

地震時における脱線後の鉄道車両の挙動評価とその 対策

後藤, 恵一

<https://doi.org/10.15017/1807149>

出版情報：九州大学, 2016, 博士（工学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

地震時における脱線後の鉄道車両の
挙動評価とその対策

Post-Derailment Vehicle Behavior during Earthquakes
and Countermeasures

2017年3月

後藤 恵一

Keiichi GOTO

目次

第1章 序論	
1. 1 研究の背景	1
1. 2 本研究の目的	11
1. 3 本研究の構成	12
第2章 鉄道車両の地震時走行安全性	
2. 1 新幹線脱線に関する公表資料	19
2. 2 新幹線脱線・逸脱対策に関する研究開発	24
2. 3 新幹線の脱線メカニズムに関する研究	30
第3章 鉄道車輪とPCまくらぎの接触力	
3. 1 本章の概要	41
3. 2 実験による検討	41
3. 3 数値解析による検討	50
3. 4 本章の結論	58
第4章 鉄道車輪と走行案内路の接触力	
4. 1 本章の概要	61
4. 2 模型実験による検討	62
4. 3 数値解析による検討	73
4. 4 本章の結論	78
第5章 脱線後の鉄道車輪と軌道の接触モデル	
5. 1 本章の概要	79
5. 2 解析手法	79
5. 3 走行面の領域分割手法の検討	90
5. 4 脱線後車輪とレールの接触モデルの検討	95
5. 5 本章の結論	97
第6章 逸脱防止ガードの基本性能評価	
6. 1 本章の概要	99
6. 2 解析手法	99
6. 3 逸脱防止ガードの性能評価	101
6. 4 有道床軌道における脱線後挙動の検討	108
6. 5 本章の結論	115

第7章	車体と軌道，構造物の簡易な接触解析法	
7. 1	本章の概要	117
7. 2	解析手法	117
7. 3	脱線前における車体と構造物の接触検討	125
7. 4	脱線後における車体と構造物の接触検討	130
7. 5	本章の結論	133
第8章	実列車の脱線痕に基づく数値解析手法の検証	
8. 1	本章の概要	135
8. 2	模型実験による検討	135
8. 3	車輪痕調査による検討	139
8. 4	解析手法の妥当性の検証	143
8. 5	本章の結論	148
第9章	結論	
9. 1	本論で得られた結論	149
9. 2	今後の課題	152

謝辞

第1章 序論

2004年新潟県中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震等の新幹線の脱線を始めとして、地震力による鉄道車両の脱線が報告されている。高速走行時の脱線による被害を勘案すると、とくに新幹線等では、大規模地震動に対して、地震早期検知システムの利用による速やかな減速や、車両特性の改善、軌道からの逸脱防止装置の設置による脱線後の被害軽減等、ソフト・ハード両面において鉄道システム全体からみて適切で効果的なリスク低減手段を講じる必要があると考えられる。

このうち脱線後の被害軽減策については、具体的な対応が進む一方で、その効果の定量化については、走行試験や模型実験が困難な現象であることから、シミュレーションによる数値実験に大きな期待が寄せられている。

本章では、以上を踏まえた本論文の研究の背景と目的、本論文の構成について概説する。

1. 1 研究の背景

1.1.1 地震による列車の脱線被害

表 1-1 に 1923 年の関東地震以降での地震による列車被害（脱線事故）の一覧^{1-1)~1-3)}を示す。表より、列車の脱線被害は過去の地震では震度 5 以上の地震で発生していることが分かる。

(1) 兵庫県南部地震以前

図 1-1 に兵庫県南部地震以前において発生した列車被害 36 件を原因別に分類して示す。土木構造物の被害に起因したものが 17 件と最も多くなっており、次いで地震動によるもの 10 件（うち、

表 1-1 地震による列車被害の一覧（関東地震以降）

	地震名	発生日	時刻	マグニチュード	震度階	脱線列車本数	備考
1	関東地震	1923.09.01	11:58	7.9	6	23	
2	石見益田地震	1941.04.06	01:49	6.2	5	1	
3	鳥取地震	1943.09.10	17:36	7.2	6	1	
4	東南海地震	1944.12.07	13:35	7.9	6	1	
5	福井地震	1948.06.28	16:13	7.1	6	3	
6	十勝沖地震	1952.03.04	10:22	8.2	6	4	
7	宮城県北部地震	1962.04.30	11:26	6.5	6	1	
8	十勝沖地震	1968.05.16	09:48	7.9	6	2	
9	兵庫県南部地震	1995.01.17	05:46	7.2	7	17	
10	宮城県北部地震	2003.07.26	07:13	6.4	6 強	1	
11	十勝沖地震	2003.09.26	04:50	8.0	6 弱	1	
12	新潟県中越地震	2004.10.23	17:56	6.8	7	1	新幹線
13	新潟県中越沖地震	2007.07.16	10:13	6.8	6 強	1	
14	東北地方太平洋沖地震	2011.03.11	14:46	9.0	7	3	新幹線
15	熊本地震	2016.04.14	21:26	6.5	7	1	新幹線
		2016.04.16	01:25	7.3	7	1	

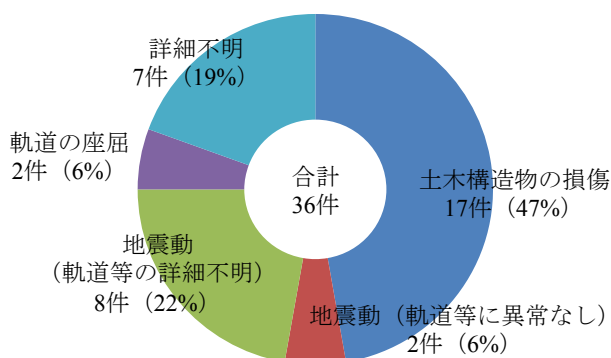


図 1-1 列車の被害原因の分類¹⁻¹⁾



図 1-2 脱線した新幹線車両 (10 両目)

軌道等の詳細不明 8 件), 軌道座屈箇所への進入によるもの 2 件, 詳細不明 7 件となっている¹⁻¹⁾。このように兵庫県南部地震以前の列車被害の大半は土木構造物の被害に起因して発生し, これに対する地震対策も, 構造物の被害発生防止, 軌道の強化を中心に進められていた。兵庫県南部地震では多くの構造物が被害を受けるとともに, 在来線の 17 列車が脱線した^{1-2), 1-4)}。

(2) 兵庫県南部地震以降

兵庫県南部地震以降については, 新幹線 3 件を含む 26 件の列車の脱線被害が発生している。これらの中には構造物等の変状が特にない箇所での脱線も含まれており, 運輸安全委員会は, 「本件列車が左右方向の成分が大きい地震動を受けたため」¹⁻³⁾と推定している。

以下に, 兵庫県南部地震以降の地震による列車の脱線被害のうち, 新幹線での脱線 3 件についての概要を記す。

(a) 2004 年 新潟県中越地震における脱線被害¹⁻⁵⁾

2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震 (M6.8) において, 図 1-2 に示すように上越新幹線 (とき 325 号, 10 両編成) が滝谷出口から出て直線区間を速度約 200km/h で走行中に非常ブレーキが作動して停止した。停止時に 10 両中 8 両が脱線していたが, 1 両目の前台車第 1 軸 (車両は前から数え, 前後左右は進行方向を基準) は, 左車輪とギアケースとの間に左レールを, 右車輪と排障器の間に右レールを挟み込んだ状態で停止した。このため線路から大きく逸脱することはなかった。営業中の新幹線車両が初めて高速走行時に脱線したことは社会に強い衝撃を与える



(a)脱線状況 (b)逸脱防止ガイド (L型ガイド)

図 1-3 東北地方太平洋沖地震で脱線した新幹線車両¹⁻⁶⁾



図 1-4 熊本地震で脱線した新幹線車両と軌道損傷状況¹⁻⁷⁾

ともに、地震時の走行安全性をさらに向上させる必要性を広く認識させることとなった。

(b) 2011 年 東北地方太平洋沖地震における脱線被害¹⁻⁶⁾

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震 (M9.0) において、図 1-3 に示すように東北新幹線仙台総合車両所発、白石蔵王行き 10 両編成の試運転列車 (7932B 列車) が速度約 72km/h で仙台駅構内に進入中、運転士が強い揺れを感じると同時に、車内信号機に停止信号機が現示されたのを認めたため、直ちに非常ブレーキを使用した。列車停止後、4 両目 (車両は前から数え、前後左右は列車の進行方向を基準) の前台車の 2 軸が左に脱線していた。被害が拡大しなかった要因については、早期に列車を停止させるシステムが作動して脱線直前には低速になっていたこと、また、図に示す逸脱防止ガイドが機能して車両が軌道から大きく逸脱しなかったことが挙げられるとされている。

(c) 2016 年 熊本地震における脱線被害¹⁻⁷⁾

2016 年 4 月 14 日に発生した熊本地震の前震 (M6.5) により、図 1-4 に示すように九州新幹線の熊本～新八代間 (熊本駅から終点側 1.3km 付近) を速度約 80km/h で走行中の回送列車が脱線した。6 両編成中の 2 軸のみを残し、その他の輪軸が脱線するものであったが、脱線車両以外の走行中及び停車中の列車 8 本については脱線しなかった。脱線車両及び周辺軌道には脱線防止及び逸脱防止対策工は設置されていなかった。また、4 月 16 日に発生した本震 (M7.3) では、豊肥本線赤水駅構内での回送列車 (在来 2 両編成) の脱線も報告されている。

1.1.2 列車の走行安全性と構造物の設計

(1) 過去の技術基準の経緯

構造物の設計において、地震時の列車の走行安全性を確保するための記載がなされたのは、1972年（昭和47年）に制定された「全国新幹線網建造物設計標準（施土第183号別冊）」¹⁻⁸⁾が初めてである。ここでは、車輪がレールを横方向に押す力である横圧 Q を、車輪がレールを下方向に押す力である輪重 P で除した値である脱線係数 (Q/P) を1.2相当とし、さらにレール付近における建築限界の間隔を考慮して、表1-2のように構造物境界部に発生する不同変位の許容目安値が示された。また、「必要に応じて地震警報装置を効果的に配置するなど、数種の対策を併用しておく必要がある。」¹⁻⁸⁾と複数の対策により地震時被害を抑制する考えが示された。

1983年に国鉄が制定した「建造物設計標準（鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物）」¹⁻⁹⁾では、「全国新幹線網建造物設計標準」で解説文中に示されていた表1-2が本文中に示されるとともに、在来線にも適用範囲が広がった。

1992年の「コンクリート構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」¹⁻¹⁰⁾では、表1-2と同じ限界値を用いて「中程度の地震動の影響を受けても、列車の走行安全性を確保できるように設計する」¹⁻¹⁰⁾と、現在の設計思想に近い形となった。また、長大橋梁、高橋脚橋梁、特殊な地盤上にある構造物等の軌道面横振動が不規則な場合については、車両－軌道－構造物の動的相互作用シミュレーションによる検討を行う必要性についても言及されている。

1999年の「コンクリート構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」（以下、耐震標準という）¹⁻¹¹⁾では、「構造物の変位について、本標準では、L1地震動に対して列車走行性を損なうような過大な変位を生じないように検討を行うことを原則とする。」¹⁻¹¹⁾としつつ、1995年に発生した兵庫県南部地震から得られた知見が反映され、これまでの折れ角・目違いの検討に加えて、横方向の振動変位に対する検討も実施されることとなった。表1-3に折れ角・目違いの制限値を、表1-4に振動変位の制限値を示す。折れ角・目違いの制限値は、車輪とレール間の左右相対変位最大値を70mm、車輪とレール間の上下相対変位最大値を30mm、横圧最大値を98kN、及び輪重最大値を

表1-2 列車を支持する構造物の許容不同変位目安値（地震時）

（1972年：全国新幹線網建造物設計標準）

変位の方向	列車速度 (km/h)	目違い (mm)	折角(θ) (1/1000)			
			平行移動		折れ込み	
			$L < 30m$	$30m \leq L$	$L < 30m$	$30m \leq L$
鉛直	70	20	20	20	20	20
	110		20	20	20	20
	160		18	16	20	18
	210	16	12	10	14	11
	260	11	8.5	7	9.5	7.5
水平	70	10	12	12	12	12
	110		9	12	11	12
	160		6.5	7.5	8	9.5
	210		5.5	5	6.5	6
	260		6	4.5	4	5.5

※ L : スパン長(m)

表 1-3 軌道面の折れ角・目違いの制限値（地震時）

(1999年：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計））

変位の方向	目違い δ (mm)	折角 θ (1/1000)		適用範囲
		平行移動	折れ込み	
鉛直	$35*(300/V)$	$10*(300/V)^{1.3}$	$9*(300/V)$	$V \leq 300\text{km/h}$
水平	$9*(300/V)^{0.4}$	$5.5*(300/V)$	$35*(300/V)^{1.1}$	

※ V ：列車走行速度(km/h)

表 1-4 振動変位の制限値（地震時）

(1999年：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計））

新幹線鉄道	$f < 1.0$	$1.0 \leq f < 2.0$	$2.0 \leq f$
	$90.0/f^{1.85}$	$110.0-15f$	80.0
在来線鉄道	$f < 0.8$	$0.8 \leq f < 1.4$	$1.4 \leq f < 2.6$
	$114.8/f^{1.2}$	150.0	$281.4.0-95.8f$
			35.0

※ f ：水平加振周波数(Hz)

490kN として、走行シミュレーションにより求めたものである。振動変位の最大値は、線路直角方向に 70mm の水平相対変位を生じる場合を限界とする正弦波加振による車両振動シミュレーションをもとに定めたものである。

(2) 現在の技術基準¹⁻¹²⁾

現行の基準としては、2006年に鉄道構造物の変位制限に関する設計規定を設計標準としてまとめた「鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）」（以下、変位標準という）¹⁻¹²⁾が発刊された。ここでは、地震時の走行安全性について最新の研究成果が取り込まれるとともに、大規模地震動に対しては走行安全性を確保するのは困難な場合もあるため、鉄道システム全体からみて適切な対策を施すのがよい、との方向性が示されている。以下に、変位標準に記される地震時の列車走行性の概要を示す。

(a) 地震時の列車走行性に関する基本的な考え方

発生する確率は低いですが激しい地震動である大規模地震動に対しては、兵庫県南部地震や過去の震災例をみると在来車両の脱線が地表面においても生じていることから、鉄道構造物上での走行安全性に関する実験ならびに解析を限られた条件ではあるが行ったところ、ある規模を超える地震動が橋軸直角方向から加わると、構造物のみによる対策では走行安全性を確保することが困難な場合があることが明らかとなった。このため変位標準では、L1地震動を尺度として立地条件や構造物の重要度、経済性等を考慮しながら、地震時の走行安全性に有利な構造形式を採用することにより、脱線に至る確率をできるだけ低減すること、を設計の基本的な考え方としている。

また、高速走行時の脱線による被害を勘案すると、とくに新幹線構造物等では、大規模地震動に対しては、地震早期検知システムの利用による速やかな減速や、車両特性の改善、軌道からの逸脱防止装置の設置による脱線後の被害軽減等、ソフト・ハードの両面において鉄道システム全体からみて適切で効果的なリスク低減手段を講じる必要があると考えられる。しかし、これらの具体的なリスク低減手段は今後さらに研究開発を進めていく必要がある、とされている。

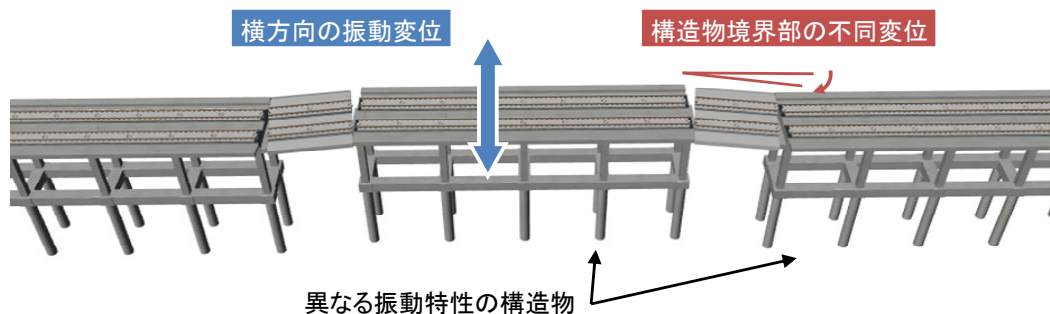
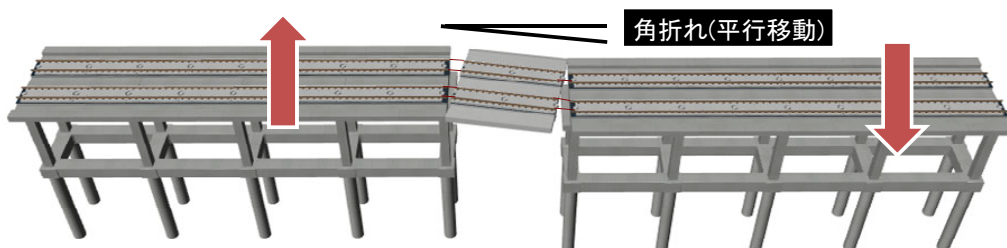
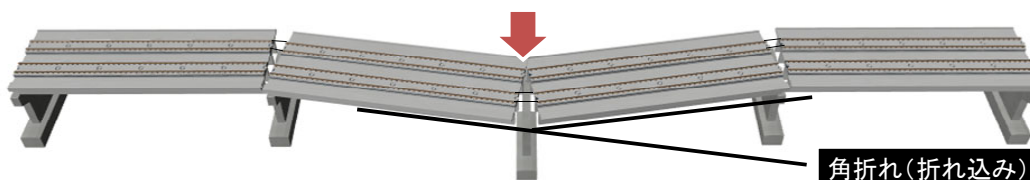


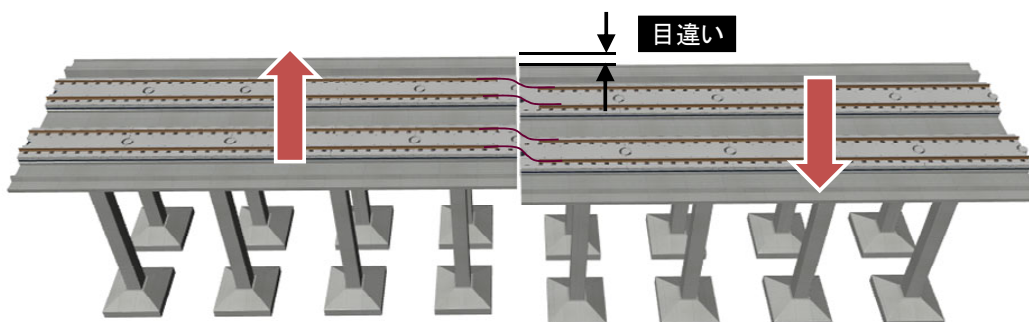
図 1-5 構造物の横方向振動変位と境界部の不同変位



(a) 角折れ（平行移動）：調整桁式ラーメン高架橋



(b) 角折れ（折れ込み）：桁式高架橋



(c) 目違い：張り出し式ラーメン高架橋

図 1-6 構造物境界部の不同変位の種類

地震時の列車走行性に関する具体的な照査方法は、耐震標準と同様に、地震時の走行安全性に大きな影響を与える軌道面の変位を図 1-5 及び図 1-6 に示す構造物の横方向振動変位及び構造物境界における不同変位（角折れ・目違い）であると考え、この2つの軌道面変位に対する変位の照査を実施することとしている。

構造物の横方向の振動変位と構造物境界における角折れ・目違いは、地震時に同時に生じているため、本来は照査を統合して行うべきものであるが、照査方法が煩雑となるため、両者を使い

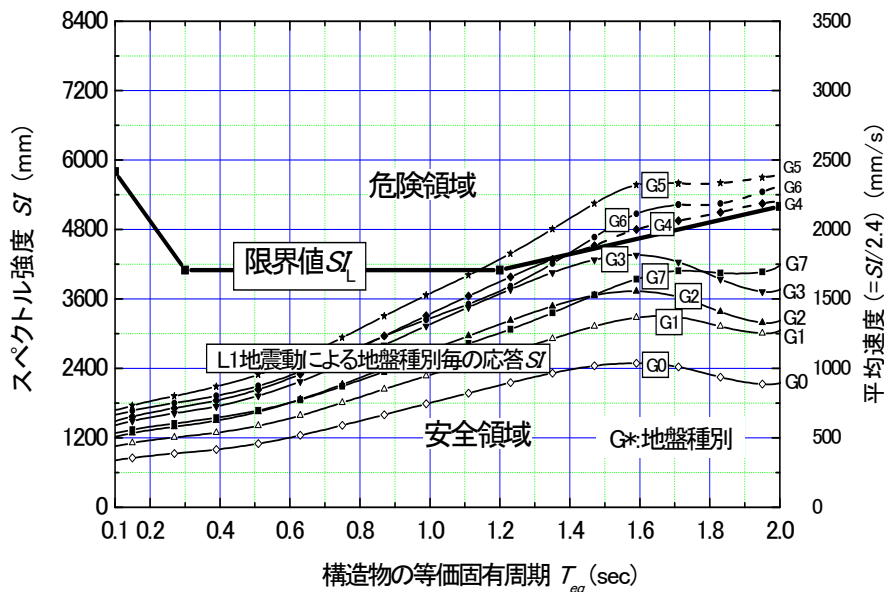


図 1-7 横方向振動変位の応答値と限界値¹⁻¹²⁾

分けて照査する手法とされている。

(b) 構造物の横方向の振動変位の照査

地震時の横方向の振動変位に対する具体的な照査方法としては、L1地震動により生じる構造物変位を尺度として、走行安全性から定まる構造物変位の限界値に対して照査を行う方法を用いている。

横方向の振動変位に対する走行安全性の指標やその目安値に関しては、従来から幾つかのものが提案されており、本四連絡橋建設時の検討では、脱線係数（横圧と輪重との比 $Q/P=2.0$ ）や輪重抜けに基づいた目安値が用いられた¹⁻¹³⁾。また、兵庫県南部地震を契機に行われた検討では、車輪とレール間の水平相対変位の最大値 70mm を目安値として正弦波加振に対する走行安全限界曲線が求められた。耐震標準¹⁻¹¹⁾では、この目安値を採用している。

変位標準では耐震標準と同様に、車輪とレール間の水平相対変位の最大値 70mm を地震時の走行安全性の目安値とし、代表的な車両諸元を用いた解析に基づき、構造物の等価固有周期に応じた構造物変位の限界値を求めている。

この構造物変位の限界値は車両諸元（車両重量や重心高さ、各種支持機構等）の違いにより異なるが、構造物に適切な剛性を与えるための目安を示すという観点から、1種類のみ設定することとし、高速性による被災の影響等を勘定し、新幹線の代表的な車両諸元に基づき求めている。

具体的には、横方向の振動変位の指標として軌道面の加速度応答波に対するスペクトル強度 $SI^{1-14)}$ を用いている。図 1-7 に、横方向の振動変位に関する構造物変位の応答値と限界値を示す。この限界値は、設計地震動を含む十数種類の地震動による限界スペクトル強度 SI の 90%信頼限界曲線を求め、角折れ・目違いの影響を考慮して、それを 1 割低減した曲線をほぼ包絡するように定めたものである。実設計においては、図 1-7 をノモグラムとして使い、構造物の等価固有周期に対応する応答値及び限界値とから照査を行う。

表 1-5 地震時の軌道面の不同変位の限界値¹⁻¹²⁾

最高速度 (km/h)	角折れ θ_L ($\times 1/1000$)		目違い (mm)
	平行移動		
	$L_b=10m$	$L_b=30m$	
130	7.0		14
160	6.0		12
210	5.5	3.5	10
260	5.0	3.0	8
300	4.5	2.5	7
360	4.0	2.0	6

※ L_b : スパン

(c) 構造物の不同変位の照査

角折れ・目違い¹⁻¹⁵⁾は、本来、構造物の振動中に生じているものであり、横方向の振動変位との連成を考慮して照査するのが理想的であるが、照査方法が煩雑となるため、変位標準では構造物境界における不同変位について独立して照査することとしている。このため、角折れ・目違いの限界値は、それらによる横方向の振動変位の走行安全曲線に及ぼす影響が限定された範囲になるようにし、その適値として限界変位の低下が1割以下に収まるよう定められている¹⁻¹⁶⁾。表 1-5 に角折れ及び目違いの限界値を示す。

1.1.3 今後の研究課題¹⁻¹²⁾

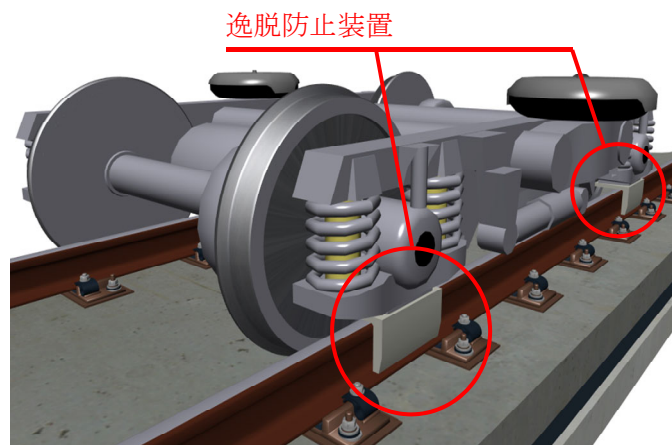
(1) 鉄道システムとしての地震対策

変位標準においても示されているように、大規模地震動に対して、構造物のみの対応で車両の走行安全性を保つように設計することは困難な場合もある。従って、大規模地震に対しては、地震早期検知システム¹⁻¹⁷⁾や軌道からの逸脱防止施設等を利用し、鉄道システム全体として減災に努める必要がある。

地震早期検知システムの改良については、既に国土交通省の新幹線脱線対策協議会において、運転規制の判断指標の変更、地震規模等の推定式の変更、地震規模に合わせた範囲の送電停止機能の追加、沿線地震計の増設等が提案されており、各社において適宜対応がなされると考えられる。

一方、効率的な地震対策を実施するためには、鉄道システム全体のリスクを適切に評価し、限られた投資リソースを有効に活用すべく、精度の高い投資判断ができるリスク評価システムの構築が必要であると考えられる。リスク評価については既に数多くの研究がなされており、基本的な評価手順は確立されていると考えられるが¹⁻¹⁸⁾、重要となるのは具体的な評価に用いるデータの精度である。

地震ハザード曲線（地震動指標に対する年超過発生確率等）については、当該研究分野において相当程度進んでいると考えられる。一方、鉄道独自のイベントツリー（被害形態の分類）、被害形態毎のフラジリティ曲線（地震動指標に対する被害発生確率）被害形態ごとの被害時コスト等については、今後の重要な検討課題になると考えられる。なお、リスク評価システムを実際に適用するためには、既存鉄道構造物の効率的な耐震診断システムが併せて必要となる。

図 1-8 軸箱下逸脱防止装置の例¹⁻¹²⁾

現在、様々な設計分野において、全体システムのリダンダンシーを向上させることを目的として複雑系の構築が推奨されている。以下に示すような個々の要素技術において各々が安全性を追求することにより、全体システムの安全性を向上させることができると考えられる。

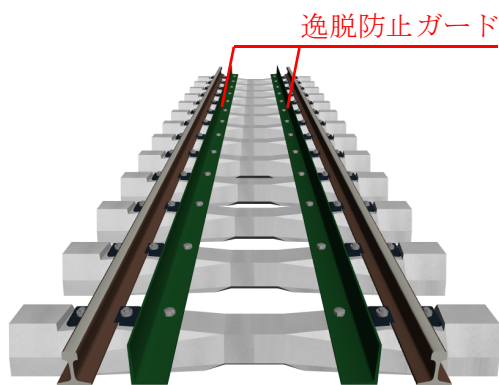
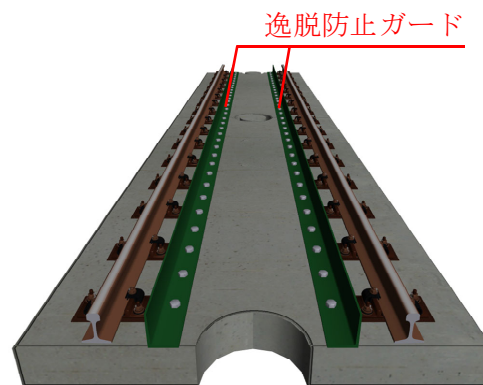
(2) 車両による地震対策

車両の走行メカニズムは複雑な要因が絡むため、その解明には未だ多くの研究課題が残されているが、地震時の挙動については、実台車を用いた半車両モデルに対する加振試験やシミュレーション解析が行われており、限られた条件下ではあるが基本的な挙動特性については把握がなされている^{1-12), 1-19)}。

車輪フランジ高さを増して、安全性を向上する方法も考えられるが、脱線防止効果には自ずと限度がある。車両諸元を変更し振動系を最適化することにより、安全性を図る方法も考えられる。この場合、地震時に想定される軌道面の全振動周期帯域で効果を検証する必要があるとともに、通常走行時の車両性能との両立も考慮しなければならない。具体的な手法としては、車体の低重心化、まくらばね上下方向の高減衰化、軸箱上下ストップ間隔の拡大、車体一台車間ストップの間隔の拡大等が考えられる¹⁻¹²⁾。

車両形式や乗車率等によって脱線に対する性状が大きく異なることが予想されるが、車両側にこの種の技術や設計方法が確立されていないことも課題の一つである。特に首都圏の通勤車両等については、新幹線車両に準じた地震時脱線に対する検討が必要であると考えられる。土木構造物が設計時に100年程度の寿命を想定しているのに対し、車両の想定寿命は数十年であり、また、近年短縮しつつもある。従って重要線区においては車両の更新・新製時に地震時走行安全性に配慮した車両設計を行っていくことが必要であると考えられる。

図 1-8 に変位標準で示されている車両側の逸脱防止装置の例を示す。軸箱の下等に逸脱防止装置を設置し、逸脱を防止する手法についても効果が期待される。また、この効果の検討を実験的に行うことは限界があるため、脱線後の車両の挙動を適切に評価できるシミュレーション解析手法を構築していく必要がある。

図 1-9 バラスト軌道の逸脱防止ガードの例¹⁻¹²⁾図 1-10 スラブ軌道の逸脱防止ガードの例¹⁻¹²⁾

(3) 軌道による地震対策

(a) 脱線防止ガード及び逸脱防止ガード

脱線防止ガードの軌道への設置は、最も効果的な対策の一つである^{1-20), 1-21)}。また、大規模地震動による脱線を想定した上で、さらに被害の最小化を図るためには、脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱させないための方策についても検討する必要がある。図 1-9 及び図 1-10 に変位標準で示されている逸脱防止ガードの例を示す。具体的な構造、設計法、機能、費用対効果、設置優先順位の決定等について、今後技術開発を行っていく必要がある。

さらに、車両側の逸脱防止装置と同様、これらの効果の検討を実験的に行うことは限界があるため、脱線後の車両の挙動を適切に評価できるシミュレーション解析手法を構築していく必要がある。

(b) 軌道の耐震性

列車の脱線や逸脱の防止に加え、軌道構造自体の耐震性についても検討していく必要がある。特に、バラスト軌道の地震時軌道座屈等について検討を実施していく必要があると考えられる¹⁻²²⁾。

(4) 構造物による地震対策

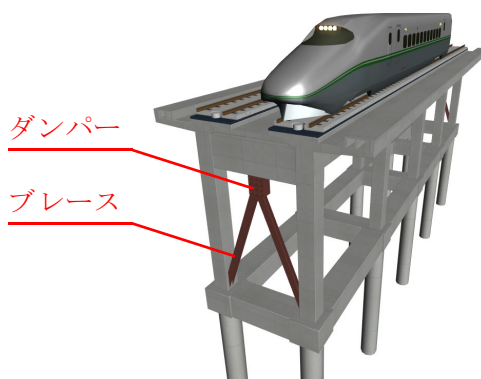
(a) 耐震補強

車両の走行安全性の基本となるのは、その走行面が保持されていることである。即ち、地震に構造物が崩壊しないように補強を行うことが脱線・逸脱対策の基本となる。具体例としては、高架橋、橋りょう等における耐震補強を推進すること、盛土等の土構造物についても耐震補強工法を検討し実現を図ること、トンネルの耐震性能向上策を進めることが挙げられる。特に盛土の長い区間では、1995年兵庫県南部地震や中越地震で多くの盛土が崩壊した経緯を踏まえ、耐震診断に基づき、必要な施策を実施する必要がある。

(b) 列車走行性の改善施策

高架橋上の列車走行性を改善させるための対策としては、構造物変位を可能な限り抑制する手法が基本となる。具体的には、図 1-11 に示すような既設高架橋へのダンパー・ブレース工の追加や¹⁻²³⁾、シートパイル基礎¹⁻²⁴⁾による補強等が挙げられる。

新設の高架橋では、壁式ラーメン高架橋や壁式橋脚が剛性が高く有利であり、柱や杭を可能な限り外側に張り出す設計や死荷重の低減も有効である。側壁を車体の転倒防止に用いる逸脱防

図 1-11 ダンパー・ブレース工による高架橋の高剛性化¹⁻²³⁾

止施設も有効な手法と考えられ、例えば下路桁や下路式ラーメン高架橋等の構造形式は安全性を飛躍的に向上できると考えられる。ただし、構造物境界における角折れ・目違いへの対策が併せて必要である。

一方、構造計画を行う際には、線路方向に連続する構造物群の等価固有周期を可能な限り揃える等して不同変位を小さくしていく必要がある。また併せて群として構造物が連成振動する場合の応答や地盤条件のばらつきの影響に関しても研究を進めていく必要がある。

1. 2 本研究の目的

以上の背景のように、大規模地震に対しては、地震早期検知システム、構造物の補強、軌道・車両の安全対策等を利用し、鉄道システム全体として減災に努める必要がある。しかしながら、軌道側・車両側の安全対策工のうち、脱線後の被害軽減に重点を置いた逸脱対策工については、地震動による走行車両の脱線及び脱線後の走行といった一連の現象を実験により検討することが極めて困難であるため、その効果を定量的に評価できていない現状にある。よって、本論文では下記のコンセプトを基に、脱線前～脱線後の一連の車両挙動を表現可能な数値解析手法を構築することを主目的とした。

- ・実験では表現困難な、地震時における脱線前～脱線後の一連の車両挙動を表現する。
- ・上記の数十秒単位の長時間の現象を表現するために、マルチボディーダイナミクス手法を活用した効率的な数値解析手法とする。
- ・実験では表現困難な現象に対する解析手法の妥当性を確保するために、実物大要素実験の結果を援用した数値解析手法とする。

1. 3 本研究の構成

図 1-12 に本研究の構成フローを、図 1-13 に本研究の構成概念図を示す。本論文は 9 章で構成されている。以下にその概要を示す。

「第 1 章 序論」は、本研究の導入部分であり、研究の背景、目的と構成を示した。

「第 2 章 鉄道車両の地震時走行安全性」は、過去の地震による新幹線の脱線被害やこれまで実施されてきた新幹線脱線・逸脱対策や新幹線脱線メカニズムに関する研究について整理したものである。

「第 3 章 鉄道車輪と PC まくらぎの接触力」は、脱線車輪とまくらぎとの間で生じる接触力に関して、実物大部分模型実験により、まくらぎの載荷位置ごとの耐荷力及び破壊モードを明らかにするとともに、脱線後の車両挙動解析に用いる車輪とまくらぎ間の接触剛性について検討を行ったものである。さらに、実験を再現可能な数値解析手法の構築に関する検討を行ったものである。

「第 4 章 鉄道車輪と走行案内路の接触力」は、分岐器部の逸脱防止装置として提案されている走行案内路について、脱線車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、走行案内路のタイプごとの耐荷力及び破壊モードを静的及び衝撃載荷実験により評価したものである。また、上記実験より、脱線後の車両挙動解析に用いる走行案内路と車輪間の接触剛性を評価するとともに、一部について数値解析により検証を行ったものである。

「第 5 章 脱線後の鉄道車輪と軌道の接触モデル」は、脱線後の車両挙動解析手法の開発を行ったものである。具体的には FEM と MBS を組み合わせた手法を提案するとともに、線路方向及び線路直角方向に軌道不整及び接触ばねを定義する手法を構築した。さらに、脱線後車輪のレールへの衝突及び飛び越え現象を表現する手法についても構築した。また、これまで著者らが構築してきた車両と構造物の動的相互作用解析プログラムに上記手法を取り込み、提案手法について試計算を実施することで本手法の適用性を検討した。

「第 6 章 逸脱防止ガードの基本性能評価」は、第 5 章で開発した脱線後の車両挙動解析手法を用い、逸脱防止装置の一つである逸脱防止ガードを対象として、振動変位及び不同変位に関する基本性能を確認した。次に、これらの基本性能確認を踏まえ、長さ 6.3km のモデル線区に対して、逸脱防止ガードの効果を推定するとともに、脱線後の車両走行に有道床軌道が及ぼす影響について検討した。

「第 7 章 車体と軌道、構造物等の簡易な接触解析法」は、軌道側だけでなく車両側など様々なタイプの逸脱防止装置が開発される中で、その効果を定量的に評価可能な柔軟な数値解析手法を構築するために、第 5 章で構築した脱線後の車両挙動解析手法をさらに拡張し、走行車両と様々な線路構造物の接触手法を提案するとともに、脱線後の車両挙動を表現可能な既存の解析プログラムに組み込み、両者間の動的相互作用を考慮可能な地震時車両挙動の解析手法を構築したものである。また、車体と構造物の接触に関する試計算を実施することで構築手法の実用性を検討した。

「第 8 章 実列車の車輪痕に基づく数値解析法の検証」では、MBS に導入可能な車輪と軌道スラブ間の接触剛性を、車輪形状の接触子を用いたコンクリート板への静的模型実験により評価した。また、実列車の脱線により生じたスラブ軌道上・有道床軌道上の車輪痕の調査を実施すると

ともに、そのうち大規模地震により脱線した新幹線の軌道スラブ上の車輪痕調査結果と、第8章までに構築した地震時車両挙動による解析結果とを比較することで、本研究で構築した解析手法の妥当性を確認した。

「第9章 結論」では、各章で得られた結論をまとめて述べるとともに、今後の展望と課題を示し本研究の結論とした。



図 1-12 本論文の構成フロー

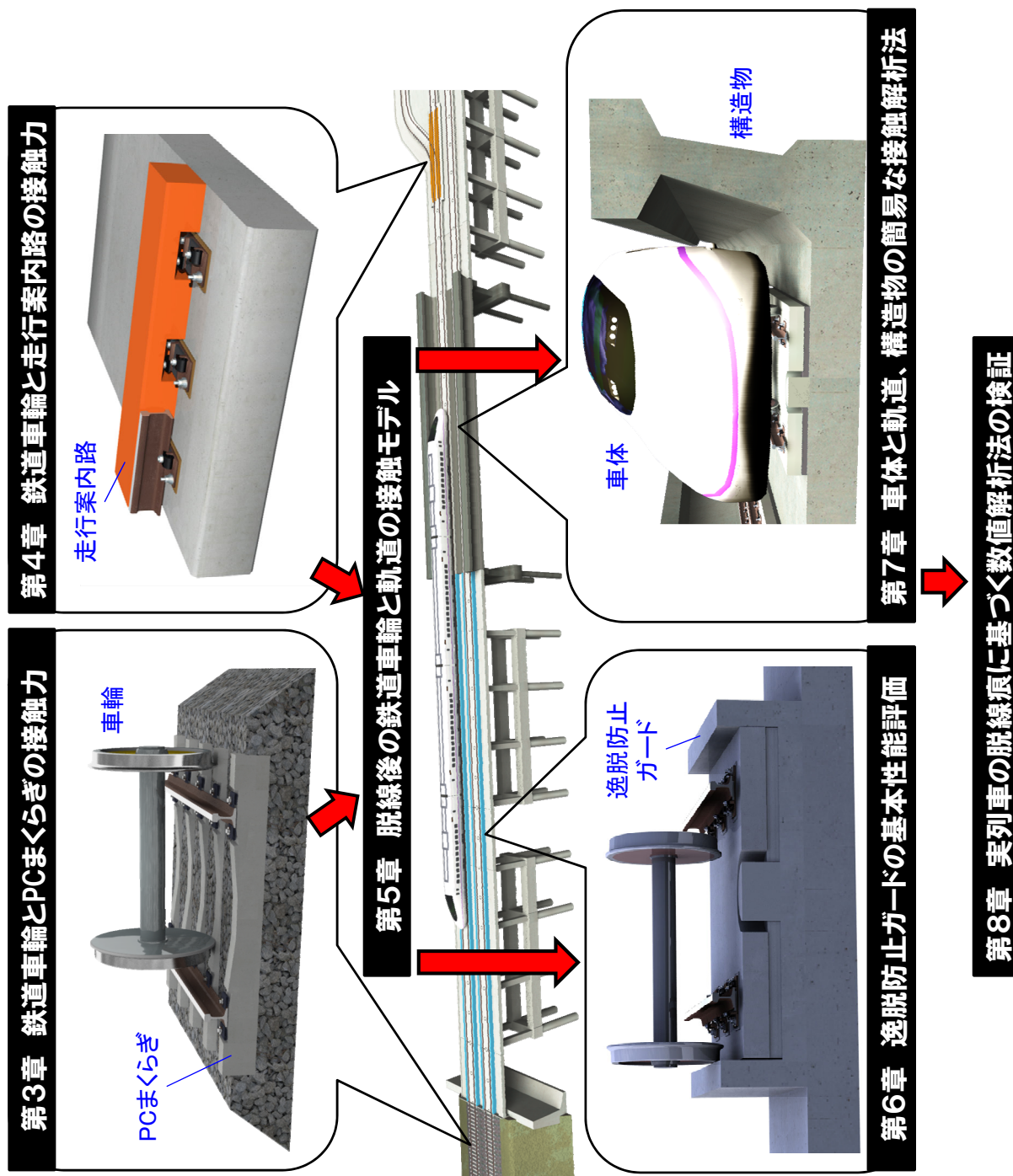


図 1-13 本論文の構成概念図

参考文献

- 1-1) 三浦重：地震時の軌道変状と安全性，鉄道総研報告，Vol.10，No.3，1996
- 1-2) 永瀬和彦，近藤和宏，野村敏明：阪神大震災における鉄道車両の被災状況，日本機械学会論文集（C編），Vol.63，No.606，pp.300-307，1997
- 1-3) 国土交通省 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書，
<http://jtsb.mlit.go.jp/jtsb/railway/index.php>
- 1-4) 鉄道総合技術研究所地震対策プロジェクト：特別号 兵庫県南部地震鉄道被害報告書，鉄道総研報告，No.4，1996
- 1-5) 国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書 RA2007-8 I 東日本旅客鉄道株式会社 上越新幹線浦佐駅～長岡駅 列車脱線事故，2007
- 1-6) 国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書 RA2013-1 I 東日本旅客鉄道株式会社 東北新幹線仙台駅構内 列車脱線事故，2013
- 1-7) 国土交通省：第13回「新幹線脱線対策協議会」の結果について 資料1（熊本地震による九州新幹線の被害状況について），2016
- 1-8) 日本国有鉄道：全国新幹線網建造物設計標準（東北，上越，成田用），1972
- 1-9) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説（鉄筋コンクリート建造物および無筋コンクリート建造物），1983
- 1-10) 鉄道総合技術研究所：鉄道建造物等設計標準・同解説（コンクリート建造物），1992
- 1-11) 鉄道総合技術研究所：鉄道建造物等設計標準・同解説（耐震設計），1999
- 1-12) 鉄道総合技術研究所：鉄道建造物等設計標準・同解説（変位制限），2006
- 1-13) 日本鉄道施設協会：本州四国連絡橋の列車走行性に関する研究報告書 別冊1 走行分科会報告書，1982.
- 1-14) 羅休：スペクトル強度による地震時列車走行性の簡便照査法，鉄道総研報告，Vol.16，No.3，pp.31-36，pp.31-36，2002.
- 1-15) 佐藤吉彦，三浦重：走行安全ならびに乗心地を考慮した線路建造物の折角限度，鉄道総研報告，No.820，1972.
- 1-16) 曾我部正道，宮本岳史，松橋宏治，涌井一，松本信之：地震時振動変位の影響を考慮した建造物不同変位の照査法，鉄道総研報告，Vol.20，No.5，pp.5-10，2006.
- 1-17) 中村豊：総合地震防災システムの研究，土木学会論文集，No.531/I-34，pp1-33，1996.
- 1-18) 大島靖樹，平田和太：建造物の損傷度曲線の地震動指標変換法，JCOSSAR2003 論文集，pp.703-710，2003.
- 1-19) 松浦章夫：地震時における列車走行性に関する研究，鉄道力学論文集，No.9，pp.99-104，2005.
- 1-20) 土木学会：平成16年新潟中越地震 社会基盤システムの被害等に関する総合調査「調査結果と緊急提言」 I 報告・提言編，2004.
- 1-21) 竹内篤史，及川祐也，松浦章夫：脱線防止ガードが鉄道車両の地震時走行特性に与える効果に関する一考察，鉄道力学論文集，No.4，pp.43-48，2000.
- 1-22) 浅沼潔，松本信之，曾我部正道，涌井一：フローティング・ラダー軌道と建造物の地震時

挙動解析，鉄道総研報告，Vol.18，No.8，pp.47-52，2004.

1-23) 松本信之，曾我部正道，岡野泰之，涌井一，大内一：鋼製ダンパー・ブレースを用いた鉄道高架橋の振動性状改善に関する研究，構造工学論文集，Vol.46A-2，pp.547-554，2000.

1-24) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物），2012

第2章 鉄道車両の地震時走行安全性

本章では、新幹線脱線に関する公表資料を整理するとともに、各鉄道事業者における新幹線脱線・逸脱対策に関する研究開発、新幹線脱線メカニズムの解明や対策の定量化のために実施されている車両模型実験、車両と構造物との動的相互作用シミュレーションについての現状を整理する。

2.1 新幹線脱線に関する公表資料

2.1.1 2004年 新潟県中越地震

新潟県中越地震の被害状況については既に多くの調査報告が公表されている。図2-1に上越新幹線被害状況の概要を示す²⁻¹⁾。

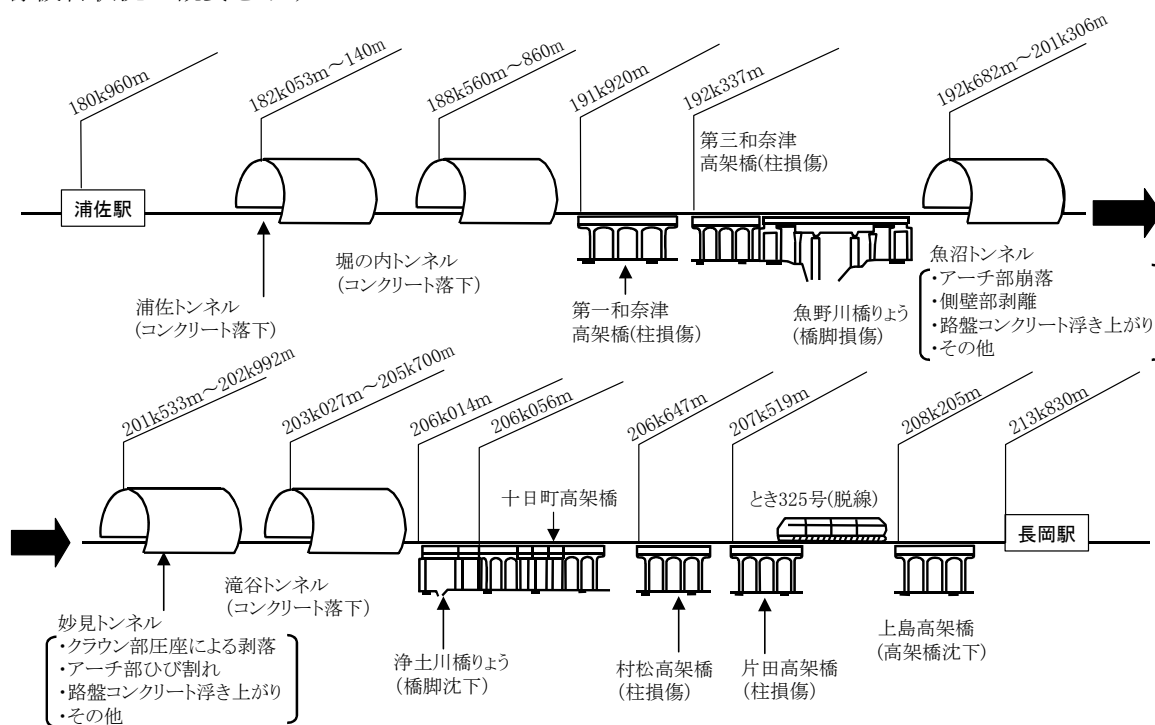


図2-1 上越新幹線被害状況の概要²⁻¹⁾

表2-1 国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会の経過報告の要旨²⁻²⁾

章構成	具体的な記述
1.鉄道事故の概要	鉄道事業者名、列車脱線事故、発生日時、発生場所、鉄道事故の概要
2.鉄道事故調査の概要	上越新幹線列車脱線メカニズム調査部会の設置、調査部会専門委員の構成
3.人の死亡、行方不明及び負傷	なし
4.鉄道施設とその損傷の状況等	鉄道施設の概要、脱線の痕跡、軌道の損傷状況等
5.車両とその損傷の状況等	車両の概要、脱線の状況、各車両の損傷状況等
6.乗務員に関する情報	運転士・車掌の行動
7.地震に関する情報	事故現場周辺の地震計の記録、上越新幹線変電所に設置された地震計等の警報発生時刻
8.地震の際の列車脱線における被害軽減対策等の検討に参考となる事実情報等	多数の締結装置に損傷、レールの破断もしくはレールの接着絶縁継目での破断、対向列車との衝突の恐れ、車輪と台車部品による逸脱防止とみられる効果

(1) 国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会

国土交通省の航空・鉄道事故調査委員会は、2005年1月24日付けで、「東日本旅客鉄道株式会社 上越新幹線における列車脱線事故に係る鉄道事故調査について（経過報告）」²⁻²⁾をとりまとめた。原因究明のためには更に多角的な事実調査と科学的な解析を行う必要があるが、過去に例のない事故であること、今後の地震の際の列車脱線における被害対策等の検討が必要であること等から、調査経過の公表がなされた。

表2-1に航空・鉄道事故調査委員会の経過報告の概要を示す。経過報告は8章構成で、鉄道事故の概要、鉄道事故調査の概要、鉄道施設とその損傷の状況等、車両とその損傷の状況等、地震に関する情報、地震の際の列車脱線における被害軽減対策等の検討の参考となる事実情報等が述べられている。

このうち、「8. 地震の際の列車脱線における被害軽減対策等の検討に参考となる事実情報等」で述べられている内容は以下のようなものである。

- (a)速度200km/hで走行中の列車が、桁の落下等の著しい損傷がない橋梁区間で脱線したものである。この事実を踏まえると、地震の際のこのような列車脱線に備えた被害軽減対策等の検討が必要と考えられる。
- (b)現時点までに得られた事実情報等での参考となるものとしては、多数の締結装置に脱線した車輪によると見られる著しい損傷があったこと、レールの移動、転倒、破断、絶縁継目の分離が生じたこと、傾斜して上り線軌道のスラブに接して停止した10両目は対向列車があれば列車衝突の恐れがあったこと、車輪、排障器、ギアボックスがレールを挟み列車の逸脱を防止したと思われること、等である。

(2) 国土交通省 鉄道局 新幹線脱線対策協議会

事故調査委員会による脱線原因の調査と並行して、国土交通省鉄道局及び鉄道事業者から構成される新幹線脱線対策協議会（以下、協議会という）が組織され、脱線対策に関する協議が行なわれている。協議会は、2005年3月に施設面、車両面で当面とり得る対策の可能性等について中間的なとりまとめを行った²⁻³⁾。

表2-2に中間とりまとめの要旨について示す。中越地震と同様の被害が予測される活断層と交差する山岳トンネル及び柱中間部付近で拘束される高架橋の構造物耐震対策、地震検知・警報装置に関する脱線防止対策、逸脱防止地上ガードや逸脱防止車両ガード等による逸脱防止対策、引き続き調査・研究すべき項目等が提言された。

また、2005年10月開催の第6回新幹線脱線対策協議会においては、耐震対策等の進捗状況が相互確認されている。

(3) 東日本旅客鉄道株式会社

JR東日本は、新潟県中越地震の発生から1年を迎えるに当たり、2005年10月19日に大規模地震に対する取り組みの現状及び今後の対策を発表した²⁻⁴⁾。表2-3にJR東日本の取り組みの概要を要約して示す。耐震補強の進捗状況、類似被害箇所の対策、早期地震検知システムの改良、新幹線の脱線現象の解明、脱線対策等について公表がなされた。脱線の原因については、社内委員会である「上越新幹線脱線調査専門委員会」が組織され調査が進められた。その結果、発表の時点

では、脱線は構造物の損傷、沈下が原因でなく、地震動により発生したと推定している。

表 2-2 国土交通省 鉄道局 新幹線脱線対策協議会の中間とりまとめの要旨²⁻³⁾

章構成		具体的な記述
1.構造物耐震対策	山岳トンネル	活断層との交差状況について実態調査を行った結果、12箇所(箇所のトンネル)において活断層と交差していることが確認された。 今後、これらのトンネルについて詳細調査を行い、必要に応じ、裏込注入工、ロックボルト工等の対策を実施する。
	高架橋	従前から実施している高架橋柱の耐震補強計画を前倒しし、高架下利用箇所の一部を除き概ね平成19年度までに完了することとした。 また、高架下の設備等について総点検を行った結果、約140本の高架橋柱において、第3和南津高架橋と同様に柱の中間部付近で拘束されていることが確認された。 今後、これら高架橋柱について詳細調査を行い、柱の中間部で拘束させない対策又は柱への鋼板巻等による耐震補強を実施する。
2.脱線防止対策		地震検知・警報装置に係る検知点の増設及び新型への更新について、平成18年度までに完了する。
3.逸脱防止対策		仮に列車が線路から脱線した場合においても、線路から大きく逸脱することを防止するため、施設、車両の両面からの対策を検討することとし、具体的には逸脱防止地上ガードや車両の軸箱等による逸脱防止車両ガード等の構造の基礎的検討を行い、これらを踏まえて平成17年度末を目途に実施計画の策定を目指す。
4.引き続き調査、研究する項目		レール締結装置等の損傷防止策 脱線防止ガードの構造、設置方法 非常ブレーキの停止距離短縮化 早期地震検知装置システムの充実

表 2-3 大規模地震に対する取組み (JR 東日本)²⁻⁴⁾

章構成		具体的な記述
1.耐震補強の進捗状況	①新幹線 新潟県中越地震発生時18,500本中44%にあたる8,100本の耐震補強を完了していたが、平成2005年9月末現在では総数16,500本、89%が完了となった。高架下利用されている箇所のうち残る2,000本についても2007年度末までに終了予定。 ②在来線 高架下利用されている箇所の耐震補強を実施中であり、現在総数10,000本、対象本数の79%が完了した。残る2,600本についても2008年度末までに補強工事を完了させる。	
2.被害類似箇所の対策	①断層に近接する新幹線トンネルの耐震補強 覆工コンクリートの崩落や軌道隆起等の被害が発生したことから耐震対策の検討を実施してきた。検討結果に基づき、活断層から水平距離で5kmの範囲内にある新幹線トンネルを対象に、トンネル耐震補強計画を策定することとする。 ②活断層と交差する新幹線トンネルの補強対策 調査結果から2つのトンネルで背面空洞への裏込め注入工を実施する。 ③第3和南津高架橋類似箇所対策 高架下利用の建物が高架橋柱の中間部を拘束したことが原因となって損傷した第3和南津高架橋に類似する91本の補強を実施する。	
3.早期地震検知システムの改良	運転規制の判断指標の変更、地震規模等の推定式の変更、地震規模に合わせた範囲の送電停止機能の追加、沿線地震計の増設。	
4.新幹線の脱線現象の解明	上越新幹線脱線調査専門委員会を組織して調査した結果、以下の推定を公表。 ①脱線は構造物の損傷、沈下が原因でなく、地震動により発生したこと。 ②地震動により11軸が脱線、更に脱線した車輪による軌道破壊も加わり22軸が脱線。 ③脱線後もレールに列車が誘導され、停止するまで列車の姿勢が保持された。 ④レールの接着絶縁継ぎ目の破断により、1号車が中央返送水路(上下線間)に傾斜した。	
5.脱線対策	車両ガイド機構、レール締結装置の改良、接着絶縁継ぎ目の改良が試作段階に入った。	

2.1.2 2011年 東北地方太平洋沖地震

平成23年3月11日14時46分ごろ、宮城県沖を震源とするモーメントマグニチュード9の「東北地方太平洋沖地震」が発生し、宮城県北部で最大震度7の揺れが観測された。

国土交通省東北運輸局鉄道部は、「よみがえれ！みちのくの鉄道」²⁻⁵⁾において事故の経緯を以下のように取りまとめている。

東北新幹線は、当該時間には仙台・盛岡支社管内で14本の列車が運行しており、そのうちの13本の列車にお客様が乗車していた。14時46分、JR東日本管内に設置してある新幹線早期地震検知システム（図2-2）の海岸地震計があらかじめ定めた基準値を観測、これにより、最も揺れが激しかった仙台駅～古川駅間を約270km/hで走行中だった2本の新幹線は、これらの列車が運転中止基準値18.0カインを超過する12～15秒前に送電が停止し、列車への電力供給を遮断したため、自動的に非常ブレーキが作動、全ての列車が緊急停車し、お客様が乗車していた13本の列車に脱線がなかった。しかし、仙台駅構内を約70km/h走行中だった試運転7932B列車は地震発生に伴い非常ブレーキが作動したものの、停止直前に低速にて脱線し、脱線後約3m走行し停車した（図2-3）。

新幹線早期地震検知システムが観測したSI値（速度スペクトル強度、単位カイン＝cm/sec）の確定は新幹線運行本部で行われるが、度々発生する余震の影響により、線路設備の警護範囲の確定までに数十分程度を要した。運転中止の判断指標が18.0カイン値以上であったため、今回の本震では、仙台・盛岡支社管内で大規模地震扱いとなった（図2-2）。

また、国土交通省は2016年5月27日付で「鉄道事故調査報告書」²⁻⁶⁾以下のように取りまとめている。

本事故発生前には軌道を含めた鉄道施設、列車及び運転取扱いに問題はなかったと推定されること、また、列車が脱線した時刻は東北地方太平洋沖地震の本要動が仙台市内に到達した時刻の直後と推定されることから、列車は東北地方太平洋沖地震の本震による地震動を受けたために脱線したと推定される。なお、脱線した車両の前台車全2軸のみが脱線した理由は明らかにできていない。

脱線に至る経過としては、まず東北地方太平洋沖地震の地震動の周波数成分のうち、本事故現場の高架橋の固有周波数とおおむね一致する周波数成分が、構造物の共振現象により増幅された高架上で大きな変位として現れたこと、そして、その周波数成分が、車両に上心ロールを生じさせやすい周波数帯にあったことから、車両に上心ロールが生じて脱線に至ったと考えられている。

被害が拡大しなかったことについては、早期に列車を停止させるシステムが動作して脱線直前には低速になっていたこと、また逸脱防止ガイドが機能して脱線した（4両目）車両が軌道から大きく逸脱しなかったことが関与したと考えられている。

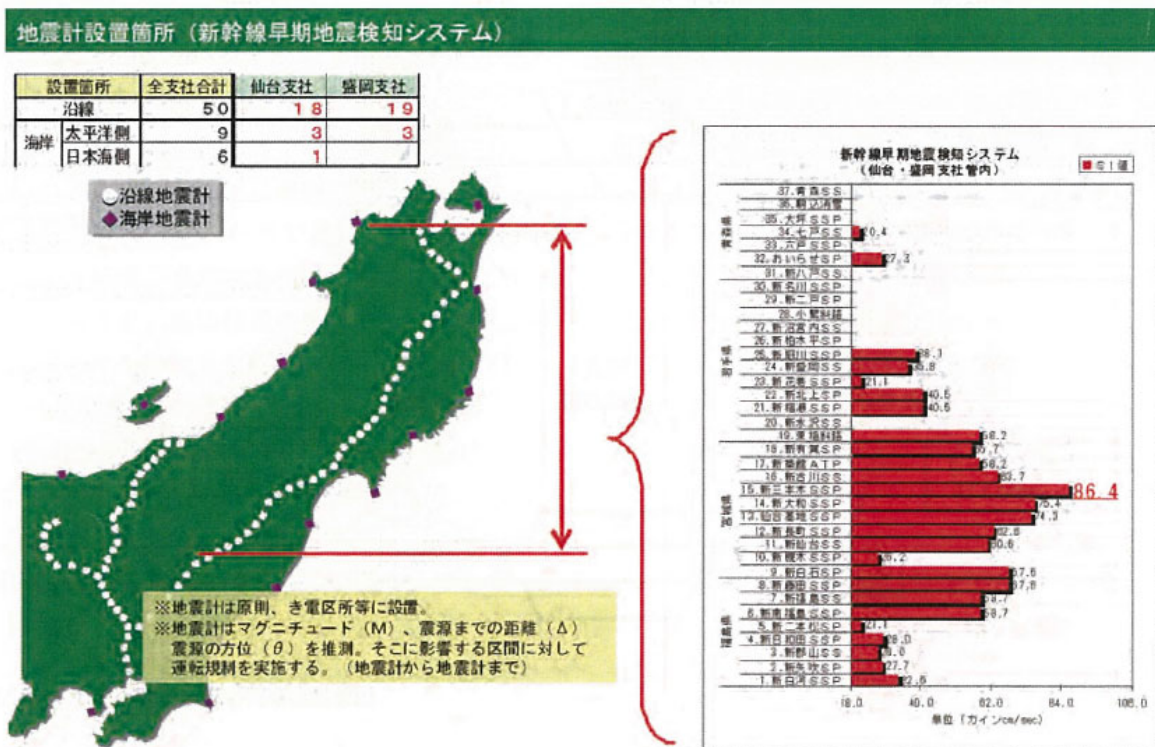


図2-2 東北新幹線における新幹線早期地震検知システム設置箇所とカイン値²⁻⁵⁾



図2-3 脱線した7932B²⁻⁵⁾

図 2-4 熊本地震における新幹線の脱線状況²⁻⁷⁾

2.1.3 2016年 熊本地震

国土交通省が平成28年5月27日に公開した第13回「新幹線脱線対策協議会」では、以下の内容についての報告がなされている²⁻⁷⁾。

熊本地震による九州新幹線の被害状況については、熊本地方において、4月14日21時26分以前震発生（M6.5，震度7），さらに4月16日1時25分に本震（M7.3，震度7）が発生した。この中で、4月14日の地震で、図2-4に示すように熊本・新八代間（熊本駅から終点側1.3km付近）を約80km/hで走行中の回送列車が脱線した。脱線車両以外の走行中及び停車中の列車8本について脱線は発生しなかった。

地震に伴い、脱線箇所の軌道損傷をはじめ、防音壁の落下、調整桁の支承周りのズレ、橋脚・橋台のストッパーの損傷、ホーム桁の柱損傷等の多くの設備損傷が生じた。

九州新幹線における当面の追加対策については、今回の熊本地震において車両が脱線した当該箇所周辺に今年度末までに脱線防止ガード14kmを設置すること、平成29年度末に完了予定だった車両の逸脱防止ストッパーについては、残り6編成への取り付けを今年度中に完了すること、等がJR九州より報告されている。

2.2 新幹線脱線・逸脱対策に関する研究開発

新幹線の脱線・逸脱対策に関する研究は、鉄道事業者各社でなされている。経営環境、車両、軌道、構造物の形式が各社により異なるため、それぞれが技術開発を行い、導入を進めている状況にある。

国土交通省鉄道局技術企画課は、平成28年4月5日に「平成27年度末における新幹線脱線対策の進捗状況について」を公表した²⁻⁸⁾。これは、新幹線脱線対策協議会を構成する各社の取組を毎年度事務局において取りまとめたもので、平成27年度末における取組の進捗状況は以下の通りである。

表 2-4 耐震補強の状況²⁻⁸⁾

平成 27 年度末		
事業者名	追加対策内容	整備期間
J R 東日本	南関東・仙台等・その他エリアにおける曲げ破壊先行型に対する耐震補強	震災前の平成 21 年度より実施。 平成 24 年度から 5 年間で重点的な整備期間として推進。
J R 東海	東海地震の際に強く長い揺れが想定される激震地区（三島～豊橋間）に対する耐震補強	震災前より実施。平成 21 年度完了
J R 西日本	東海・東南海・南海地震想定エリアにおける曲げ破壊先行型に対する耐震補強	平成 24 年度より実施。 概ね平成 34 年度を目途に完了予定。

※ J R 北海道・J R 九州については対策が必要な箇所はなし。



図 2-5 耐震補強の例（鋼板巻き補強）²⁻⁸⁾

2.2.1 構造物の耐震対策

新幹線脱線・逸脱対策の基本は、新幹線の走行に対する基本的な走行面の確保、即ち施工基面の保持が重要であり、このためには構造物が崩壊しないことが重要となる。

(1) 耐震補強

表 2-4 に耐震補強の状況を示す²⁻⁸⁾。各社とも阪神・淡路大震災を受け実施した緊急耐震補強については、概ね完了しており、緊急耐震補強を実施した高架橋については、東日本大震災において損傷はなかった。東日本大震災後、各社において推進中の地震対策に加え、更なる対策を実施しているところである。

図 2-5 に一般的な耐震補強である鋼板巻き補強の例を示す²⁻⁸⁾。各社とも構造物の耐震補強の方法に関しては様々な技術開発を実施しているが、ここでは本研究のテーマからは外れるため説明は省略する。

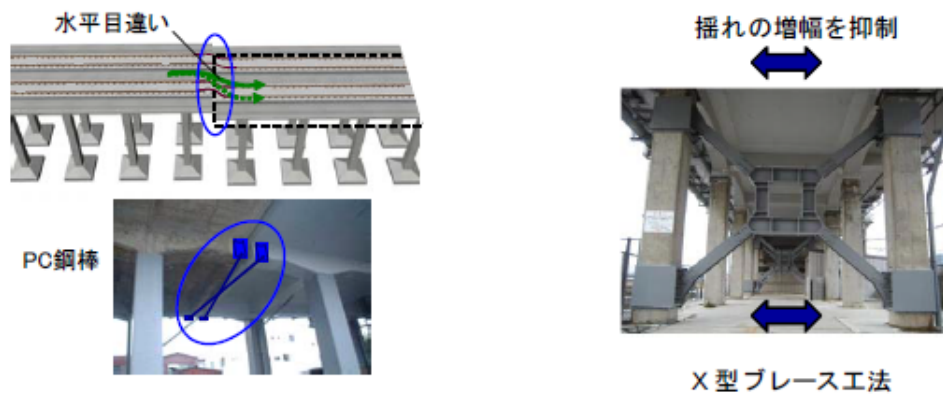


図 2-6 東海道新幹線における変位抑制対策の例²⁻⁹⁾

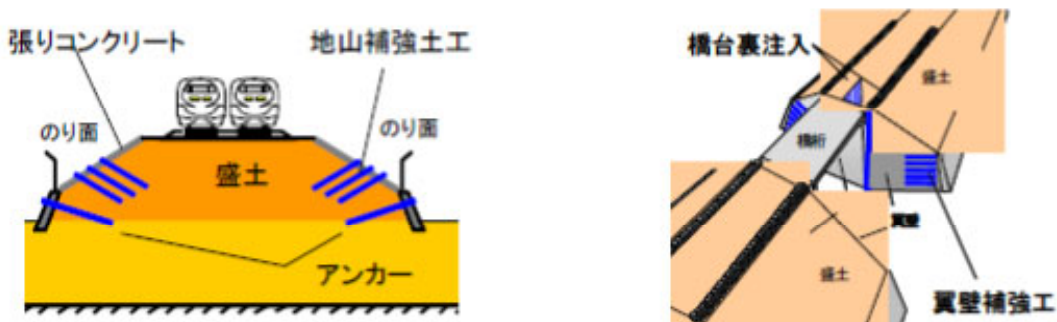


図 2-7 東海道新幹線における盛土の耐震補強の例²⁻⁹⁾

(2) 変位抑制

図 2-6 に変位抑制対策の例を示す²⁻⁹⁾。東海道新幹線については、高架橋上の列車走行性を改善する対策として、隣接する高架橋を連結し、地震時に高架橋間で生じる水平目違いを抑制する手法が採用されている。具体的には、PC 鋼棒により高架橋の両側から拘束を行う手法であり、実物大実験により性能が確認されている。

また、東海道新幹線では、高架橋の柱に X 型ダンパーブレース補強を実施し、地震時の高架橋上での揺れの増幅を抑制する方法が採用されている。ダンパーブレース補強は、ブレースの剛性付加により、高架橋の揺れの増幅を抑制するとともに、隣接高架橋間の相対変位も抑制する効果がある。また、降伏震度も高まり、耐震補強としても効果も大きい。併せて大規模地震時にはダンパーの高減衰効果により変位が抑制される。

(3) 盛土の耐震補強

図 2-7 に東海道新幹線における盛土の耐震補強の例を示す²⁻⁹⁾。盛土の「のり面」を補強し、地震時の盛土の変形により生じる沈下を抑制している。また、橋台裏（盛土と橋の境界部）にセメントミルクの注入等を実施して盛土を固め、地震時の橋台裏での盛土沈下により生じる段差を抑制することとしている。

盛土の補強は、JR 東日本でも実施されており、首都直下地震に備えた盛土の耐震補強工事が進められている。JR 東日本の盛土の耐震補強工事では、高さ 6m 以上の盛土を対象に耐震補強対策を行っており、現在、東京支社管内において全 23 箇所中 10 箇所完了している²⁻¹⁰⁾。

2.2.2 早期地震検知システム

地震計の増設、地震検知システムの機能強化、列車ブレーキ力の向上等、地震時に列車を早期に停止させる取組みが各社においてなされている²⁻⁸⁾。

図 2-8 に早期地震検知システムの概念図を示す。このうち、早期地震検知システムは、地震計が初期の小さな地震波を検知することにより、大きな地震波の到来が推定された場合や、一定の大きさを超える地震波を検知した場合に、鉄道変電所から列車への送電を自動的に停止し、列車の非常ブレーキを動作させ減速・停止させるシステムである²⁻⁸⁾。

表 2-5 に地震計の設置状況及び東日本大震災以降の主な改良内容を、図 2-9 に地震計設置箇所を示す。各社とも地震計の増設に加え、検知アルゴリズムの高度化に取り組んでいる²⁻⁸⁾。

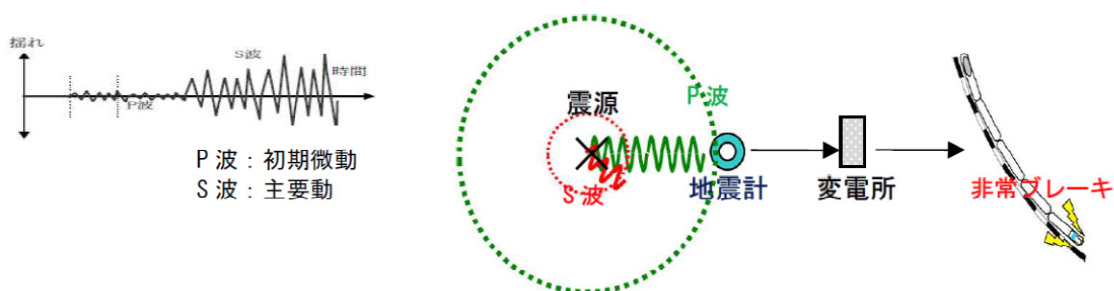


図 2-8 早期地震検知システムの概念図²⁻⁸⁾

表 2-5 地震計の設置状況及び東日本大震災以降の主な改良内容²⁻⁸⁾

	地震計設置箇所 (平成 27 年度末現在)			東日本大震災以降の主な改良内容
	遠方	沿線	計	
JR 東日本	50	85	135	○首都圏及び内陸への地震計を 30 箇所増設 ○気象庁の緊急地震速報を導入
JR 東海	21	50	71	○沿線地震計への P 波による検知機能追加および 遠方地震計への S 波による検知機能追加
JR 西日本	14	59	73	○遠方地震計に S 波による検知機能追加
JR 九州	6	12	18	○気象庁の緊急地震速報を導入

- ・ JR 東日本、JR 西日本及び JR 九州においては、震災前に沿線地震計への P 波検知機能追加済み。
- ・ JR 東日本及び JR 九州においては、震災前に遠方地震計への S 波検知機能追加済み。
- ・ JR 東海及び JR 西日本においては、震災前に緊急地震速報導入済み。
- ・ JR 北海道においては、開業時に地震計（遠方 9 箇所、沿線 8 箇所、計 17 箇所）を設置済み（S 波、P 波検知機能を有する）。
- ・ 各研究機関が設置している海底地震計の利用に向けて、関係機関との調整、検討を進めている。

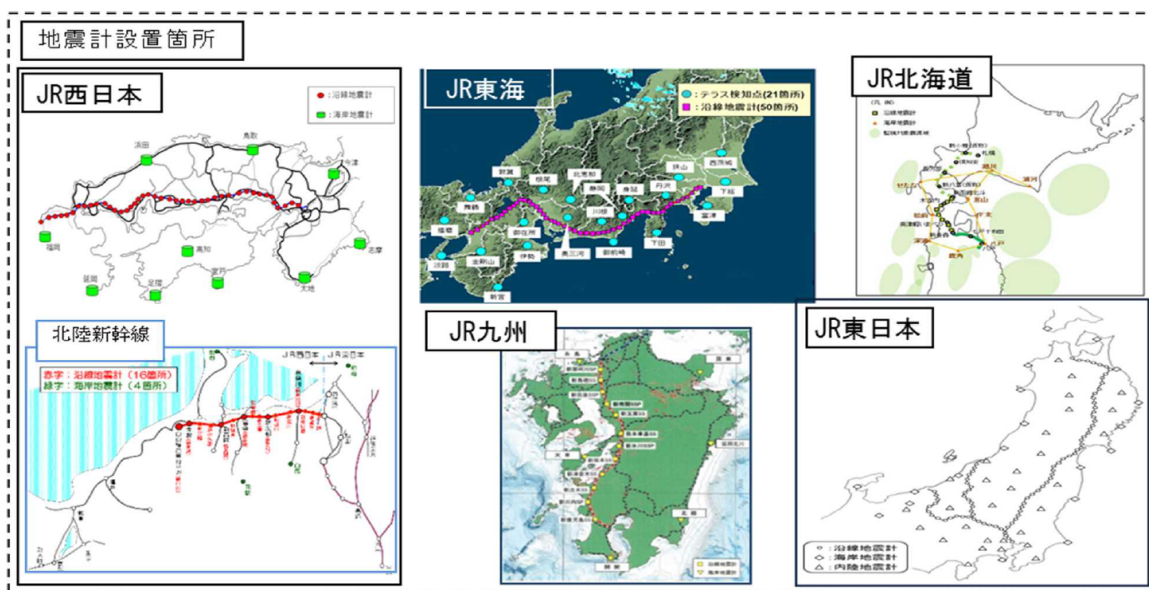


図 2-9 地震計の設置箇所²⁻⁸⁾

2.2.3 脱線・逸脱防止装置

地震時の列車の脱線を極力防止する装置の整備，また，仮に脱線した場合においても，線路から大きく逸脱することを防止する装置の整備を，各社において実施中である。

(1) JR 北海道，JR 東日本，JR 西日本（北陸新幹線）

図 2-10 に JR 北海道，JR 東日本，JR 西日本（北陸新幹線）の逸脱対策を示す²⁻⁸⁾。台車の軸箱下に設けられた L 型の逸脱防止ガイドがレールに引っ掛かることにより，線路から大きく逸脱することを防止するシステムで，その際に発生する横圧によりレールが転倒しないように，レール転倒防止装置も併せて設置される。東日本大震災において脱線した回送列車の L 型ガイドはレールに引っ掛かっており，機能を発揮したと推定されている²⁻⁶⁾。

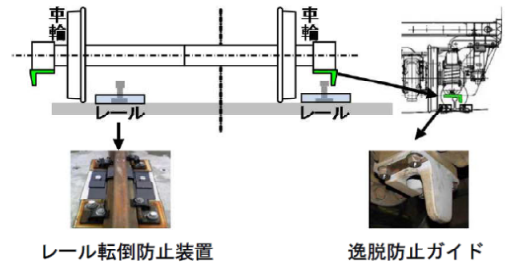
(2) JR 東海，JR 九州

図 2-11 に JR 東海，JR 九州における脱線防止・逸脱防止対策システムを示す^{2-8), 2-9)}。脱線防止ガードにより，地震時の列車の脱線を極力防止するシステムである。JR 東海では，東海地震の際，強く長い地震動が想定される地区の全区間，その他の地区の高速で通過するトンネルの手前や三種桁（三主桁：3 本の桁が線路上に露出している構造の橋りょう）の手前に対して脱線防止ガードの整備を進めている^{2-8), 2-9)}。また，仮に脱線した場合においても，台車に取り付けた逸脱防止ストoppaが逸脱防止ガードに引っ掛かることにより，線路から大きく逸脱することを防止する。


さらに，JR 東海では，脱線防止ガードを有効に機能させるため，必要な箇所では，バラストの流出，盛土の沈下，高架橋の変位を抑制する対策を実施している²⁻⁹⁾。

平成 27 年度末


JR 北海道・JR 東日本・JR 西日本（北陸新幹線）



仮に脱線した場合においても、台車に取り付けた L 型の逸脱防止ガイドがレールに引っ掛かることにより、線路から大きく逸脱することを防止する。



レール転倒防止装置



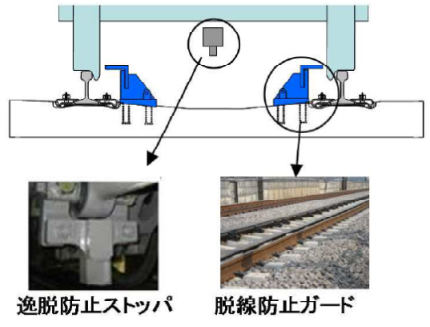
逸脱防止ガイド

事業者	対策	計画数	実績	完了年度
JR 東日本	逸脱防止ガイド	132 編成	132 編成	平成 23 年度
	レール転倒防止装置	約 360km	約 360km	平成 26 年度 (南関東・仙台等エリア)

※ H27 年度末現在の JR 東日本の編成総数は 153 編成でその全てに逸脱防止ガイドを設置している。
 ※ JR 北海道(4 編成)及び JR 西日本(11 編成)の編成総数全てに逸脱防止ガイドを設置している。
 ※ JR 東日本のその他のエリア(約 930km)についてもレール転倒防止装置の設置を進めており、H27 年度末現在で約 53km の設置が完了している。
 ※ 北海道新幹線、東北新幹線及び北陸新幹線の一部については、レール転倒防止装置を建設に併せ設置している。


図 2-10 JR 北海道, JR 東日本, JR 西日本（北陸新幹線）の逸脱対策²⁻⁸⁾

JR 東海・JR 九州




脱線防止ガードにより地震時の列車の脱線を極力防止する。

また、仮に脱線した場合においても、台車に取り付けた逸脱防止ストッパが脱線防止ガードに引っ掛かることにより、線路から大きく逸脱することを防止する。



逸脱防止ストッパ



脱線防止ガード

事業者	対策	計画数	実績	完了(予定)年度
JR 東海	脱線防止ガード	596km	約 360km	平成 31 年度
	逸脱防止ストッパ	135 編成	135 編成	平成 24 年度
JR 九州	脱線防止ガード	約 55km	約 48km	平成 29 年度
	逸脱防止ストッパ	11 編成	11 編成	平成 24 年度

図 2-11 JR 東海, 九州の脱線・逸脱対策²⁻⁸⁾

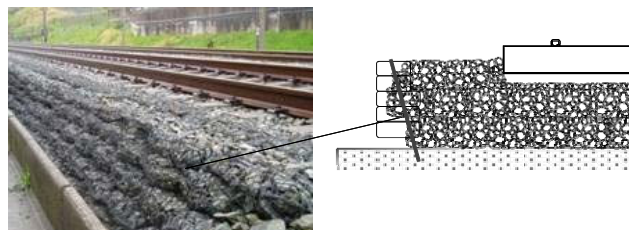


図2-12 東海道新幹線におけるバラスト耐震補強の例²⁻⁹⁾

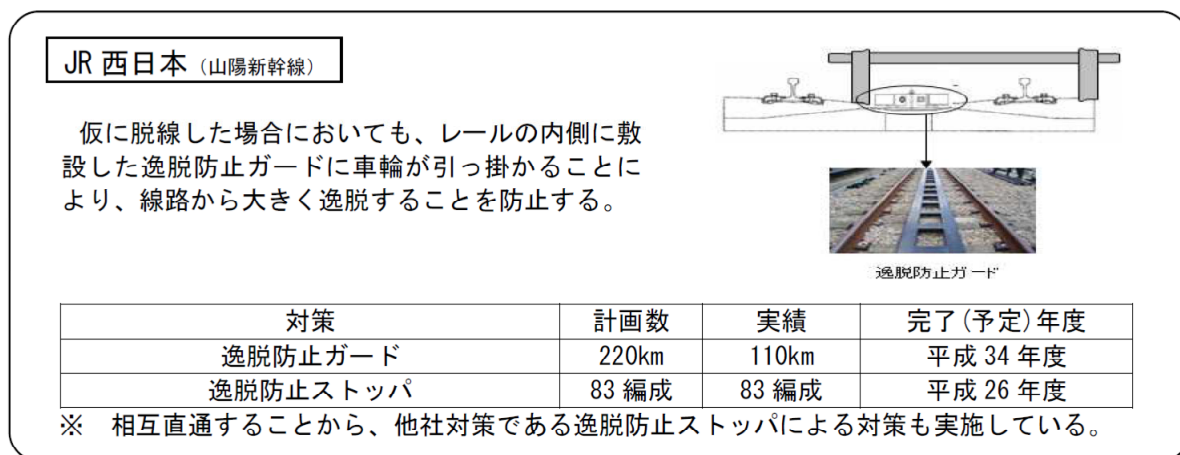


図 2-13 JR 西日本 (山陽新幹線) の逸脱対策²⁻⁸⁾

(3) JR 西日本 (山陽新幹線)

図 2-13 に JR 西日本 (山陽新幹線) における逸脱対策システムを示す²⁻⁸⁾。仮に脱線した場合においても、レールの内側に敷設した逸脱防止ガードに車輪が引っ掛かることにより、線路から大きく逸脱することを防止する。

2. 3 新幹線の脱線メカニズムに関する研究

鉄道の地震時走行安全に関する研究は古くから行われてきたが^{2-11), 2-12)}、1995 年兵庫県南部地震を契機に、地震動による構造物の横方向の振動変位に関する数値シミュレーションが盛んに行われるようになった。この結果、正弦波加振に対する鉄道車両の走行安全限界を求め、加振周波数に対する脱線、あるいは転覆に至る車両の挙動と車両諸元等が明らかにされた。この結果は、1995 年兵庫県南部地震以降に制定された鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計) から反映された²⁻¹³⁾。

2. 3. 1 車両模型実験

(1) 実大車両模型実験

安全性向上に向けて前述のシミュレーション解析を活用していくためには、シミュレーションの妥当性を検証することが求められる。

そこで、総質量 35t の実大車両模型が三次元振動台 (最大載荷質量 50t, 台面寸法 5m×5m, 最大加速度 29.4m/s²) に設置され、加振実験が行われた²⁻¹⁴⁾。

図 2-14 に加振実験の概念図を示す。試験体である車両模型には、実物の新幹線ボルスタレス台車と空車半車体相当質量を積載した荷重枠が用いられた。軌道は、軌間 1435mm, 長さ 5m で、鉄製のまくらぎを振動台に直接取り付け、直結 8 形締結装置を用いて 60kg レールが敷設された。

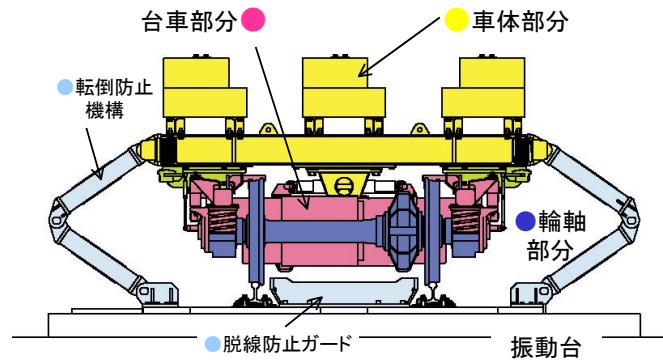


図 2-14 三次元振動台による実大車両模型加振実験の概念図²⁻¹⁴⁾

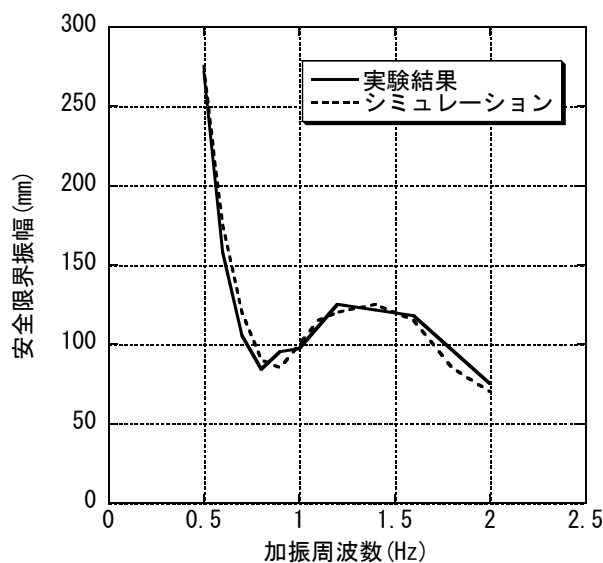


図 2-15 実大車両模型加振実験の結果²⁻¹⁴⁾

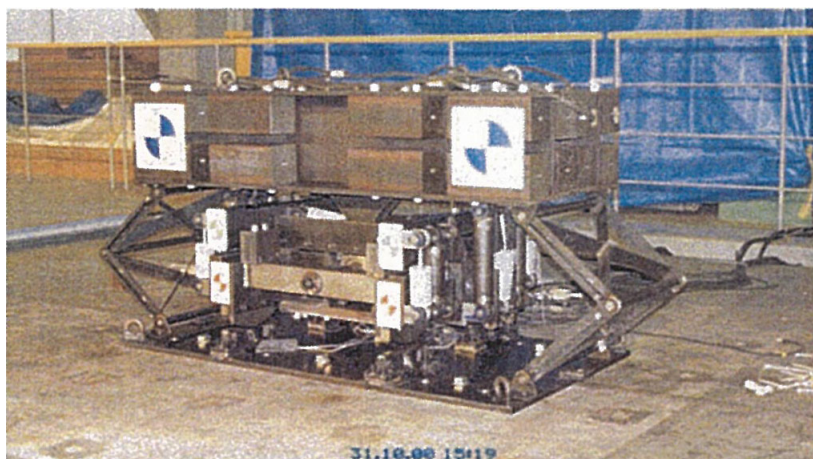
図 2-15 に実験結果を示す。得られた実験結果により正弦加振シミュレーション解析の妥当性が確認された。また、地震時のように軌道が大きく横方向に振動した際に、車輪が飛び上がる状態とその時の車両挙動が実証的に確認された。これらの成果は後述する鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）に反映された²⁻¹⁵⁾。

(2) 模型車両実験²⁻¹⁶⁾

岡野らは、車両模型により振動実験を行い、脱線挙動を把握し、加速度に着目した新たな走行安全限界を提案している。

実物台車の振動実験では、大筋で車両の振動挙動を把握したもの、実験規模の限界から、脱線に至る大振幅入力時の挙動は把握できなかった。

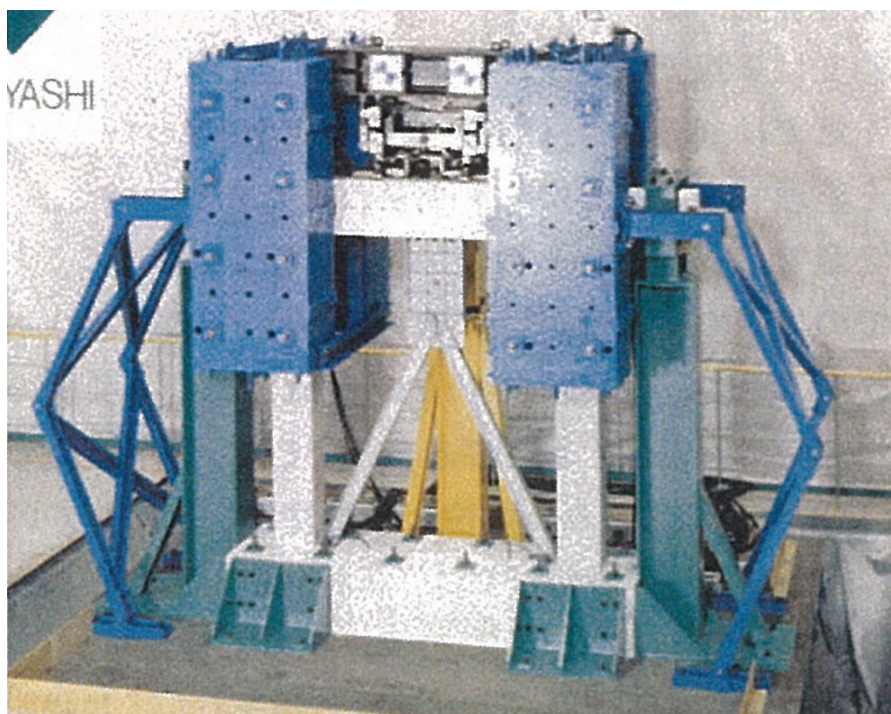
また、1/2.5 という比較的大きな縮尺の車両模型により正弦波による振動実験を行い、脱線挙動を把握し、加速度に着目した新たな走行安全限界を提案した。車両模型の概要を図 2-16 に示す。模型は実物との相似率を考慮し、ばねとオイルダンパーを用いて製作した。正弦波加振の結果、

図 2-16 車両模型の概要²⁻¹⁶⁾

脱線形態が足上げ型ととび上がり型に大別されることを実験的に検証した。本実験の範囲内では以下のことが分かっている。

とび上がり脱線は、模型で 3.0Hz（実物で 19.Hz）の特定周期の波で発生し、車体重量がレールに横方向に支持されて、横力が卓越した状態で車体の回転運動により支持側の車輪が上方に押し上げられることに起因する。足上げ脱線は、とび上がり脱線の発生する振動数以外の波により発生し、加振時に車両重量が横方向にレールで支持されて、逆側の車輪の上方への回転モーメントが発生することによる。足上げ脱線ととび上がり脱線の境界の振動数は、模型で 2.5Hz（実物で 1.6Hz）である。そして、模型は実物車用に比較して、敏感に挙動する傾向があるが、概ね実車両を模擬できることを把握した。さらに、新たな脱線判定の指標として、車両の脱線限界加速度を示す加速度限界を提案した。次に、高架橋の地震応答波入力により鋼製ダンパー・ブレースによる走行安全性の向上について調査した。その結果、構造物の剛性が高い架構の応答波の方が足上げ高さが小さく、ダンパー・ブレースを有する架構は、車両の地震時走行安全性の面から RC 単独架構に比較して有利であることがわかった。

また、岡野らは、車両模型を上載した逆 V 型ダンパー・ブレース付き RC 架構の振動台実験を実施し、ダンパー・ブレースによる高剛性化が車両の地震時走行安全性ならびに高耐震性に寄与することを実証し、新たな走行安全限界の成立性を検討した（図 2-17）。その結果、ダンパー・ブレースによる架構の高剛性化により、車輪の足上げが抑制され、地震時の車両の走行安全性が向上することが実証され、降伏震度が同程度の RC 高架橋に比較し、ダンパー・ブレース付架構は応答変位が大幅に低減されることを検証した。

図 2-17 車両と構造物の連成実験²⁻¹⁶⁾

2.3.2 車両と構造物との動的相互作用シミュレーションに関する研究

(1) 鉄道総研における研究

鉄道固有問題である車両と構造物との動的相互作用シミュレーションの研究は、国鉄の鉄道技術研究所において継続的に取り組みがなされ、財団法人鉄道総合技術研究所に移行してからも、技術継承が図られてきた。

鉄道車両と構造物との動的相互作用解析に関する研究は、東海道新幹線の計画、設計における橋梁の共振現象解明に端を発して、1960年代後半より開始された。松浦は、高速走行する車両と構造物との共振問題を解明するために、鉛直系の車両と構造物との動的相互作用シミュレーションを提案し、この分野における最初の系統的なとりまとめを行った²⁻¹⁷⁾。

地震時に関する検討については、本州四国連絡橋の計画、設計を契機に開始された。西岡²⁻¹⁸⁾、八十島ら²⁻¹²⁾は、長大吊橋の固有振動数が車両の固有振動数に近いことに着目し、水平方向の振動変位の観点から、地震時の列車走行性に関する数値解析や実験を行った。また、涌井は、長大吊橋の桁端に生じる大きな角折れに注目して、数値解析や実験を行い、高速走行時の角折れの限度値を定めている²⁻¹⁹⁾。

涌井らは、上記で用いた車両モデルを発展させ、有限要素プログラムと組み合わせることにより、鉄道車両と構造物との動的相互作用解析プログラム DIASTARS を構築した²⁻²⁰⁾。同プログラムは多編成のマルチボディー車両モデルと、有限要素法による構造物モデルを取り扱うことができるもので、任意の構造形式を対象としたスーパーコンピュータによる数値解析手法が確立された。

松本らは、上記プログラムの車輪とレール間の接触モデル等について更に改良を重ねた²⁻²¹⁾。ここでは車輪とレールの接触現象を鉛直系と水平系に分け、各計算ステップにおける接触パラメ

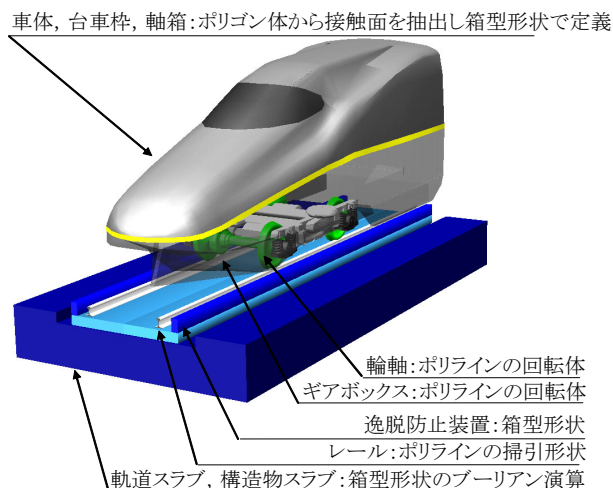


図 2-18 MSC Adams を用いた車両と軌道部材の接触を考慮した逸脱限界検討モデル²⁻²²⁾

ータからテーブルを用いて接触点を求める手法が用いられた。また、併せて、構造物に標準トリリニア型、逆行型トリリニアの非線形ばねが導入された。これにより、地震時において車輪がレール上に乗りに上がる挙動や構造物の非線形挙動を表現することが可能となった。

曾我部らは、汎用機構解析ソフトである MSC Adams を用いて、車両と軌道部材の接触を考慮した逸脱限界について検討している²⁻²²⁾。図 2-18 に MAC Adams モデルを示す。様々な車両部品、軌道部品の詳細な形状を調査して、接触モデルを構築している。接触に関してはペナルティ法でモデル化している。実際に車両が脱線した場合に、どのような部分の接触を考慮すべきかについて、示唆したモデルであると言える。ただし、このモデルでは車両が脱線した後の大変位挙動までは表現できるが、車両は走行せず、また、車両も軌道部材も全て剛体として表現されるに留まっている。

鉄道総研における車両系の研究事例であるが、谷藤²⁻²³⁾、宮本ら^{2-24), 2-25)}等が様々な車両モデルを用いて検討を行っている。

宮本らは、従来の車両運動シミュレーターを発展させ横方向の振動変位に関する現象解明を行っている²⁻²⁶⁾。また、大型振動台を用いて実物大の車両の振動試験を行い、検証も実施している²⁻²⁷⁾。これらの研究に基づき、現在の鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）²⁻¹⁵⁾における横方向の振動変位の照査体系が構築されている。このモデルでは脱線防止ガードの機能は検討できるが、脱線後については検討することができない。基本的に車両系の研究では軌道・構造物との相互作用は取り扱えないが、一方で、空気ばねやダンパー等の車両の力学モデル、車輪とレールの接触に関する力学モデルがより詳細に取り扱える特徴がある。

(2) 東海道新幹線に関する数値解析モデル

東海道新幹線に関しては、松浦らの地震時走行安全性の研究²⁻²⁸⁾や脱線防止ガードの研究²⁻²⁹⁾をベースに、研究の深度化が図られた。

前田ら²⁻³⁰⁾は、車両、軌道、構造物の相互作用を考慮できる解析プログラムを用いて、様々な問題に継続して取り組んでいる。前田らは近年、車輪とレールの接触パラメータにより内挿するモデルを用いている。図 2-19 に 2 点接触モデルを示す。この手法において、レールの小返りや車

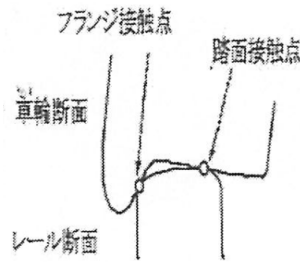


図 2-19 2点接触モデル²⁻³⁰⁾

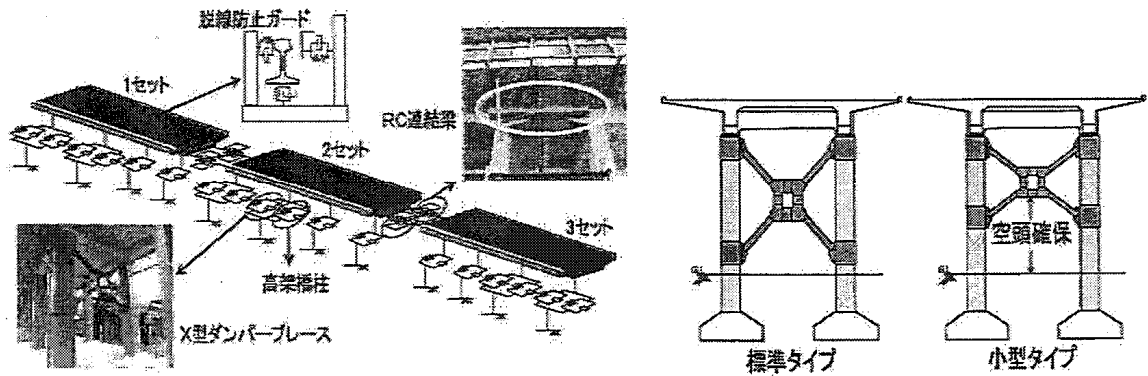


図 2-20 構造物の数値解析モデル²⁻³⁰⁾

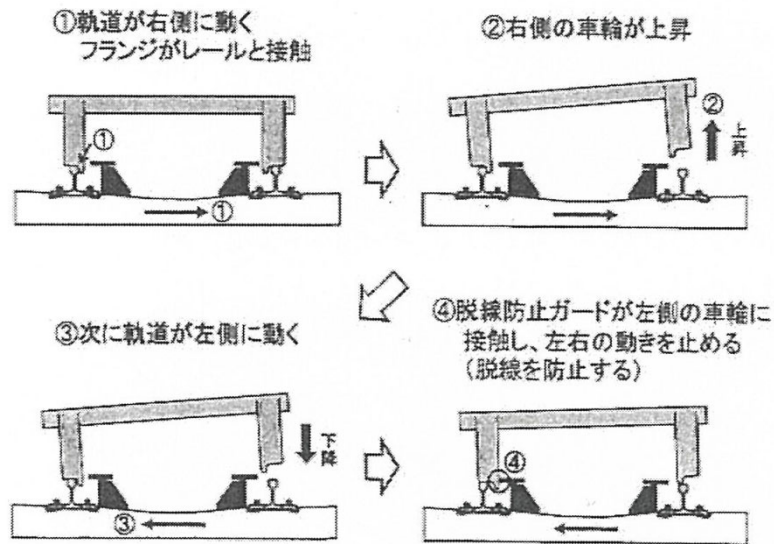
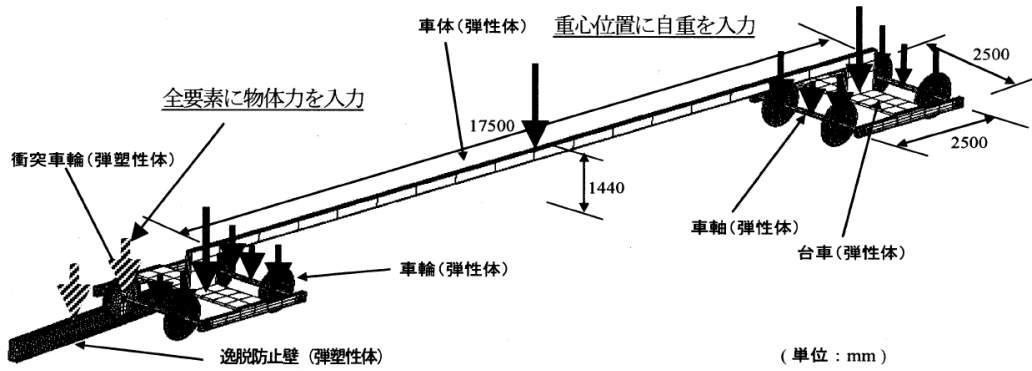


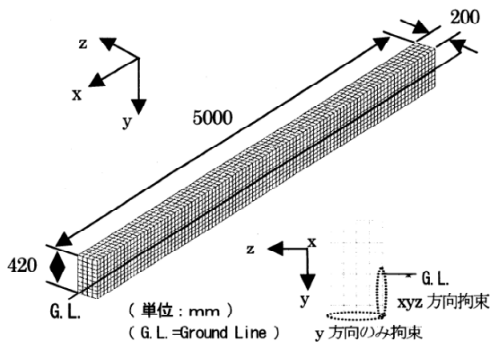
図 2-21 ロッキング脱線，脱線防止ガードのメカニズム^{2-31), 2-32)}

輪軸のローリングにより想定される，2点接触にも対応可能なモデルを提案している。

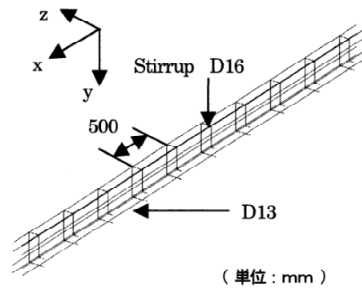
図 2-20 に構造物の数値解析モデルを示す．構造物は非線形の有限要素よりモデル化される．逸脱防止ガード，高架橋間の目違い防止工，制振構造である X 型ダンパーブレースの効果などについて検討がなされている．構造物の履歴特性は，プッシュオーバー解析に基づき，ばね要素で表現され，履歴モデルには標準型のトリリニアモデルが用いられている．



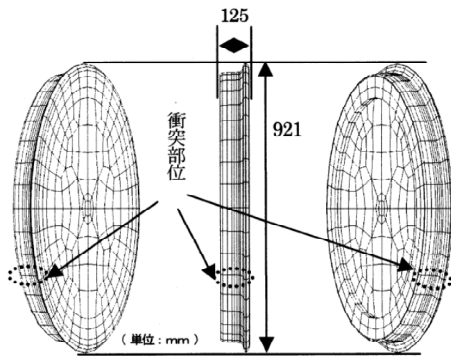
(a) 解析モデル



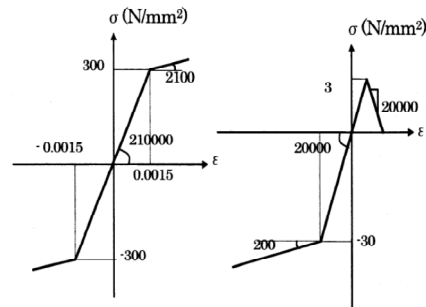
(b) コンクリート部分



(c) 鉄筋部分



(d) 車輪モデル



(e) 鋼とコンクリートの応力ひずみモデル

図 2-22 MSC Marc を用いた車両と逸脱防止装置の接触力検討モデル^{2-33), 2-34)}

また、西村ら²⁻³¹⁾、あるいは足立ら²⁻³²⁾は、東海道新幹線の脱線防止ガードについて、その動作メカニズムの解明を実施した。図 2-21 にロッキング脱線，脱線防止ガードのメカニズムを示す。ここでは、数値シミュレーションと実物大の車両模型実験とにより、地震時のロッキング脱線のメカニズム、このロッキング脱線に対して脱線防止ガードが有効に作用するメカニズム等を明らかにしている。数値解析モデルは二次元半車両から三次元 1 車両に拡張された。

(3) 九州大学における数値解析モデル

園田ら²⁻³³⁾、深澤ら²⁻³⁴⁾は、鉄筋コンクリート製の鉄道車両逸脱防止装置の耐衝撃性能の評価を、汎用非線形解析ソフトウェア MSC.Marc を用いて行っている。図 2-22 に車両と逸脱防止装置の接触力検討モデルを示す。ここでは、有限要素の車輪モデルを、有限要素の鉄筋コンクリート製逸脱防止壁モデルに衝突させて、発生接触力や車輪の挙動等々を評価している。その結果、実現に近い斜め衝突モードにおいて、列車速度 270km/h で衝突させた場合、逸脱防止壁は局所的に破壊する可能性があるが、全体破壊には至らず、鉄道車両の走行方向を修正できるものとの結論が得られている。

園田ら²⁻³⁵⁾は更に、鋼製の鉄道車両逸脱防止装置の耐衝撃性能の評価を、上記と同様な方法で評価している。ここでは、鋼製逸脱防止装置のプッシュオーバー解析を行うとともに、入射角を変化させながら有限要素車両モデルを衝突させて、発生接触力や車輪の挙動等々を評価している。

これらの一連の解析では、特に車輪が回転しながら接触する状況が表現されており、車輪が逸脱防止ガードにせり上がるケースについても表現されている点が特徴的である。ただし、これらの数値解析は解析の規模が大きくなるため、解析で表現可能な時間が限られており、実際の地震開始から数 km 走行して脱線するような現象までを連続して取り扱うことはできない。

(4) 海外における数値解析モデル

海外においても、古くから鉄道車両と構造物の連成解析について研究がなされており、代表的な研究チームとしては、ミラノ工科大学の Diana, Collina, Stefano らが挙げられ、Fortran による研究プログラムにより、鉛直方向、水平方向の鉄道車両/鉄道構造物の連成解析を早くから実現している²⁻³⁶⁾。近年では、マドリード大学の Goicolea, Pabro が、汎用ソフトウェアである ABAQUS にユーザーサブルーチンで車輪/レールの接触モデルを導入し、鉛直、水平方向の連成解析を可能としている²⁻³⁷⁾。同様に、ポルト大学の Calcada, Pedro は、ANSYS で作成した車両、構造物のマトリクスを、Matlab 上で鉛直、水平方向の連成解析を可能としている²⁻³⁸⁾。いずれの研究チームにおいても、水平方向の連成解析の主な対象は風荷重であり、日本で考慮する設計地震動時に発生する著大な変位応答、強い非線形性に対応したものではない。

(5) 道路分野における研究

道路分野における自動車と構造物との動的相互作用の研究は、山田ら²⁻³⁹⁾、川谷ら²⁻⁴⁰⁾、本田ら²⁻⁴¹⁾により行われている。これらの研究では、主に路面凹凸による衝撃問題や低周波音に焦点が当てられてきた。検討車両は、橋梁に最も影響を及ぼす大型トラックを中心にモデル化が行われている。

成田ら²⁻⁴²⁾は、東日本大震災時に横浜ベイブリッジ下路桁スパン中央付近で 3 軸 6 輪のセミトレーラーが転倒し、それを撤去するのに約 30 時間を費やしたのを契機に、地震時の自動車の転倒に関する研究を実施している。ここでは、大型トラックの 2 軸 4 輪車両モデルを定式化し、横浜ベイブリッジ上を走行する大型車の地震時の転倒可能性の詳細な分析を行い、その要因を明らかにしている。東北地方太平洋沖地震時の横浜ベイブリッジでは架設地点で震度 5 弱を観測したが、下路スパン中央付近で水平橋軸直角方向の最大加速度 2.99m/s²、最大変位 62cm を観測している。このデータに基づき、振動入力倍率を変化させながら転倒安全比率、滑動安全比率を求めている。

参考文献

- 2-1) 伊藤昭夫, 鉄道構造物の被害状況と復旧状況, 鉄道力学論文集, No.2, pp.69-75, 2005.
- 2-2) 国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会: 東日本旅客鉄道株式会社 上越新幹線における列車脱線事故に係る鉄道事故調査について(経過報告), 2007.
- 2-3) 国土交通省 鉄道局 新幹線脱線対策協議会: 新幹線脱線対策に係る中間とりまとめについて, 2005.
- 2-4) 東日本旅客鉄道株式会社: 大規模地震に対する当社の取組みについて, 2005.
- 2-5) 東北の鉄道震災復興誌編集委員会: よみがえれ!みちのくの鉄道, 2012.
- 2-6) 国土交通省 航空・鉄道事故調査委員会: 鉄道事故調査報告書 RA2013-1 I 東日本旅客鉄道株式会社 東北新幹線仙台駅構内 列車脱線事故, 2013.
- 2-7) 国土交通省 鉄道局 新幹線脱線対策協議会: 第13回新幹線脱線協議会資料, 2016.
- 2-8) 国土交通省 鉄道局技術企画課: 平成27年度末における新幹線脱線対策の進捗状況について, 2016.
- 2-9) 東海旅客鉄道株式会社: 東海道新幹線の脱線・逸脱防止対策について, 2012.
- 2-10) 東日本旅客鉄道株式会社 東京支社: 首都直下地震に備えた盛土耐震補強工事について 2016.
- 2-11) 西岡隆: 軌道の振動を考慮した車両運動に関する理論的研究, 土木学会論文報告集, No.172, pp.43-57, 1969.
- 2-12) 八十島義之助, 松本嘉司, 西岡隆, 大嶋孝二: 振動軌道上の鉄道貨車の走行安全性に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.313, pp.111-124, 1981.
- 2-13) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 丸善, 1999.
- 2-14) 宮本岳史, 松下信之, 曾我部正道, 下村隆之, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 日本機械学会論文集(C編), Vol.71, No.706, pp.1849-1855, 2005.
- 2-15) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物設計標準・同解説(変位制限), 丸善, 2006.
- 2-16) 岡野素之: RC 鉄道高架橋を対象とした鋼製ダンパー・ブレースの形式と設計法に関する研究, 東北大学学位論文, 2004.
- 2-17) 松浦章夫, 涌井一: 二軸貨車の走行性からみた長大吊橋の折れ角限度, 鉄道技術研究報告, No.1086, 1978.
- 2-18) 西岡隆, 橋本渉一: 水平地震動に対する橋梁上の2軸貨車の走行安全性, 土木学会論文報告集, No.296, pp.61-72, 1980.
- 2-19) 涌井一: 新幹線車両の走行性からみた長大吊橋の折れ角限度, 鉄道総研技術報告, No.1087, 1978.
- 2-20) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.129-138, 1995.4
- 2-21) 松本信之, 田辺誠, 涌井一, 曾我部正道: 非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.3, pp.533-551, 2007.
- 2-22) 曾我部正道, 浅沼潔, 涌井一: 地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発, 鉄道力学論文集, Vol.11, pp.69-74, 2007.

- 2-23) 谷藤克也：鉄道車両の乗り心地管理と強制振動計算法に関する研究，鉄道技術研究報告，No.1321，1986.
- 2-24) 宮本昌幸，藤本裕：編成列車中間車両の運動解析のための手法－ボギー車両と連接車両の上下系周波数応答－，鉄道総研報告，Vol.2，No.4，pp.37-45，1988.
- 2-25) 宮本昌幸，松尾雅樹，谷藤克也：軌道狂いに対する輪軸挙動のシミュレーション－車輪・レール接触力のモデル化レベルの影響－，日本機械学会講演論文集，No.840-16，pp.17-20，1984.
- 2-26) 宮本岳史，石田弘明，松尾雅樹：地震時の鉄道車両の挙動解析，日本機械学会論文集（C編），Vol.64，No.626，pp.236-243，1998.
- 2-27) 宮本岳史，松本信之，曾我部正道，下村隆行，西山幸夫，松尾雅樹：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集（C編），Vol.71，No.706，pp.59-65，2005.
- 2-28) 松浦章夫，富田健司，涌井一：鉛直フランジ付き3次元車両モデルによる振動軌道上車両の走行性に関する研究，土木学会論文集，No.556/I-38，pp.169-178，1997.
- 2-29) 竹内篤史，及川祐也，松浦章夫：脱線防止ガードが鉄道車両の地震時走行特性に与える効果に関する一考察，鉄道力学論文集，Vol.4，2000.
- 2-30) 西村和彦：地震時の車両運動シミュレーション，JR東海技報，Vol.14，pp.15-18，2016.
- 2-31) 足立昌仁，森村勉，西村和彦，曄道佳明：軌条輪上での実台車加振実験による鉄道車両の地震時脱線メカニズムの検証，日本機械学会論文集（C編），Vol.79，No.808，pp.261-276，2013.
- 2-32) 前田昌克，阿知波秀彦，関雅樹，松浦章夫：地震時構造物の相互作用を考慮した車両運動シミュレーション，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.667-670，2009.
- 2-33) 園田佳巨，深澤仁，曾我部正道：鉄道車両逸脱防止壁に作用する衝撃力の評価に関する研究，応用力学論文集，Vol.10，pp.273-280，2007.
- 2-34) 深澤仁，園田佳巨：鉄道車両用逸脱防止壁の性能評価に関する研究，応用力学論文集，Vol.11，pp.459-466，2008.
- 2-35) 園田佳巨，瀧上翔太，綿島理晃：鉄道車両逸脱防止装置の耐衝撃性能評価に関する解析的研究，構造工学論文集，Vol.55A，pp.1399-1407，2009.3.
- 2-36) S. Alfi, G.Diana, D.Rocchi, G.Fiammenghi and E.Vullo: Train-bridge-wind interaction of the Messina bridge, ICWE13 (13th International Conference on Wind Engineering), 2011.
- 2-37) P. Antolin, J.M.Goicolea, J. Oliva and M. A. Astiz: Nonlinear train-bridge lateral interaction using a simplified wheel-rail contact method within a finite element framework, Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, No.7, 2012.
- 2-38) P. Montenegro, S. Neves, R.Calcada, M. Tanabe and M. Sogabe: Wheel-rail contact formulation for analyzing the lateral train-structure dynamic interaction, Computers & Structures, Vol.152 pp.200-214, 2015
- 2-39) 山田善一，小堀為雄：活荷重に対する道路橋の動的応答－衝撃係数－に関する考察，土木学会論文集，No.148，pp.40-50，1967.
- 2-40) 川谷充郎，小松定夫，佐々木孝：走行自動車荷重を受けるプレートガーター橋の動的応答

特性に関する研究，土木学会論文集，No.392/I-9，pp.351-358，1988..

- 2-41) 本田秀行，小堀為雄，山田善一：多径間連続桁橋の動的応答と衝撃係数に関する考察，土木学会論文報告集，No.331，pp.65-73，1983.
- 2-42) 成田顕次，シリゴリンゴ ディオン，藤野陽三，西尾真由子：橋梁走行中の大型トラックの地震時転倒解析，土木学会年次学術講演会講演概要集，I-089，Vol.70，No.1，I-89，2015.

第3章 鉄道車輪とPCまくらぎの接触力

3.1 本章の概要

第1章でも述べたが、大規模地震動に対して、単一の対策のみで列車の走行安全性を確保することは困難であること、従って、大規模地震動に対しては、地震早期検知システム、構造物の補強、軌道の安全対策等を利用し、鉄道システム全体として減災に努める必要がある³⁻¹⁾。こうした背景から、軌道については、脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱させないための各種逸脱防止装置の開発が進められている^{3-2), 3-3)}。しかしながら、バラスト軌道においては、地震動により車両が脱線した場合には、車輪がまくらぎ上に落下し、その後も走行し続けることが予想される。その際、車輪はまくらぎを損傷させながら、場合によっては、まくらぎ上で大きく跳ね上がりながら走行する可能性も考えられるため、車輪衝突によるまくらぎの挙動、作用する荷重の大きさ及び破壊モード等を把握し、さらに、上記のようなまくらぎ上走行においても逸脱防止装置がどのようなメカニズムで機能するか、どの程度までの地震動に対して機能するのか等の逸脱防止性能を明らかにする必要がある。こうした検討には通常、Multi Body System モデルが用いられる^{3-4), 3-5)}。この過程で重要となるのが、各構成要素の接触力の評価、とりわけ車輪と軌道部材等（本研究ではまくらぎ）との接触モデルである。理想的には、両者を非線形の有限要素（Finite Element, 以下 FE という）モデルとし、接触力を厳密に評価するのがよいが、現在の計算機能力の面からすると必ずしも実用的ではない。従って、実務では、要素実験や部分 FE モデルに基づき、ペナルティー関数法³⁻⁶⁾など簡易なマクロモデルを構築し、これを MBS モデルに組み込み、現象解明や性能設計を実施するのが一般的である。しかしながら、これまでに高速走行する車輪と軌道部材の衝突、特にコンクリート部材との接触モデルに関する知見はほとんど得られていない現状にある。

以上より本章では、研究の目的を次のように定めた。

- (1) 地震時に脱線した車輪とまくらぎの間で生じる接触力に関して、車輪形状を模擬した接触子を用いた、まくらぎの静的及び衝撃実験を実施し、載荷位置ごとの最大荷重および破壊モードを明らかにする。
- (2) 上記実験より、MBS モデルに導入可能な車輪とまくらぎ間の接触剛性について評価する。
- (3) 上記の衝撃実験に関する数値シミュレーションを実施することで、車輪とまくらぎ間で発生する接触力を精度よく表現可能な解析手法について検討する。

3.2 実験による検討

3.2.1 実験方法

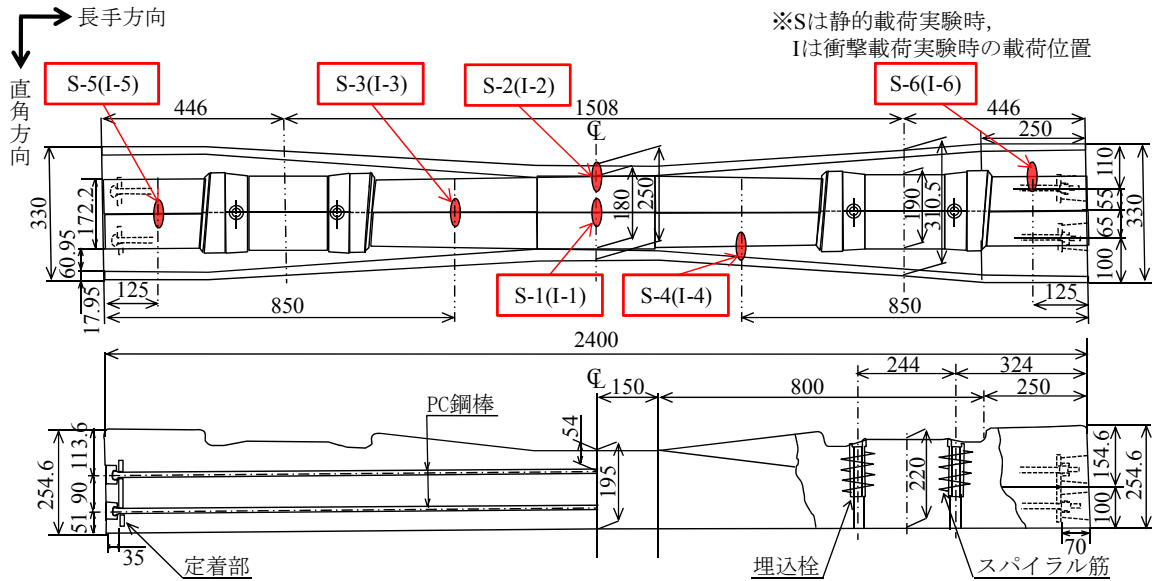


図 3-1 PCまくらぎの形状寸法 (単位: mm)

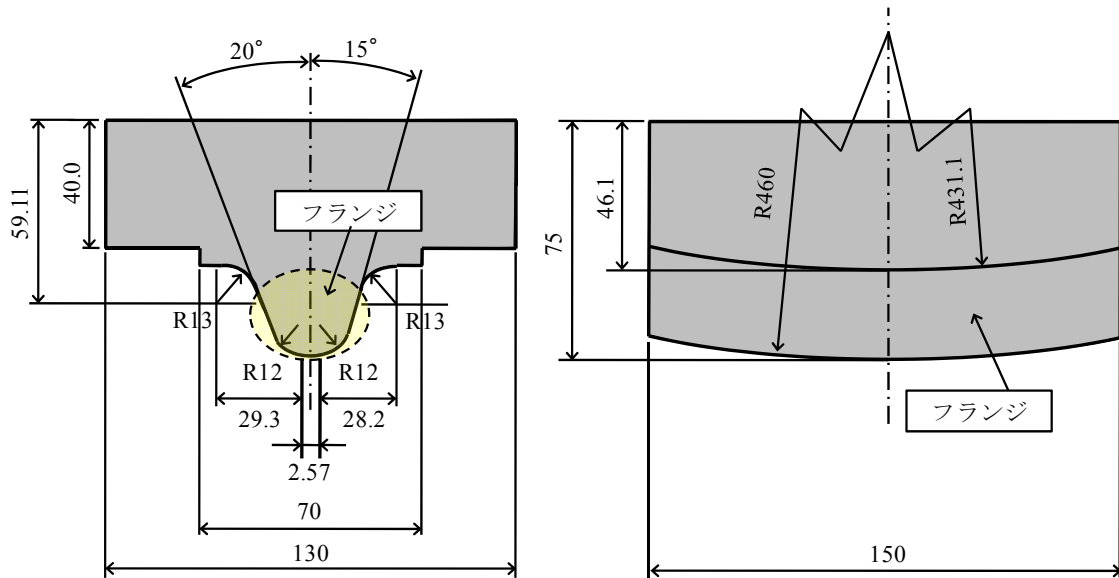


図 3-2 接触子の形状寸法 (単位: mm)

表 3-1 コンクリートの材料諸元

弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	密度 (g/cm ³)
38.4	65.9	2.39

表 3-2 PC 鋼棒 (φ13) の材料諸元

弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	緊張力 (kN)
201.0	1372	1462	122.6

(1) PCまくらぎ及び接触子

図 3-1 に試験体である新幹線用ポストテンション式 PCまくらぎ (4H) の形状寸法を示す。本

研究では便宜的に、図に示すように、まくらぎ長手方向を「長手方向」、その直角方向を「直角方向」と向きを定義した。表 3-1、表 3-2 に PC まくらぎに使用されたコンクリート及び PC 鋼棒の材料諸元を示す。PC まくらぎ 1 体当りの質量は約 318kg である。

図 3-2 に接触子の形状寸法を示す。接触力は接触要素形状に依存するため³⁻⁶⁾、新幹線用円弧踏面形状に基づく車輪フランジを模擬した接触子（材質：S45C）を製作し、これを用いて静的及び衝撃実験を実施した。

(2) 静的実験

図 3-3 に静的実験状況を示す。静的載荷実験は 1000kN の載荷能力を有する万能材料試験機を用いて、漸増載荷により行った。まくらぎは載荷に伴う移動を防止する目的で、押さえ金具により長手方向に 2 箇所固定した。測定項目は荷重及び接触子の鉛直変位であり、荷重測定は接触子上部に配置したロードセルで、変位測定は接触子に取り付けたターゲットと、試験機台座に設置した接触式変位計で行った。以下、接触子の鉛直変位に関しては、まくらぎに接触子が食込んだ量と等しいと仮定し、食込み量と呼ぶこととした。ここでの食込み量は、まくらぎの弾性及び塑性変形量の両方を含んだものである。

接触子はフランジ方向とまくらぎ長手方向が直角になるように配置し、その載荷位置は図 3-1 に示す S-1～S-6 の 6 箇所である。S-1、S-3、S-5 については、まくらぎ直角方向中央部に載荷しており、S-2、S-4、S-6 については、まくらぎ上面端部への載荷とし、接触子のフランジ中央部がまくらぎ上面端部に接触するように載荷を行った。また、静的載荷に用いたまくらぎは 2 本であり、1 体目は載荷 S-1 のみ、2 本目は載荷 S-2～S-6 を行った。

(3) 衝撃実験

図 3-4 に衝撃実験状況を示す。本載荷実験は、重錘（直径 20cm、高さ 25cm、加速度計内蔵）に、静的実験と同様の接触子を取り付けて行った。

落下位置に関しては、図 1-1 に示す静的実験時と同様である。以降、静的実験と区別するために、衝撃実験の載荷位置の名前を S-1 から I-1 のように、先頭のアルファベットを“I”に変更して呼ぶものとする。また、衝撃実験に用いたまくらぎは 2 本であり、1 体目は載荷 I-1 のみ、2 本目は載荷 I-2～I-6 を行った。各載荷位置における重錘の落下高さは、250mm、500mm、750mm、1000mm、1500mm、2000mm を基本として、載荷位置は変えずに 1 回ずつ繰り返し漸増載荷した。この時、発生衝撃力が前回の落下高さのものより小さくなった場合、もしくは、まくらぎの損傷が大きくなった場合に載荷を中止した。

衝撃載荷における測定項目は、衝撃力及び載荷点におけるまくらぎ表面の接触子の食込み量である。衝撃力に関しては、重錘内部に埋め込まれた加速度計出力に重錘質量を乗じて評価した。用いた加速度計は、測定周波数範囲が 1Hz から 10kHz、最大測定加速度が 1000G の RION 社製せん断型圧電式加速度計、型式 PV94 である。また、サンプリング周波数は 24kHz とし、フィルター処理は施していない。食込み量に関しては、載荷ごとにノギスにより測定した。ここでの食込み量は、載荷後の測定であるため弾性変形量を考慮できていない。しかし、衝突現象が極めて短い時間で起こっており、弾性変形量の測定は困難であることから、今回は載荷終了後の塑性変形量のみを食込み量として採用した。

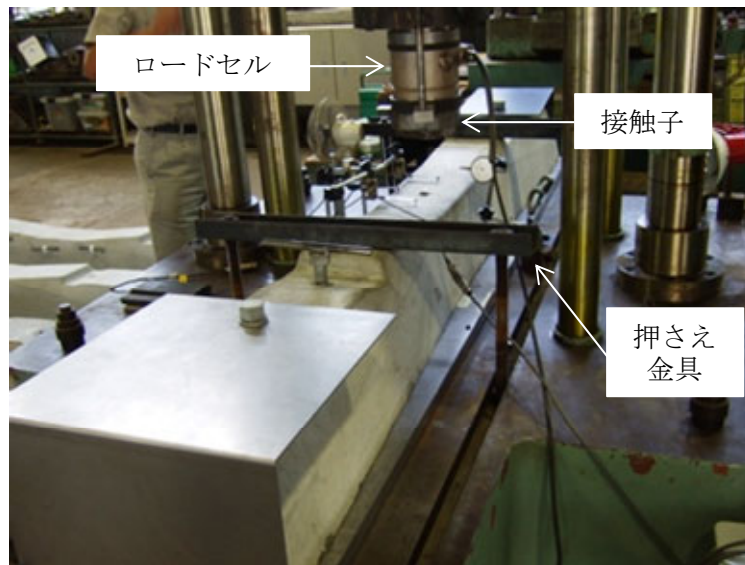


図 3-3 静的実験状況

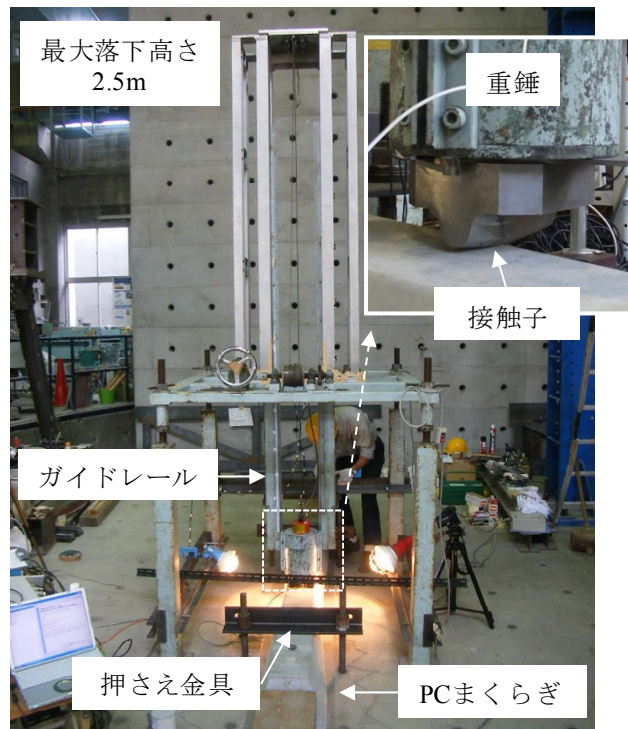


図 3-4 接触子の形状寸法 (単位: mm)

3.2.2 実験結果

(1) 静的実験

図 3-5 に各載荷位置における荷重と食込み量の関係を最大荷重と併せて示す。また、図 3-6 に載荷終了時の破壊状況を示す。図 3-6 より、まくらぎ直角方向中央部に載荷した場合と端部に載荷した場合を比較すると、中央部載荷の場合が食込み量に対する荷重の増加割合が大きいことが確認できる。また、中央部載荷の場合は食込み量に対して荷重が単調に増加しているが、端部載

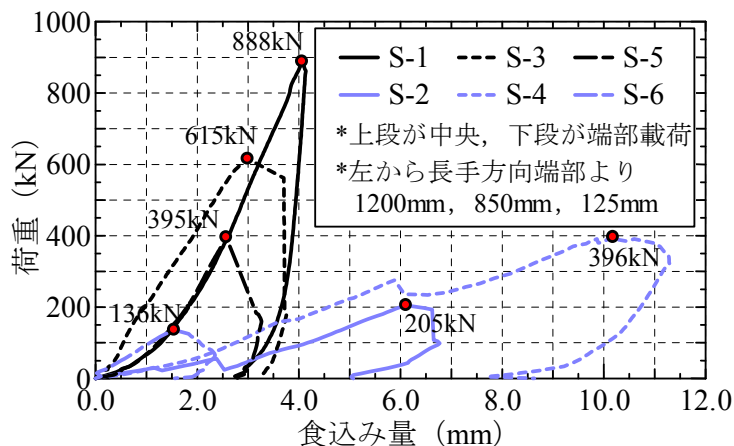


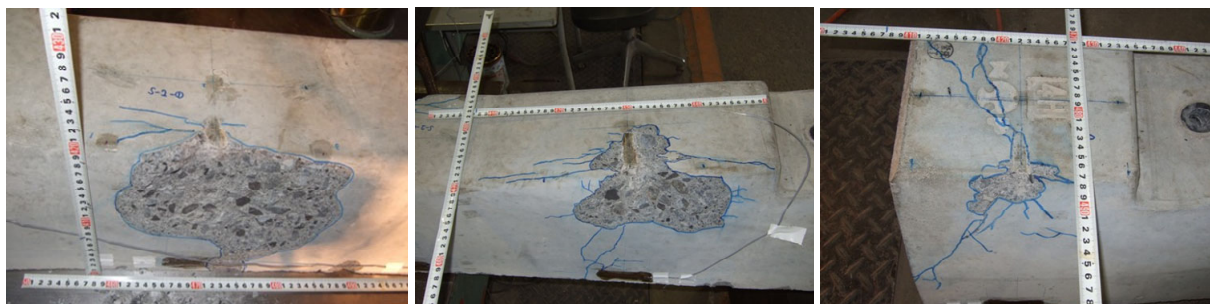
図 3-5 荷重と食込み量の関係



(a) S-1 (曲げ破壊)

(c) S-3 (曲げ破壊)

(e) S-5 (せん断破壊)



(b) S-2 (側面剥離)

(d) S-4 (側面剥離)

(f) S-6 (せん断破壊)

図 3-6 載荷終了時の破壊状況

荷である S-2 及び S-4 の場合は、それぞれ 50kN, 270kN 程度で荷重が一度低下する箇所がある。これは端部荷重では荷重が増加するにつれて図 3-6(b), (d)に示すように端部が段階的に破壊するためである。

次に、まくらぎ長手方向の荷重位置が同じ場合（例えば S-1 及び S-2）で比較すると、直角方向端部に荷重した場合よりも、中央部に荷重した場合に最大荷重が大きくなっていることが分かる。その差はまくらぎ長手方向 1250mm の位置で 4.3 倍、850mm の位置で 1.6 倍、125mm 位置で 2.9 倍となった。

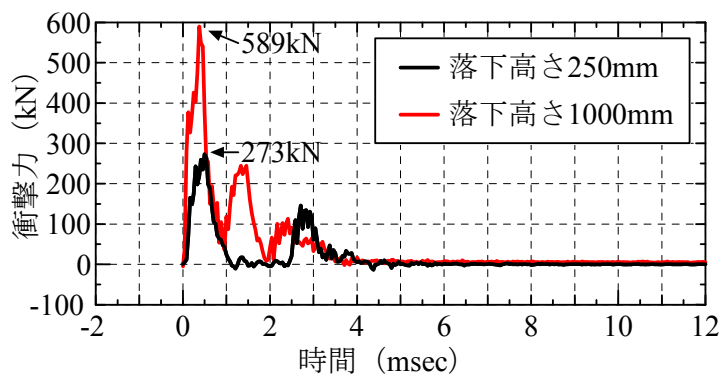
さらに、まくらぎ直角方向の荷重位置が同じ場合（例えば S-1, S-3 及び S-5）で比較すると、

中央部及び端部ともに 125mm 位置が最小値となった。また、最大荷重との差は、中央部で 1.6～2.2 倍、端部で 1.5～2.9 倍であり、まくらぎ長手方向の荷重位置によってばらついていることが分かる。

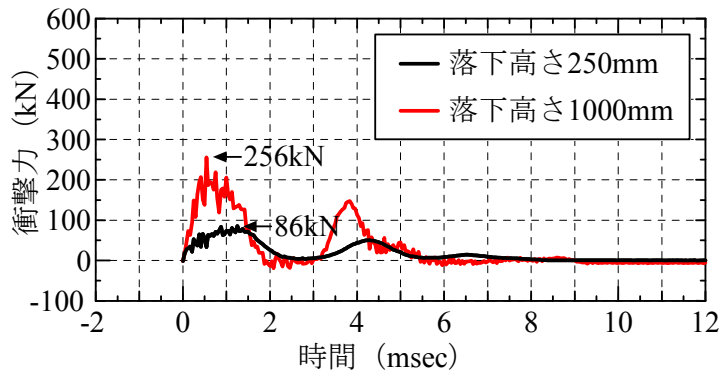
破壊モードに関しては、図 3-6(a), (c)に示すように中央部荷重の場合は、荷重位置近傍のコンクリートの圧壊及びまくらぎ下面から上面に向かうひび割れが発生する曲げ破壊であった。ただし、ここではまくらぎを試験機台座上に設置していることから、純粋な曲げ破壊とは異なることに注意が必要である。それに対し図 3-6(b), (d)に示す端部荷重では、側面のコンクリートが剥離する破壊モードであった。これらの破壊モードは、まくらぎ長手方向の荷重位置が変わっても同様の傾向を示した。ただし、まくらぎ長手方向 125mm 位置に荷重した S-5 及び S-6 については、両者とも図 3-6(e), (f)に示すように荷重位置からまくらぎ長手方向端部に向かう大きなひび割れを生じるせん断破壊であった。

(2) 衝撃実験

図 3-7 に、荷重位置 I-1 及び I-2 の落下高さ 250mm, 1000mm における衝撃力波形を示す。図 3-7(a)の落下高さ 250mm の場合、継続時間が 1msec 前後の正弦半波波形が 2 波励起している。この 2 波目については、重錘衝突後にまくらぎが床の反力により跳ね上がり、鉛直下向きの加速度を持ち続けた重錘と再衝突したために生じたものと考えられる。そこで、各衝撃力波形に関して



(a) 荷重位置 I-1



(b) 荷重位置 I-2

図 3-7 衝撃力波形の例

1 波目だけに着目すると、落下高さが高くなるにつれて最大衝撃力は大きくなるとともに、その発生時間は早くなり、衝撃力継続時間は短くなっていることが分かる。また、落下高さが増すにつれて高周波成分も多く計測された。次に、まくらぎ直角方向の荷重位置の違いである I-1 及び I-2 を比較すると、端部荷重の場合が中央部荷重よりも衝撃力継続時間が長くなっている。この傾向はどの波形でも同様であり、中央部荷重の継続時間は 0.8msec~1.4msec であったのに対し、端部荷重では 1.5msec~2.6msec であった。

図 3-8 に各荷重位置における最大衝撃力と落下高さの関係を示す。図中には各荷重位置における最大値も併せて示した。この図より、静的荷重結果と同様、直角方向端部に荷重した場合と比較して、中央部に荷重した場合に最大値が大きくなっていることが確認できる。この時、まくらぎ長手方向の荷重位置が同じ場合（例えば I-1 及び I-2）で比較すると、端部荷重に対する中央部荷重の最大値の比は、1250mm の位置で 3.3 倍、850mm の位置で 2.4 倍、125mm 位置で 3.0 倍程度であった。

また、まくらぎ直角方向の荷重位置が同じ場合（例えば I-1, I-3 及び I-5）で比較すると、静的荷重結果と同様、125mm 位置で最大値が小さい傾向にあった。しかし、荷重位置での差は中央部、端部荷重とも 1.2 倍程度であり、静的荷重結果とは異なり、長手方向の荷重位置での差はあまり見られなかった。

図 3-9 に荷重終了時の破壊状況を示す。この図と図 3-6 に示す静的荷重時の破壊状況を比較すると、静的及び衝撃荷重における破壊モードがほぼ同様であるため、破壊モードに関しては荷重方法によらず、荷重位置によって、曲げ破壊、側面剥離、せん断破壊に分類できることが分かった。

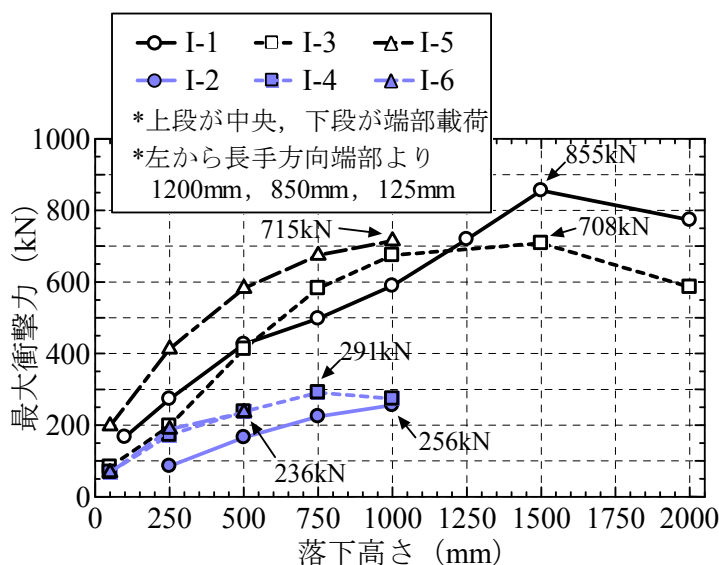


図 3-8 最大衝撃力と落下高さの関係

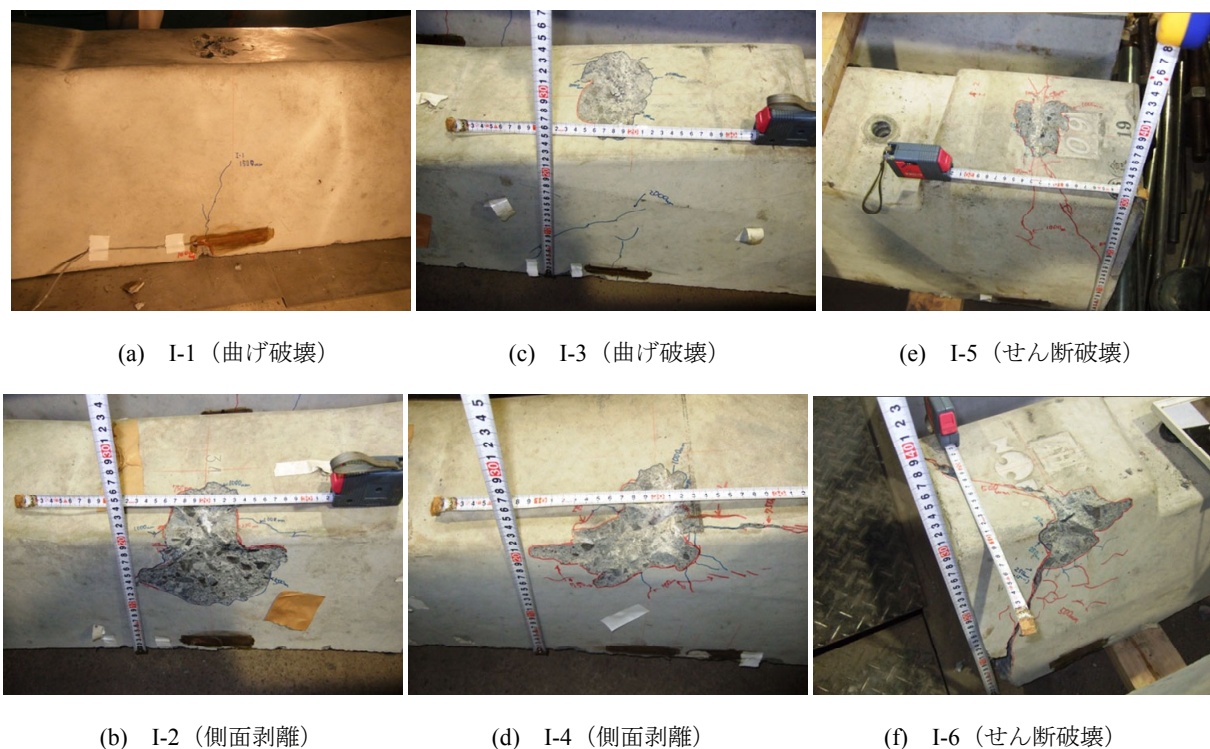


図 3-9 各载荷位置における破壊状況

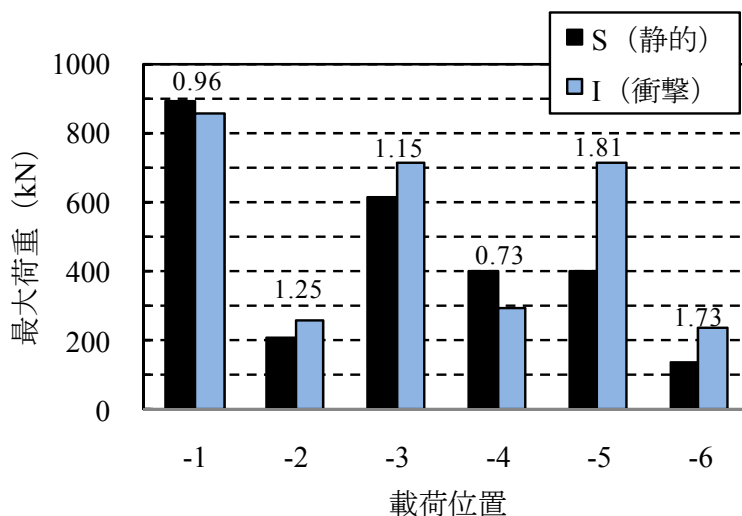


図 3-10 各载荷位置における最大荷重の比較

(3) 最大荷重評価

図 3-10 に静的及び衝撃载荷実験の各载荷位置における最大荷重を示す．図中には，静的最大荷重に対する衝撃最大荷重の比を併せて示した．この図から，各载荷位置における静的最大荷重に対する衝撃最大荷重の比は，まくらぎ長手方向 125mm 位置（端部）载荷である 5, 6 を除けば 0.73 ～1.25 倍であり，静的及び衝撃最大荷重はほぼ同程度であった．しかし，長手方向端部载荷 5, 6 については，1.73 倍及び 1.81 倍と 2 倍近い差となった．

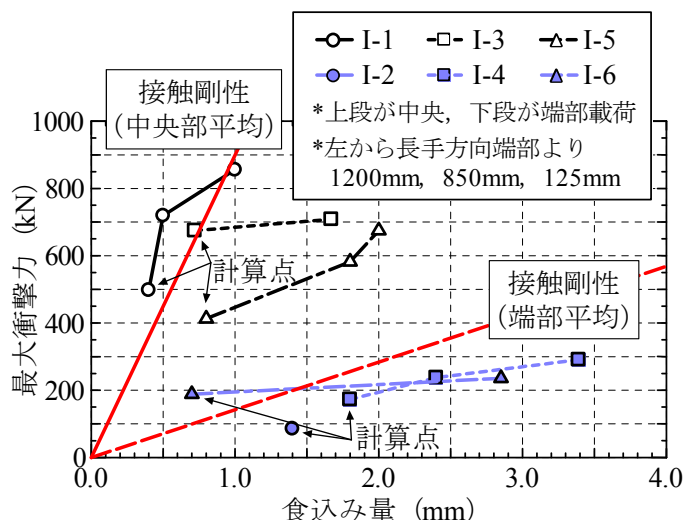


図 3-11 最大衝撃力と食込み量の関係

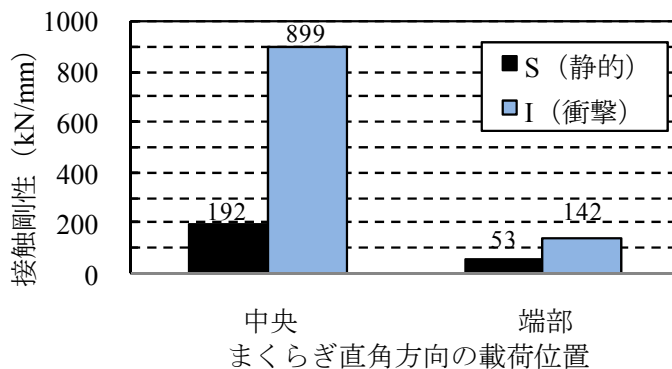


図 3-12 荷重方法及び荷重位置での接触剛性の比較

(4) 接触剛性評価

図 3-11 に衝撃実験で得られた各荷重位置及び各落下高さにおける、最大衝撃力と食込み量の関係を示す。食込み量については、ノギスにより測定が可能であった点のみ図中に示した。また、図中には衝撃実験により求められた接触剛性も示した。ここで、接触剛性は、各荷重位置における最初の食込み量の測定点を接触剛性の計算点とし、その点の衝撃力をその食込み量で除し、まくらぎ直角方向中央部荷重の 3 箇所及び端部荷重の 3 箇所それぞれ平均化して算出した。図 3-12 に、まくらぎ直角方向中央部及び端部荷重における静的荷重と衝撃荷重の接触剛性の比較図を示す。ここで、静的荷重における接触剛性は、図 3-5 に示す荷重と食込み量の関係において、各最大荷重点をその点の食込み量で除し、まくらぎ直角方向中央部荷重の 3 箇所及び端部荷重の 3 箇所それぞれ平均化したものである。この図より、静的及び衝撃荷重といった荷重方法によって接触剛性が異なることが分かる。ここで、各荷重方法における食込み量について、静的荷重での食込み量は、弾性及び塑性変形量の両方を考慮したものであるのに対し、衝撃荷重での食込み量は、塑性変形量のみであるために単純には比較できないが、本実験では、静的荷重に対する衝撃荷重の接触剛性の比は、まくらぎ直角方向中央部荷重の場合で 4.7 倍、端部荷重で 2.7 倍となった。また、まくらぎ直角方向の荷重位置に関しても、端部荷重に対する中央部荷重の接触剛性が、衝撃荷重の場合で 6.3 倍となり、荷重位置に関しても異なる値となった。

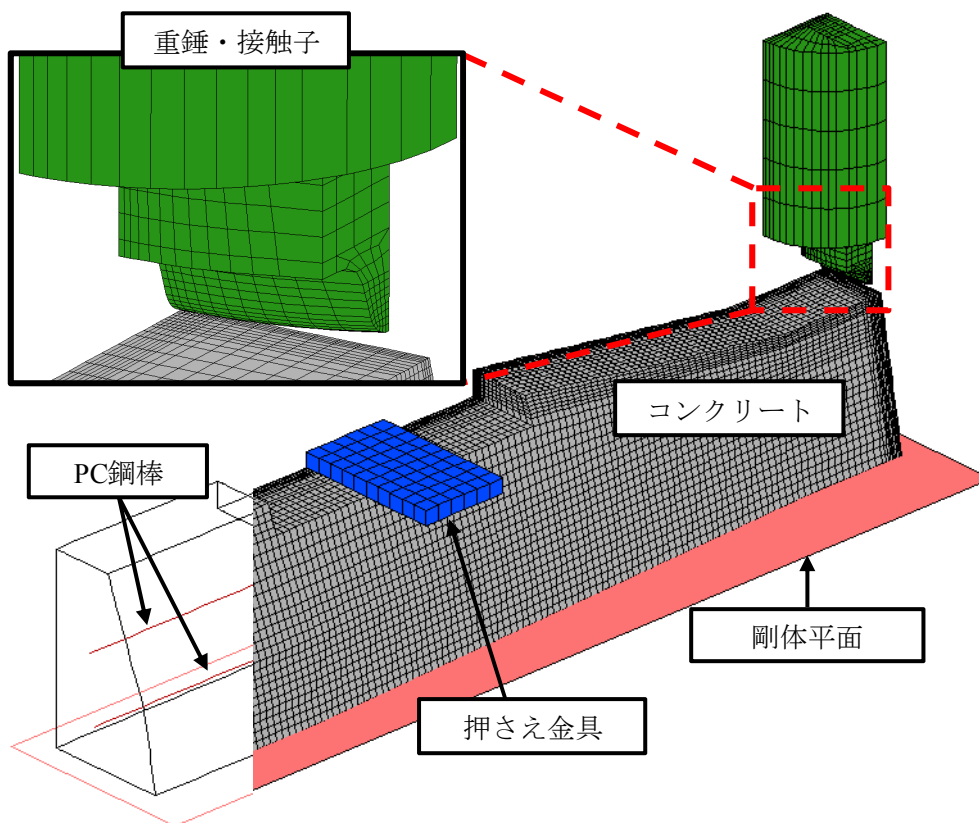


図 3-13 数値解析モデル (1/4 モデル)

3. 3 数値解析による検討

3.3.1 数値解析方法

数値解析による検討には、陽解法に基づく非線形構造解析用汎用解析コード LS-DYNA (ver.971)³⁻⁷⁾を用いた。

(1) 数値解析モデル

図 3-13 に数値解析モデルを示す。本解析モデルは、PC まくらぎを構成するコンクリート及び PC 鋼棒、さらに重錘、跳ね上がり防止用の押さえ金具、PC まくらぎ底面に配置された剛体平面からなる。PC まくらぎ及び接触子はそれぞれ図 3-1、図 3-2 に示す形状寸法を再現したモデルとなっている。また、コンクリート要素、重錘要素、押さえ金具要素は 8 節点固体要素で、PC 鋼棒は梁要素を用いてモデル化を行った。要素積分点に関しては固体要素が 1 点積分、梁要素が 4 点積分である。

要素分割に関しては、解析時間の短縮を図るため、構造の対称性を考慮した 1/4 モデルとし、載荷点近傍のメッシュサイズを他の部分よりも細かくした。本解析モデルの総節点数は 67873、総要素数は 60990 である。

境界条件に関しては、モデルの対称境界は面対称、重錘要素は鉛直方向以外の自由度を拘束した。押さえ金具要素に関しては剛体として空間に固定した。また、各構成要素間には面と面との接触を定義しており、リバウンドを表現可能なモデルとなっている。この時、各接触要素間の摩

擦については考慮していない。コンクリート要素とPC鋼棒要素の節点については完全付着を仮定した。

本解析は、重錘がPCまくらぎに衝突した時点から開始するものとし、解析パラメータである重錘の落下高さに関しては、エネルギー的に等価な衝突速度に置き換えて、あらかじめ衝突位置に配置した重錘要素の全節点に初速度として与えた。ここで、実験では漸増载荷と単一载荷における衝撃力の差を確認できなかったため、载荷条件による影響は小さいものと判断し、解析では単一载荷条件とした。解析時間は、重錘がPCまくらぎと衝突した後に跳ね上がり、完全に非接触となる5msec間とした。減衰については考慮していない。

(2) 材料物性モデル

表3-3に本解析で用いた材料定数の一覧を示す。また、図3-14に本解析で用いた材料モデルを示す。

図3-14(a)にコンクリート要素に関する相当応力 σ -相当ひずみ ε の関係を示す。圧縮側に関しては、圧縮強度 f'_c を降伏応力とする完全弾塑性のバイリニア型とし、引張側に関しては、引張強度 f_t に達した段階で引張力を伝達しないカットオフモデルとした。ここでの引張強度は圧縮強度の1/10と仮定した³⁻⁶⁾。

図3-14(b)にPC鋼棒要素に関する相当応力 σ -相当ひずみ ε の関係を示す。PC鋼棒要素に関しては、塑性硬化係数 H を弾性係数 E_s の1/100とするバイリニア型の等方弾塑性体とした。

重錘要素に関しては、実験時終了時に変形が見られなかったことから、弾性体としてモデル化した。また、重錘要素の密度は、重錘質量71.1kgを重錘要素の総体積で除した値とした。

なお、コンクリート要素及びPC鋼棒要素の降伏条件は、von Misesの降伏条件に従うものとした。また、ひずみ速度効果の影響については、本実験の範囲内では解析結果の応答性状に与える影響は小さいと判断し、本解析では考慮していない。

表 3-3 本解析で用いた材料定数一覧

材料	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
コンクリート	2.39	38.4	0.167
PC 鋼棒	7.85	205.0	0.300
重錘	8.38	205.0	0.300
押さえ金具	7.85	205.0	0.300

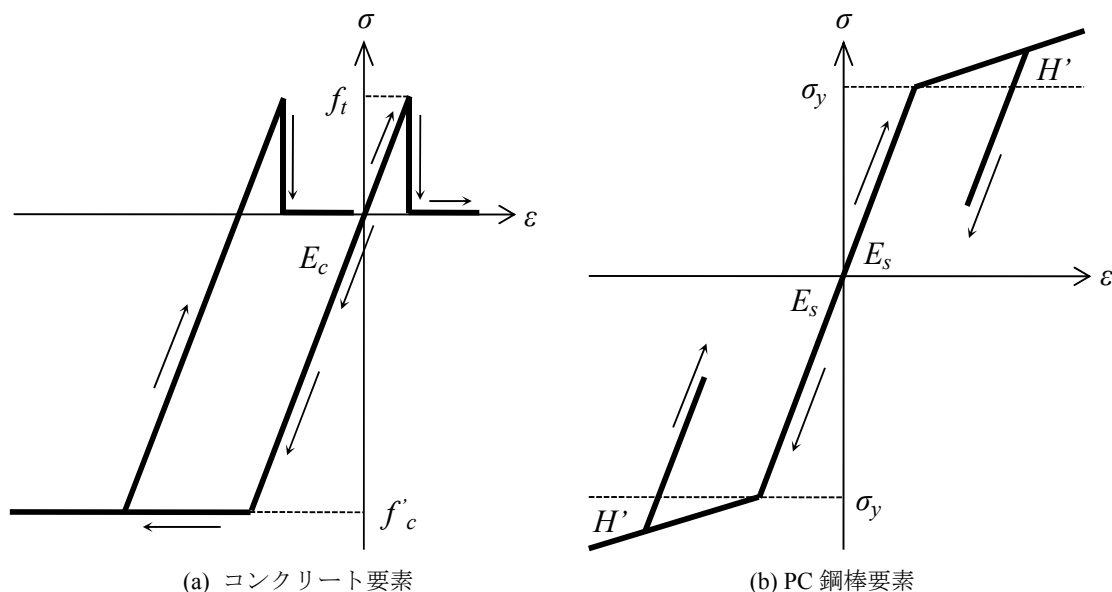


図 3-14 本解析で用いた材料モデル

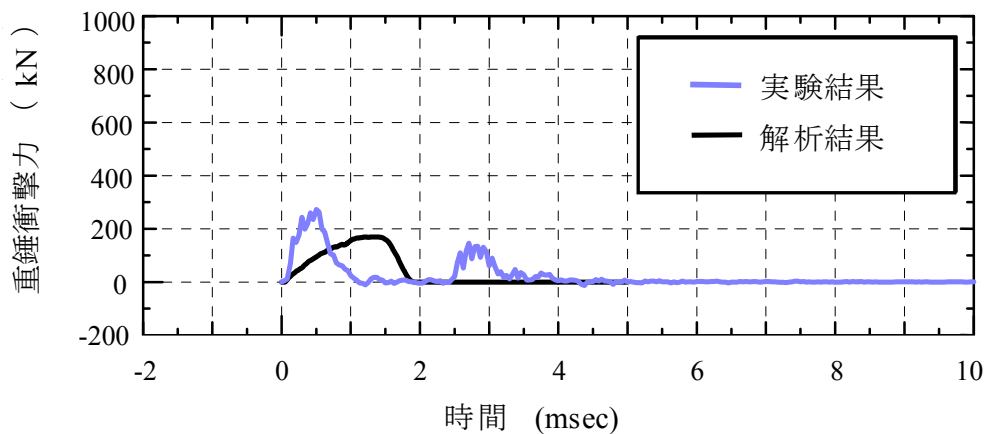
3.3.2 数値解析結果

(1) 実験結果と解析結果の比較

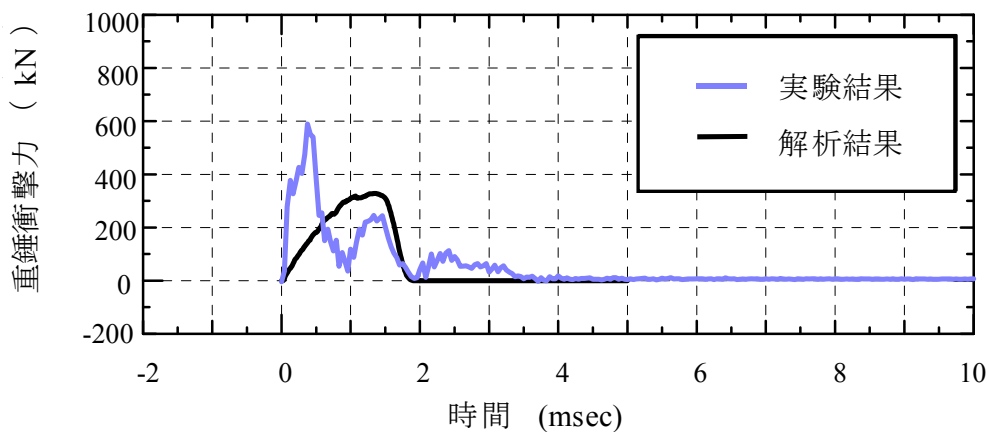
図 3-15 に重錘衝撃力波形の例を、実験結果と解析結果を比較する形で示している。縦軸には重錘衝撃力値を、横軸には時間を重錘衝突時点を零として整理している。図より、実験結果の衝撃力波形は重錘衝突開始後に鋭く立ち上がり、継続時間が 1msec 前後の正弦半波波形が 2 波もしくは 3 波励起していることが確認できる。また、落下高さが増すにつれて、1 波目以降の波の発生時間が早くなり、落下高さが 1000mm の場合においては、1 波目の成分が零になる前に 2 波目が発生している。これら 1 波目以降の成分については、まくらぎ製造時の仕上げ等に起因する底面の凹凸の影響により生じたものである。この凹凸により、まくらぎと反力床の間に若干の隙間が生じ、この隙間の存在により重錘衝突時に一瞬まくらぎがたわみ、鉛直下向きの加速度を持ち続けた重錘と再衝突することで 2 波目、3 波目が立ち上がる。そこで、実験結果の衝撃力波形に関しては 1 波目だけに着目することとする。

一方、解析結果はまくらぎ底面の凹凸の影響を加味していないため、正弦半波波形が 1 波のみ生じている。この波形は実験結果に比べて衝撃力の立ち上がりが鈍く、それに伴い最大重錘衝撃力発生時間も遅くなっていることが確認できる。また、衝撃力継続時間も約 1.8msec と実験結果に比べ 2 倍程度長くなっている。

図 3-16 には最大重錘衝撃力と落下高さの関係を示している。図より、落下高さが大きくなるにつれて最大重錘衝撃力が増加する傾向は、実験結果と解析結果は同様であるが、各落下高さの最大重錘衝撃力に関しては、解析結果は実験結果の約半分程度であることが分かる。即ち、本解析結果は、車輪と PC まくらぎ間で発生する接触力に関しては十分に再現できたとは言いがたい。



(a) 落下高さ 250mm



(b) 落下高さ 1000mm

図 3-15 重錘衝撃力波形の例

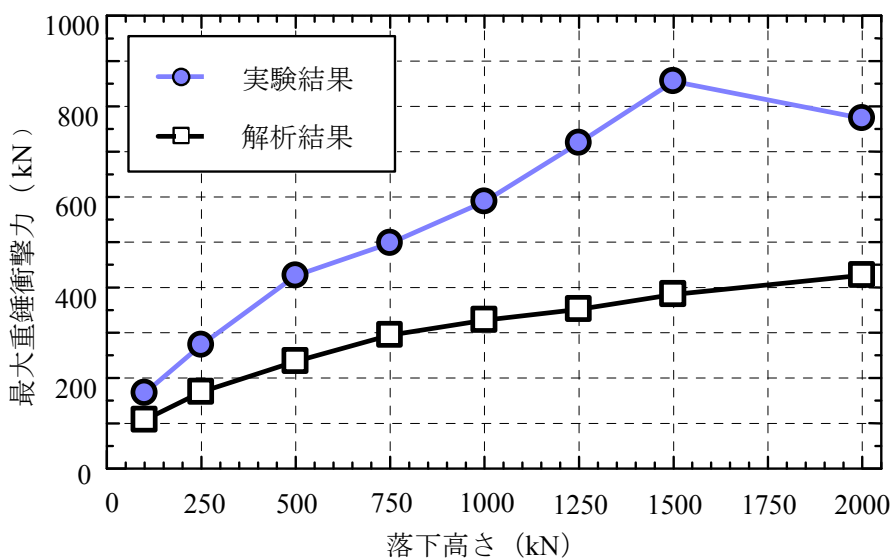


図 3-16 最大重錘衝撃力と落下高さの関係

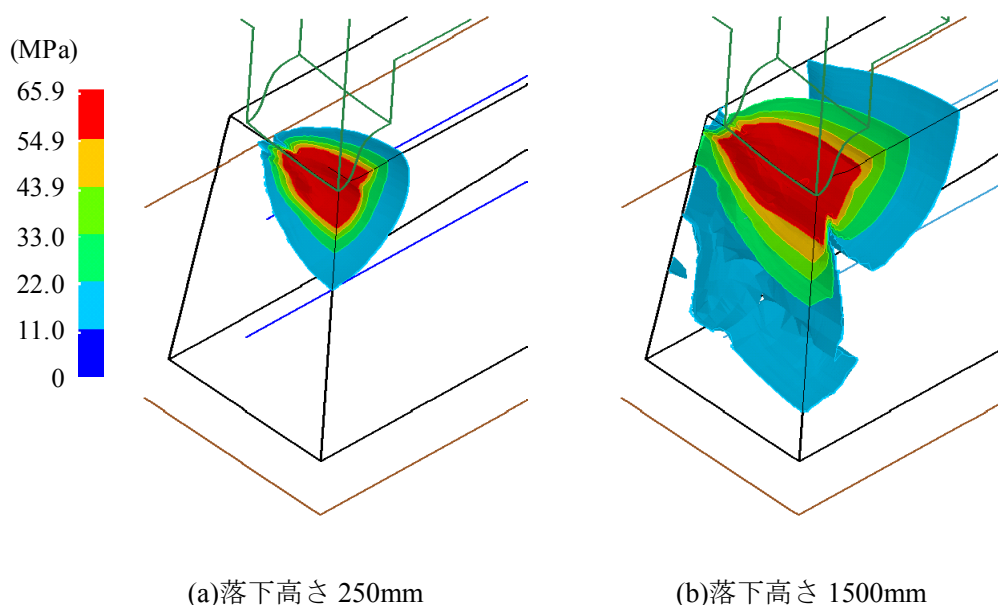


図 3-17 コンクリート要素の相当応力のコンター図

(2) 解析精度向上策の検討

(a) 実験結果と解析結果の差異についての考察

ここではまず、前節の実験結果と解析結果の差異について考察を行う。図 3-17 に落下高さ 250mm 及び 1000mm の場合における、コンクリート要素の相当応力のコンター図を示す。本コンター図は、各落下高さにおいて最大衝撃力が生じる約 1.3msec 時の表示であり、コンター図で赤く囲まれている箇所は、その要素が圧縮強度に達して降伏したか、その付近まで応力が上昇している範囲を示している。この図から、重錘の落下高さが増しても、鉛直方向（重錘の落下方向）には降伏応力付近まで応力が上昇した要素の範囲はほとんど広がっておらず、接触子に沿ってまくらぎ直角方向に広がっている様子のみが確認できる。これは、载荷点近傍の要素のみが圧縮力を受けて変形し続け、まくらぎ全体として重錘衝撃力に抵抗できていない可能性があることを示している。

そこで上記を、前節の PC まくらぎの静的実験と照らし合わせ確認する。図 3-18 に静的実験で得られた荷重と変位の関係を示す。横軸の変位は、接触子がまくらぎ上面に接した時点を零としており、この変位はそのまま接触子がまくらぎに食い込んだ量と置き換えることができる。また、縦軸の荷重は、接触子をまくらぎに押し付けた際の反力を、ロードセルによって測定したものである。さらに、この図には解析結果も併せて示している。この解析は、衝撃解析と同様の解析モデル・材料物性モデルを用いて、重錘の全節点に与えていた初速度の代わりに、重錘上部の全節点に強制変位を与えて実施したものである。荷重は強制変位を与えた重錘上部の全節点の鉛直反力を合計して算出した。

この図より、実験結果については、変位が増加するにつれて荷重が二次関数的に増加していることが分かる。一方、解析結果については、载荷開始～1.5mm 程度までは実験結果とほぼ同等の勾配を有しているが、その後の変位に対する荷重増加割合が実験結果に比べて小さく、荷重と変位の関係が線形関係にある。これは前述したように、本解析モデルにおいては、早い段階で载荷点近傍のコンクリート要素の応力が圧縮強度に達して、荷重に対して抵抗できないためであると

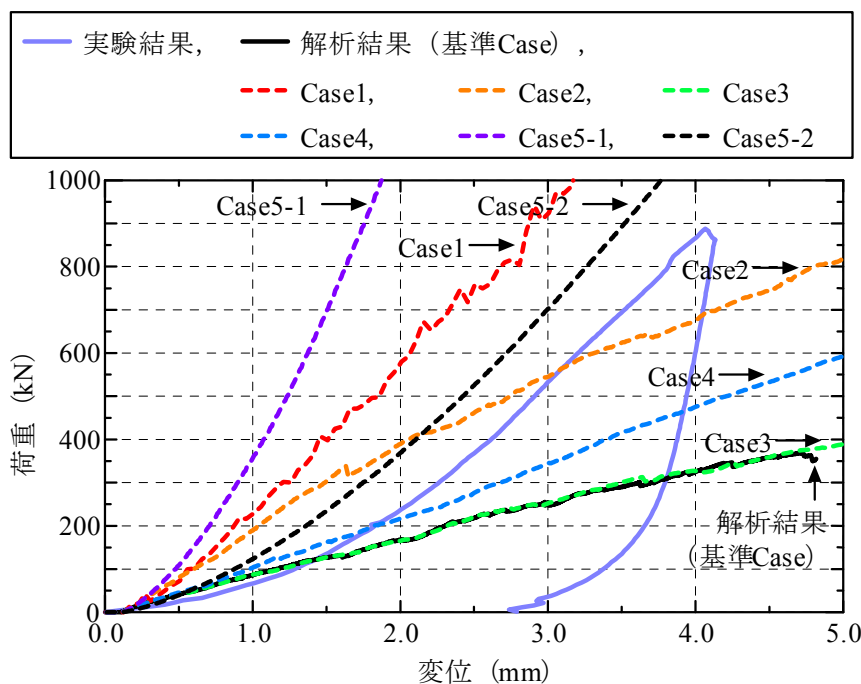


図 3-18 静的実験における荷重と変位の関係

考えられる。また、荷重が線形的に増加するのは、変位が増加するにつれて接触子がまくらぎに接触する面積が増加するためである。

(b) 各種材料物性モデルによる検討

前記の考察により、本解析で用いたコンクリート要素の材料物性モデルでは、本実験のように圧縮場が卓越する場合の衝撃力波形及び荷重－変位関係を表現することは難しいと考えられる。しかしながら、本解析で用いたコンクリート要素の材料物性モデルを変更し、静的実験の荷重－変位関係を表現可能な材料物性モデルとした場合には、衝撃実験における衝撃力波形の再現も可能になると思われる。よって、ここでは、静的実験の荷重－変位関係を表現可能なコンクリート要素の材料物性モデルについて検討するために、降伏条件式や材料構成則、材料定数が解析結果に与える影響を検討した。

検討を実施した項目を表 3-4 にまとめて示す。基準 Case はこれまで使用した表 3-3 及び図 3-14 に示す材料物性モデル、Case1 は降伏条件式を von Mises 型からコンクリートに対して用いられることが多い Drucker-Prager 型に変更したもの、Case2～Case4 は図 3-19(a)に示すように、材料定数及び材料構成則の影響を検討したもの、さらに参考として Case5-1 は図 3-19(b)に示すように、コンクリート要素を弾性体としたもの、Case5-2 は Case5-1 に対して弾性係数の影響を検討したものである。

図 3-18 に各検討 Case による解析結果を示している。図より、Case1～Case4 については傾きが変化しているものの、基準 Case と同様に荷重－変位関係が線形関係にあることが分かる。また、引張強度の影響を検討した Case3 については基準 Case と大差は見られない。次に、コンクリート要素を弾性体とした Case5 については、その他のケースとは異なり、荷重が変位に対して二次関数的に増加していることが確認できる。さらに、弾性係数の影響を検討した Case5-2 については、

表 3-4 検討材料物性モデル一覧

検討ケース	【変更点】（上段） 詳細（下段）
基準 Case	【これまでの材料物性モデル】 表 3-3, 図 3-5 (a)
Case1	【降伏条件式】 Von Mises → Drucker-Prager
Case2	【圧縮強度】 65.9MPa → 197.7MPa (3 倍)
Case3	【引張強度】 6.59MPa → 65.9MPa (10 倍)
Case4	【圧縮側降伏後の履歴】 完全弾塑性 → 降伏後 E/100 で硬化
Case5-1	【弾性体】 塑性化を考慮しない弾性体モデル
Case5-2	【弾性係数】 Case5-1 の弾性係数を E → E/4

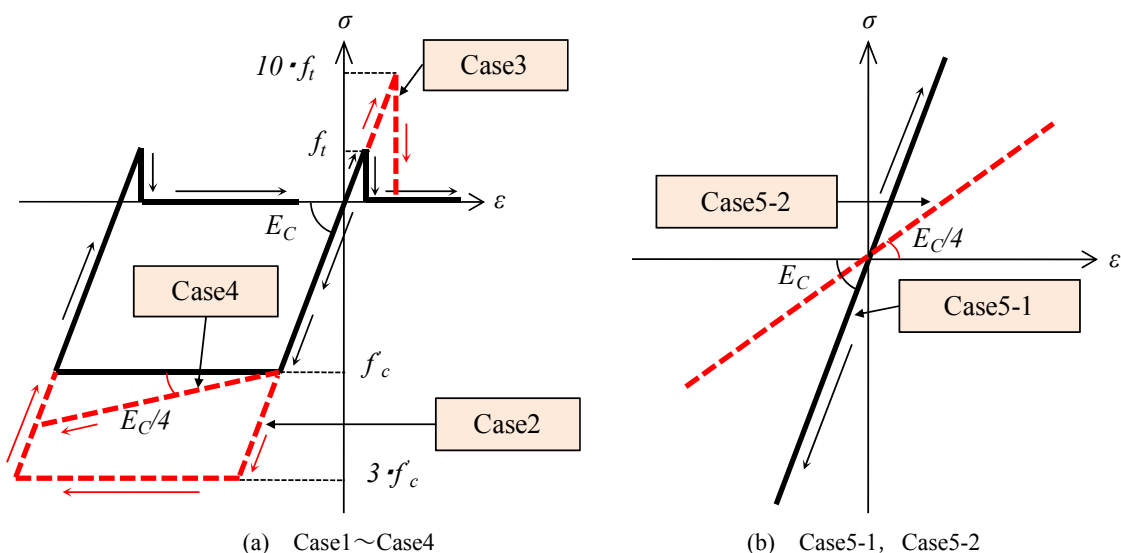
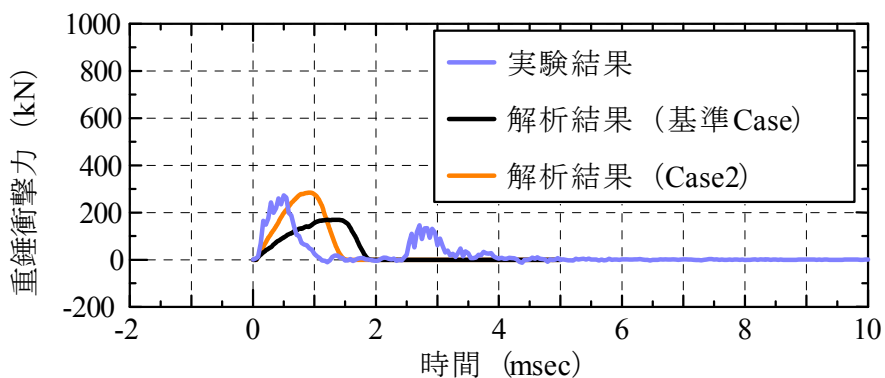


図 3-19 検討材料物性モデルの概念図

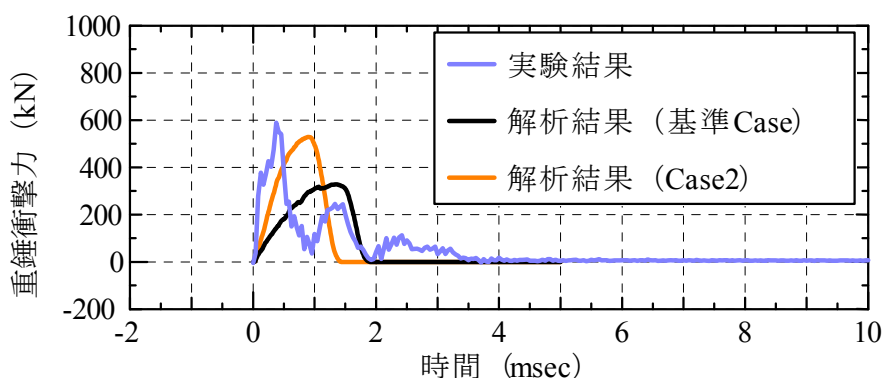
実験結果に近い荷重-変位関係を有していることが分かる。

以上より、荷重-変位関係に影響を与える支配的要因が圧縮強度（降伏条件式を含む）、弾性係数、又は両者の複合であることが予想される。本解析で使用したこれらの材料定数は、円柱供試体の一軸圧縮試験により求めた値であり、本実験のように圧縮場が卓越し、かつ、接触子とまくらぎが局所的に接触する場合は、材料試験により得られた圧縮強度と弾性係数をそのまま解析に使用できない可能性がある。この点については、現在明確な知見が得られていないため、今後の課題としたい。

上記の検討結果を踏まえ、図 3-20、図 3-21 にコンクリートの圧縮強度を 3 倍にした材料物性モデルである Case2 を用いて、再度、衝撃実験の数値シミュレーションを実施した結果を示す。



(a) 落下高さ 250mm



(a) 落下高さ 1000mm

図 3-20 実験結果と材料物性モデルを変更した解析結果の重錘衝撃力波形の比較

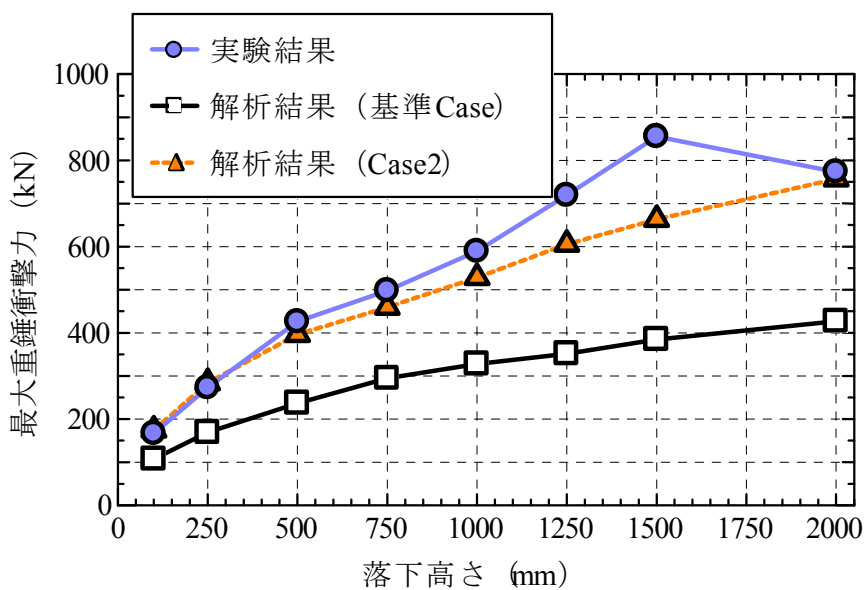


図 3-21 最大重錘衝撃力と落下高さの関係

ここでは、材料物性モデルを弾性体とした場合、重錘衝突時のまくらぎの塑性変形等を算出することができないことから本研究では除外し、静的実験の最大変位である約 4mm 時に発生した荷重に最も近く、かつ、圧縮強度という 1 つのパラメータを変更するのみで簡易に材料物性モデルを変更可能であることから Case2 を選択した。

この図より、衝撃力波形に関しては、荷重の立ち上がり及び衝撃力継続時間が改善され、実験結果に近づいていることが確認できる。また、最大重錘衝撃力に関しても、各落下高さについてもある程度実験結果を再現できていることが分かる。

3. 4 本章の結論

本章では、地震時に脱線した車輪とまくらぎの間で生じる接触力に関して、車輪形状を模擬した接触子を用いた、まくらぎの静的及び衝撃実験を実施し、載荷位置ごとの最大荷重および破壊モードを明らかにするとともに、MBS モデルに導入可能な車輪とまくらぎ間の接触剛性について評価した。また、衝撃実験に関する数値シミュレーションを実施することで、車輪とまくらぎ間で発生する接触力を精度よく表現可能な解析手法について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 最大荷重に関して、載荷位置における静的最大荷重に対する衝撃最大荷重の比は、まくらぎ長手方向 125mm 位置（端部）での載荷を除けば 0.73~1.25 倍であり、静的及び衝撃最大荷重はほぼ同程度であった。
- (2) 破壊モードに関して、まくらぎ直角方向の載荷位置によって破壊モードが異なる結果となった。まくらぎ直角方向中央部に載荷した場合は、載荷部のコンクリートの圧壊及び下面から上面に向かうひび割れが発生する曲げ破壊であったのに対し、端部に載荷した場合は、側面が剥がれるような破壊モードであった。また、まくらぎ長手方向端部に載荷した場合は、直角方向の載荷位置に関わらず、載荷位置から長手方向端部に向かう大きなひび割れを生じるせん断破壊であった。静的及び衝撃載荷での破壊モードはほぼ同様であった。
- (3) 接触剛性に関して、本実験では、静的載荷に対する衝撃載荷の接触剛性の比が、まくらぎ直角方向中央部載荷の場合で 4.7 倍、端部載荷で 2.7 倍となった。また、まくらぎ直角方向の載荷位置に関しても、端部載荷に対する中央部載荷の接触剛性が、衝撃載荷の場合で 6.3 倍となり、載荷位置に関しても異なる値となった。今回の実験により算出された接触剛性は厳密なものとは言えないが、MBS 解析を行う際に要求される接触剛性の精度はオーダーレベルであるため、本実験により MBS 解析を実施するための一定のオーダーは示されたものと考えられる。
- (4) 本数値解析により得られた重錘衝撃力波形は、実験結果と比べて最大衝撃力は約半分程度小さく、衝撃力継続時間は 2 倍程度長くなる結果となった。
- (5) 実験と解析の差異を考察した結果、本解析に用いた材料物性モデルでは載荷点近傍の要素のみが降伏し、まくらぎ全体として荷重に抵抗できていない可能性があることが分かった。
- (6) 静的実験の荷重-変位関係と比較する形で解析モデルの各種材料物性モデルの影響について

検討した結果，コンクリートの圧縮強度を簡易に3倍にすることで，重錘衝撃力波形をある程度再現可能であることが分かった．

参考文献

- 3-1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006.
- 3-2) 土木学会・第二次調査団：平成16年新潟県中越地震 社会基盤システムの被害等に関する総合調査「調査結果と研究提言」，I 報告・提言編，2004.
- 3-3) 浅沼 潔，曾我部正道，渡辺 勉，岡山準也，涌井 一：逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.2，2009.
- 3-4) 曾我部正道，浅沼 潔，涌井 一：地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発，鉄道力学論文集，No.11，pp.69-74，2007.
- 3-5) Brabie, D.: Wheel-Sleeper Impact Model in Rail Vehicles Analysis, Journal of System Design and Dynamics, Vol.1, No.3, pp.468-480, 2007.
- 3-6) 土木学会構造工学委員会 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：衝撃実験・解析の基礎と応用，丸善，2004.
- 3-7) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.

第4章 鉄道車輪と走行案内路の接触力

4.1 本章の概要

大規模地震動による鉄道車両の脱線を想定し、その際の被害の最小化を図るために⁴⁻¹⁾、脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱させないための各種逸脱防止装置の開発が進められている。本章はこの内、脱線後の走行案内路に相当する部分について検討したものである。走行案内路は、脱線後の車両の走行を想定し、転覆等の二次被害を引き起こすことなく、分岐器等の施設を通過させる目的で提案されているものである。

図4-1に本構造の概略図を示す。同図に示すように、走行案内路のうち、締結装置部分は箱抜き構造となっており、さらに車両の走行が可能となるように、一部スロープ構造を有する。この走行案内路は、耐衝撃性能、加工性、維持管理性、及び経済性等を考慮し、超高強度繊維補強コンクリート⁴⁻²⁾の一種であるダクタル (Ductal) により構築することが検討されている。ダクタルに関しては既に、爆風や高速飛翔体による耐衝撃・吸収性能に関する報告がなされているが⁴⁻³⁾、地震動により生じる鉄道車両のロッキング振動に伴い車輪がレールから脱輪・落下する挙動は、走行案内路に相当に高い衝撃力を与えることが予想されるため、適切な耐力設計が必要となる。

加えて、逸脱防止装置を用いる場合、その逸脱防止性能を明らかにする必要がある。こうした検討は通常、Multi Body System (以下MBSという) モデルが用いられる⁴⁻⁴⁾。この過程で重要となるのが、各構成要素の接触力の評価、とりわけ車輪と軌道部材等との接触モデルである。理想的には、両者を非線形の有限要素 (Finite Element, 以下FEという) モデルとし、接触力を厳密に評価するのがよいが、計算機能力の面から実用的ではない。従って、実務では、要素実験や部分FEモデルに基づき、ペナルティ関数法など簡易なマクロモデルを構築し、これをMBSに組み込み、現象解明や性能設計を実施するのが一般的である⁴⁻⁵⁾。

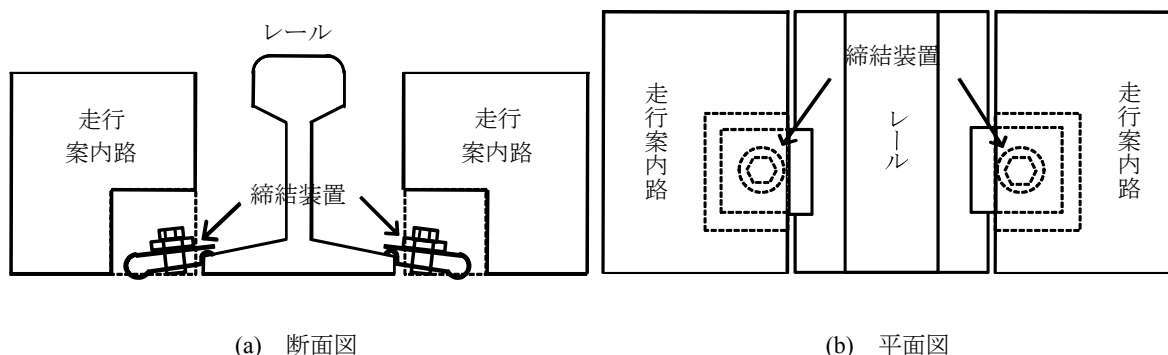


図4-1 走行案内路の概略図

以上より本章では、研究の目的を次のように定めた。

- (1) 地震時に車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、走行案内路の供試体及び車輪形状を模擬した接触子を作成し、走行案内路の耐力を静的及び衝撃実験により評価する。
- (2) 上記実験より、MBSモデルに導入可能な走行案内路と車輪間の接触剛性を評価する。
- (3) 上記実験の一部について数値解析により検証を行う。

4.2 模型実験による検討

4.2.1 実験方法

(1) 供試体及び接触子

図4-2に走行案内路の供試体概要を、表4-1に供試体の材料諸元を示す。供試体に混入した補強

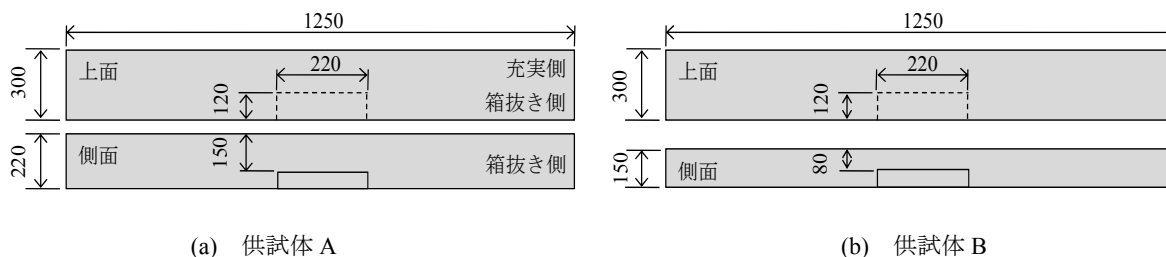


図4-2 供試体概要（単位：mm）

表4-1 供試体の材料諸元

弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
50.7	196	10.6

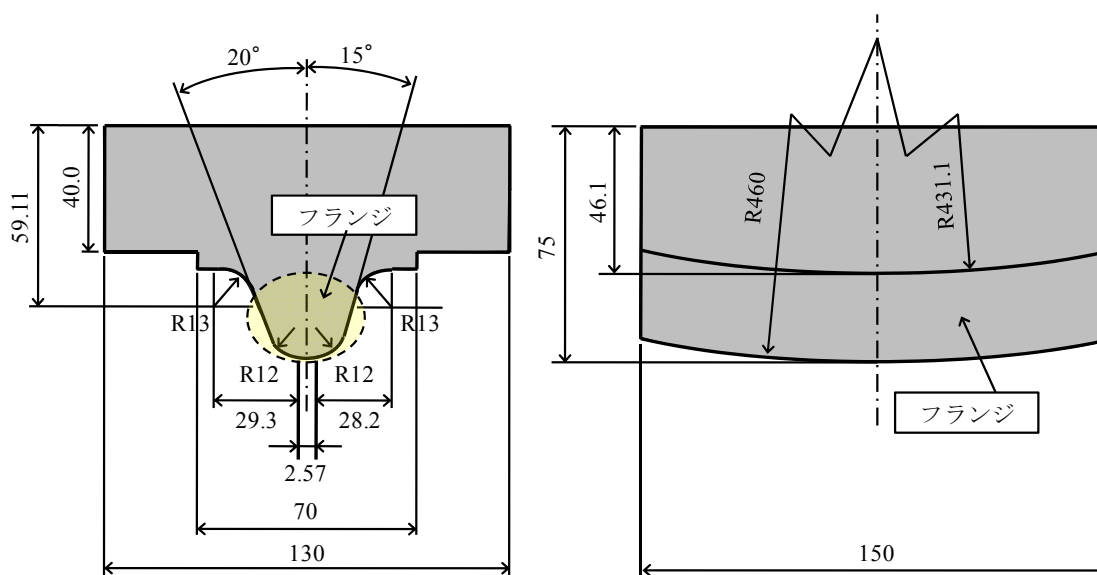


図4-3 接触子の形状寸法（単位：mm）

用繊維は、引張強度2700N/mm²、繊維径0.2mm、長さ15mmの鋼繊維である。本研究では、縮結装置用の箱抜き部天板厚さが150mm（高さ220mm）である標準の供試体をA、線路方向に縦断勾配を設けた場合の漸減する高さを考慮するとともに、箱抜き部天板厚さによる破壊モードを確認するために設定した天板厚さ80mm（高さ150mm）の供試体をBとした。静的実験で用いた供試体をA1, B1、衝撃実験で用いた供試体をA2, B2と区別し、それぞれ一体ずつ用意した。

図4-3に接触子の形状寸法を示す。接触力は接触要素形状に依存するため、新幹線用円弧踏面形状に基づく車輪フランジを模擬した接触子（材質：S45C）を作成し、これを用いて静的及び衝撃実験を行った。

(2) 静的実験

図4-4に静的実験概要図を、図4-5に実験状況を示す。供試体は貫通させた4本の鋼棒により固定しており、油圧ジャッキを用いて単調に鉛直载荷した。荷重測定はロードセルで行い、変位測定は2つのレーザー変位計を用いて行った。変位測定位置は、载荷部裏側の箱抜き部上面中央及び接触子の食込み量計測用にロードセルに取り付けたターゲットとした。この2点から測定された変位量の差を、供試体に接触子が食込んだ量とした。ロードセル先端には、前述の新幹線用の車輪フランジを模擬した接触子を取り付けた。

図4-6に载荷位置説明図を示す。载荷位置は、供試体A1に関しては、接触子フランジ方向と供試体長手方向を平行に設置し、箱抜き側縁端から10mm, 35mm, 反対側の充実側縁端からは25mm, 90mm, 50mmの順に载荷を実施した。また、供試体B1に関しては、供試体A1の载荷方向と同様に平行の場合、その他に、直角に設置した場合の2ケースを実施した。平行に設置した場合は、供試体（箱抜き部の天板の厚さ）の違いによる評価を行うために、供試体A1と同様に箱抜き側から35mmの位置に、直角に設置した場合は、フランジ中央が充実側端部に接触するように载荷を実施した。この直角方向の载荷は、走行案内路を線路方向に連続して設置した場合に、一定間隔で存在する施工目地を想定したものである。

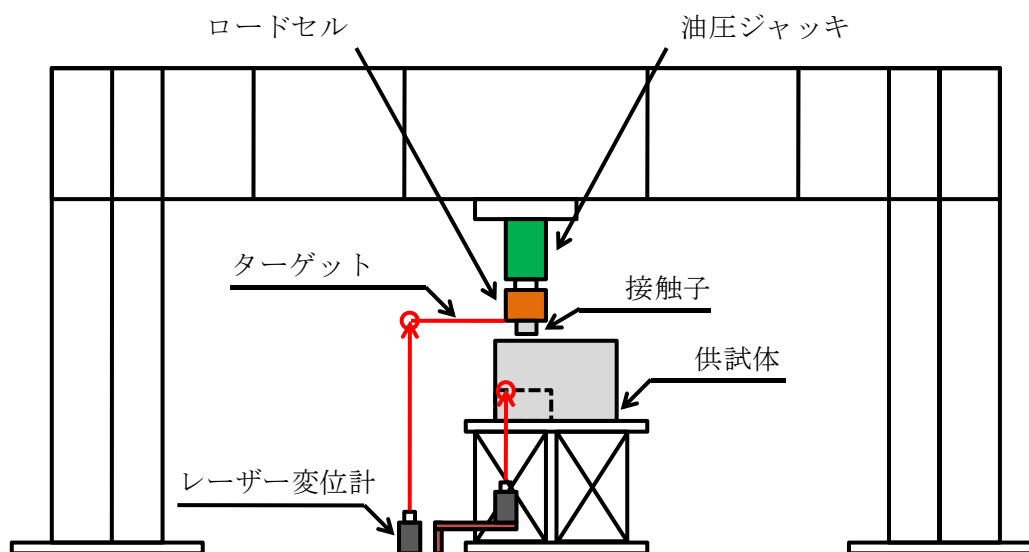


図 4-4 静的実験概要図



図 4-5 静的実験状況

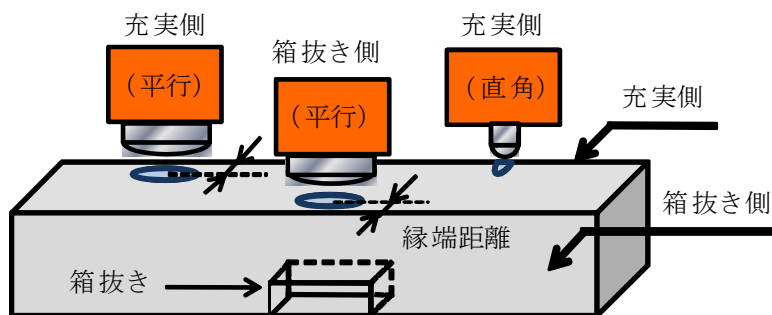


図 4-6 荷重位置説明図

本静的実験においては、同一供試体を用い、荷重位置を変えて実験を行っているため多少なりとも荷重履歴の影響が考えられる。しかし、各荷重における最終的な破壊面及び発生したひび割れが繋がっていなかったこと、また、図4-7に示すように、荷重と荷重面変位の関係においても初期勾配がほとんど変化していないことが確認できたため、荷重履歴の影響については考慮しないこととした。

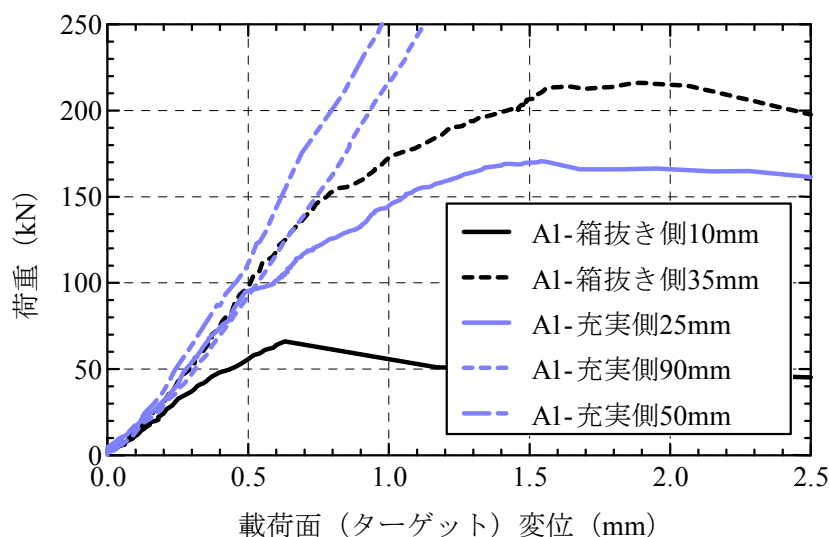


図4-7 荷重と載荷面変位の関係

(3) 衝撃実験

図4-8に衝撃実験概要図を、図4-9に実験状況を示す。本載荷実験では、重錘（直径20cm，高さ25cm）に静的実験と同様の接触子を取り付けて載荷を行った。

接触子を取り付けた状態での重錘質量は71.1kgであった。この重錘質量に関しては、特に実際の車輪質量等を想定してはいない。また、重錘は載荷実験装置に取り付けてあるガイドレールに沿って自由落下させた。

落下位置及び落下高さに関しては、接触子フランジ方向と供試体長手方向を平行にし、供試体A2の場合は、落下高さ250mm，250mm，500mm，500mm，750mm，1000mmの計6ケースを繰り返し載荷した。供試体B2の場合は、落下高さ100mm，250mm，500mm，750mm，1000mm，1500mm，2000mmの計7ケースを繰り返し載荷した。落下位置に関しては、静的実験との比較を行うことができるように、どちらの供試体の場合も箱抜き側縁端から35mmの位置を重錘の落下位置とした。

衝撃力は、加速度計出力に重錘質量を乗じて算出した。加速度計は、1000G 対応の RION 社の PV94 を用い、サンプリング周波数は 10240Hz とした。

供試体の固定方法は静的実験と同様であるが、供試体の下には防振材を敷設した。供試体の下に防振材を敷設した場合、供試体全体の応答性状が変化する可能性があるが、走行案内路の実際の設置条件が決まっていないため、本実験においては応答を明確にする目的で防振材を敷設し、変形が生じ易い条件とした。用いた防振材はGetzner社のSYLODYN（材質：発泡ポリウレタン）である。

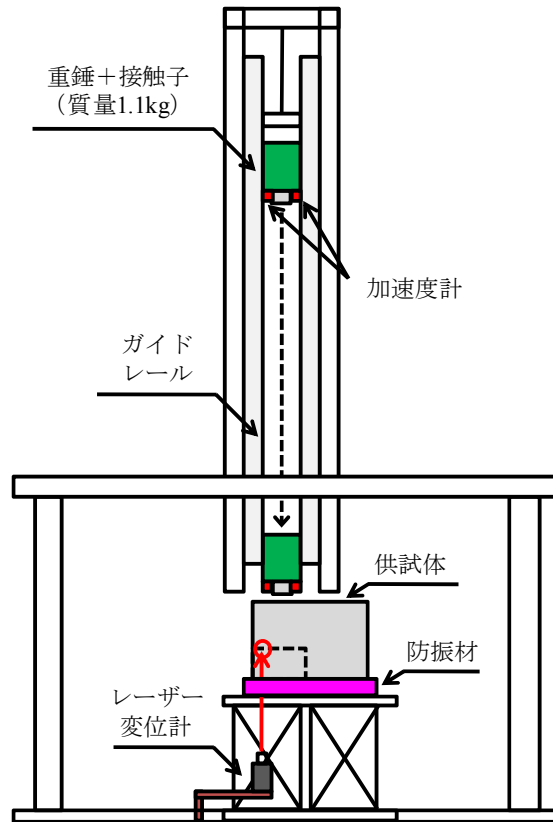


図 4-8 衝撃実験概要図



図 4-9 衝撃実験状況

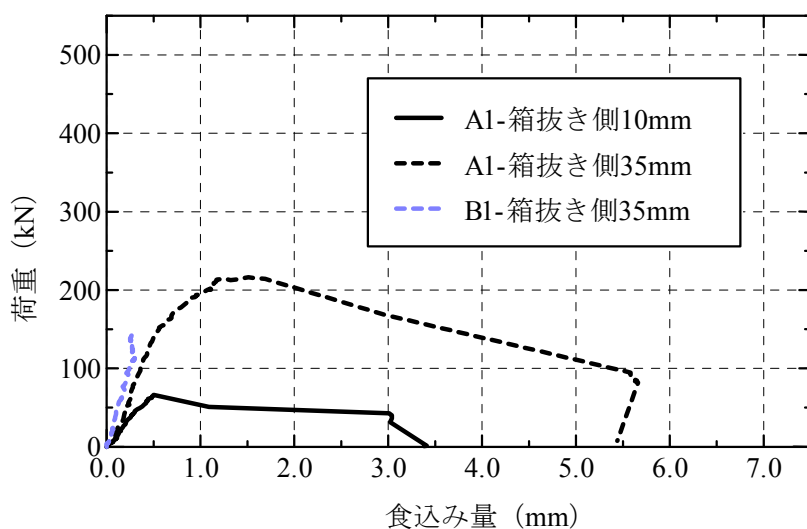


図 4-10 箱抜き側載荷での荷重と食込み量の関係

4.2.2 実験結果

(1) 静的実験

図 4-10 に、供試体 A1 の箱抜き側縁端から 10mm、35mm の位置、及び供試体 B1 の箱抜き側縁端から 35mm の位置での、荷重と接触子の食込み量の関係を示す。また、図 4-11 に載荷終了時の破壊状況を示す。

供試体 A1-箱抜き側 10mm の場合、66kN 程度で最大荷重となった。その後、鋼繊維補強の効果により 50kN ほどの荷重を維持したが、供試体側面がせり出すように半円弧状に破壊面を形成し、縁端破壊により荷重が大きく低下した。供試体 A1-箱抜き側 35mm の場合、約 216kN に達したところで最大荷重を記録した。その後、供試体 A1-箱抜き側 10mm の場合と同様に、鋼繊維補強の効果により緩やかに荷重が低下し、図 4-11(a)に示すように、接触子接触点中央から縁端まで大きな斜めひび割れが発生し、供試体 A1-箱抜き側 10mm の場合よりも大きな半円弧状の破壊面を形成し、縁端破壊により荷重が低下した。

供試体 B1-箱抜き側 35mm の場合、最大荷重が約 146kN となり供試体 A1-箱抜き側 35mm の場合と比べて 30%ほど最大荷重が低い値となった。ただし、図 4-11(b)に示すように、供試体 B1-箱抜き側 35mm は箱抜き部上部が押し抜かれた破壊形態となった。供試体側面には、載荷点位置から箱抜き部上縁まで斜めにひび割れが入り、また、箱抜き部上面の 3 辺にも大きなひび割れが発生し破壊面が形成された。

図 4-12 に供試体 A1 の充実側縁端から 25mm、50mm、90mm の位置での載荷結果を示す。それぞれの最大荷重は、25mm の場合が約 170kN、50mm の場合が約 492kN であった。いずれも半円弧状の破壊面を形成した。また、90mm の場合はロードセルの測定限界である 500kN を上回ったが、供試体には載荷点の凹み以外に変状が見られなかったため載荷を終了した。

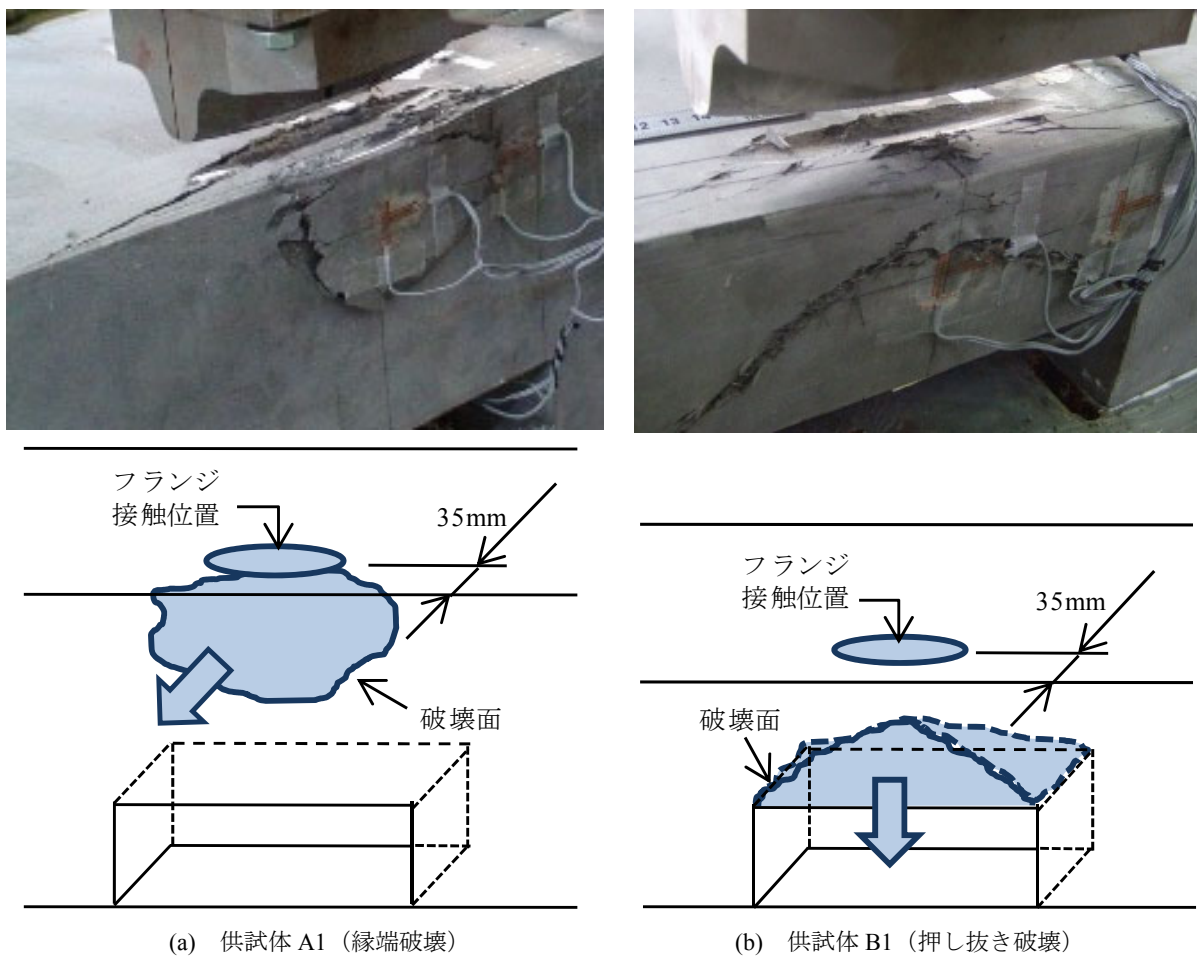


図 4-11 箱抜き側縁端から 35mm 荷重での破壊状況

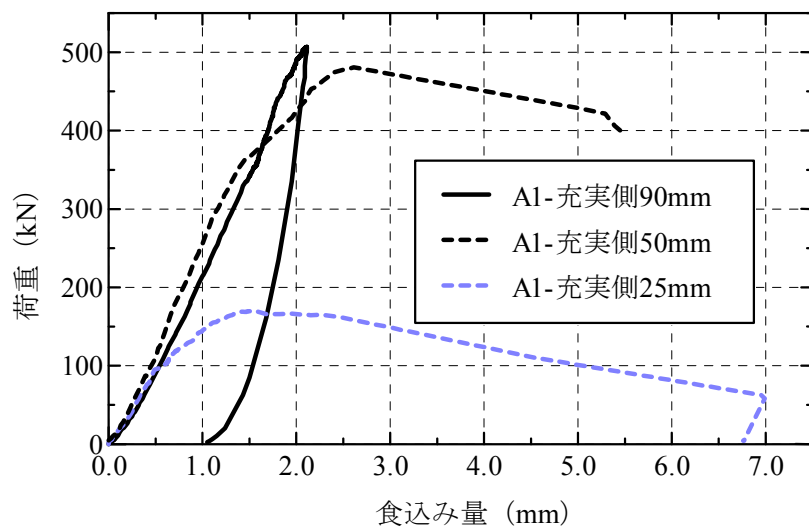


図 4-12 充実側荷重での荷重と食込み量の関係

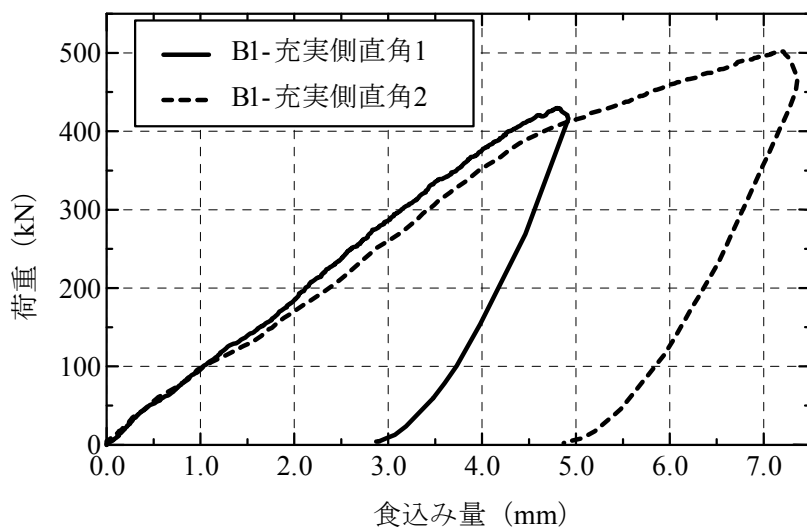


図4-13 充実側直角載荷での荷重と食込み量の関係

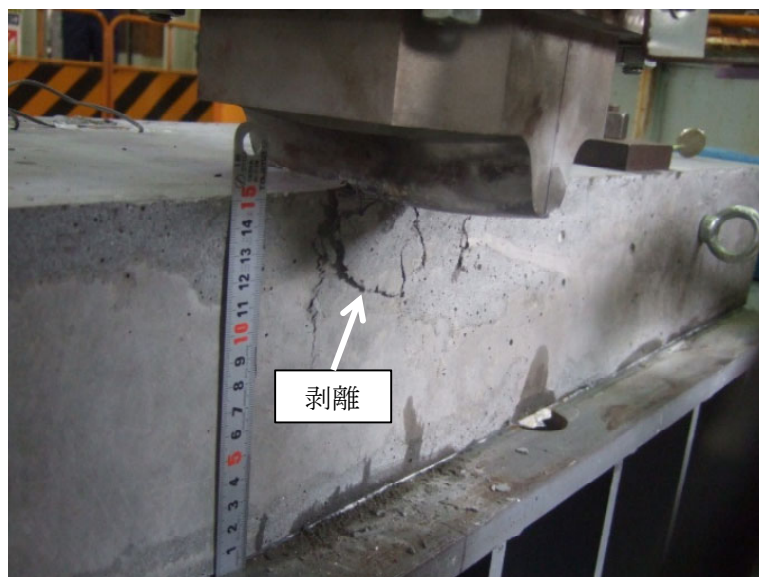


図4-14 充実側直角載荷での損傷状況

図4-13に供試体B1の充実側直角載荷の結果を示す。充実側直角載荷の場合、他の静的載荷結果と比べ接触子の食込み量に対する荷重の増分が少ない結果となった。これは端部載荷のために、供試体の変形が比較的許される条件であったためと考えられる。充実側直角載荷の場合も、供試体A1の充実側載荷と同様に測定限界に迫ったため載荷を終了した。損傷状況は図4-14に示すように、供試体縁端が多少剥がれるようなものであった。

(2) 衝撃実験

図4-15に供試体A2及び供試体B2の衝撃実験の最大衝撃力と落下高さの関係を示す。ここでの最大衝撃力は、2つの加速度計出力の平均値に重錘質量を乗じて算出した。また、図4-16に載荷終了時の損傷状況を示す。

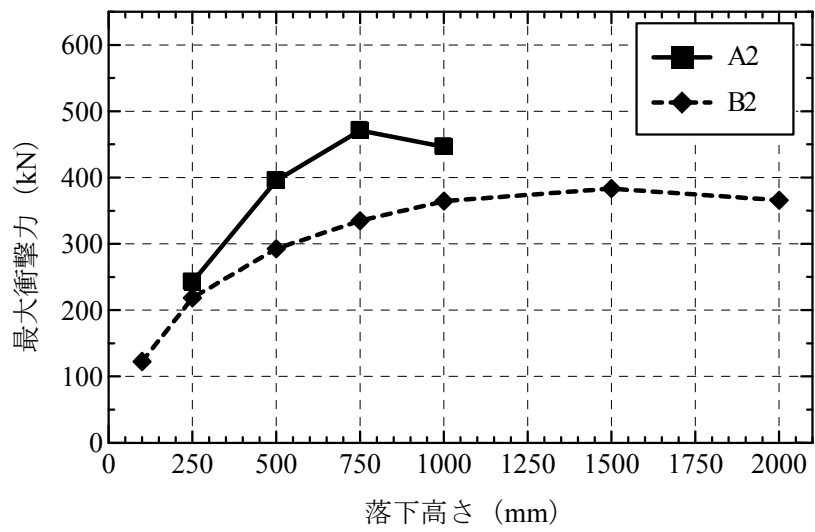
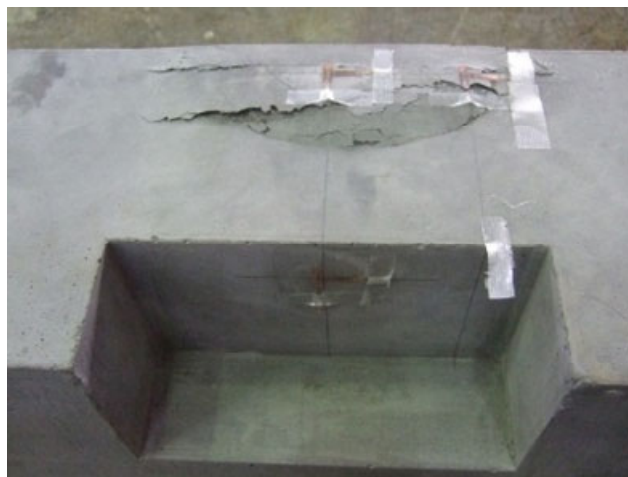


図 4-15 最大衝撃力と落下高さの関係



(a) 供試体 A2 (縁端破壊に似た損傷)



(b) 供試体 B2 (押し抜き破壊に似た損傷)

図 4-16 衝撃実験終了時の損傷状況

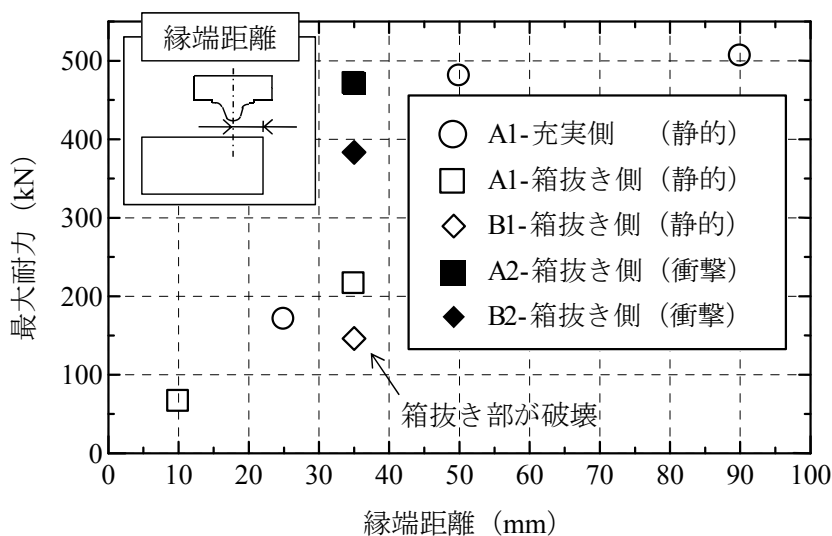


図 4-17 縁端距離（载荷位置）と耐荷力の関係

図 4-15 に示すように、供試体 A2 は落下高さ 750mm で、最大衝撃力 471kN を記録した。この時点で、静的実験で見られた半円弧状のひび割れが確認できた。落下高さ 1000mm では、衝撃力は 446kN に留まったが、ひび割れがさらに進展した。この損傷形態は図 4-16(a)に示すように、静的载荷である供試体 A1-箱抜き側 35mm の場合の縁端破壊と類似した損傷形態であった。

図 4-15 に示すように、供試体 B2 は落下高さ 1500mm で最大衝撃力 383kN を記録した。供試体上面には、载荷点位置から縁端まで斜めにひび割れが入り、供試体側面にも供試体上部から箱抜き部上部に至る大きな斜めひび割れを生じた。また、箱抜き部上面の载荷点直下位置にも供試体長手方向に縦断するひび割れが生じていた。この損傷形態は図 4-16(b)に示すように、静的载荷である供試体 B1-箱抜き側 35mm の場合の押し抜き破壊と類似した損傷形態であった。

(3) 耐力評価

図4-17に縁端距離（载荷位置）と最大耐力の関係を示す。図から、縁端距離が耐力に及ぼす影響を評価することができる。実際に車輪が位置する縁端距離の限界は、車輪と逸脱防止装置の遊間により定まるが、予想衝撃力と同図から求まる耐力を指標にすればその限界を設定することができる。静的実験の耐力と衝撃実験の耐力の間には2.5倍程度の開きがある。耐力は、実際には载荷速度に依存することとなるが、静的から数m/sec程度の载荷速度であれば本実験により包含されると見なし、実務上はより小さな値である静的実験の値を設計に用いれば安全側の評価になる。押し抜き破壊となった静的载荷の供試体B1-箱抜き側35mmと衝撃载荷の供試体B2-箱抜き側35mmは、同一条件の供試体Aに比べて耐力が低下する傾向となった。

図 4-18 に供試体の箱抜き部天板厚さと最大耐力の関係を示す。4.2.2.(1), 4.2.2.(2)で述べたように、供試体 A と供試体 B の間には明確な破壊モードの違いが存在した。その境界は 80mm から 150mm の間に存在すると考えられる。

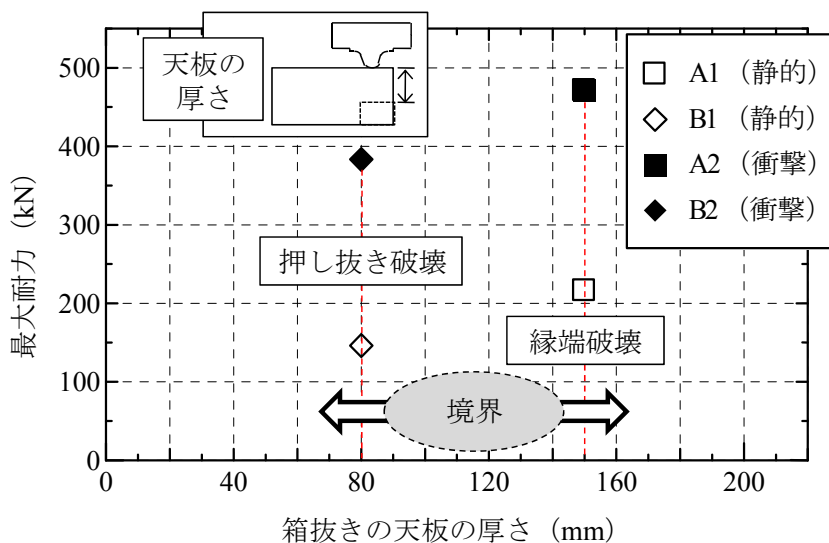


図4-18 箱抜き部天板厚さと最大耐力の関係

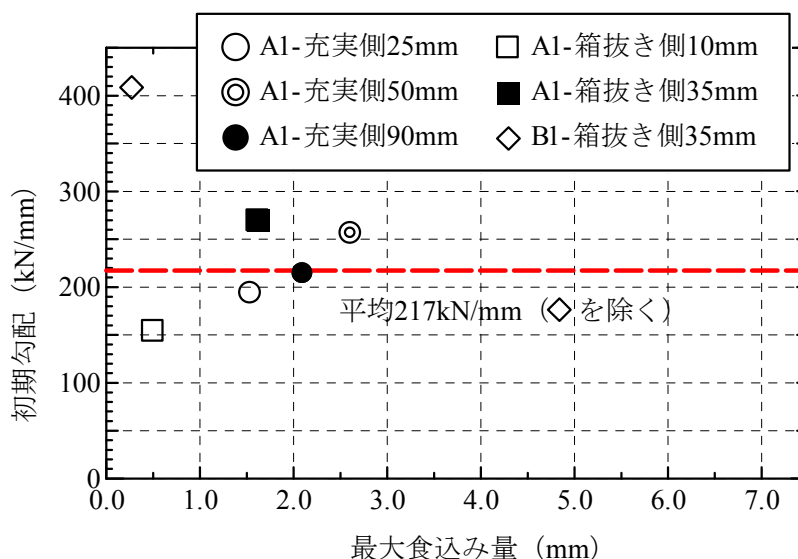


図4-19 食込み量と弾性域における初期勾配の関係（長手方向）

(4) 接触力評価

図4-19に車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配の関係を示す。そのばね定数は概ね静的に217kN/mm程度であった。得られたばね定数は、ペナルティ法のばね定数に等価に換算できる訳ではなく、また動的なひずみ速度の影響等も考えられるため、厳密な値とは言えないが、MBSにより数値解析を実施するための一定のオーダーは示されたものとする。

図4-20に接触子フランジを縁端に対して直角に接触させた場合の、車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配の関係を示す。この際のばね定数は静的に89kN/mm程度であった。この値の解釈については前図と同様である。

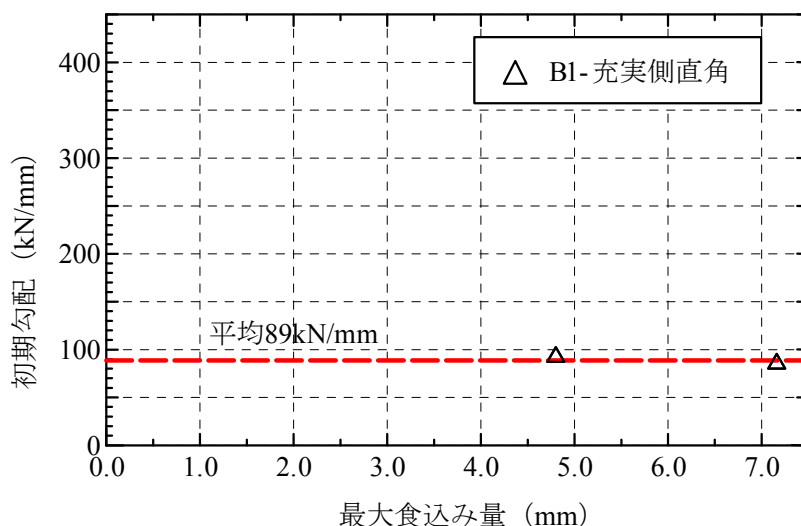


図 4-20 食込み量と弾性域における初期勾配の関係（直角方向）

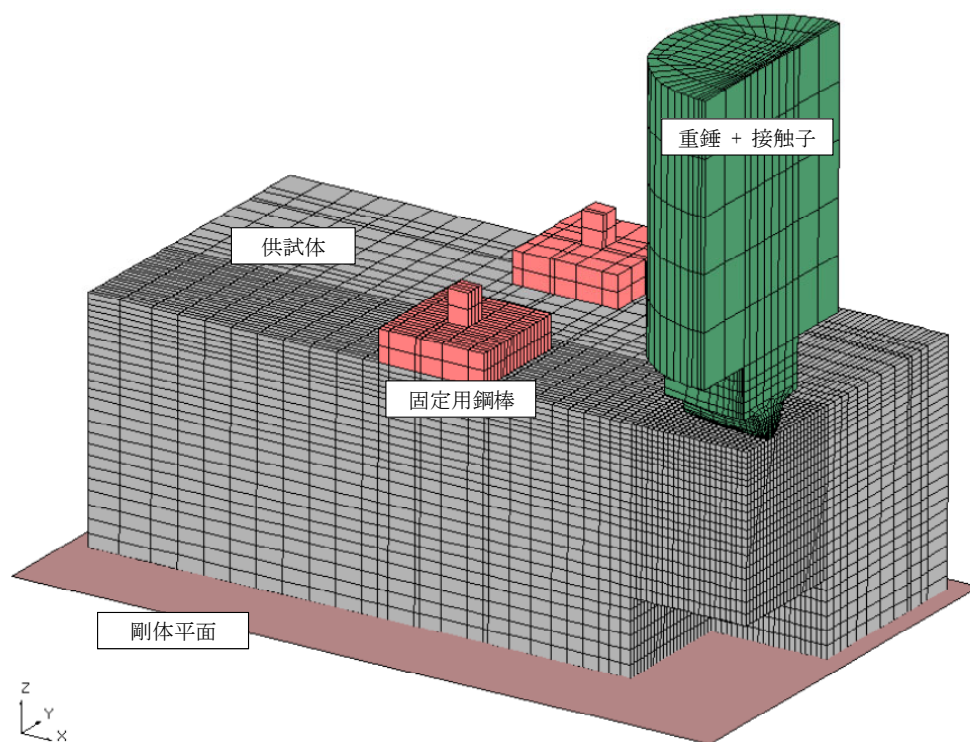


図 4-21 解析モデルの例（供試体 A）

4. 3 数値解析による検討

4.3.1 実験結果

本節では前節での実験結果の一部について、数値解析により検証を行う。数値解析には、有限要素法による非線形動的構造解析用汎用コードLS-DYNA(ver.971)⁴⁻⁶⁾を用いた。

図4-21に解析モデルの例（供試体A）を示す。解析モデルは、供試体、重錘、供試体固定用の鋼棒、供試体底面に配置された剛体平面から構成される。供試体に関しては、セメントや鋼繊維

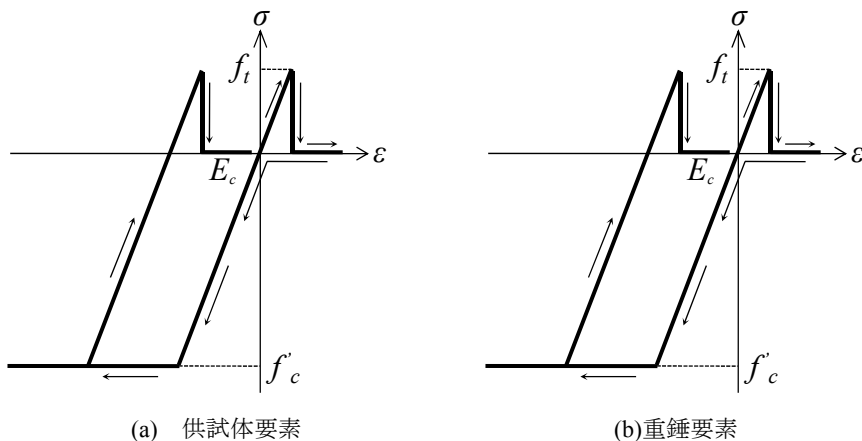


図 4-22 本解析で用いた材料モデル

表 4-2 本解析で用いた材料定数

	供試体要素	重錘要素
弾性係数(GPa)	50.7	206
ポアソン比	0.20	0.30
密度(g/cm ³)	2.60	8.55
圧縮強度(MPa)	196	300
引張強度(MPa)	1.06	(降伏応力)

等の特性の大きく異なる材料が混在しているが、それぞれをモデル化することは現状の計算技術では実用的でないため、ここでは一様な物体としてモデル化した。供試体及び接触子は、それぞれ図4-2、図4-3に示す寸法を再現したモデルとなっている。供試体、重錘は8節点固体要素を用いてモデル化を行い、要素積分点に関しては1点積分とした。

要素分割に関しては、解析時間の短縮のため構造の対称性を考慮した1/2モデルとした。各解析モデルの総節点数及び総要素数は、供試体Aの場合が50944と45500、供試体Bの場合が36016と31388である。

境界条件に関しては、モデルの対称境界は面対称、重錘要素は鉛直方向以外の自由度を拘束した。鋼棒要素に関しては剛体として空間に固定した。また、各構成要素間には面と面との接触を定義している。摩擦に関しては考慮していない。

解析パラメータである重錘の落下高さに関しては、エネルギー的に等価な衝突速度に置き換えて、あらかじめ衝突位置に配置した重錘要素の全節点に初速度として与えた。

表4-2に本解析で用いた材料定数を示す。供試体要素に関しては、表4-1で示した材料諸元の値を用いた。

図4-22に本解析で用いた材料モデルを示す。図4-22(a)に供試体要素に関する相当応力-相当ひずみの関係を示す。圧縮側に関しては、圧縮強度を降伏応力とする完全塑性型とし、引張側に関しては、破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとするモデルとした。ここでの破壊圧力は

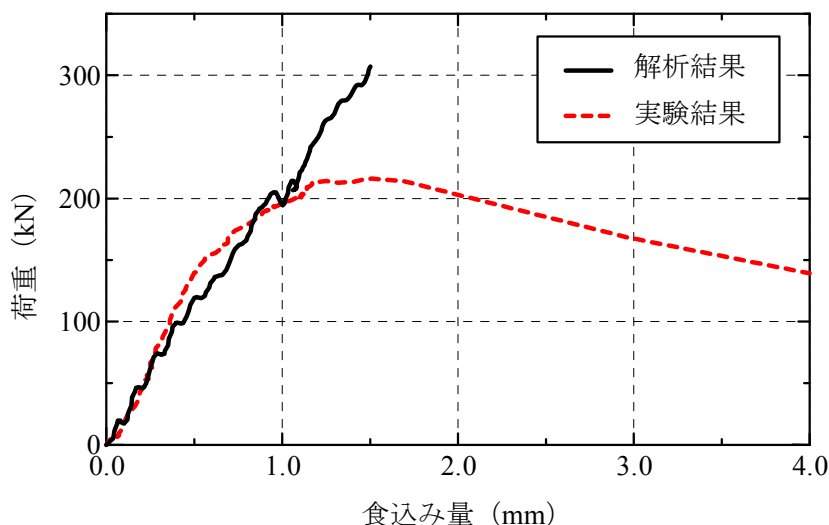


図4-23 供試体A 箱抜き側35mm 載荷での荷重と食込み量の関係

引張強度と等しいと仮定した⁴⁷⁾。なお、非線形の有限要素法により超高強度繊維補強コンクリートをモデル化する場合の材料モデルは文献4-2)に示されているが、本研究の主目的が耐力及び初期剛性の評価であるため、より平易な構成則を用いることとし、超高強度繊維がもたらす靱性能については考慮せず、通常の高強度コンクリートとみなした概略解析を行った。

図4-22(b)に本解析で用いた重錘要素に関する相当応力-相当ひずみの関係を示す。重錘要素に関しては、塑性硬化係数を弾性係数の1/100とするバイリニア型の等方弾塑性体とした⁴⁷⁾。また、重錘要素の密度は、重錘質量71.1kgを重錘要素の総体積で除した値とした。

なお、本実験の範囲内では、解析結果の応答性状に与えるひずみ速度効果の影響は小さいと判断し、本解析ではこれを考慮していない。

4.3.2 数値解析結果

(1) 静的解析結果

図4-23に静的解析の結果を実験結果とあわせて示す。図は供試体Aの箱抜き側35mm載荷における荷重と接触子の食込み量の関係について整理した。なお、静的解析は線形解析として実施した。ここで、数値解析の初期勾配と実験の初期勾配に着目すると、食込み量が1mmの場合、荷重が互いに200kN程度と概ね良い一致を見た。この結果から、実験で得られた車輪先端の食込み量に関する初期勾配は概ね妥当であると考えられる。

(2) 衝撃解析結果

図4-24に最大衝撃力と落下高さの関係を示す。ここで、解析における衝撃力は、重錘要素の加速度に重錘質量を乗じて算出している。最大衝撃力と落下高さの関係については、供試体A、落下高さ750mmの場合において、実験結果と解析結果に2割程度の差異が確認できるものの、その他のケースでは比較的良い一致が見られた。しかし、図4-25の衝撃力波形の例に示すように、衝撃力継続時間については1.4~2.0倍程度、解析結果の方が長くなる傾向となった。また、解析の波

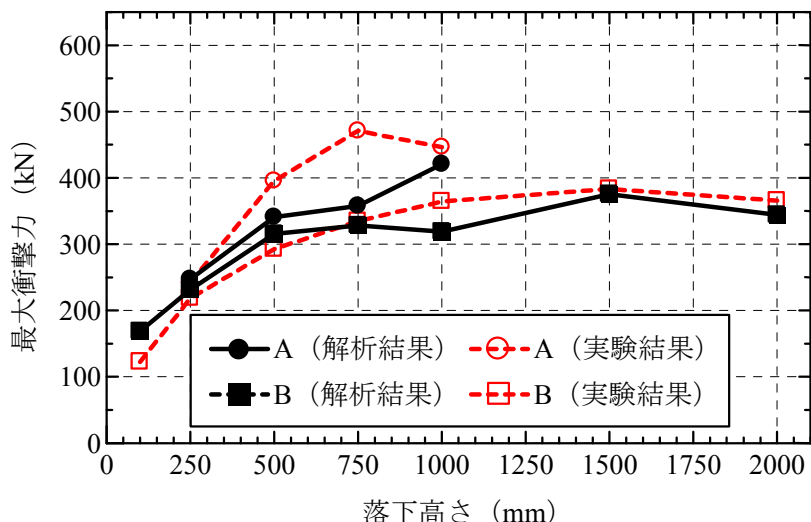
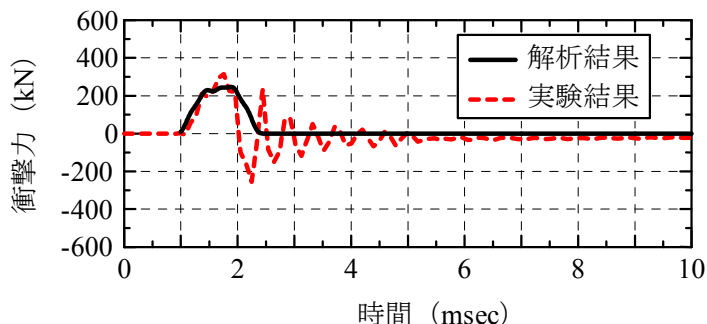
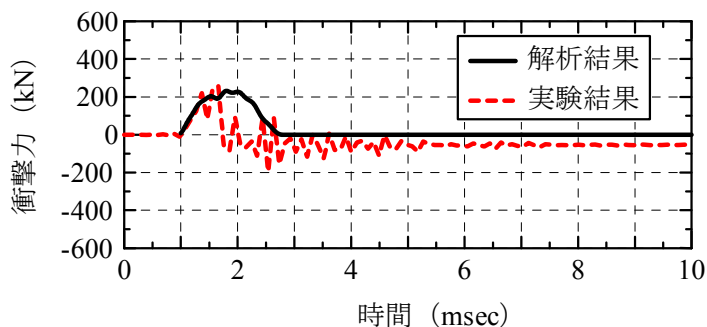


図 4-24 最大衝撃力と落下高さの関係



(a) 供試体 A2



(b) 供試体 B2

図 4-25 衝撃力波形の例 (落下高さ 250mm)

形が全体としてきれいな正弦波の半波となっているのに対して、実験の波形では激しく増減し、負の衝撃力も生じている。これらの点について、数値解析のパラメータとして接触子の形状、弾性係数、落下位置、試験体側の各種構成則、弾性係数、ポアソン比、引張強度等の検討を行ったが、その傾向が大きく変化する結果は得られなかった。そのほか、衝撃力継続時間及び波形の傾向が一致しなかった理由としては、実験の衝撃力の計測が加速度計によっていることが考えられるが、現時点では解明するまでには至っていないため、今後の課題となる。

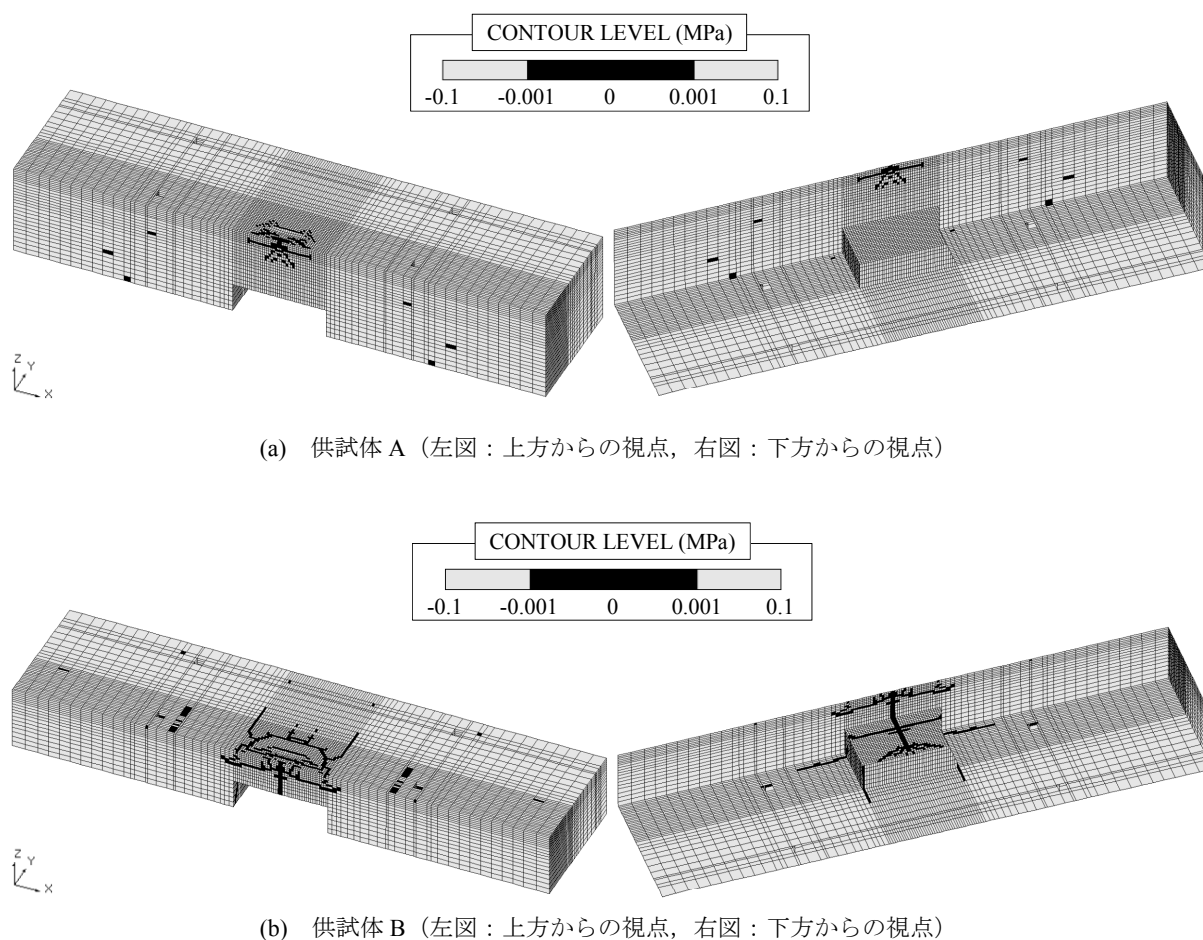


図 4-26 ひび割れ分布図の例 (落下高さ 1000mm, 最大変位時)

図4-26に落下高さ1000mmの場合のひび割れ分布図の例を示す。この図は最大変位時の第一主応力分布を描いたものであり、図4-22(a)に示す供試体要素の相当応力-相当ひずみの関係に従うと、黒色で示される領域は応力がほとんど作用していないか、もしくは引張強度に達してひび割れが生じた要素であることを意味する。従って、変形が大きく示されている領域ではひび割れが発生しているものとして評価可能である⁴⁾⁷⁾。

図4-26(a)より、供試体Aの場合には、接触子との接触点から縁端に向かうひび割れや、供試体側面上部のひび割れの発生を確認できるが、その他の領域についてはひび割れの発生を確認できない。つまり、供試体縁端の破壊の可能性が高いと判断できる。一方、供試体Bの場合には、図4-26(b)に示すように、ひび割れが箱抜き部上部全体に発生しているのと同時に、供試体Aのひび割れ分布では見られなかった箱抜き部上面のひび割れも確認できる。つまり、箱抜き部上部が全体的に破壊する可能性があるかと推察される。これらのひび割れ分布は実験結果とも概ね一致しており、定性的ではあるが供試体の損傷形態をある程度裏付けることが可能であると考えられる。

4.4 本章の結論

分岐器部の逸脱防止装置として提案されている走行案内路について、脱線車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、走行案内路のタイプごとの耐荷力及び破壊モードを静的及び衝撃実験により評価した。また、上記実験より、脱線後の車両挙動解析に用いる走行案内路と脱線車輪間の接触剛性を評価するとともに、一部について数値解析により検証を行った。

本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、縁端距離と耐力の関係を定量的に示した。例えば、縁端距離 35mm の位置に載荷した場合の耐力は約 216kN であった。
- (2) 箱抜き部の天板の厚さにより破壊モードが縁端破壊と押し抜き破壊に分類される。その境界厚さは 80mm から 150mm の間に存在すると考えられる。
- (3) 衝撃実験の耐力は静的実験の耐力の 2.5 倍程度となった。耐力は衝撃力の作用時間にもよるが、実務上はより小さな値である静的実験の値を設計に用いれば安全側である。
- (4) 地震時に車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配は、静的に 217kN/mm 程度であった。フランジを縁端に対して直角に接触させた場合の、初期勾配は静的に 89kN/mm 程度であった。これらの値は厳密なものとは言えないが、MBS により数値解析を実施するための一定のオーダーは示されたものとする。
- (5) 実験の一部について有限要素法を用いた数値解析により検証を試み、車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配、最大衝撃力、ひび割れ分布等が概ね一致することを確認した。

参考文献

- 4-1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006。
- 4-2) 土木学会コンクリート委員会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，2004。
- 4-3) 小尾博俊，加納宏一，七井慎一，末田隆敏：衝撃荷重を受けるコンクリート造と UFC 造の比較解析，大成建設技術センター報，No.39，pp.28，2006。
- 4-4) 曾我部正道，浅沼潔，涌井一：地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発，鉄道力学論文集，No.11，pp.69-74，2007。
- 4-5) Dan Brabie: Wheel-Sleeper Impact Model in Rail Vehicles Analysis, Journal of System Design and Dynamics, Vol.1, No.3, pp.468-480, 2007.
- 4-6) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- 4-7) 土木学会構造工学委員会 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：衝撃実験・解析の基礎と応用，丸善，2004。

第5章 脱線後の鉄道車輪と軌道の接触モデル

5.1 本章の概要

2004年の新潟県中越地震において走行中の新幹線が脱線し、それ以降、各所で地震時列車走行性に関する様々な研究が進められている。鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限：以下、変位標準という）⁵⁻¹⁾では、大規模地震動に対して単一の対策のみで列車の走行安全性を確保することが困難であること、従って、大規模地震動に対しては、地震早期検知システム、構造物の補強、軌道の安全対策等を利用し、鉄道システム全体として減災に努める必要があること等が指摘されている。

大規模地震に対する軌道の対策の一つとしては、脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱させないための各種逸脱防止装置の開発が進められている^{5-2), 5-3)}。このような逸脱防止装置を導入する場合には、当該装置がどのようなメカニズムで機能するのか、また、どの程度までの地震動に対して有効であるのか等を明らかにすることが重要となる。しかしながら、脱線後の挙動については十分な検討が行われておらず、逸脱防止装置の性能等について未解明な点が多いのが実情である。

そこで著者らは、脱線後の車両挙動を表現可能な解析手法を構築し⁵⁻⁴⁾、逸脱防止装置の一つである逸脱防止ガードを対象として、有道床軌道を想定したモデル線区での脱線後の横まくらぎ上走行が、逸脱防止ガードの効果に及ぼす影響について、スラブ軌道のような平坦なコンクリート上を走行した場合と比較することで、基本的な検討を進めてきた⁵⁻⁵⁾。

しかしながら、上記解析では、脱線後の走行面に関して、線路直角方向は平坦であったことから、締結装置上走行後にまくらぎ上走行に移行する連続挙動については評価することができなかった。また、脱線後の車両挙動を表現する際に最も重要となる車輪と走行面間の接触ばねについても、単一の値のみを使用可能なモデルであったことから、線路方向に逐次変化する接触ばねの影響（例えば、横まくらぎや締結装置、バラストの繰り返し）を表現することはできなかった。

そこで、本章では、上記の問題に対応するために、左右の各車輪の走行面に関して、軌間内および軌間外の走行面をそれぞれ線路直角方向に2つ（合計8つ）の領域に分割するとともに、各走行面に対して凹凸形状の不整および接触ばねを線路方向の関数として離散的に定義する手法を新たに構築することを目的とする。加えて、脱線後車輪の跳ね上がりに伴うレールへの衝突および飛び越え現象を表現する手法についても新たに構築する。

5.2 解析手法

本提案手法は、車輪の脱線後挙動を解析可能な新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラムDIASTARS III^{5-4), 5-6)}を改良することで構築した。以下にその概要を述べる。

5.2.1 車両の力学モデル

表5-1に車両の力学モデルに用いた記号を示す。図5-1に車両の力学モデルを示す。車両は、車体、台車、輪軸の各構成要素を剛体と仮定し、これら剛体をばね、ダンパで結合した三次元モデルとした。1車両当たりの自由度は31である。また、実車では各構成要素間に著大な相対変位を抑制できるストoppaが設けられていることから、これを表現するために、ばねはバイリニア形为非線形ばねとした。なお力学モデルの妥当性については、実物大車両模型を用いた検証実験が既に実施されている⁵⁻⁷⁾。

具体的な車両諸元は、近年の新幹線車両の諸元を参考に仮定した。主な入力諸元は、車両長25m、車両質量36t、台車3.0t、輪軸質量1.8t、空気ばね定数（1台車片側）鉛直220kN/m、水平270kN/m、空気ばね減衰係数（1台車片側）鉛直10kN/(m/s)、水平（左右動ダンパ）60kN/(m/s)、軸ばね定数（1軸片側）1200kN/m、軸ばね減衰係数（1軸片側）40kN/(m/s)である。この力学モデル1両を解析に用いた。

車両系の運動方程式は、車両座標系において、各構成要素間の非線形ばね項を右辺に移行し、式(5.1)のように表せる。

$$\mathbf{M}^V \ddot{\mathbf{X}}^V + \mathbf{C}^V \dot{\mathbf{X}}^V + \mathbf{K}^V \mathbf{X}^V = \mathbf{F}_L^V + \mathbf{F}_I^V(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B) + \mathbf{F}_N^V(\mathbf{X}^V) \quad (5.1)$$

ここに、 \mathbf{X}^V は車両の変位ベクトル、 \mathbf{X}^B は構造物の変位ベクトル、 \mathbf{M}^V 、 \mathbf{C}^V 、 \mathbf{K}^V はそれぞれ車両の質量、減衰、剛性マトリクス、 \mathbf{F}_L^V は遠心力や風荷重等の車両への荷重ベクトル、 $\mathbf{F}_I^V(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B)$ は構造物との相互作用力、 $\mathbf{F}_N^V(\mathbf{X}^V)$ は外力扱いとした車両モデル内の非線形ばね力の荷重ベクトルである。

5.2.2 構造物の力学モデル

DIASTARS IIIでは、任意の構造形式を、様々な有限要素でモデル化することができる。本研究では、車輪の走行ラインとしても取り扱う1.435m間隔で配置された2本の剛な梁要素により構造物をモデル化し、それぞれの端部に加速度入力用の質点を設けた簡易なモデルとした。

なお、構造物系の運動方程式は、構造物の非線形ばねの項（本構造物モデルでは未使用）を右辺に移行し、式(5.2)のように表せる。

$$\mathbf{M}^B \ddot{\mathbf{X}}^B + \mathbf{C}^B \dot{\mathbf{X}}^B + \mathbf{K}^B \mathbf{X}^B = \mathbf{F}_L^B + \mathbf{F}_I^B(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B) + \mathbf{F}_N^B(\mathbf{X}^B) \quad (5.2)$$

ここに、 \mathbf{M}^B 、 \mathbf{C}^B 、 \mathbf{K}^B はそれぞれ構造物の質量、減衰、剛性マトリクス、 \mathbf{F}_L^B は主として地震や風荷重等の構造物に働く荷重ベクトル、 $\mathbf{F}_I^B(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B)$ は車両との相互作用力に関する節点荷重ベクトル、 $\mathbf{F}_N^B(\mathbf{X}^B)$ は外力扱いとした構造物モデル内の非線形ばね力の荷重ベクトルである。

表 5-1 力学モデルに用いた記号

名 称	記号	名 称	記号	名 称	記号
前後台車心ざら間距離/2		半車体質量	m	牽引装置弾性	K_1
軸距/2	a	車体重心ロール慣性モーメント/2	I_x	ヨーダンパー減衰定数	C_1
車輪・レールの接触点間隔/2	b	車体重心ピッチ慣性モーメント/2	I_y	左右枕ばね定数 (1台車片側)	K_2
ヨーダンパー左右間隔/2	b_0	車体重心ヨー慣性モーメント/2	I_z	左右枕ばね減衰定数	C_2
軸ばねの左右間隔/2	b_1	台車枠質量	m_T	上下枕ばね定数 (1台車片側)	K_3
枕ばねの左右間隔/2	b_2	台車重心ロール慣性モーメント	I_{Tx}	上下枕ばね減衰定数	C_3
レール面上車体重心の高さ	H_b	台車重心ピッチ慣性モーメント	I_{Ty}	前後ばね定数 (1台車片側)	K_{wx}
レール面上台車重心の高さ	H_T	台車重心ヨー慣性モーメント	I_{Tz}	左右ばね定数 (1台車片側)	K_{wy}
車軸中心-車体重心間高さ	h_1	輪軸質量	m_w	軸ばね定数 (1台車片側)	K_{wz}
枕ばね中央-車体重心間高さ	h_2	輪軸重心ロール慣性モーメント	I_{wx}	軸ばね減衰定数	C_{wz}
台車-枕ばね中央高さ	h_s	輪軸重心ヨー慣性モーメント	I_{wz}	静輪重	P_s
車輪の公称半径	r				
車両長/2	L_c				

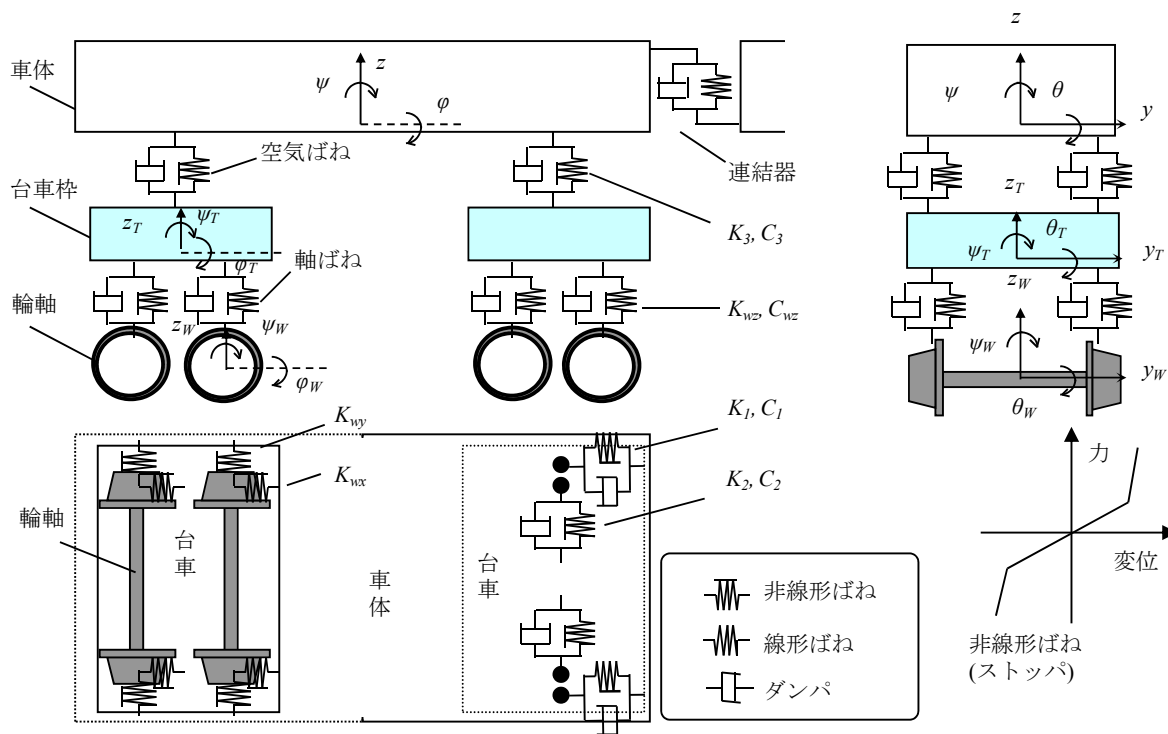


図 5-1 車両の力学モデル

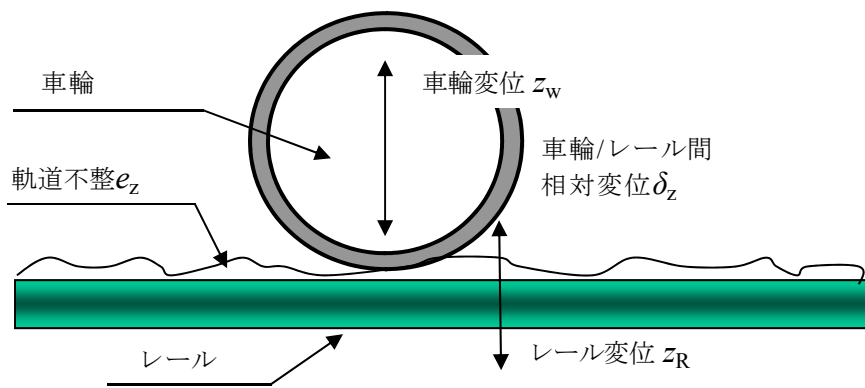
5.2.3 脱線前の車輪とレール間の力学モデル

(1) 鉛直方向

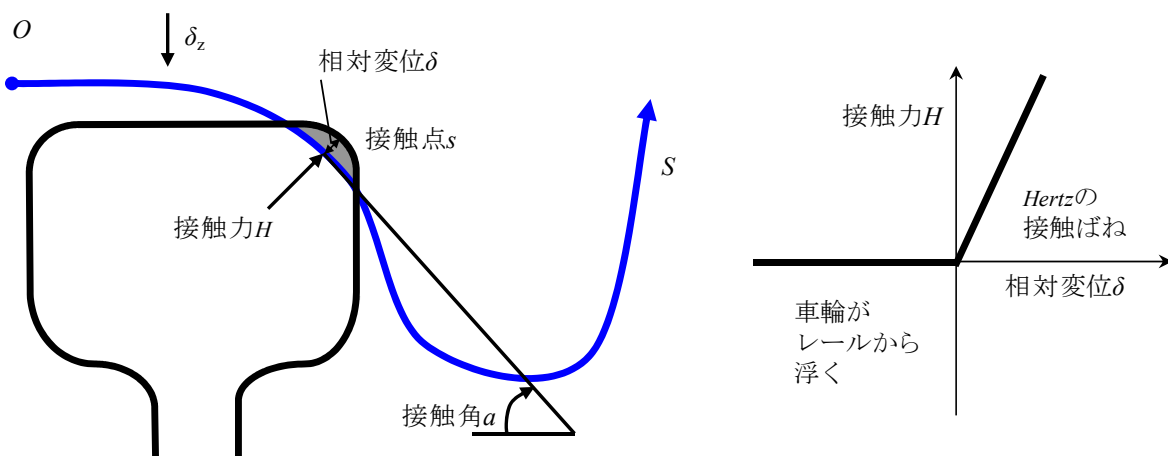
図 5-2 に鉛直方向の力学モデルを示す. 車輪とレール間の鉛直方向の相対変位 δ_z は, 式(5.3)で表せる.

$$\delta_z = z_R - z_w + e_z + e_{z0}(\delta_y) \tag{5.3}$$

ここに, z_R および z_w はそれぞれレールおよび車輪の接触点における鉛直変位, e_z は図 5-2 に示すレール上に存在する鉛直方向の軌道不整である. e_{z0} は接触点における車輪の直径の初期接触点からの変動分で, 車輪とレールの水平方向相対変位 y (以下, 水平移動量) の関数として表される.



(a) 相対変位の概念図



(b) Hertz の接触ばね

図 5-2 車輪とレール間の鉛直方向の力学モデル

相対変位 δ_z に対する接触点 s 、接触角 a は、水平移動量 δ_y と車輪およびレールの幾何学形状に基づき定めた接触関数から算出する。車輪とレールがそれぞれ二次曲面から構成されている場合、接触面法線方向の車輪とレールの相対変位 δ と接触力 H との関係は、式(5.4)のように Hertz の接触ばねにより表すことができる。

$$H = H(\delta) = H(\delta_z \cdot \cos a) \tag{5.4}$$

この接触力 H の鉛直方向および水平方向の分力を車輪およびレールにそれぞれ与えて相互作用力とする。

ここで、本研究では車輪とレールを二次曲面で表現していることから、地震時のように車輪のアタック角が大きくなり、車輪踏面がレールと接触する位置より前方で車輪フランジとレールが接触するといった現象については表現することはできない。この点については、今後、別途詳細なプログラム⁵⁻⁸⁾によりその影響度を把握し、必要に応じて本解析プログラムについても車輪とレールの接触を3次曲面により表現していきたいと考えている。

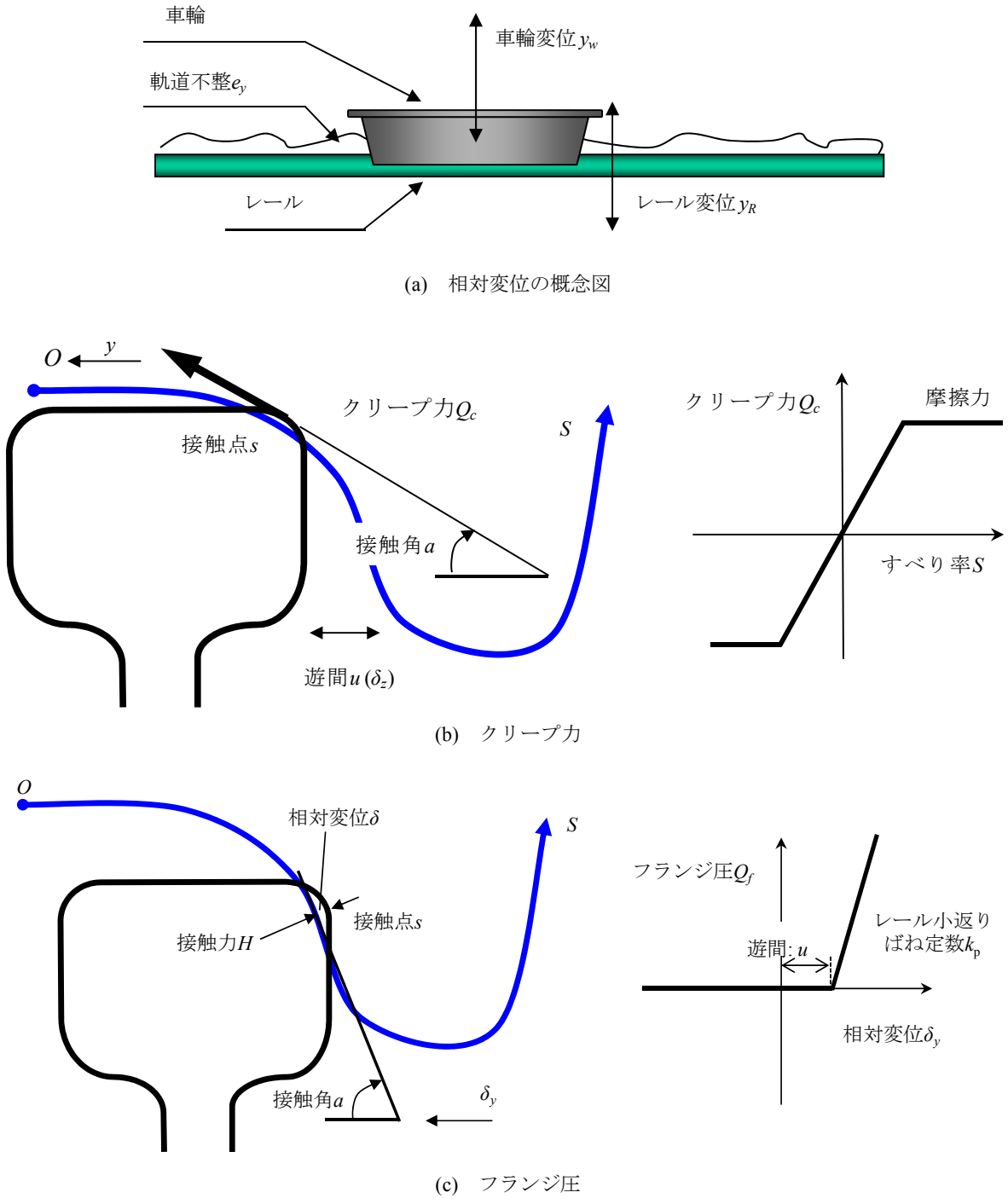


図 5-3 車輪とレール間の水平方向の力学モデル

(2) 水平方向

図 5-3 に水平方向の力学モデルを示す. 車輪フランジとレールの水平方向相対変位 δ_y は, 式(5.5)のように表すことができる.

$$\delta_y = y - u(\delta_z) = y_w - y_R - e_y - u(\delta_z) \quad (5.5)$$

ここに、 y_R および y_w はそれぞれレールと車輪の接触点 s における水平変位、 e_y はレール上に存在する水平方向の軌道不整、 $u(\delta_z)$ は車輪フランジとレールの遊間で、鉛直方向相対変位 δ_z の関数として表すことができる。

相対変位 δ_y に対する接触点 s 、接触角 α は、車輪とレールの鉛直方向相対変位 δ_z と車輪およびレールの幾何学形状に基づき定めた接触関数から算出する。

$\delta_y < 0$ の時、車輪フランジとレールは非接触と考える。この場合には、車輪とレールの接触面の接線方向にクリープ力（すべり力）が働く。クリープ力は、車輪がレール上を転がりながら進む時のクリープ（すべり）により発生する接線力で、式(5.6)で表すことができる。このクリープ力はすべり率が大きくなると摩擦力を上限として飽和する。

$$Q_c = C \cdot S_y = C \cdot (y_w + r\dot{\phi}_w - v\psi_w)/v \quad (5.6)$$

ここに、 Q_c はクリープ力、 C はクリープ係数、 S_y は横方向すべり率、 v は列車速度、 r は車輪公称半径、 ϕ_w 、 ψ_w はそれぞれロール角、ヨー角である。

$\delta_y \geq 0$ の時、車輪フランジとレールは接触していると考えられる。フランジ接触について、接触力 H の水平方向の分力に相当するフランジ圧 Q_f は、レールの小返りばね k_p を用いて式(5.7)で表すことができる。

$$Q_f = k_p \cdot \delta_y \quad (5.7)$$

5.2.4 新しい脱線後の車輪と軌道の力学モデル

図5-4に脱線後の車輪と軌道の力学モデルを示す。DIASTARS IIIでは、脱線後の車両挙動を評価するために、マルチボディーダイナミクスの手法を用いて逸脱防止ガードを含む軌道と車輪をモデル化している。軌道は、軌間内および軌間外（以下、内側および外側）に逸脱防止ガードを有する剛体断面モデルとし、車輪は、解析の高速化を図るため区分的な直線（円錐台形）により近似するモデルとした。

図5-5に軌道断面の力学モデルを示す。逸脱防止ガードに関しては、左右および上下方向の不整を定義可能なモデルとした。走行面に関しては、左右車輪の軌間内および軌間外の走行面をそれぞれ線路直角方向にA、Bゾーンの2つ（合計8つ）の領域に分割する手法を新たに提案した。この各領域に対しては、線路方向の関数として離散的に凹凸形状を定義可能であることから、線路方向における締結装置やまくらぎの凹凸形状、線路直角方向における締結装置上走行からまくらぎ上走行等への連続挙動を表現することができる。また、車輪と走行面間の接触ばねについても、各領域において線路方向の関数として離散的に定義可能なモデルとした。これにより、まくらぎや締結装置とバラストの繰り返りなど、逐次変化する接触ばねを表現することも可能である。

ここで、本研究では軌道を剛体と仮定していることから、車輪衝突による軌道部材の変形や物性値の変化等は考慮できていない。この点に関しては、別途詳細なプログラム⁵⁻⁸⁾によりそれらの影響を評価し、本プログラムにフィードバックさせていきたいと考えている。

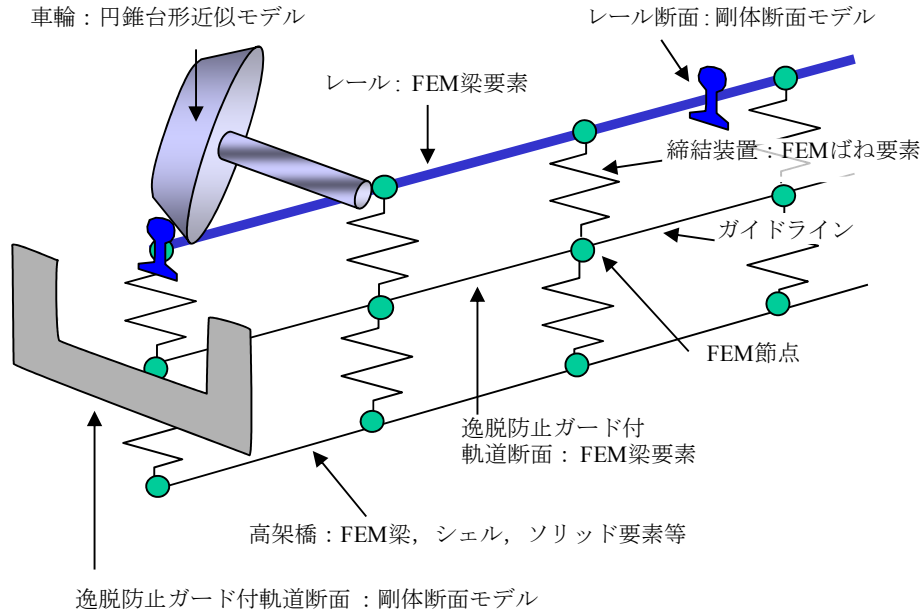


図 5-4 脱線後の車輪と軌道の力学モデル

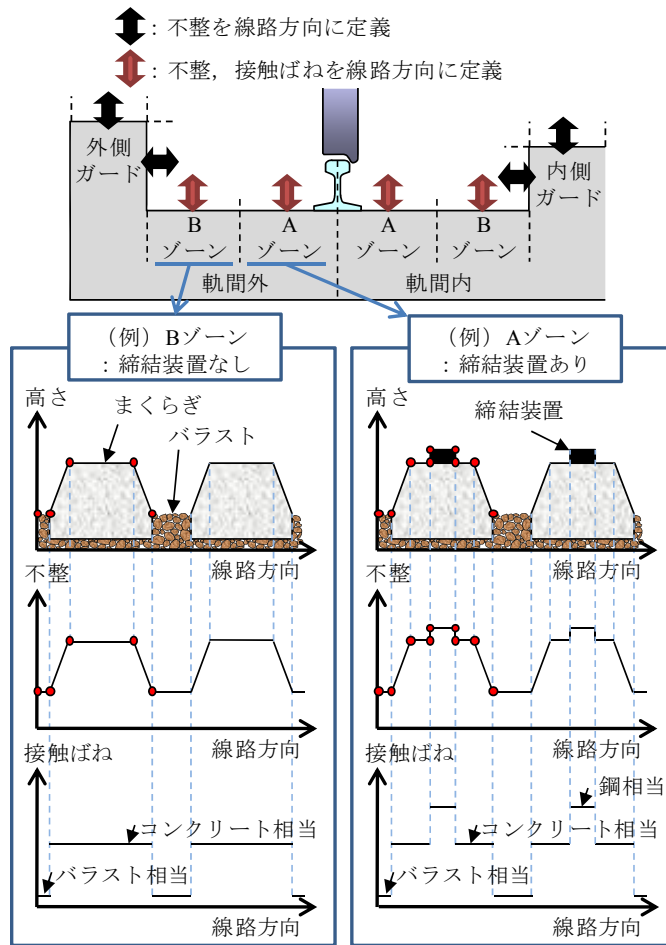


図 5-5 軌道断面の力学モデル

(1) 車輪と走行面間の力学モデル

車輪と走行面間の相互作用力に関して、鉛直方向については車輪の落下に伴う接触力を、水平方向については摩擦力を考慮することとした。

図 5-6(a)に鉛直方向の力学モデルを示す。車輪と走行面間の鉛直方向の相対変位 δ_z^T は、式(5.8)で表せる。

$$\delta_z^T = z_G - z_w + e_z^T - h^T \quad (5.8)$$

ここに、 z_G はガイドライン（軌道）の鉛直変位、 e_z^T は走行面上に存在する鉛直方向の不整、 h^T は中立状態での走行面から車輪下端までの高さである。

$\delta_z^T < 0$ の時、車輪と走行面は非接触と考える。また、 $\delta_z^T \geq 0$ の時、車輪と走行面は接触しているものと考え、接触力 H_z^T を車輪と走行面の鉛直方向相対変位 δ_z^T の関数として式(5.9)のように表す。

$$H_z^T = K_z(\delta_z^T) \quad (5.9)$$

ここに、 K_z は車輪と走行面の鉛直方向相対変位と接触力の関係式であり、新幹線車輪フランジ形状のアタッチメントを用いた軌道部材の静的載荷試験⁵⁻⁹⁾または車輪フランジの詳細形状をモデル化した FEM 静的解析に基づく接触ばねで表現される。また、車輪衝突時に考えられるコンクリート表面の局所的な圧壊等による衝撃減衰は、粘性減衰により表現可能な力学モデルとしたが、その影響については未解明であるため、本解析では衝突減衰の影響は考慮しないものとした。

水平方向の力学モデルは、 $\delta_z^T \geq 0$ の場合にのみ、クーロン摩擦により水平方向の抵抗力が働くものとする。

(2) 車輪と逸脱防止ガード間の力学モデル

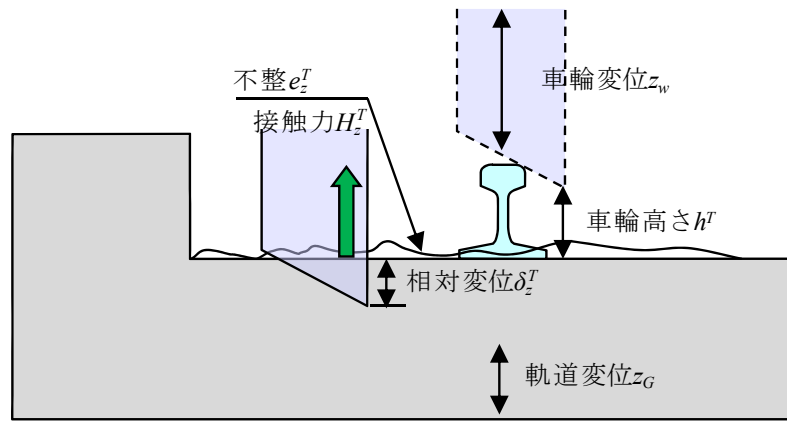
車輪と逸脱防止ガード間の相互作用力に関して、鉛直方向については車輪の逸脱防止ガード天端への落下に伴う接触力を、水平方向については車輪の逸脱防止ガード側面への衝突に伴う接触力を考慮することとした。

図 5-6(b)に鉛直方向の力学モデルを示す。車輪と逸脱防止ガード天端間の鉛直方向の相対変位 δ_z^G は、式(5.10)で表せる。

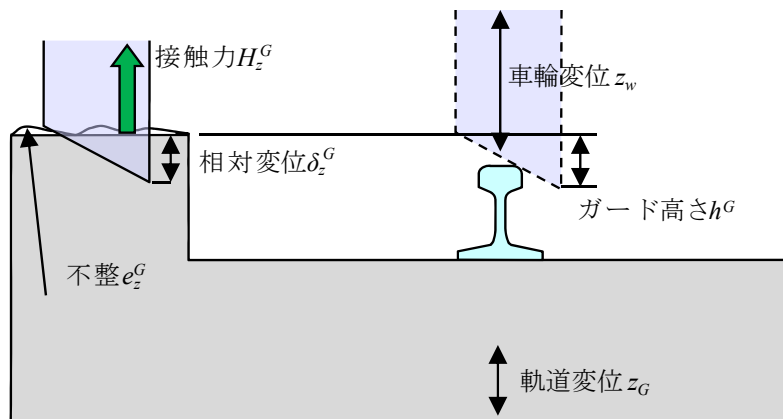
$$\delta_z^G = z_G - z_w + e_z^G + h^G \quad (5.10)$$

ここに、 e_z^G は逸脱防止ガード天端に存在する鉛直方向の不整、 h^G は中立状態での車輪下端から逸脱防止ガード天端までの高さである。

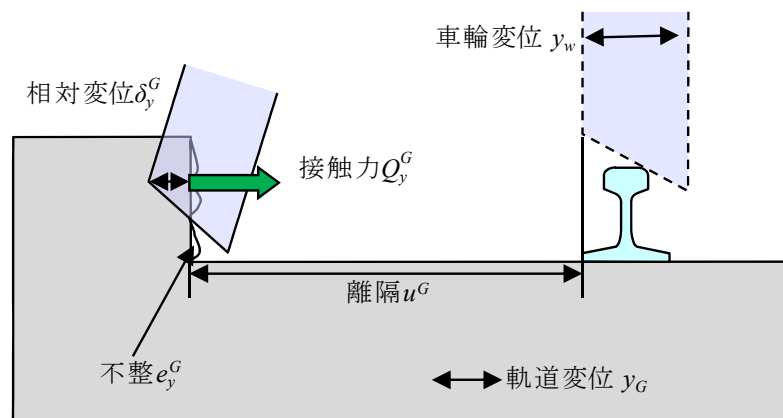
$\delta_z^G < 0$ の時、車輪と逸脱防止ガード天端は非接触と考える。 $\delta_z^G \geq 0$ の時、車輪と逸脱防止ガード天端は接触しているものと考え、接触力 H_z^G を鉛直方向相対変 δ_z^G の関数として、接触ばね K_z を用いて式(5.11)のように表すことができる。



(a) 走行面 (鉛直方向)



(b) 逸脱防止ガード (鉛直方向)



(c) 逸脱防止ガード (水平方向)

図5-6 車輪と軌道間の力学モデル

$$H_z^G = K_z(\delta_z^G) \tag{5.11}$$

次に、図 5-6(c)に水平方向の力学モデルを示す。車輪と逸脱防止ガードの水平方向相対変位 δ_y^G は、式(5.12)で表せる。

$$\delta_y^G = y_w - y_G - e_y^G - u^G \tag{5.12}$$

ここに、 y_G はガイドライン（軌道）の水平変位、 e_y^G は逸脱防止ガードに存在する水平方向の不整、 u^G は中立状態での車輪から逸脱防止ガードまでの離隔である。

$\delta_y^G < 0$ の時、車輪と逸脱防止ガードは非接触と考える。 $\delta_y^G \geq 0$ の時、車輪と逸脱防止ガードは接触しているものと考え、接触力 Q_y^G を車輪と逸脱防止ガードの水平方向相対変 δ_y^G の関数として式(5.13)のように表す。

$$Q_y^G = K_y(\delta_y^G) \tag{5.13}$$

ここに、 K_y は車輪と逸脱防止ガード間の水平方向相対変位と接触力の関係式である。この K_y に関しては現段階では明らかにされていないことから、本研究においては関数 K_z を仮定した。

(3) 車輪とレール間の力学モデル

脱線後のモデルでは、レールは矩形断面により近似し、車輪の衝突や飛び越えを考慮できるモデルとした。ただし、レール上への再載線は想定せず、車輪とレール間の相互作用力は水平方向のみを考慮した。

図 5-7 に水平方向の力学モデルを示す。脱線後の車輪とレールの水平方向相対変位 δ_y^R は、式(5.14)のように表すことができる。

$$\delta_y^R = \delta_{Lim} \pm y = \delta_{Lim} \pm (y_w - y_R - e_y) \tag{5.14}$$

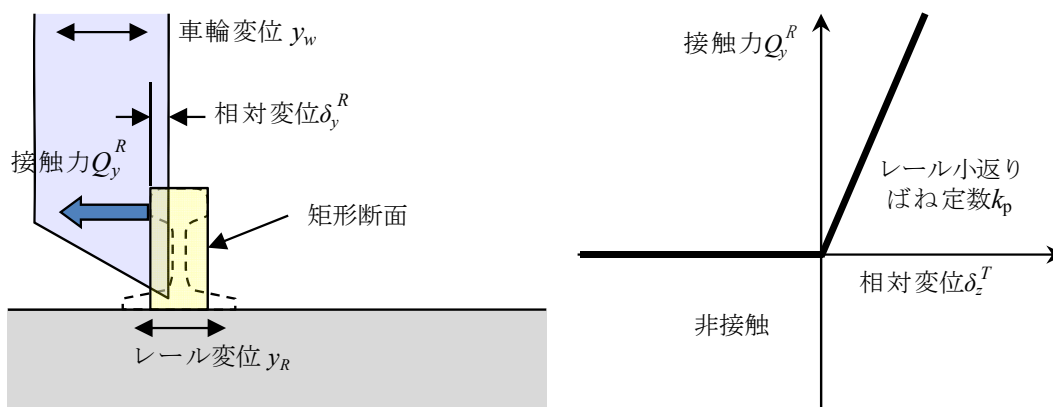


図 5-7 車輪とレール間の力学モデル

5.2.5 脱線の評価指標

図 5-9 に地震時の車両走行性の評価指標と脱線モードを示す。評価指標には、水平移動量 y を用い、その限界値は $\pm 70\text{mm}$ とした。これは、車輪がレールから外れて落ちる直前の状態を表し⁵⁻¹⁾、軌間外脱線と軌間内脱線を区別した。また、地震時の車両の脱線モードは、概ね 0.8Hz 以下で卓越する下心ロールと概ね 1.3Hz 以上で卓越する上心ロールに大別され、車体の水平動とローリング動の位相により判別される（座標系は図 5-1 参照）。

逸脱防止ガードを用いた場合は、車輪が逸脱防止ガードの高さを越え、逸脱防止ガード天端に接触した時点で逸脱と判定した。

5.2.6 数値解析法

DIASTARS IIIでは、車両および構造物に関する運動方程式を連立して解くことにより、複数の車両からなる長大な列車と構造物との動的な連成解析を行うことができる。効率的な数値解析を行うために、車両および構造物の運動方程式をモーダル変換する。得られる車両および構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、Newmarkの平均加速度法により時間増分 Δt 単位に解いていく。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が十分小さくなるまで Δt 内において反復計算を行う。この際、数値解析速度を向上させるために、時間増分 Δt 内における収束回数をモニターし、 Δt の大きさをプログラム内で自動的に調整する手法を用いた。なお、解析に用いた Δt は、 0.0005 秒を標準とした。

5.3 走行面の領域分割手法の検討

5.3.1 検討方法

5.2 で述べた領域分割手法を用いて脱線後の締結装置上走行の影響（線路方向および線路直角方向への凹凸形状の影響）および横まくらぎとバラストの繰り返し走行の影響（線路方向への接触ばねの変化の影響）に関する試計算を実施した。表 5-2 に具体的な検討ケースを示す。検討ケースは、A、B ゾーンの両方について平坦および横まくらぎ形状の不整を定義した Case1 と Case2、次に本提案手法を適用し、Case1 および Case2 の A ゾーンに図 5-10 に示す簡易な締結装置形状の不整を定義した Case3 と Case4、さらに接触ばねの変化の影響を検討するために、走行面は平坦（まくらぎ上部までバラストが詰まっている状態を想定）であるが、まくらぎ位置とバラスト位

表 5-2 検討ケース

ケース	A ゾーン	B ゾーン	接触ばね
Case1	平坦	平坦	一定(200kN/mm)
Case2	横まくらぎ	横まくらぎ	一定(200kN/mm)
Case3	平坦+締結	平坦	一定(200kN/mm)
Case4	横まくらぎ+締結	横まくらぎ	一定(200kN/mm)
Case5	平坦	平坦	変化(20, 200kN/mm)

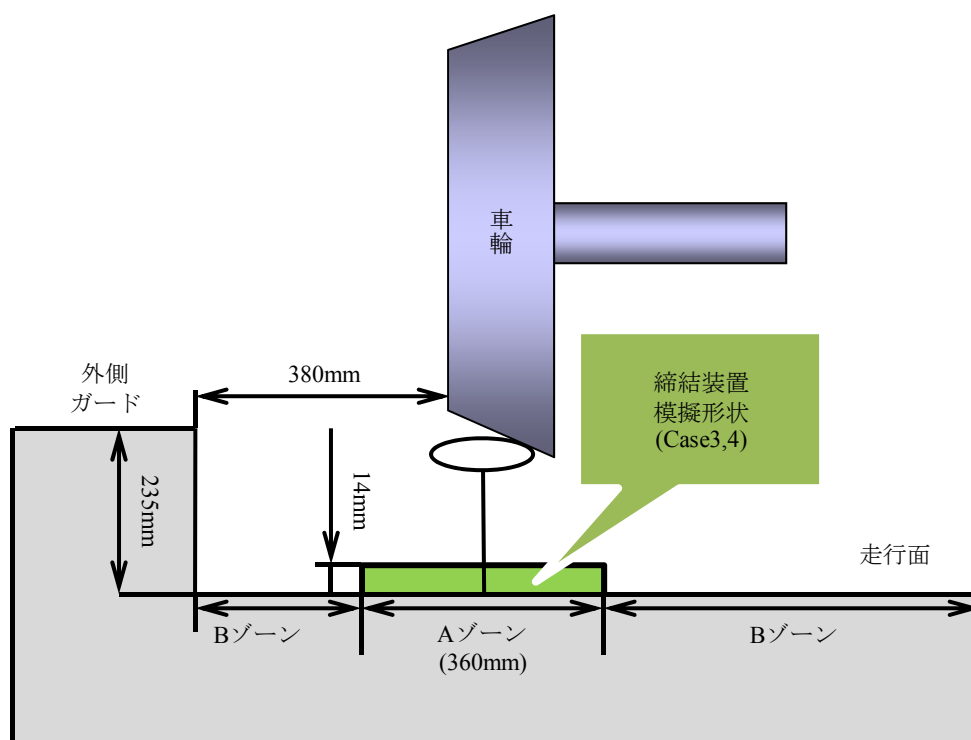


図 5-10 締結装置のモデル化の概念図

置で接触ばねを変化させた Case5 とした。ここで、接触ばねに関して、車輪とまくらぎ間の接触ばねについてはある程度明らかにされているが⁵⁻⁹⁾、車輪と締結装置間および車輪とバラスト間の接触ばねについては現状では未解明である。そのため本研究では、車輪と締結装置間の接触ばねをまくらぎとの接触時と同値の 200kN/mm、車輪とバラスト間の接触ばねをその 1/10 の 20kN/mm と仮定した。

図5-11に、走行面の線路方向の不整形形状のモデル化手法として、横まくらぎの場合を例として示す。前述のように横まくらぎは、線路方向の座標の関数としてその形状を離散的に定義し、この形状データを車輪の走行位置に応じて車輪と走行面との相対変位算出時に加味することで表現した。ただし、DIASTARS IIIでは、車輪と走行面とは、線路方向に1点で接触するモデルであるため、非現実的な落下量が生じないように、車輪径とまくらぎ形状・間隔から定まる落下限界を考慮し、落下限界時の輪軸中心位置に基づいてまくらぎの形状関数を定義した。締結装置を考慮した場合も同様の考えで形状関数を定義した。なお、解析条件については、列車は1両編成、列車速度は270km/hとした。逸脱防止ガードは、図5-10に示すように外側のみとし、脱線を表現するために徐々に振幅を拡大させた正弦波の左右振動を軌道に入力した。

5.3.2 検討結果

図 5-12 に車輪上昇量および車輪水平移動量の時刻歴の例 (Case1) を示す。加振後約 2.2 秒に左車輪が浮き上がり始め、レールに着地後、右車輪が大きく浮き上がり、約 3.9 秒で車輪の水平移動量が 70mm を超えて脱線に至っていることが確認できる。また、その後も車輪は移動し続け、約 4.7 秒で逸脱防止ガードに接触し、それ以上の横移動が制限されているのが分かる。

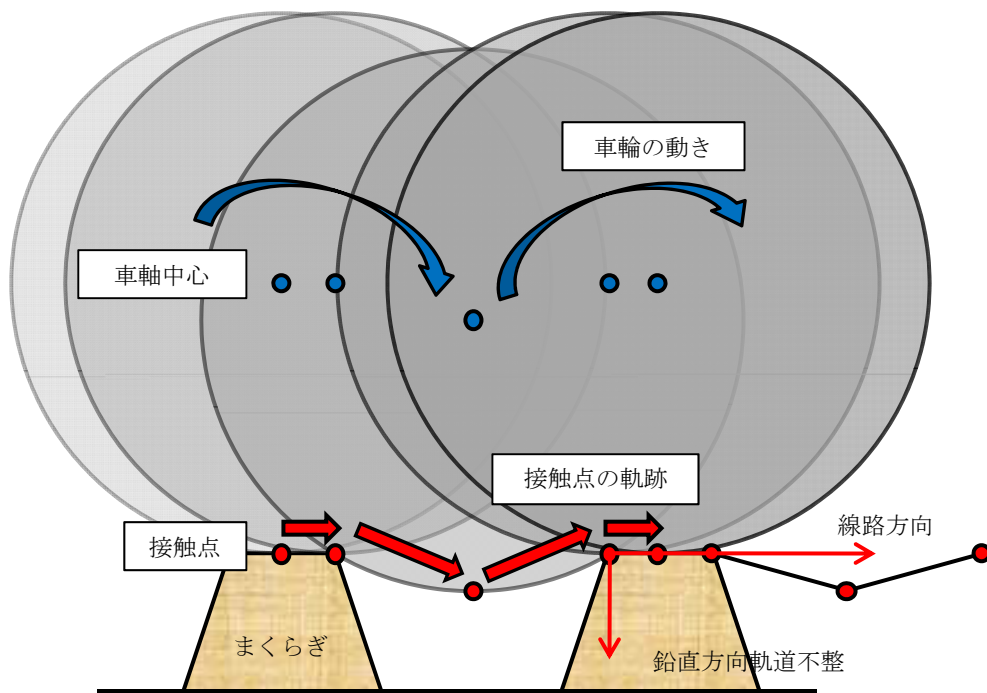


図 5-11 まくらぎ形状のモデル化の概念図

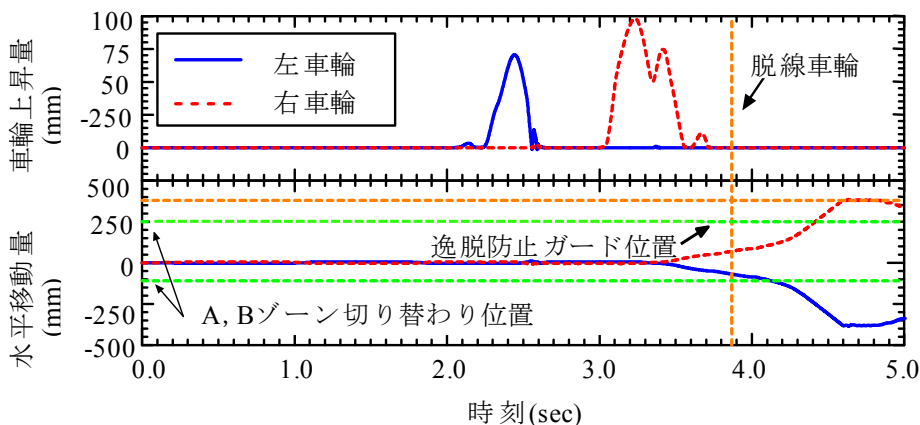
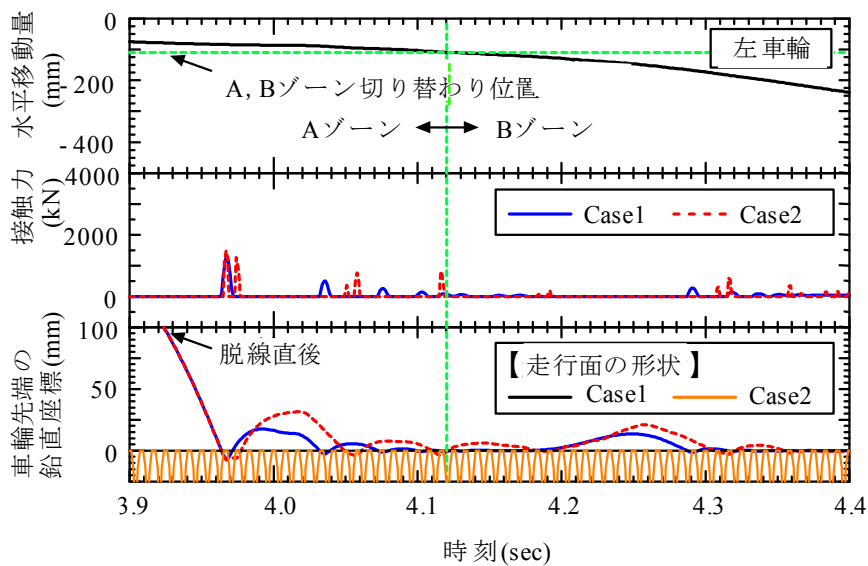
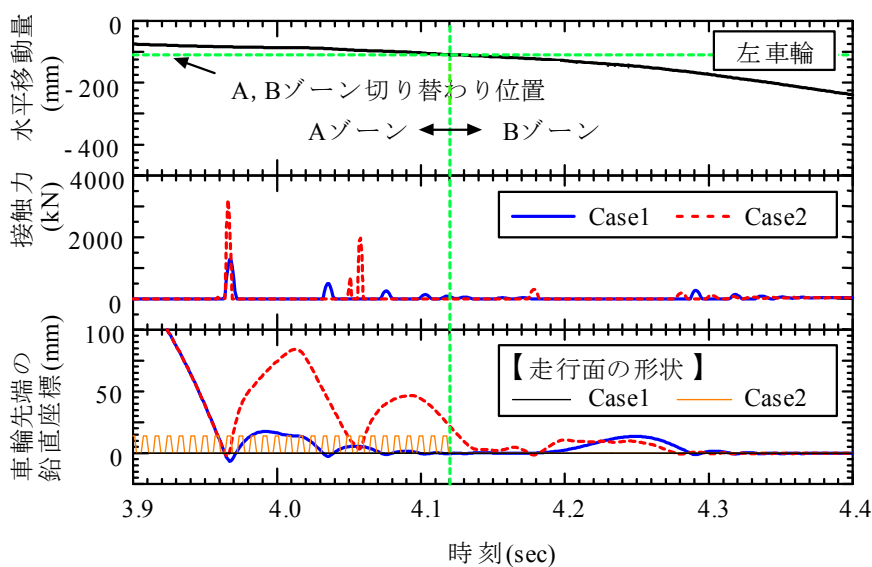


図 5-12 車輪上昇量および水平移動量の時刻歴(Case1)

図 5-13 に脱線後の左車輪の挙動および車輪と走行面間の接触力の関係を示す。図 5-13(a)で、脱線後の車輪の挙動に着目すると、平坦なコンクリート上を走行する Case1 に比べ、まくらぎ上を走行する Case2 で、脱線直後の跳ね上がり量がやや大きい傾向が読み取れる。また、Case2 では、2つのまくらぎに接触しながら跳ね上がる特徴的な挙動も確認できる。次に、図 5-13(b), (c) では、締結装置を考慮した Case3, Case4 では、考慮していない Case1, Case2 に比べ脱線直後の跳ね上がり量が大きく、最大で 85mm 程度まで車輪が上昇した。これは図からも読み取れるように、最初の車輪の落下位置がちょうど締結装置間であったためであると考えられる。また、車輪が A ゾーンから B ゾーンに移動した後では、車輪の上昇量に大きな違いは見受けられない。図 5-13(d)では、接触ばねを一定とした Case1 に比べ、接触ばねを線路方向に変化させた Case5 が脱線直後の跳ね上がり量がやや大きい傾向が読み取れる。また、Case5 は走行面をまくらぎ形状に



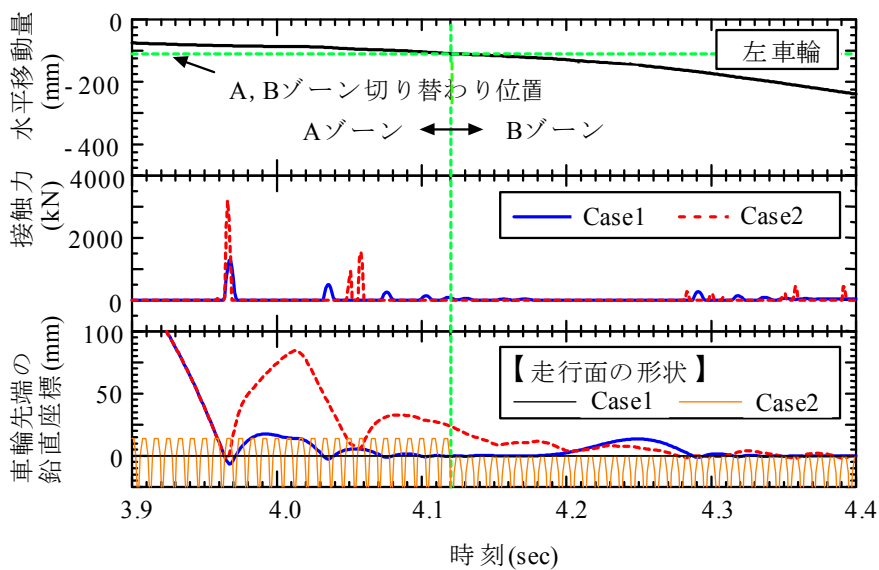
(a) Case1 と Case2 の比較 (走行面の比較)



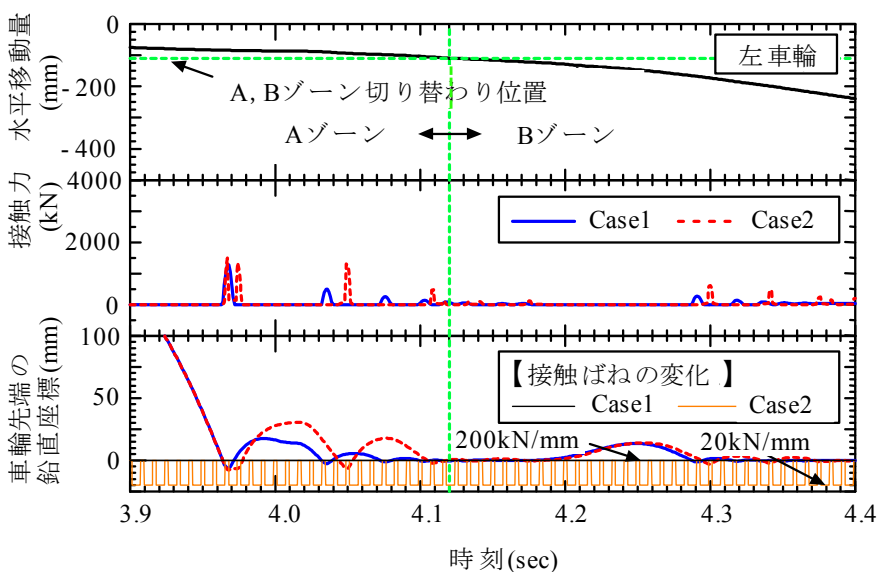
(b) Case1 と Case3 の比較 (走行面の比較)

図 5-13 脱線後の左車輪の挙動および接触力の時刻歴

した Case2 とほぼ同一の波形であることから、接触ばねの変化が走行面の凹凸形状の変化に対応していることが分かる。



(c) Case1 と Case4 の比較 (走行面の比較)



(d) Case1 と Case5 の比較 (接触ばねの比較)

図 5-13 脱線後の左車輪の挙動および接触力の時刻歴

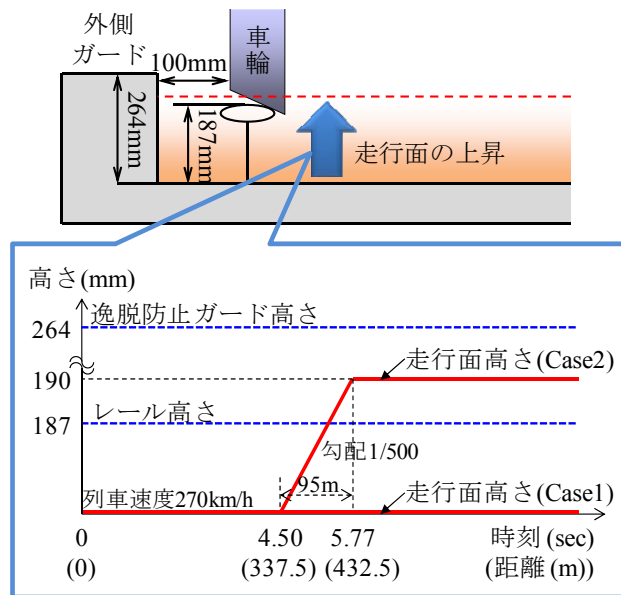


図 5-14 走行面の高さ変化および解析モデル

5. 4 脱線後車輪とレールの接触モデルの検討

5. 4. 1 検討方法

5.2で述べた脱線後車輪とレールの接触モデルにおいて、車輪とレールの接触および飛び越え現象を再現するために試計算を実施した。

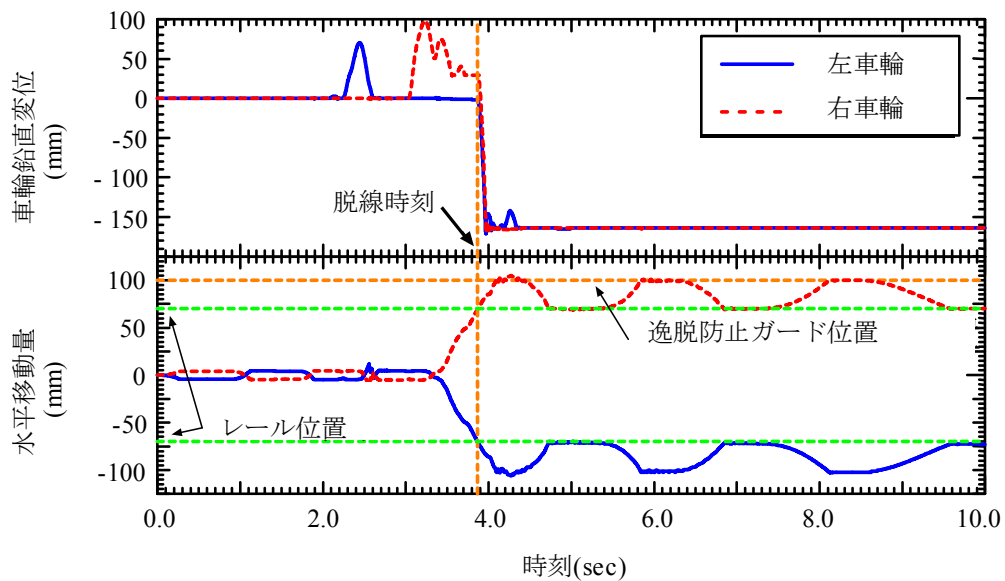
図5-14に走行面の高さ変化および解析モデルを示す。本解析では、検討ケースとして、線路方向への走行面の高さの変化により、2つのケースを設定した。Case1は、走行面は線路方向に平坦なままで、脱線後の車輪は逸脱防止ガードとレール間で衝突を繰り返すケースである。Case2は、車輪のレール飛び越えを再現するために、走行面の高さを線路方向に1/500勾配で変化させたケースである。走行面の高さはレール高さ（187mm）を超える190mmまで上昇させ、上昇開始時刻は脱線後車輪の跳ね上がりが落ち着いた4.5秒後とした。また、車輪と走行面間の接触ばねについては、200kN/mmで一定とした。

なお、解析条件については、列車は1両編成、列車速度は270km/hとした。逸脱防止ガードは、図5-14に示すように外側のみとし、脱線を表現するために徐々に振幅を拡大させた正弦波の左右振動を軌道に入力した。

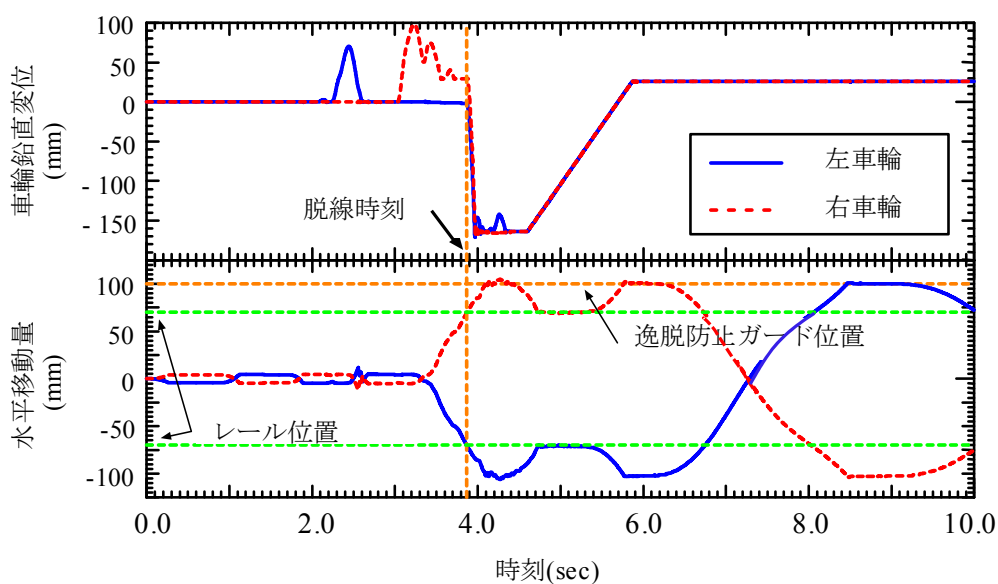
5. 4. 2 検討結果

図5-15に車輪の鉛直変位および水平移動量の時刻歴を示す。どちらのケースも脱線前の車両挙動は共通であり、加振後約3.9秒で車輪の水平移動量が70mmを超えて脱線に至っていることが分かる。

脱線後に関して、Case1では、脱線直後に若干車輪が跳ね上がるものの、平坦な走行面に沿って車輪が移動しており、右車輪が逸脱防止ガードとレール間で衝突を繰り返している様子が確認できる。一方、Case2では、4.5秒後から走行面に設けた勾配に沿って車輪が上昇していることが分



(a) Case1



(b) Case2

図 5-15 車輪の鉛直変位および水平移動量の時刻歴

かる。車輪の高さがレール高さを超えない約5.0秒では車輪はレールに衝突しているが、レール高さを超えた状態でレール位置に達する6.8秒では車輪はレールを通過し、その後、通過前とは反対側の車輪である左車輪が逸脱防止ガードに衝突している様子が確認できる。

即ち、本接触モデルにより、車輪とレールの接触および車輪のレールの飛び越え現象を表現できたと考えられる。

5.5 本章の結論

本章では、脱線後の車両挙動解析手法の開発を行ったものである。具体的にはFEMとMBSを組み合わせた手法を提案するとともに、線路方向及び線路直角方向に軌道不整及び接触ばねを定義する手法を構築した。さらに、脱線後車輪のレールへの衝突及び飛び越え現象を表現する手法についても構築した。また、これまで著者らが構築してきた車両と構造物の動的相互作用解析プログラムに上記手法を取り込み、提案手法について試計算を実施することで本手法の適用性を検討した。

本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 左右の各車輪の走行面に関して、軌間内および軌間外の走行面をそれぞれ線路直角方向に2つ（合計8つ）の領域に分割するとともに、各走行面に対して凹凸形状の不整および接触ばねを線路方向の関数として離散的に定義する手法を提案した。この手法はFEMにより軌道全体モデルを構築するのに比べれば表現力は劣るが、同一構造が連続し、かつ単純なパーツの組み合わせで構成される軌道の力学モデルとしては、十分な再現性を有していると考えられる。基本的な寸法諸元と材料特性が得られれば、大規模なモデル化作業を経ることなく、有効な軌道モデルを構築することができる。
- (2) 脱線後車輪の跳ね上がりに伴うレールへの衝突および飛び越え現象を表現する手法として、車輪とレールを剛体矩形断面によりそれぞれ近似して、複雑な挙動を実用的に解く方法を提案した。ただし、脱線後の車輪のレール上への再載線は現実的には考えにくいいため、考慮しないモデルとした。また、このため車輪とレールの相互作用力は水平方向のみとした。
- (3) 上記手法を用いた検討解析により、走行面の形状および接触ばねの違いによる車両挙動の変化を確認した。具体的には、横まくらぎ、締結装置、平坦路盤面を組み合わせたサンプル軌道モデルを用いて数値解析を行い、各領域を変化させながら、それぞれの特性に応じた妥当な解が得られていることを確認した。また、走行面に高低差を付けて、レール高さまで車輪の走行位置を持ちあげた解析により、レール衝突およびレールの飛び越え現象を表現できていることを確認した。

参考文献

- 5-1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006。
- 5-2) 土木学会・第二次調査団：I 報告・提言編，平成16年新潟中越地震 社会基盤システムの被害等に関する総合調査「調査と緊急提言」，2004。
- 5-3) 浅沼潔，曾我部正道，渡辺勉，岡山準也，涌井一：逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発、鉄道総研報告，Vol.23，No.2，2009。
- 5-4) 曾我部正道，原田和洋，浅沼潔，丸山直樹，渡辺勉：連続する鉄道構造物群の地震時列車走行性，鉄道力学論文集，No.13，pp.177-184，2009。
- 5-5) 後藤恵一，曾我部正道，浅沼潔：逸脱防止ガードの基本性能評価，鉄道力学論文集，No.14，

pp.29-36, 2010.

- 5-6) 涌井一, 松本信之, 松浦章夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513/I-31, pp.129-138, 1995.
- 5-7) 松本信之, 田辺誠, 涌井一, 曾我部正道: 非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集 (A 編), Vol.63, No.3, pp.533-551, 2007.
- 5-8) 園田佳巨, 深澤仁, 曾我部正道: 鉄道車両逸脱防止壁に作用する衝撃力の評価に関する研究, 応用力学論文集, Vol.10, pp.273-280, 2007.
- 5-9) 後藤恵一, 曾我部正道, 浅沼潔, 渡辺勉: 鉄道車輪と PC まくらぎの接触力に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.769-774, 2010.

第6章 逸脱防止ガードの基本性能評価

6.1 本章の概要

大規模地震動に対する軌道の対策の一つとしては、脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱させないための各種逸脱防止装置の開発が進められている⁶⁻¹⁾。このような逸脱防止装置を導入する場合には、当該装置がどのようなメカニズムで機能するのか、また、どの程度までの地震動に対して有効であるのか等を明らかにすることが重要となる。しかしながら、脱線後の挙動については十分な検討が行われておらず、逸脱防止装置の性能等について未解明な点が多いのが実情である。

また、こうした逸脱防止ガードを有道床軌道に設置する場合、その影響に関する検討も必要になる。我が国の線路の約90%は有道床軌道であるが、有道床軌道で車両が脱線した場合には線路方向に離散的に存在する横まくらぎにより、車輪が跳ね上がりながら走行することも想定されるが、その挙動が逸脱防止装置等の機能にどのような影響を及ぼすかについても未解明である。

以上のような背景から、本章ではまず、車両の脱線後の挙動を表現できる解析手法を用い、逸脱防止装置の一つである逸脱防止ガードを対象として、振動変位及び不同変位に関する基本性能を確認した。次に、これらの基本性能確認を踏まえ、長さ6.3kmのモデル線区に対して、逸脱防止ガードの効果を推定するとともに、脱線後の車両走行に有道床軌道が及ぼす影響について検討した。

6.2 解析手法

第5章で開発した新幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラムDIASTARS IIIを用いた。以下にその概要を述べる。

6.2.1 車両の力学モデル

車両の力学モデルは、5.2.1で記述したものをを用いる。具体的には、車両は、車体、台車、輪軸の各構成要素を剛体と仮定し、これら剛体をばね、ダンパで結合した三次元モデルとした。1車両当たりの自由度は31である。実車では各構成要素間に著大な相対変位を抑制できるストoppaが設けられている。これを表現するため、ばねはバイリニア形の非線形ばねとした。なお力学モデルの妥当性については、実物大車両模型を用いた検証実験が既に実施されている⁶⁻²⁾。この車両モデルを必要編成数連結して用いた。

6.2.2 構造物の力学モデル

DIASTARS IIIでは、従来と同様に、任意の構造形式を、様々な有限要素でモデル化した。本研究で用いた構造物の力学モデルの詳細については、以降の各節で述べる。

6.2.3 脱線前の車輪とレール間の力学モデル

脱線前の車輪とレール間の力学モデルは、5.2.3に記述したものをを用いた。具体的には、従来と同様に、脱線前の車輪／レール間の相互作用力を、両者の鉛直方向相対変位及び水平方向相対変位を用いて算定した。具体的には、両者の接触面の法線方向にはHertzの接触ばねを、接線方向にはクリープ力をそれぞれ考慮した。車輪フランジとレールが接触した場合にはレール小返りばね定数を用いてフランジ接触力を評価した。接触点と接触角は、予め定めておいた接触関数から求めた。接触関数は、車輪とレールの幾何学形状に基づき、鉛直方向相対変位及び水平方向相対変位の関数として定義した。

6.2.4 脱線後の車輪と逸脱防止ガードの力学モデル

脱線後の車輪と逸脱防止ガードの力学モデルには、5.2.4に記述したものをを用いた。具体的には、脱線後の車両挙動を評価するために、マルチボディーダイナミクスの手法を用いて逸脱防止ガードを含む軌道構造と車輪をモデル化している。

軌道構造は、軌間内及び軌間外（以下、内側及び外側）に逸脱防止ガードを有する剛体断面モデルとした。車輪は、解析の高速化を図るため区分的な直線（円錐台形）により近似するモデルとした。

ただし、車輪と逸脱防止ガード及び軌道構造間の弾性体同士の衝突効果はペナルティ関数法を用いて非線形の衝突ばねにより考慮する。接触点での面法線方向衝撃力は非線形ばねで、また衝突時に考えられるコンクリート表面の局所的な圧壊等による衝撃減衰は、線形の粘性減衰により表すものとした。この衝突ばねについては、新幹線車輪フランジ形状を模擬した接触子を用いた静的実験により求めた⁶⁻³⁾。

車輪が軌道上面を接触しながら左右方向に移動する場合の摩擦力は、等価なクーロン摩擦により平均的に表した。輪軸のヨー角は十分小さいものとし、車輪のヨー角による接触位置の線路方向のずれは無視するものとした。

DIASTARS IIIでは、脱線までは前節の車輪とレールの精密な幾何形状を考慮した接触モデルを、脱線後は本節の脱線後モデルを車輪ごとに使い分けることとした。脱線後のモデルでは、レールは矩形断面とし、車輪の再衝突や飛び越えも考慮できるモデルとした。ただし、レール上への再載線・走行は考慮しないものとした。

6.2.5 数値解析法

DIASTARS IIIでは、車両及び構造物に関する運動方程式を連立して解くことにより、複数の車両からなる長大な列車と構造物との動的な連成解析を行うことができる。効率的な数値解析を行うために、車両及び構造物の運動方程式をモーダル変換する。得られる車両及び構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、Newmarkの平均加速度法により時間増分 Δt 単位に解いていく。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が十分小さくなるまで Δt 内において反復計

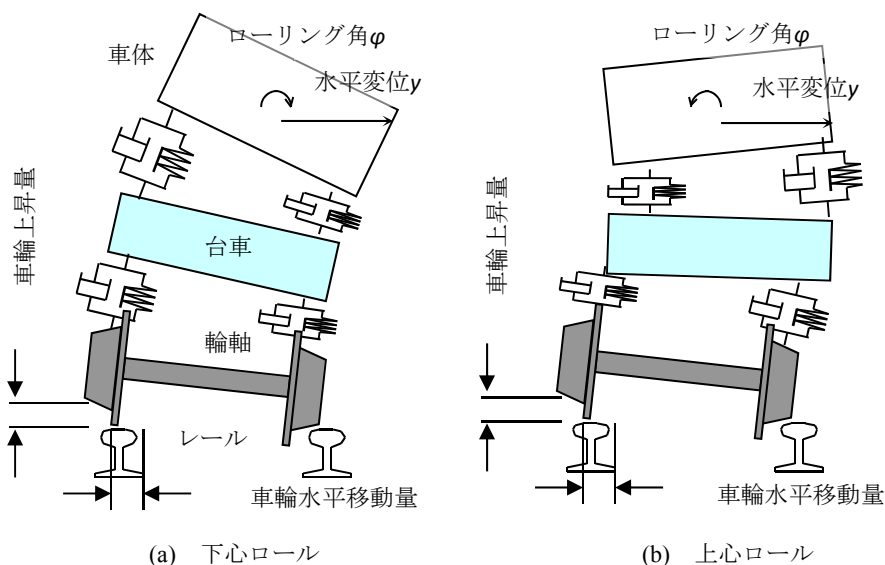


図 6-1 地震時の車両走行性の評価指標と脱線モード

算を行う。この際、数値解析速度を向上させるために、時間増分 Δt 内における収束回数をモニターし、 Δt の大きさをプログラム内で自動的に調整する手法を用いた。解析に用いた Δt は、0.0001秒を標準とした。

6.2.6 解析結果の評価指標

図 6-1 に地震時の車両走行性の評価指標と脱線モードを示す。評価指標には、車輪とレールの相対水平移動量（以下、車輪水平移動量という）を用い、その限界値は $\pm 70\text{mm}$ とした。これは、車輪がレールから外れて落ちる直前の状態を表している⁶⁻⁴。地震時の車両の脱線モードは、概ね 0.8Hz 以下で卓越する下心ロールと概ね 1.3Hz 以上で卓越する上心ロールに大別され、車体の水平動とローリング動の位相により判別される。

また、逸脱防止ガードを設置した場合については、車輪が逸脱防止ガードに乗り上げ、逸脱防止ガード上部に車輪が接触した時点で逸脱と判定した。

6.3 逸脱防止ガードの性能評価

6.3.1 検討方法

本節では逸脱防止ガードの基本性能を評価した。具体的には、正弦波加振による振動変位に関する性能評価、角折れ・目違い走行による不同変位に関する性能評価を実施した。

図 6-2 に本検討で設定した逸脱防止ガードのパラメータ及びその説明図を示す。本検討では、車輪と逸脱防止ガードの離隔を 400mm に固定し、軌道面からの高さを 174mm（レール高さ）と 87mm（レール高さの 1/2）に設定した。なお、上記 2 ケースについてそれぞれ内側及び外側に逸脱防止ガードを設置した場合の検討を行った。

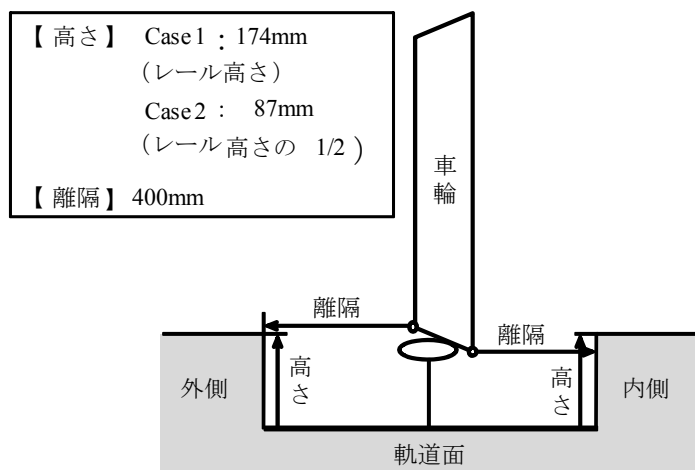


図 6-2 逸脱防止ガードのパラメータ説明図

(1) 振動変位に関する検討

本検討では 1.435m 間隔で配置した 2 本の剛な梁要素で軌道をモデル化し、それぞれの端部には加速度入力用の質点を設けた。検討車両は 1 両編成とした。

正弦波の加振振動数は 0.5Hz~3.0Hz で変化させ、各加振振動数における脱線限界及び逸脱限界振幅を見極めるため、加振振幅を線形に漸増させながら検討した。

(2) 不同変位に関する検討

図6-3に角折れ及び目違いの基本形状及び緩衝区間のモデルを示す。不同変位は、静的な左右の角折れ・目違いとしてモデル化した。この不同変位の形状は解析中、常に固定されている。具体的な不同変位の形状は、設計標準⁶⁴⁾に準じて定めた。角折れ・目違いが生じる桁端前後には、曲率の不連続を解消するために、角折れについては式(6.1)、目違いについては式(6.2)に示す緩衝区間を設けた。

$$\begin{aligned}
 &0 \leq x < L_c \\
 &y = \frac{\theta}{4\beta} e^{\beta(x-L_c)} \{ \cos \beta(x-L_c) + \sin \beta(x-L_c) \}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned}
 &L_c \leq x \leq 2L_c \\
 &y = \frac{\theta}{4\beta} e^{-\beta(x-L_c)} \{ \cos \beta(x-L_c) + \sin \beta(x-L_c) \} + \theta(x-L_c)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &0 \leq x < L_c & y = \frac{h}{2} e^{\beta(x-L_c)} \cos \beta(x-L_c) \\
 &L_c \leq x \leq 2L_c & y = \frac{h}{2} e^{-\beta(x-L_c)} \cos \beta(x-L_c) + h
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

ここに、 L_c は全緩衝区間の長さの1/2、 θ は桁端部の角折れ量、 x は全緩衝区間開始点からの距離、 h は違い量である。 β は式(3)に示す弾性床上の梁の相対曲げ剛度である。

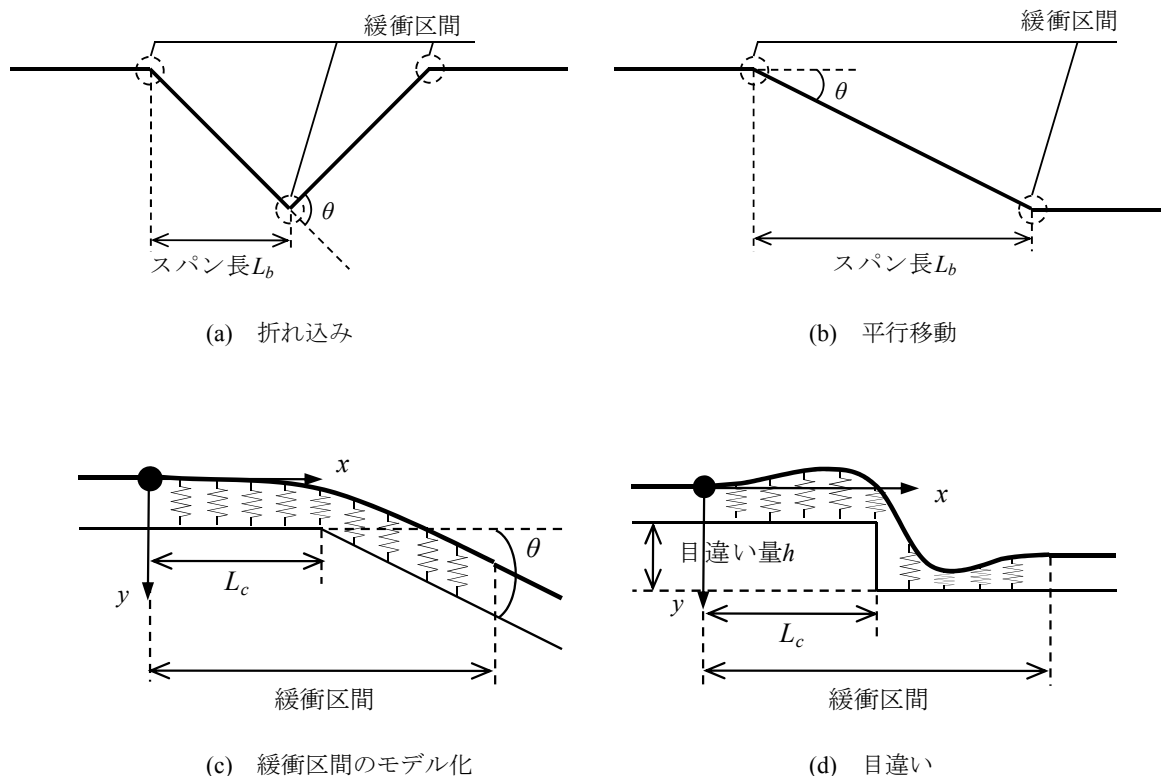


図 6-3 不同変位の基本形状

$$\beta = 4\sqrt{\frac{k}{4EI}} \tag{6.3}$$

ここに、 k は単位長さ当りの横方向の軌道支持ばね定数、 EI は横方向の軌道の曲げ剛性である。入力諸元は、60kgレールとスラブ軌道を想定し、角折れのスパン長については10m及び20mとした。また、車両は1両編成とし、列車速度160km/h、210km/h、270km/hで検討を行った。

6.3.2 検討結果

(1) 振動変位に関する検討

図6-4に正弦波1波で左右加振したときの解析結果を示す。図には車輪水平変位70mmに基づく脱線限界振幅も併せて示した。逸脱防止ガードを設置していない場合には、逸脱限界振幅が脱線限界振幅と等しくなる。図より逸脱防止ガードの効果により、脱線限界に比べ一部の加振振動数を除き全体的に逸脱限界が向上していることが確認できる。逸脱防止ガードの高さの違い (Case1とCase2) に着目すると、逸脱防止ガードの高さが高いCase1で逸脱防止効果が大きくなることが確認できる。また、逸脱防止ガードの設置位置の違い (内側と外側) に着目すると、0.5~0.7Hzでは外側、0.8~3.0Hzでは内側で逸脱防止効果が大きくなる傾向にあるが、これは脱線モードの違いに起因するものと考えられる。

正弦波1波の場合において、加振振幅で逸脱防止効果を整理すると、脱線限界に対する逸脱限界の振幅比は、内側 Case1 で 1.1~2.3, Case2 で 1.0~1.8, 外側 Case1 で 1.0~1.7, Case2 で 1.1~1.4 であった。

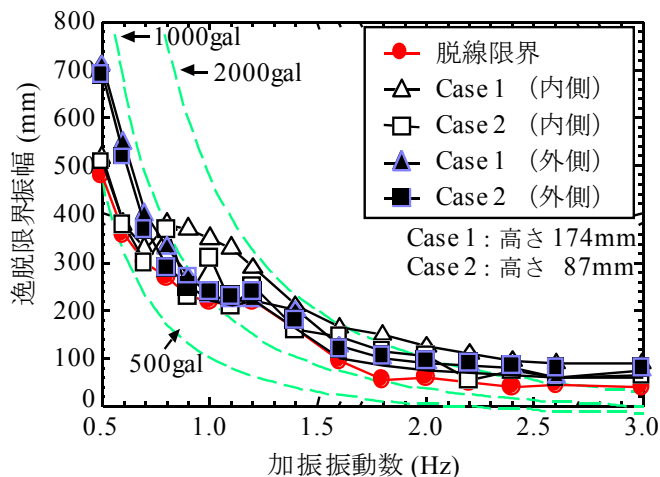


図 6-4 正弦波 1 に対する脱線及び逸脱限界振幅

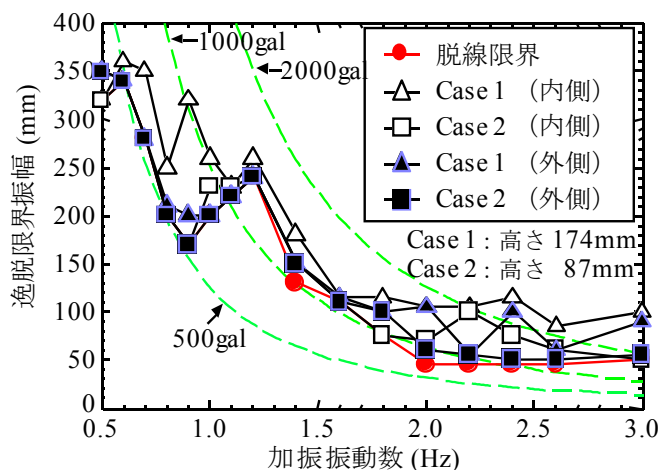


図 6-5 正弦波 5 に対する脱線及び逸脱限界振幅

図6-5に正弦波5波で左右加振したときの解析結果を示す。正弦波1波と比べて脱線限界及び逸脱限界が全体的に低下しているが、逸脱防止ガードの効果により逸脱限界が脱線限界よりも向上していることが確認できる。正弦波5波の場合には、外側の低振動数領域で逸脱防止ガードの設置により限界値が向上していない領域があり、内側に設置した場合の方が、その効果が大きいことが確認できる。また、逸脱防止ガードの高さの違い（Case1とCase2）に着目すると、逸脱防止ガードの高さが高いCase1で逸脱防止効果が大きくなるが、内側のCase2では0.5Hz～0.9Hzにおいて逸脱防止ガードによる限界値の向上は見られない。このことから、正弦波5波については逸脱防止ガードにある程度の高さがなければ逸脱限界の向上を見込めない振動数領域が存在することが分かる。

正弦波 5 波の場合において、加振振幅で逸脱防止効果を整理すると、脱線限界に対する逸脱限界の振幅比は、内側 Case1 で 1.0～2.6, Case2 で 1.0～2.2, 外側 Case1 で 1.0～2.3, Case2 で 1.0～1.3 であった。

(2) 不同変位に関する検討

図6-6に折れ込み走行時の解析結果を示す。列車速度の増加に伴い、脱線限界及び逸脱限界が下がる傾向にあるものの、逸脱防止ガードの設置により限界値が大きく向上していることが確認できる。また、逸脱防止ガードが高いほどその効果も大きいことが分かる。逸脱防止ガードの設置位置の違い（内側と外側）については、内側 Case1 の160km/hを除けば大きな差はなかった。逸脱防止ガード設置により折れ込みに対する限界値は、内側 Case1 で1.9～3.6倍、Case2で1.6～2.4倍、外側 Case1 で2.0～2.6倍、Case2で1.5～2.1倍向上した。

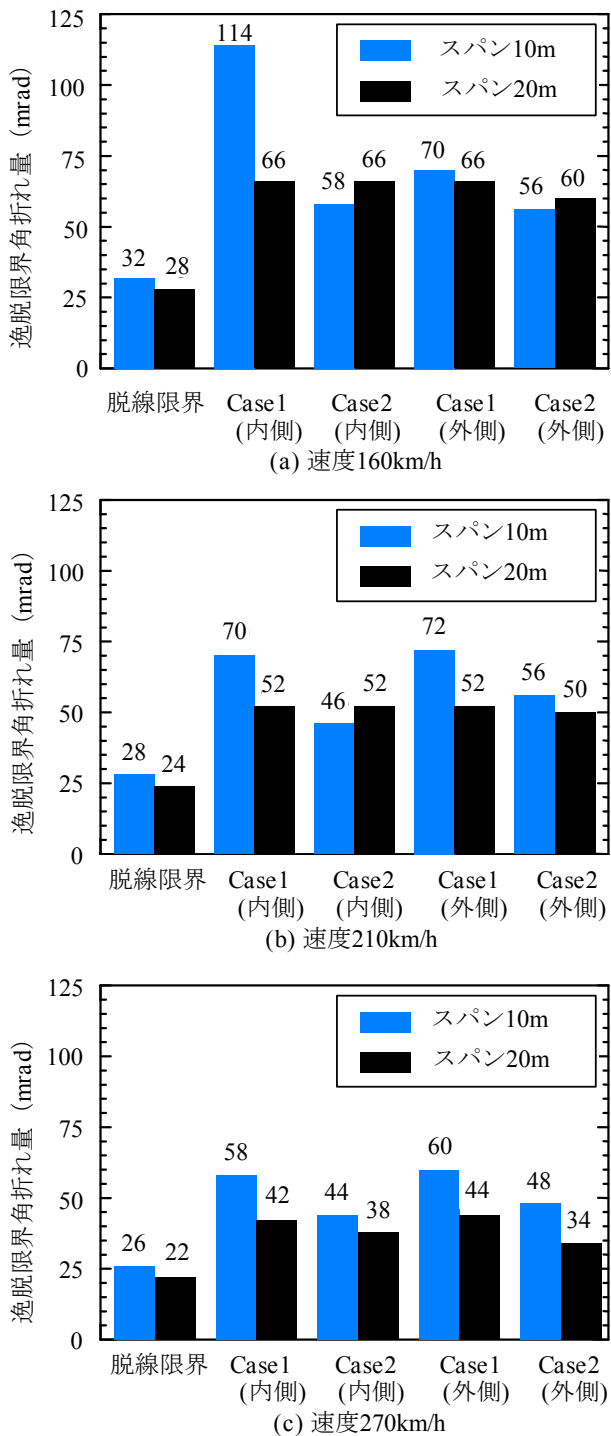


図6-6 逸脱限界（角折れ：折れ込み）

図6-7に平行移動走行時の解析結果を示す。折れ込みと同様、逸脱防止ガードの設置により限界値が大きく向上していることが確認できる。また、逸脱防止ガードが高いほどその効果も大きいことが分かる。逸脱防止ガードの設置位置の違いについては、外側よりも内側の方がやや逸脱防止効果が高くなった。逸脱防止ガード設置により平行移動に対する限界値は、内側 Case1 で 1.8～4.1 倍、Case2 で 1.5～2.6 倍、外側 Case1 で 1.4～3.3 倍、Case2 で 1.4～3.1 倍向上した。

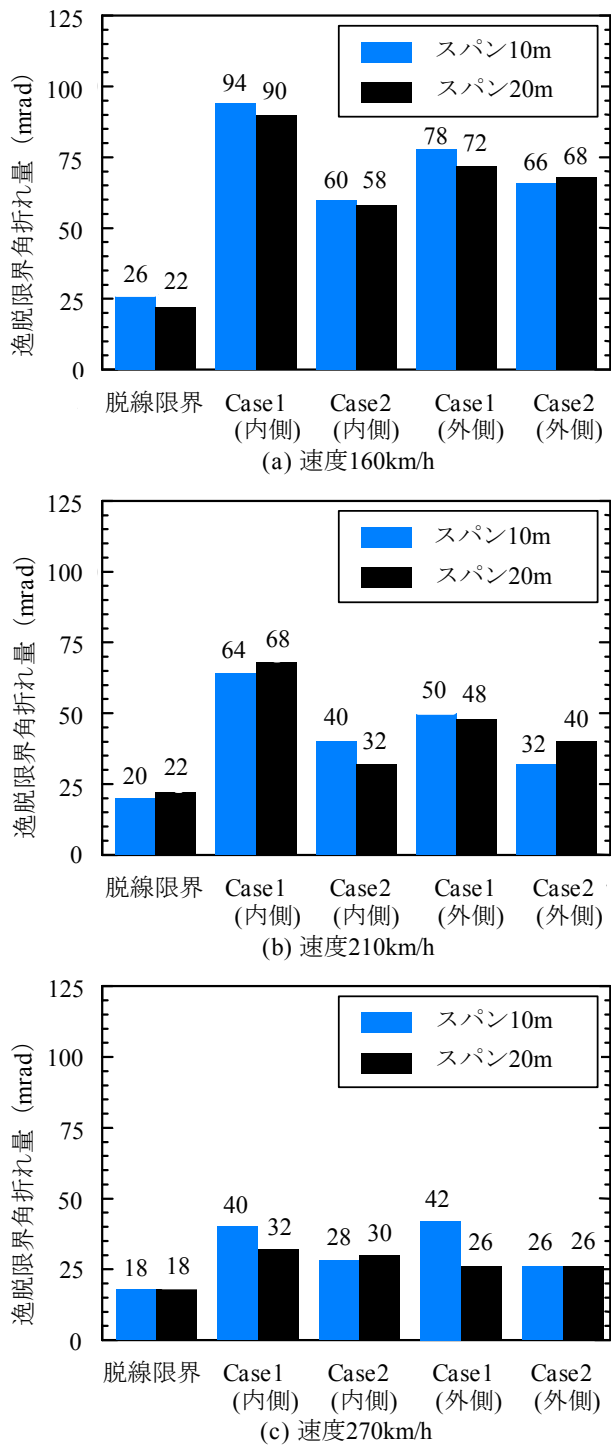


図6-7 逸脱限界 (角折れ：平行移動)

図6-8に目違い走行時の解析結果を示す。角折れの場合と同様、逸脱防止ガードの設置により限界値が大きく向上していることが確認できる。また、逸脱防止ガードが高いほどその効果も大きくなっている。逸脱防止ガードの設置位置の違いについては、外側よりも内側の方が逸脱防止効果が高くなる傾向にあった。逸脱防止ガードの設置により目違いに対する限界値は、内側Case1で1.9倍以上、Case2で1.7倍以上、外側Case1で1.9倍以上、Case2で1.5～2.2倍向上した。

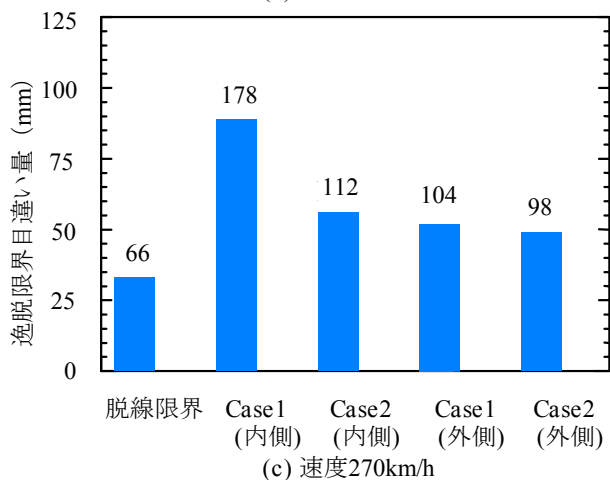
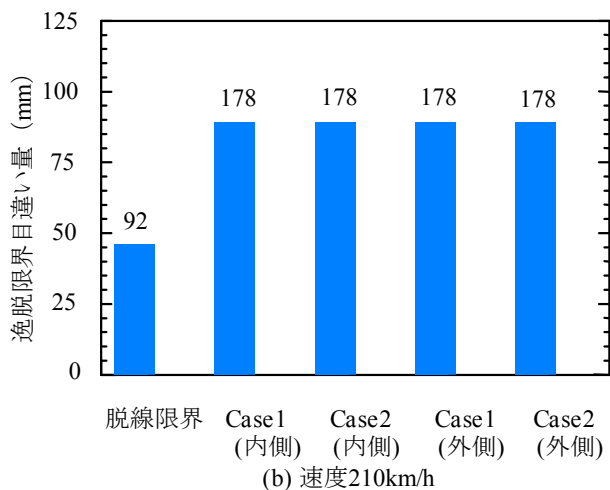
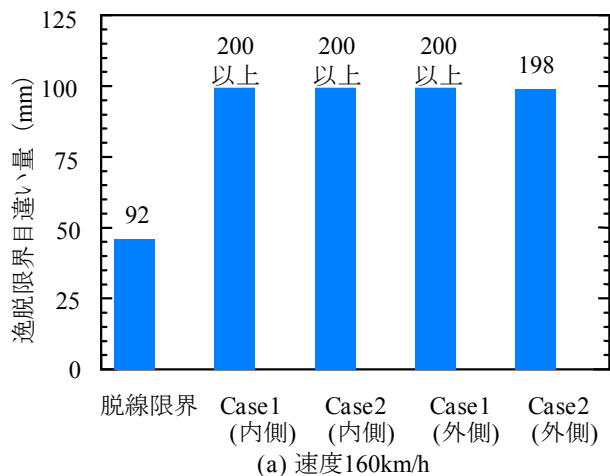


図 6-8 逸脱限界 (目違い)

6.4 有道床軌道における脱線後挙動の検討

6.4.1 検討方法

図6-9～図6-12に脱線後における有道床軌道上の車両挙動の検討モデルを示す。本章では、図6-9に示すように構造物データベースと解析条件に基づき、自動的に解析区間を抽出して解析モデルを作成し、解析実施後は、解析結果を合成して全体線区の評価を行った。脱線後における有道床軌道上の車両挙動を検討する場合、線区全線に車両を載荷して、洩れなく解析するのが理想的であるが、この場合、構造物や車両の自由度が膨大となる。そこで、図6-10に示すように、8両編成を1Sub Caseとして分割解析を行う手法を用いた。具体的には、地震動ごとに予め検討しておいた支配時間（地震動ごとの脱線の発生する可能性が最も高い時間帯）から、各Sub Caseの抽出区間を計算した⁶⁻⁵⁾。例えばSub Case 11の場合、必要な抽出区間は距離程1700～2400mとなる。この抽出した区間を自動メッシュによりFEMでモデル化する。なお抽出区間の前後には、抽出区間前後の構造物の平均的な振動特性に基づく半無限走行領域を設けた。

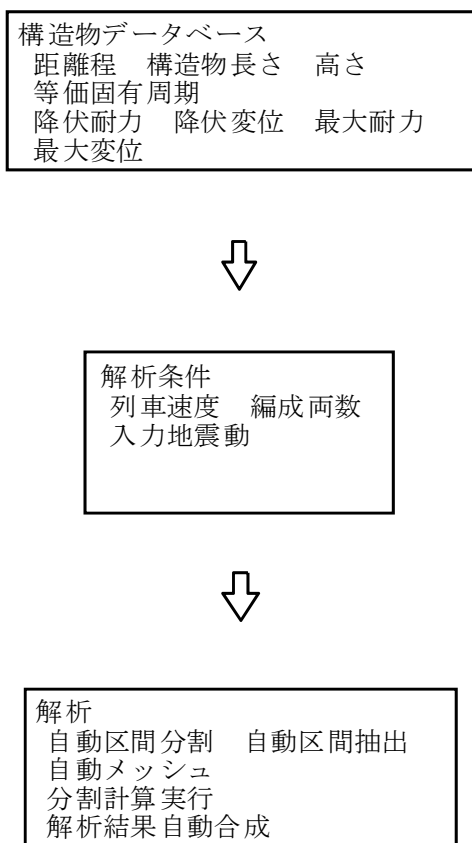


図 6-9 脱線後における有道床軌道上の車両挙動の検討モデル（全体システムフロー）

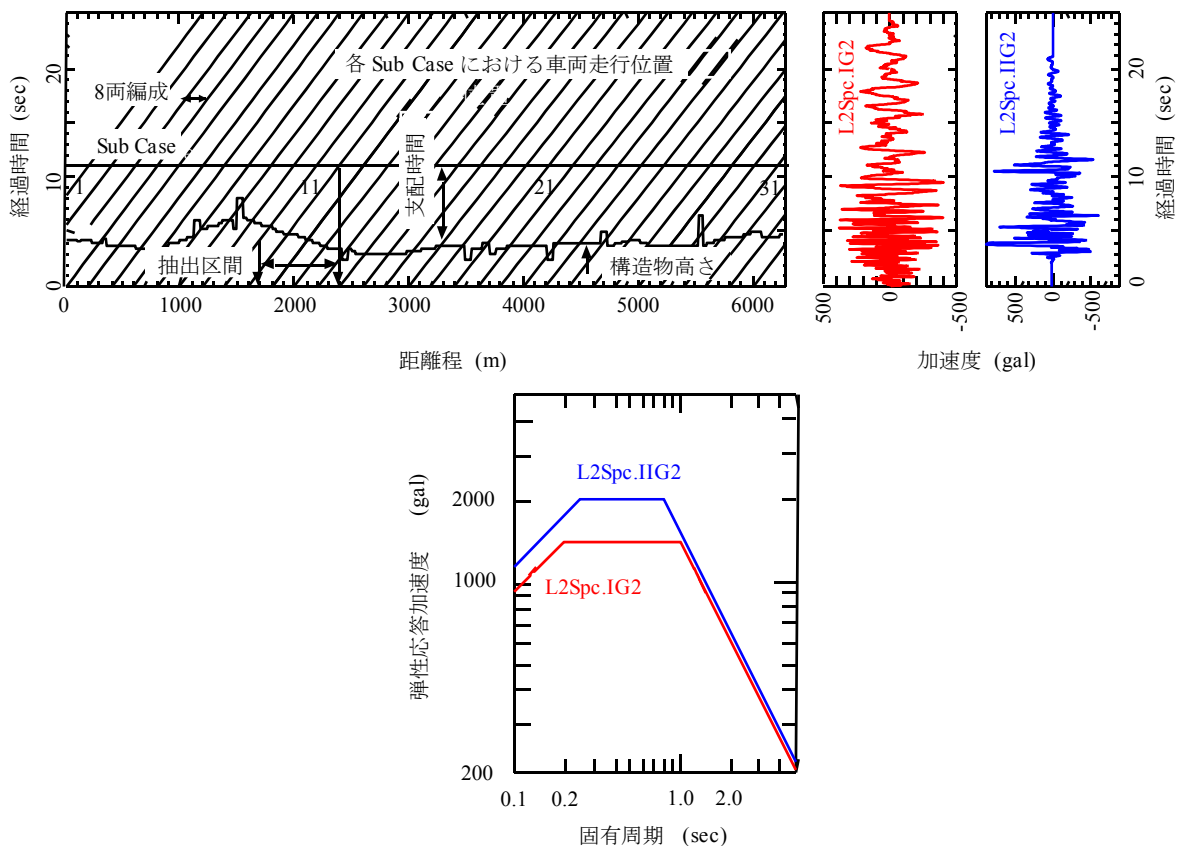


図 6-10 脱線後における有道床軌道上の車両挙動の検討モデル（列車走行位置と地震動の関係）

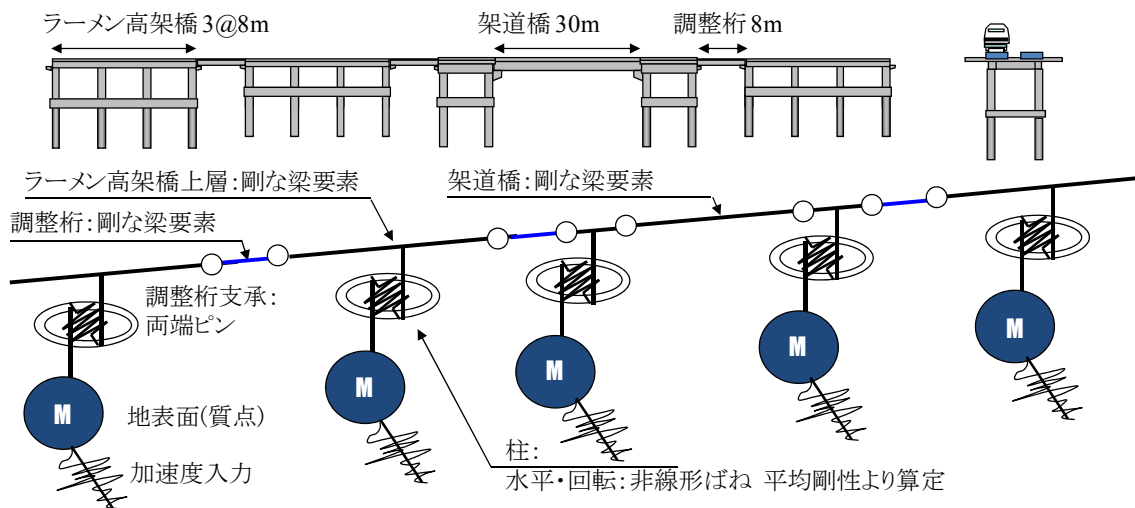


図 6-11 脱線後における有道床軌道上の車両挙動の検討モデル（構造物の FE モデル）

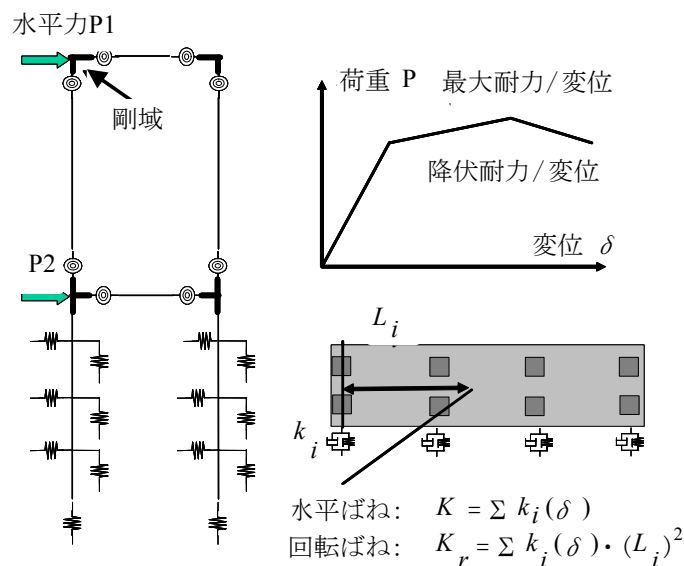


図 6-12 脱線後における有道床軌道上の車両挙動の検討モデル(柱の水平・回転ばねの算出方法)

本検討では、6.3kmの複線の新幹線高架橋を解析対象とした。3径間、ブロック長24mの調整桁式ラーメン高架橋を構造物群の基本単位とした。図6-11は抽出区間の具体的なFEMモデルの例である。高架橋の上層及び桁は剛な梁要素でモデル化した。構造物の非線形性は、図6-12に示すように予めプッシュオーバー解析により骨格線を求めておき（データベースの入力項目）、これに基づき重心位置に標準バイリニア型の非線形水平及び回転ばねを設けて考慮した。構造物の減衰定数 ζ は5%とした。

入力地震動には鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）⁶⁻⁶⁾に定める海溝型のL2スペクトルI地震動及び内陸活断層型のL2スペクトルIIを用いた。地盤はG2地盤（洪積層）を想定した。車両の応答は非線形性が強いので、地震動の地表面入力加速度最大値PGAを線形に漸増させながら検討を行った。

図 6-13 に、脱線後における有道床軌道上の車両挙動検討用軌道変位モデルを示す。DIASTARS III では車輪と軌道表面とは線路方向に1点で接触するモデルであるため、非現実的な落下量が生じないように車輪径とまくらぎ寸法・間隔から定まる落下限界を考慮する必要がある。このため本解析では、図に示すように落下限界時の車軸中心位置に基づいてまくらぎ形状関数を定義した。ここで、まくらぎは4Hまくらぎ⁶⁻³⁾を想定した。

また、本検討における逸脱防止ガードは、既に提案されている逸脱防止ガードの諸元⁶⁻¹⁾を参考にし、離隔400mm、軌道面からの高さ235mmの外側タイプとした。

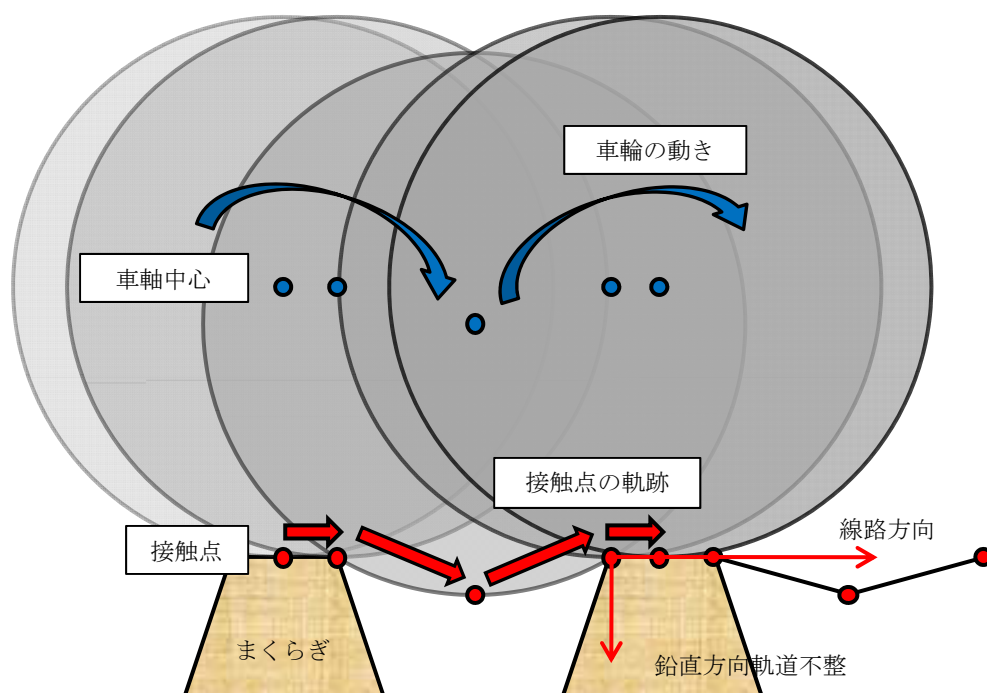


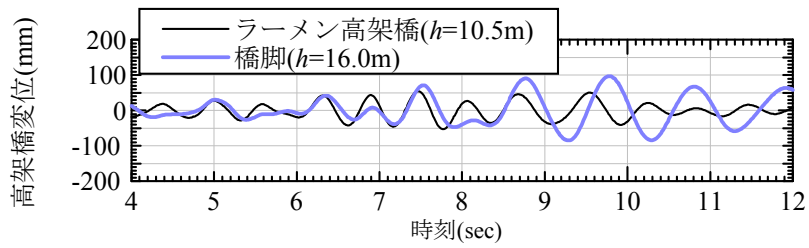
図 6-13 横まくらぎ形状のモデル化手法

6.3.2 検討結果

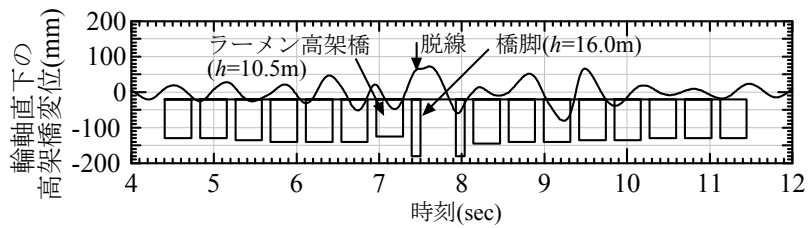
図6-14に脱線が生じたケースの時刻歴波形の例を示す。脱線の形態は様々であるが、ここではSub Case8, 1号車, 海溝型L2地震動スペクトルI, 地表面入力最大化速度 $PGA=240gal$ の場合について示した。ラーメン高架橋と橋脚の変位を見ると、7秒で相対変位50mmを生じていることが分かる。車輪直下の構造物の変位を見ると7秒前後で2Hz, 全振幅80mmの加振を受けていることが分かる。車輪上昇はラーメン高架橋と橋脚の間の調整桁上ではじまり、車輪水平移動量が70mmを超えて脱線している。脱線した車輪は9.7秒に逸脱防止ガードに衝突している。脱線時刻において車体水平変位と車体ロール角は完全に同位相となっており、上心ロールによる脱線であると判断される。個々の脱線全てに対して脱線形態を判定することはできないが、構造物の等価固有周期が0.5~0.7秒程度であること、角折れが大きいこと等から、全体として上心ロールが多く見られた。

図6-15にモデル線区全体の諸元を、図6-16に線区全体の解析結果を示す。海溝型L2スペクトルI, 地表面入力加速度 $PGA=240gal$ の場合の応答について示した。車両の応答は1両単位の最大値で整理し、海溝型は8秒後、内陸活断層型は6秒後の走行位置で図中に整理して示した。車輪の水平移動量が200mmを超えたものは200mmとして示した。高橋脚の河川橋梁は隣接ラーメン高架橋よりも等価固有周期が長く、変位が大きくなる傾向にある。架道橋は逆に隣接ラーメン高架橋よりも等価固有周期が短く、変位が小さくなる傾向にある。これらの構造物境界で角折れが生じやすいため、車輪上昇量や水平移動量も大きくなる傾向にあることが確認できる。

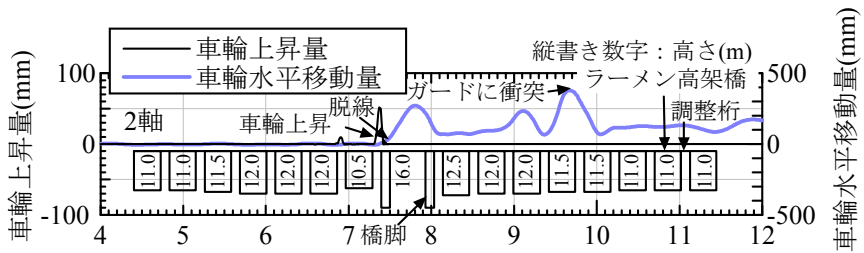
図6-17に車輪の水平移動量が70mmを超える限界地表面入力加速度 PGA_L を示す。同規模の波の繰り返し数が多い海溝型の方が、厳しい PGA_L となっている。線区内では振動特性の変化地点で PGA_L が低くなる傾向にあることが読み取れる。



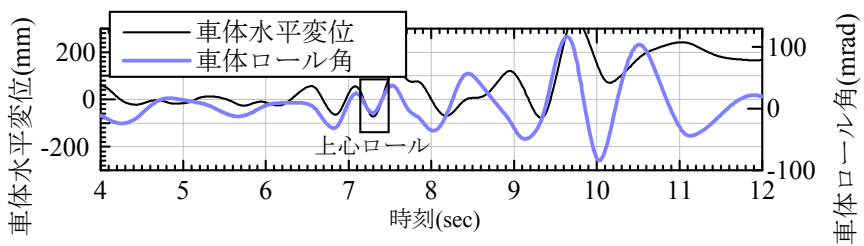
(a) 高架橋の水平変位



(b) 輪軸直下の高架橋の水平変位



(c) 車輪上昇量・車輪水平移動量



(d) 車体水平変位・車体ロール角

図 6-14 時刻歴波形の例(Sub Case 8, 1号車, 海溝型 L2 地震動スペクトル I, $PGA=240gal$)

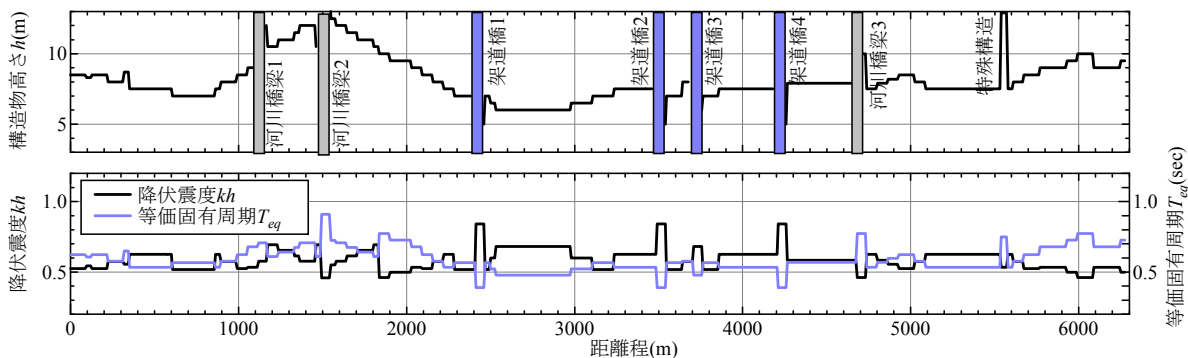


図 6-15 モデル線区の構造物諸元

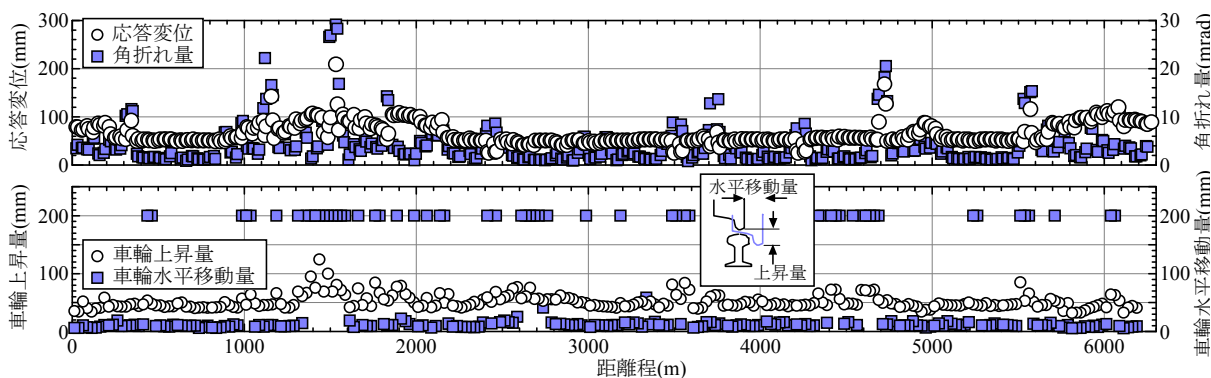


図 6-16 モデル線区の解析結果 (海溝型 L2 スペクトル I, $PGA = 240gal$)

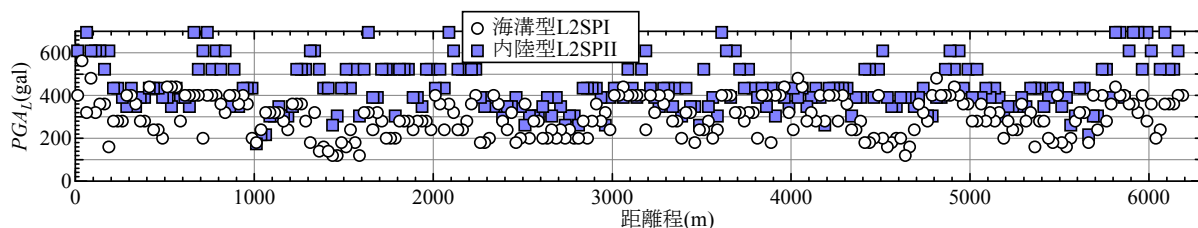
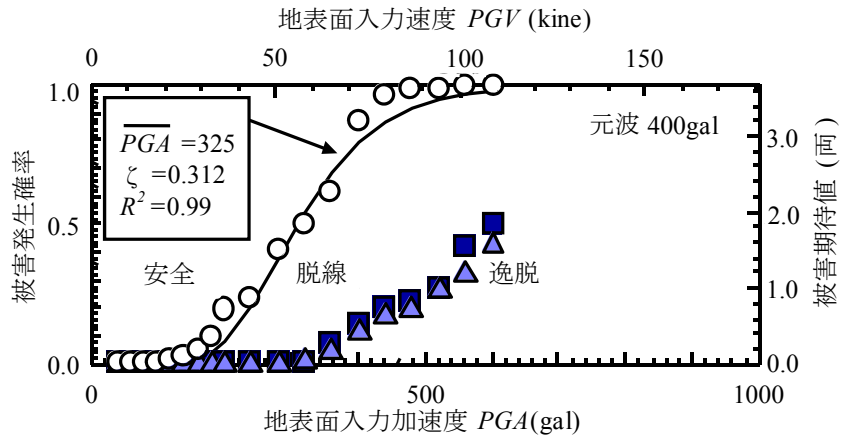
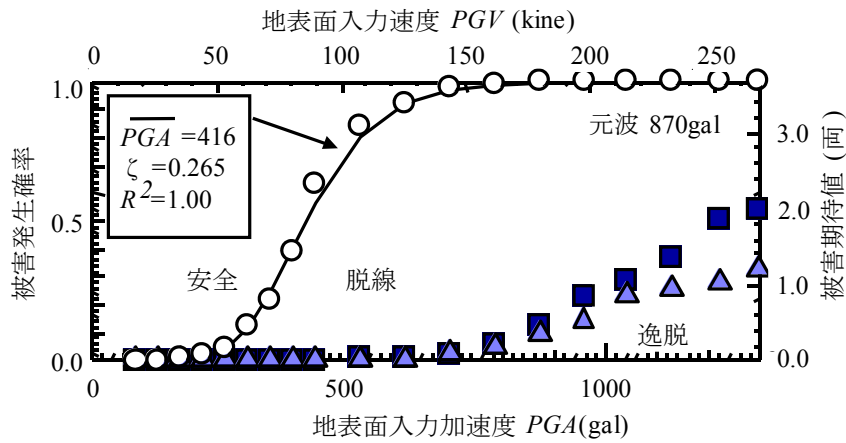


図 6-17 モデル線区の限界地表面加速度 PGA_L

図6-18にモデル線区の地震時車両走行性に関するフラジリティ曲線を示す。図中に示す仮定に基づき、図6-17に示す数値解析結果を整理した。逸脱防止ガードは、それぞれの地震動の元波に対して逸脱被害発生確率10%程度であり、かなりの大規模地震動に対しても効果を発揮することが分かった。これは3章でも示したように、逸脱防止ガードが振動変位及び不同変位による逸脱防止に有効であること、特に本検討においては、構造物境界で発生する角折れに対して、十分な逸脱防止性能を発揮したためであると考えられる。また、図から平坦なコンクリート上を走行した場合も、有道床軌道上を走行した場合も逸脱に関するフラジリティ曲線に大きな差がないことが分かった。



(a) 海溝型L2スペクトルI



(b) 内陸活断層型L2スペクトルII

図 6-18 モデル線区の地震時車両走行性に関する fragility 曲線

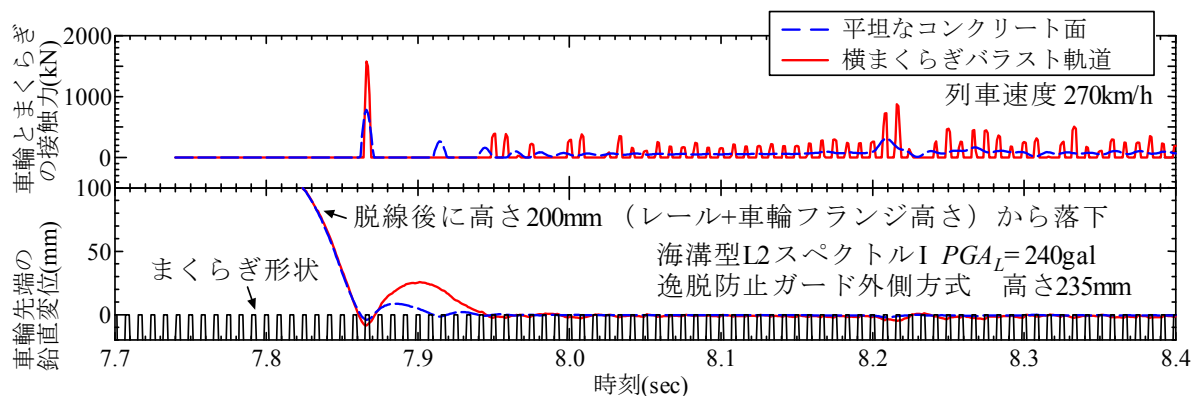


図 6-19 脱線後車輪の鉛直挙動とまくらぎ間の接触力の関係

図6-19に脱線後車輪の鉛直挙動と車輪とまくらぎ間の接触力の関係を示す。コンクリート上を平坦に走行する場合に比べ、まくらぎ上を走行する場合はやや跳ね上がり大きい傾向が読み取れる。車輪とまくらぎ間の接触力については、車輪落下直後に1500kNの著大な力が生じている。新幹線車輪フランジ形状の重錘を用いた衝撃実験³⁾より、実際のPCまくらぎの耐荷力は800kN～900kNとの結果が得られているが、これに照らすと、落下直後に接触するまくらぎは破壊する可能性が高い。その後の走行では耐荷力を超える接触力は生じなかった。

これらの挙動は、現時点で得られる情報に基づき実施したものであるが、車輪とまくらぎとの接触ばねに依存する。よって、この点については実験及び有限要素法を用いた詳細な数値解析により、更に精度を向上させていく必要がある。

6. 5 本章の結論

本章では、第5章で開発した脱線後の車両挙動解析手法を用い、逸脱防止装置の一つである逸脱防止ガードを対象として、振動変位及び不同変位に関する基本性能を確認した。次に、これらの基本性能確認を踏まえ、長さ6.3kmのモデル線区に対して、逸脱防止ガードの効果を推定するとともに、脱線後の車両走行に有道床軌道が及ぼす影響について検討した。

本章で得られた知見を以下にまとめて示す。

- (1) 脱線後の車両挙動を評価できる手法を用いて、逸脱防止ガードの振動変位及び不同変位に対する基本性能を評価した。その結果、振動変位及び不同変位の両者に対して大きな効果があることを示した。具体的には、高さ174mmの逸脱防止ガードを軌間内に設置した場合、脱線限界に対する逸脱限界の振幅比は、正弦波1波での左右加振で1.1～2.3、正弦波5波で1.0～2.6であることを示した。また、不同変位に対しても、列車速度270km/hの場合で、限界値が1.8倍以上向上することを示した。
- (2) 脱線後における有道床軌道上での車両挙動の検討のため、モデル線区での地震時車両走行性解析を実施し、当該線区における fragility 曲線を算出した。その結果、高さ235mmの逸脱防止ガードを軌間外に設置した場合、海溝型L2スペクトルI及び内陸活断層型L2スペクトル

IIの元波に対して逸脱被害発生確率10%程度であり、かなりの大規模地震動に対しても効果を発揮することを確認した。

- (3) 脱線後にコンクリート平板上を走行した場合も、有道床軌道上を走行した場合も逸脱に関するフラジリティ曲線に大きな差がないことが分かった。
- (4) 平坦なコンクリート上を走行する場合に比べ、まくらぎ上を走行する場合はやや跳ね上がりが大きい傾向にあることが分かった。また、車輪落下直後に車輪とまくらぎ間には1500kNの著大な力が生じたが、その後の走行ではまくらぎの耐荷力を超える接触力は生じなかった。

参考文献

- 6-1) 浅沼潔，曾我部正道，渡辺勉，岡山準也，涌井一：逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発、鉄道総研報告，Vol.23，No.2，2009.
- 6-2) 宮本岳史，松本信之，曾我部正道，下村隆行，西山幸夫，松尾雅樹：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集（C編），Vol.72，No.706，pp.1849-1855，2005.
- 6-3) 後藤恵一，曾我部正道，浅沼潔，渡辺勉：鉄道車輪とPCまくらぎの接触力に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.769-774，2010.
- 6-4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006.
- 6-5) 曾我部正道，原田和洋，浅沼潔，丸山直樹，渡辺勉：連続する鉄道構造物群の地震時列車走行性，鉄道力学論文集，No.13，pp.177-184，2009.
- 6-6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，1999.

第7章 車体と軌道，構造物等の簡易な接触解析法

7.1 本章の概要

鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）⁷⁻¹⁾では、大規模地震動に対して単一の対策のみで列車の走行安全性を確保することが困難であること、従って、大規模地震動に対しては、地震早期検知システム、構造物の補強、軌道の安全対策等を利用し、鉄道システム全体として減災に努める必要があることが指摘されている。

これら減災対策のうち、軌道側の対策として、車両の脱線を防止する脱線防止ガード⁷⁻²⁾や、万が一車両が脱線した場合でも脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱することを防止する各種逸脱防止装置^{7-2), 7-3)}の開発が進められている。このような対策工の開発や導入にあたっては、地震時の車両挙動および対策工の具体的な構造、設計法、機能、費用対効果、あるいは設置の優先順位等を明確にしておく必要がある。この点に関して、地震時の脱線までの車両挙動や脱線防止ガードの機能については、既に、実物大車両模型を用いた振動台実験や数値解析により明らかにされている^{7-4), 7-5)}。脱線後の車両挙動については、実験による検討が困難であることから数値解析による検討が進められ、その基本的な挙動が明らかにされつつあるが⁷⁻⁶⁾、車両の各部位（例えば、モーターや車体）が軌道や構造物等の地上設備（以下、線路構造物）に接触する影響についてはほとんど検討が行われていない^{7-7), 7-8)}。また、様々なタイプの逸脱防止装置が開発される中で、その効果を定量的に評価可能な柔軟な数値解析手法の確立が求められている。

以上のような背景から、本研究では、車両と線路構造物との接触を考慮した、脱線前～脱線後の一連の車両挙動を表現可能な数値解析手法の確立を目的として、その初期段階として、車体と線路構造物の接触評価手法を提案するとともに、脱線後の車両挙動を表現可能な既存の解析プログラムに組み込み、試算によりその実用性を検討した。

7.2 解析手法

接触体の形状寸法や材料の非線形特性を考慮した精緻な接触評価を行う場合、FEM解析手法を用いるのが一般的である⁷⁻⁹⁾。しかしながら、本研究で対象とするのは複雑な多自由度の接触問題であるため、単純なシェル要素やソリッド要素による接触問題とすると、膨大な自由度が必要となる。また、走行中の車両が地震動等の外力によって脱線し、線路構造物に接触するような数十秒単位の長時間の現象を評価する必要がある。このような問題に対して、実用的な数値解析を行うためには何らかの工夫が必要となる。本研究において、車両と線路構造物間の接触解析を行うための基本コンセプトは以下の通りである。

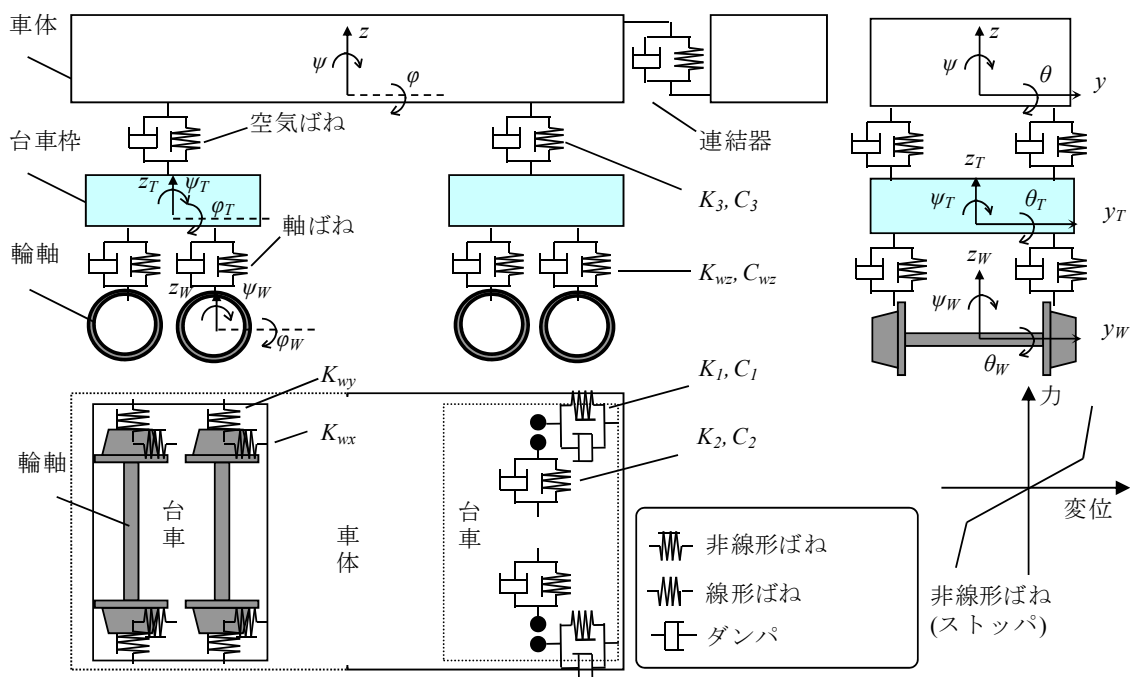


図 7-1 車両の力学モデル

- 車体，台車，輪軸（車両側逸脱防止ガードを含む）と線路構造物の接触問題を効率的に取り扱うこととする．即ち，有限要素同士のようなマイクロな接触は対象とせず，一定の程度を保ちつつもマクロに接触現象を表現する．
 - 接触方向は線路直角方向，鉛直方向とし，線路方向の衝突に関しては線路構造物側の反力のみ取り扱う．よって車両は等速運動するものとする．本解析手法では極端な正面衝突問題は取り扱わない．
 - 接触はペナルティ法を用いて効率的に行うこととする．接触力計算は，車両側の接触検知点と線路構造物側の接触面とで行う．
 - 接触（ペナルティ）ばねは，接触検知点と接触面の相対変位（仮想食い込み量）と接触力の関数として定義し，マルチリニアモデルとして区分的に表す．この接触ばね特性については，要素実験または詳細なFEM解析により別途求める．
 - 各接触ばねは，各接触検知点の支配面積に応じて個々に定義する．
 - 車両側の接触検知点は，接触検知点が属するマルチボディ（車体，台車または輪軸）の重心に対する相対位置で定義する．
 - 線路構造物側の接触面は，レールとその他の構造に分ける．レールは同一構造が連続して続くため，線路直角方向にはFEMを用いずに剛体断面のマルチボディとして定義する．その他の構造は，FEM節点情報を用いて接触面を定義する．
 - 接触解析は，接触開始判定トリガーにより，個々の車両，台車，輪軸単位で行う．
- なお，本研究では，研究の初期段階として，車体と線路構造物間の接触評価手法について先行して検討を行った．また，本提案手法は，第5章で示した脱線前後の車両挙動を解析可能な，新

幹線車両と鉄道構造物との動的相互作用解析プログラムDIASTARS III^{7-10), 7-11)}を改良することで構築した。以下にその概要を述べる。

7.2.1 車両の力学モデル

図7-1に車両の力学モデルを示す。車両は、車体、台車、輪軸の各構成要素を剛体と仮定し、これら剛体をばね、ダンパで結合した三次元モデルとした。1車両当たりの自由度は31である。また、実車では各構成要素間に著大な相対変位を抑制できるストoppaが設けられていることから、これを表現するために、ばねはバイリニア形の非線形ばねとした。なお、力学モデルの妥当性については、実物大車両模型を用いた検証実験⁷⁻⁴⁾や、汎用の機構解析プログラムおよびFEM解析プログラムとの比較・検証が既に行われている^{7-12), 7-13)}。以降の3節および4節で用いる車両諸元は、近年の新幹線車両の諸元を参考に仮定した。

車両系の運動方程式は、車両座標系において、各構成要素間の非線形ばね項を右辺に移行し、式(7.1)のように表せる。

$$\mathbf{M}^V \ddot{\mathbf{X}}^V + \mathbf{C}^V \dot{\mathbf{X}}^V + \mathbf{K}^V \mathbf{X}^V = \mathbf{F}_L^V + \mathbf{F}_I^V(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B) + \mathbf{F}_N^V(\mathbf{X}^V) \quad (7.1)$$

ここに、 \mathbf{X}^V は車両の変位ベクトル、 \mathbf{X}^B は構造物の変位ベクトル、 \mathbf{M}^V 、 \mathbf{C}^V 、 \mathbf{K}^V はそれぞれ車両の質量、減衰、剛性マトリクス、 \mathbf{F}_L^V は遠心力や風荷重等の車両への荷重ベクトル、 $\mathbf{F}_I^V(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B)$ は構造物との相互作用力、 $\mathbf{F}_N^V(\mathbf{X}^V)$ は外力扱いとした車両モデル内の非線形ばね力の荷重ベクトルである。

7.2.2 構造物の力学モデル

DIASTARS IIIでは、任意の構造形式を、様々な有限要素でモデル化することができる。構造物の詳細な力学モデルについては、別途、各章で述べる。

なお、構造物系の運動方程式は、構造物の非線形ばねの項を右辺に移行し、式(7.2)のように表せる。

$$\mathbf{M}^B \ddot{\mathbf{X}}^B + \mathbf{C}^B \dot{\mathbf{X}}^B + \mathbf{K}^B \mathbf{X}^B = \mathbf{F}_L^B + \mathbf{F}_I^B(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B) + \mathbf{F}_N^B(\mathbf{X}^B) \quad (7.2)$$

ここに、 \mathbf{M}^B 、 \mathbf{C}^B 、 \mathbf{K}^B はそれぞれ構造物の質量、減衰、剛性マトリクス、 \mathbf{F}_L^B は主として地震や風荷重等の構造物に働く荷重ベクトル、 $\mathbf{F}_I^B(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B)$ は車両との相互作用力に関する節点荷重ベクトル、 $\mathbf{F}_N^B(\mathbf{X}^B)$ は外力扱いとした構造物モデル内の非線形ばね力の荷重ベクトルである。

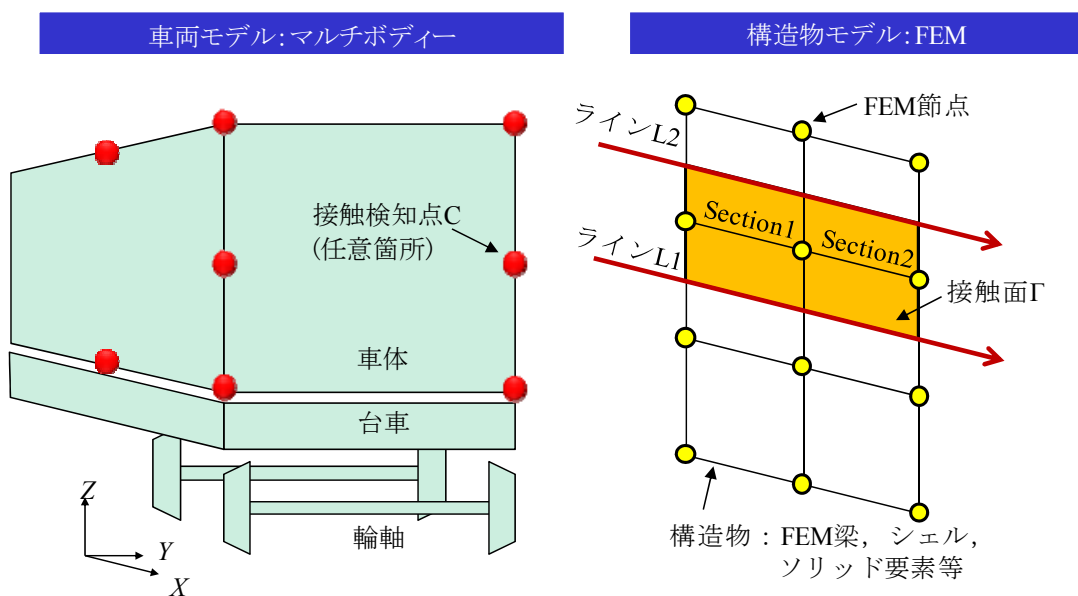


図 7-2 車体と構造物の接触モデルの概念図

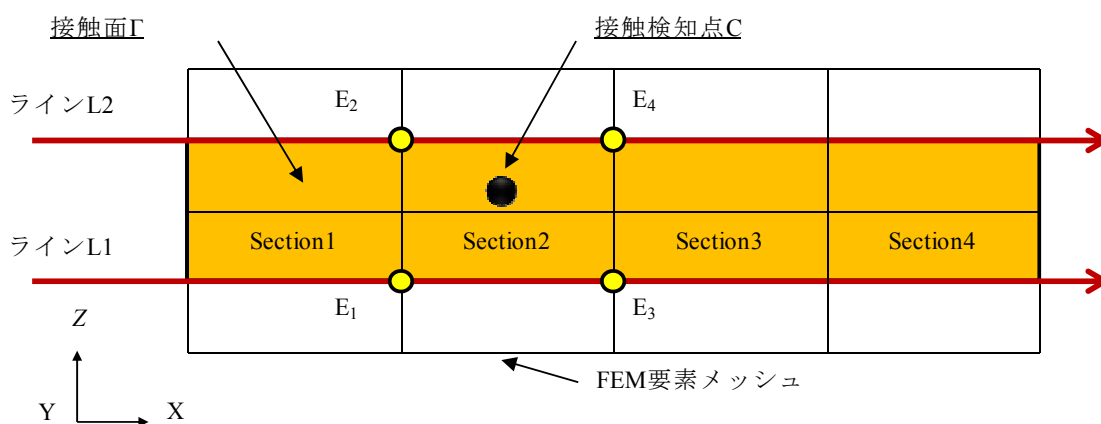


図 7-3 構造物上の接触面のモデル化

7.2.3 車体と線路構造物の接触力学モデル

図7-2に車体と線路構造物間の接触モデルの概念図を示す。本提案手法は、車体と線路構造物間の複雑な接触現象を実用的なレベルで表現可能なものとするために、車体に定義した接触検知点と、線路構造物FEM情報から構成した接触面により、接触評価を行うものである。

(1) 車体の接触検知点

構造物と接触する可能性のある車体の任意箇所 contacts 検知点 C_i ($i=1, \dots, n$) を定義し、接触検知点において構造物との接触判定や相互作用力を計算するものとした。本手法により、車体の接触位置が予想できる場合には、接触する可能性のある位置にのみ接触検知点を配置することで高速な接触計算を行える。また、車体側の接触位置が予想できない場合には、接触検知点を密に配置することで、接触位置の特定も可能となる。

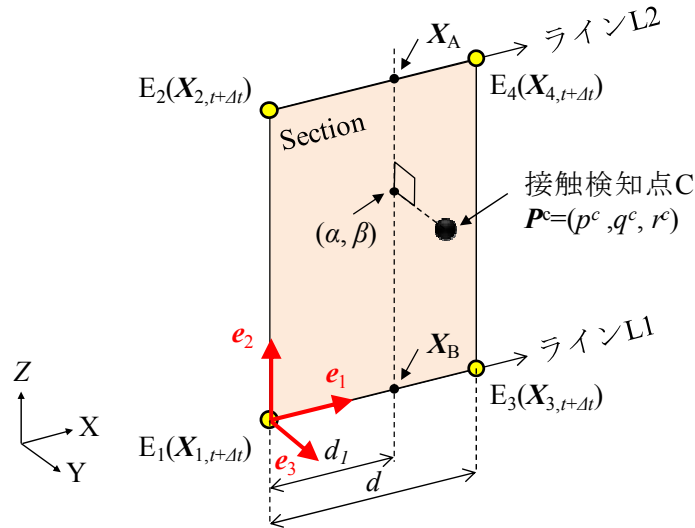


図 7-4 接触検知点 C と接触面(Section)との接触

(2) 構造物上の接触面

図 7-3 に構造物上の接触面のモデル化を示す．接触面は，構造物 FEM 要素上に定義した線路方向の 2 本のラインにより挟まれる領域としてモデル化することとした．また，この接触面は，ライン L1 および L2 が通過する要素境界上の E1～E4 の 4 点で定義される双一次曲面の各 Section により区分的に表現することとした．接触面を Section により表現することで，接触検知点が存在する Section（図 7-3 では Section2）でのみ接触計算を行えば良いため，高速な計算が可能となる．

(3) 接触検知点と接触面間の接触力

今，図 7-4 に示すように，接触検知点 C とある接触面 Section との接触を考える．Section を構成する 4 点 E_i ($i=1\sim 4$) の初期の全体座標系での位置を \mathbf{X}_i とすると，接触面の局所座標系を定義する単位ベクトル $\mathbf{e}_1\sim\mathbf{e}_3$ は，式(7.3)のように表すことができる．

$$\begin{aligned}
 \mathbf{e}_1 &= (\mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_1) / |\mathbf{X}_3 - \mathbf{X}_1| \\
 \mathbf{e}'_2 &= (\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1) / |\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_1| \\
 \mathbf{e}_3 &= \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}'_2 / |\mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}'_2| \\
 \mathbf{e}_2 &= \mathbf{e}_3 \times \mathbf{e}_1
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

時刻 t までが解かれ，接触検知点 C の時刻 $t + \Delta t$ での全体座標系での位置を $\mathbf{X}_{t+\Delta t}^C = (X_{t+\Delta t}^C, Y_{t+\Delta t}^C, Z_{t+\Delta t}^C)$ とすると，接触面局所座標系での位置 \mathbf{P}^C は，式(7.4)のように表すことができる．

$$\mathbf{p}^c = \begin{pmatrix} p^c \\ q^c \\ r^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\mathbf{X}_{t+\Delta t}^c - \mathbf{X}_1) \cdot \mathbf{e}_1 \\ (\mathbf{X}_{t+\Delta t}^c - \mathbf{X}_1) \cdot \mathbf{e}_2 \\ (\mathbf{X}_{t+\Delta t}^c - \mathbf{X}_1) \cdot \mathbf{e}_3 \end{pmatrix} \quad (7.4)$$

また，時刻 $t + \Delta t$ において，ライン L1 上で接触検知点 C が E_1 から d_1 の距離にあるものとし， $E_1 \sim E_3$ 間の距離を d とすると，接触検知点 C の接触面上ライン L1 方向の正規座標 α は式(7.5)のように書ける．

$$\alpha = d_1/d \quad (7.5)$$

次に，時刻 $t + \Delta t$ での E_i の変位ベクトルを $\mathbf{u}_{i,t+\Delta t}$ ， E_i の全体座標系での初期位置($t=0$)を \mathbf{X}_i とすると，時刻 $t + \Delta t$ での E_i の全体座標系の位置 $\mathbf{X}_{i,t+\Delta t}$ は，式(7.6)で表させる．

$$\mathbf{X}_{i,t+\Delta t} = \mathbf{X}_i + \mathbf{u}_{i,t+\Delta t} \quad (i=1 \sim 4) \quad (7.6)$$

時刻 $t + \Delta t$ におけるライン L1 および L2 上の接触検知点 C に関わる点の全体座標系の位置 \mathbf{X}_A ， \mathbf{X}_B は， E_2 ， E_4 および E_1 ， E_3 の時刻 $t + \Delta t$ の全体座標系での位置 $\mathbf{X}_{i,t+\Delta t}$ と正規座標 α を用いて式(7.7)のように書ける．

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_A &= \mathbf{X}_{2,t+\Delta t} + \alpha(\mathbf{X}_{4,t+\Delta t} - \mathbf{X}_{2,t+\Delta t}) \\ \mathbf{X}_B &= \mathbf{X}_{1,t+\Delta t} + \alpha(\mathbf{X}_{3,t+\Delta t} - \mathbf{X}_{1,t+\Delta t}) \end{aligned} \quad (7.7)$$

また， \mathbf{X}_A ， \mathbf{X}_B の接触面局所座標系での位置を \mathbf{P}_A ， \mathbf{P}_B とし，その成分を式(7.8)と書くと，接触検知点 C の接触面上ライン直角(\mathbf{e}_2)方向の正規座標 β は式(7.9)のように書ける．

$$\mathbf{P}_A = \begin{pmatrix} p_A \\ q_A \\ r_A \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_B = \begin{pmatrix} p_B \\ q_B \\ r_B \end{pmatrix} \quad (7.8)$$

$$\beta = (q^c - q_B)/(q_A - q_B) \quad (7.9)$$

ここで， $0 \leq \beta \leq 1$ となる時，接触検知点 C はライン L1 と L2 の間にある，即ち，接触面内にあることを意味する．また，接触面の正規座標(α, β)の位置での \mathbf{e}_3 方向の座標は， β で補完し式(7.10)で求められる．

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_B + \beta(\mathbf{r}_A - \mathbf{r}_B) \quad (7.10)$$

よって，接触検知点 C と接触面間の相対変位（接触変位） δ_n は，式(7.11)となる．

$$\delta_n = \mathbf{r} - \mathbf{r}^c + \varepsilon(\mathbf{x}_{t+\Delta t}^c) \quad (7.11)$$

ここに， $\varepsilon(x_{t+\Delta t}^c)$ は接触面にあらかじめ定義された不整である． $\delta_n < 0$ の時，接触検知点 C と接触面は非接触， $\delta_n \geq 0$ の時，接触検知点 C と接触面は接触しているものと考え，接触力 F_n^c を計算する．接触力 F_n^c は接触検知点 C と接触面間の相対変位 δ_n の関数として式(7.12)のように表す．

$$F_n^c = K_n(\delta_n) \quad (7.12)$$

ここに， K_n は接触検知点と接触面間の相対変位と接触力の関係式である．この K_n に関しては，接触材料間の弾塑性変形や局部座屈などの非線形挙動を表現するもので，静的載荷試験や詳細な FEM 解析により別途求める．

式(7.12)より求められた接触力 F_n^c は，車両に対しては車体重心位置での作用力およびモーメント力に変換し，式の車両の運動方程式に付加する．また，構造物に対しては接触力 F_n^c を接触位置近傍の FEM 節点に分配し，節点力として式(7.2)の運動方程式に付加する．

7.2.4 脱線前の車両とレール間の力学モデル

脱線前の車輪とレール間の力学モデルは，従来の提案モデルを使用した⁷⁻¹¹⁾．以下に概要のみを示す．

脱線前の車輪とレール間の相互作用力は，両者の鉛直方向相対変位及び水平方向相対変位を用いて算定した．具体的には，両者の接触面の法線方向には *Hertz* の接触ばねを，接線方向にはクリープ力をそれぞれ考慮した．車輪フランジとレールが接触した場合にはレールの小返りばねを用いてフランジ接触力を表現した．

7.2.5 脱線後の車輪と軌道の力学モデル

脱線後の車輪と軌道の力学モデルは，第5章で提案したモデルを使用した⁷⁻⁶⁾．以下に概要のみを示す．

脱線後の車両挙動を評価するために，マルチボディーダイナミクスの手法を用いて逸脱防止ガード⁷⁻³⁾を含む軌道構造と車輪をモデル化した．車輪と逸脱防止ガード及び軌道構造間の弾性体同士の接触効果はペナルティ法を用いて非線形の衝突ばねにより表現した．また，車輪が軌道上面を左右方向に移動する場合の摩擦力は，等価なクーロン摩擦により平均的に表した．ここで，脱線までは前節の車輪とレールの精密な幾何学形状を考慮した接触モデルを，脱線後は本節の脱線後モデルを車輪ごとに使い分けることとした．脱線後のモデルでは，レールは矩形断面とし，車輪の衝突や飛び越えも考慮できるモデルとした．レールとの衝突時の横圧は小返りばねにて表現した．脱線後のレール上への再載線は考慮しないものとした．

7.2.6 脱線の評価指標

図7-5に地震時の脱線の評価指標と脱線モードを示す．評価指標には，車輪の水平移動量を用い，その限界値は $\pm 70\text{mm}$ とした．これは，車輪がレールから外れて落ちる直前の状態を表す．また，地震時の車両の脱線モードは，概ね 0.8Hz 以下で卓越する下心ロールと概ね 1.3Hz 以上で卓越する上心ロールに大別され，車体の水平動とローリング動の位相により判別される．

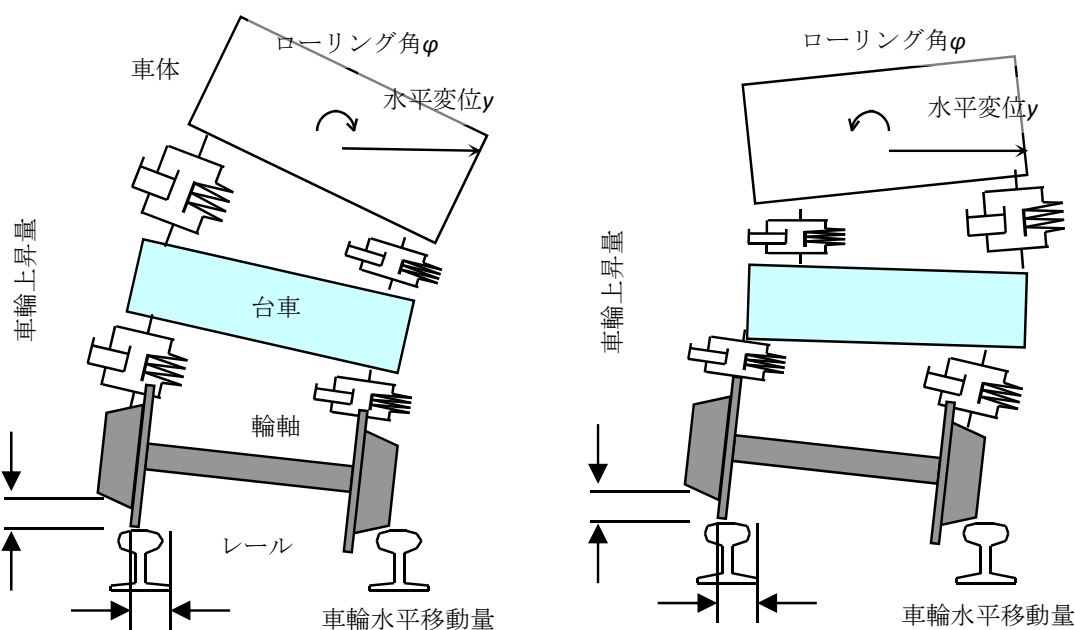


図 7-5 地震時の脱線の評価指標と脱線モード

7.2.7 数値解析法

DIASTARS III では、車両および構造物に関する運動方程式を連立して解くことにより、複数の車両からなる長大な列車と構造物との動的な連成解析を行うことができる。効率的な数値解析を行うために、車両および構造物の運動方程式をモーダル変換する。得られる車両および構造物のモーダル座標系上での運動方程式を、Newmark の平均加速度法により時間増分 Δt 単位に解いていく。ただし、運動方程式が非線形であることから、不釣合力が十分小さくなるまで Δt 内において反復計算を行う。

7.2.8 解析手法の妥当性

提案接触モデルを組み込んだ本解析手法の妥当性に関しては、実物大実験により検証を行うことは困難である。また、縮小模型実験では、接触部分の構成則を再現することが難しいため、マルチボディーとしての挙動を検証するにとどまる。現状、本解析手法の妥当性については、下記により確保されているものと判断する。

- 脱線までの車両の非線形挙動は、実物大試験^{7-4), 7-12)}、汎用の機構解析プログラムおよびFEM解析プログラムとの比較により検証されている^{7-12), 7-13)}。
- 車輪と軌道間、車両と線路構造物間の接触ばねは、実物大部分模型実験や詳細な FEM 解析の結果を用いる。

7.3 脱線前における車体と構造物の接触検討

ここでは、7.2節で述べた解析手法を用いて、脱線前の車体と構造物（ホームを想定）の接触に関する試計算を実施した。本検討は、車体と構造物の接触が線形領域にある基本的な場合について、解析手法を検証するものである。

7.3.1 検討方法

図7-6に解析モデルを示す。軌道は十分に長い2本の剛な梁要素でモデル化し、その両端に車両の約 10^7 倍の質量を有する加速度入力用の巨大質点を設けた。構造物も同様に2本の剛な梁要素でモデル化し、構造物の上端および下端位置に接触面定義用の2本のラインを設定し、接触面を構成した。

図7-7に解析の初期条件を示す。図7-7(a)に示すように車体側の接触検知点は、構造物との接

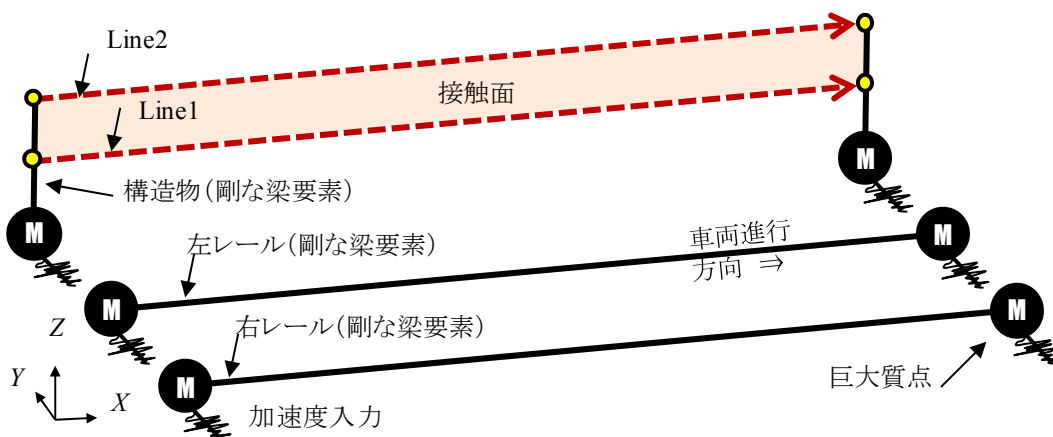


図7-6 解析モデル

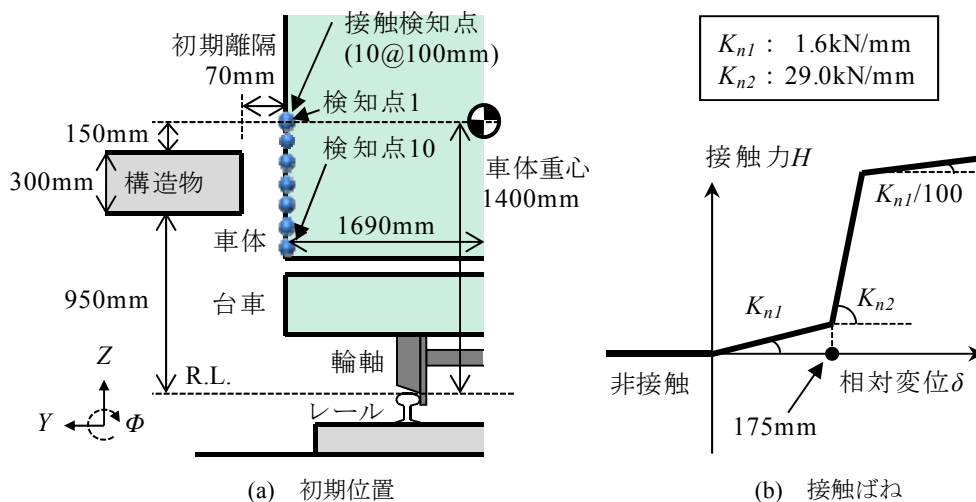


図7-7 解析の初期条件

触が想定される位置に配置した。具体的には、線路方向の車体先頭および後尾の2箇所に、車体重心位置を基準として鉛直方向に100mm間隔で10点ずつ（先頭と後尾で計20点）配置した。車体と構造物との初期離隔は70mmとした。

図7-7(b)には車体と構造物間の接触ばねを示す。車体と構造物の接触ばねに関する知見はほとんど得られていないため、長さ6.5mの実物大輪切り車体模型（在来線）に対して実施された静的載荷試験結果⁷⁻¹⁴⁾を参考に、得られた荷重-変位関係を25m車両分に換算し、接触検知点が幾何学的に同時接触する数（ここでは車体前後3点ずつの計6点）で除した値とした。ここで、初期の緩やかな勾配は主に車体側構えの変形を、その後の急な勾配は主に台枠の変形を表現するものである。さらにその後の緩やかな勾配は、材料の破断や圧壊等の破壊現象を疑似的再現したものである。また、本試計算は提案手法の実用性を検討するものであり、接触検知点の適切な配置間隔や接触ばね剛性の与え方については、今後の検討課題としたい。

入力波は加振振動数0.5~2.0Hzの正弦波とし、振幅を徐々に増加させながら検討を行った。車両は1両とした。

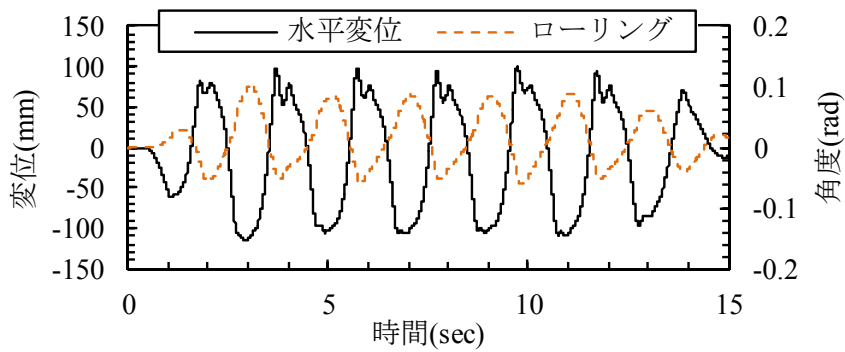
7.3.2 検討結果

(1) 時刻歴波形

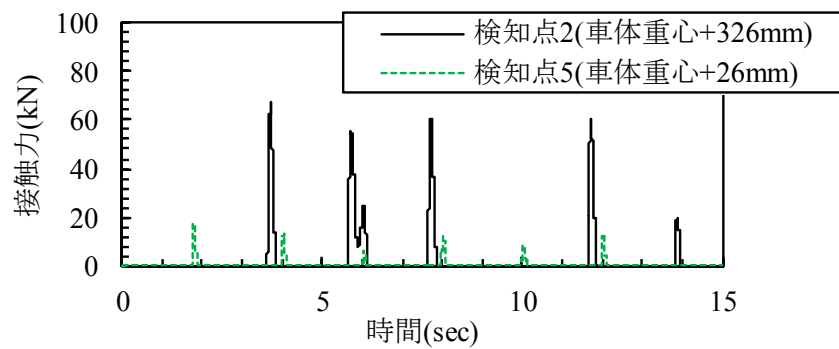
図7-8、図7-9に加振振動数0.5Hzおよび1.4Hzでの時刻歴波形を示す。接触検知点は接触が発生した最も上部または下部のものを示した。加振振動数0.5Hzでは、車体の水平変位とローリングの位相がほぼ逆転しており、図7-5で示した下心ロールとしての挙動が卓越していることが分かる。一方、加振振動数1.4Hzでは、1.5秒以降は車体の水平変位とローリングの位相がほぼ一致しており、上心ロールとしての挙動が卓越していることが分かる。各加振振動数とも、車体が構造物側に変位し、車体と構造物間の相対変位が正、即ち、食い込みが発生した際に接触力が発生していることが確認できる。ここで、食い込みが発生しているにも関わらず、接触力が発生していない接触検知点もある。これは式(7.9)から計算される β が $0 \leq \beta \leq 1$ とならない、即ち、その接触検知点が接触面内には存在せず、接触面よりも鉛直上側または下側に位置するためである。

(2) 接触力の分布

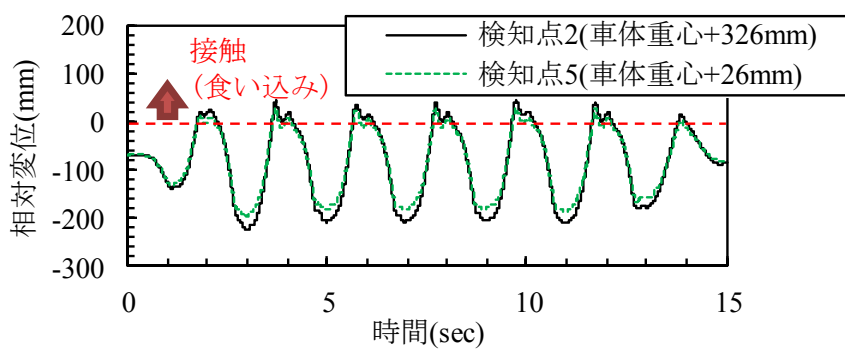
図7-10に接触力の分布を示す。加振振動数が0.5Hzの場合は3.7秒時点、加振振動数が1.4Hzの場合は2.3秒時点のものを示している。加振振動数が0.5Hzの場合では負の車体ロール角を、加振振動数が1.4Hzの場合では正の車体ロール角を有しているが、図はそれぞれ車体上側および下側の接触検知点で接触力が大きくなっていることから、車体ローリング挙動に応じた接触力が算出されていることが分かる。また、図7-10(a)に示すように構造物の高さが300mm、接触検知点が100mm間隔であることを考えると、3点接触する結果は妥当であると考えられる。加振振動数1.4Hzでは車体後尾の接触力がほとんど発生していないが、これは車体にヨーイングが発生しているためである。



(a) 車体水平変位およびローリング

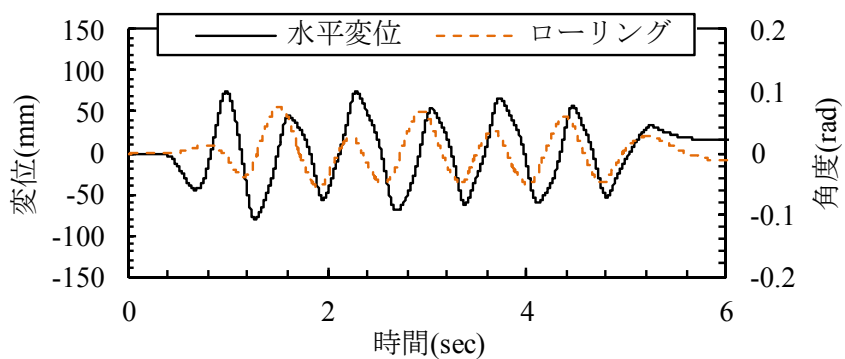


(b) 車体と構造物の接触力

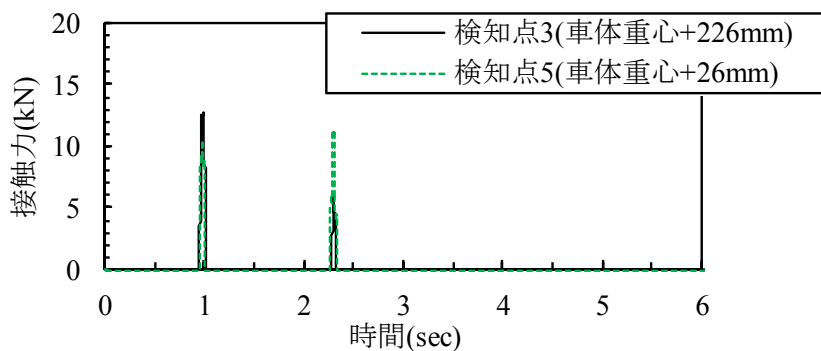


(c) 車体と構造物の相対変位

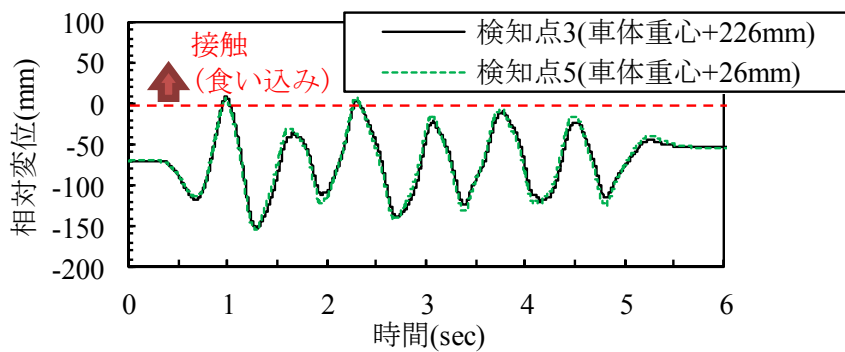
図 7-8 時刻歴波形 (加振振動数 : 0.5Hz, 振幅 : 500mm)



(a) 車体水平変位およびローリング



(b) 車体と構造物の接触力



(c) 車体と構造物の相対変位

図 7-9 時刻歴波形 (加振振動数: 1.4Hz, 100mm)

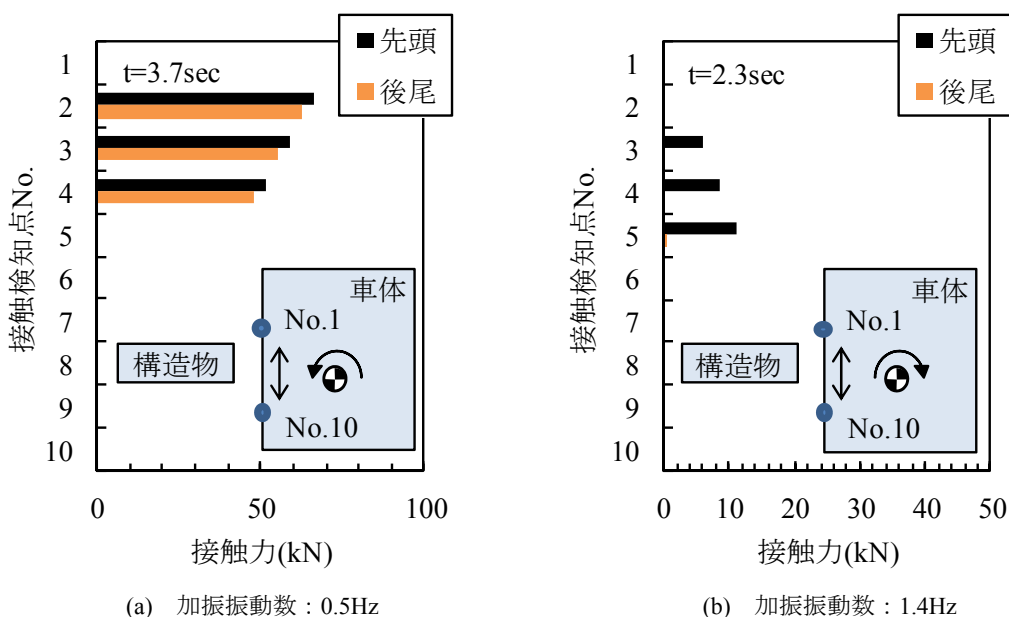


図 7-10 接触力の分布

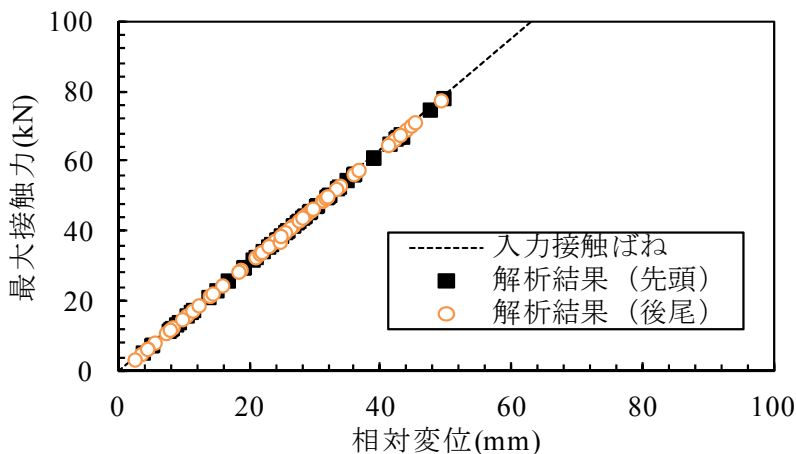


図 7-11 最大接触力と相対変位の関係

(3) 最大接触力と相対変位の関係

図 7-11 に最大接触力と相対変位の関係を示す。図は各接触検知点で発生した最大接触力とその時の相対変位をプロットしたものである。また，図 7-7(b)で仮定した接触ばねについても併せて示している。図より，解析結果が仮定した接触ばねのライン上にプロットされていることから，本提案手法は，仮定した接触ばねに対して正確に接触力を計算可能であることが確認できる。

以上から，車体と構造物の接触が線形領域にある場合において，本解析手法が接触現象を表現可能であることを確認できた。

7. 4 脱線後における車体と構造物の接触検討

ここでは，7.2節で述べた解析手法を用いて，脱線後の車体と構造物（下路桁を想定）の接触モデルに関する試計算を実施した．本検討は，脱線後の車輪と軌道が接触しつつ，車体と構造物が接触する複雑な場合について，また，車体と構造物の接触が非線形領域にある場合について，解析手法を検証するものである．

7. 4. 1 検討方法

解析モデルは図7-6と同様のモデルを用いた．図7-12に解析の初期条件を示す．図7-12(a)に示すように車体側の接触検知点は，構造物との接触が想定される位置に配置した．具体的には，線路方向の車体先頭および後尾の2箇所に，車体重心位置を基準として鉛直方向に100mm間隔で10点ずつ（先頭と後尾で計20点）配置した．脱線後には車両が走行面に落下するため，その落下量を考慮して，接触検知点も高めの配置位置とした．脱線後の走行面から車輪フランジまでの高さを164mm，車体と構造物との初期離隔は610mmとした．図7-12(b)に車体と構造物の接触ばねを示す．7.2節と同様に，静的載荷試験結果⁷⁻¹⁴を参考に，接触検知点1点当たりに換算した値を用いた．同時接触する接触検知点数は，車体前後6点ずつの計12点と仮定した．

7. 4. 2 検討結果

(1) 時刻歴波形

図7-13に加振振動数1.0Hzの時刻歴波形を示す．約3.5秒での脱線後，車両が走行面に落下し，また，車体の水平変位が増大していることが分かる．その後，車体の水平変位は増減しているが，これは，車体と構造物間，車輪とレール間の接触を繰り返すためである．車体と構造物の接触に関しては，相対変位が正となる時刻に発生していることが確認できる．

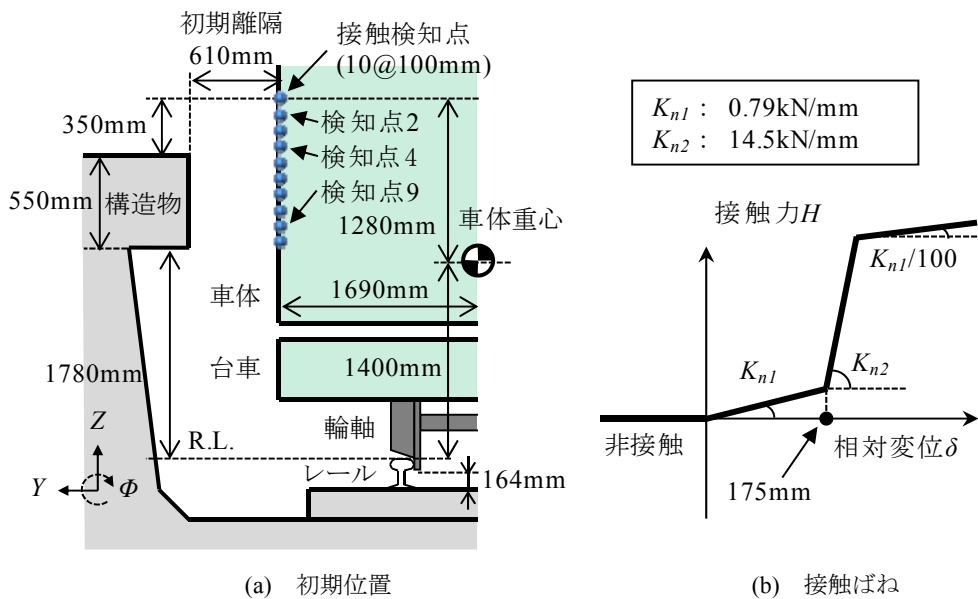
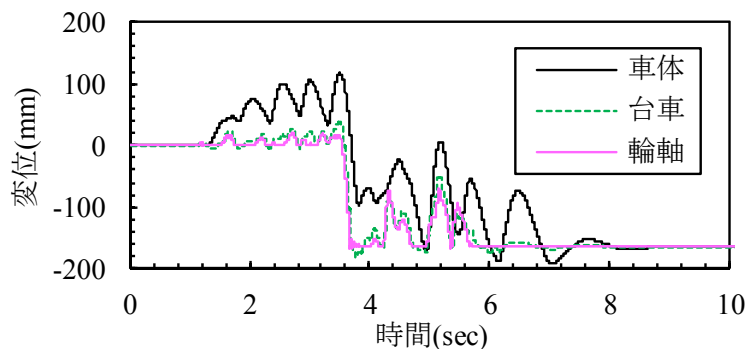
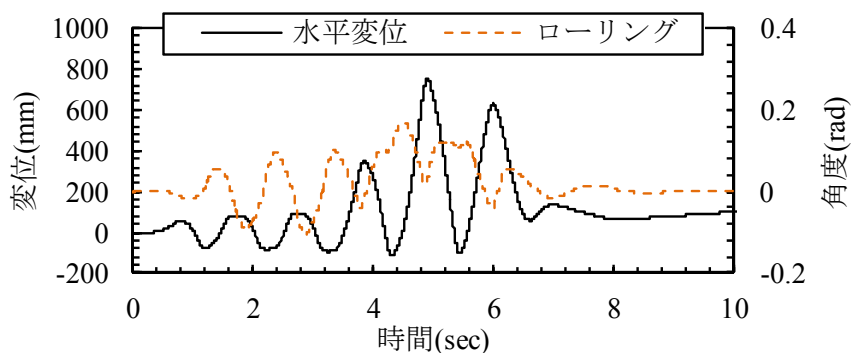


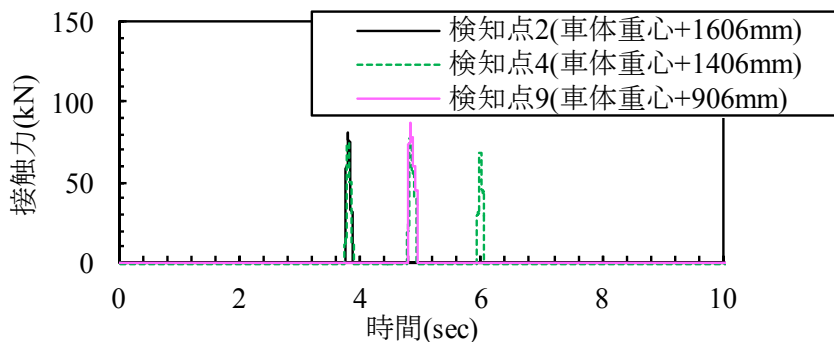
図7-12 解析の初期条件



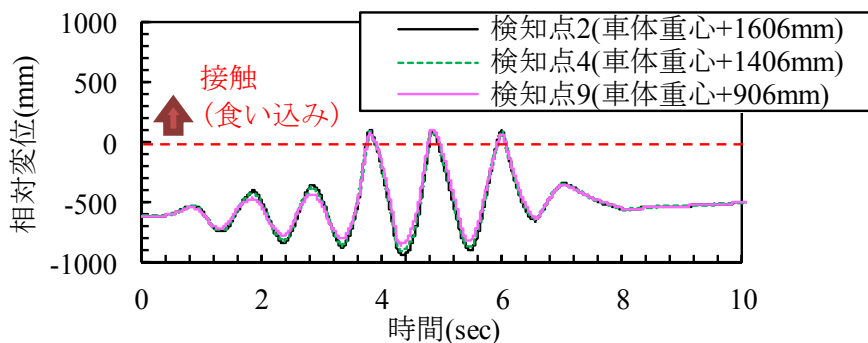
(a) 車体，台車，輪軸の鉛直変位



(b) 車体の水平変位とローリング



(c) 車体と構造物の接触力



(d) 車体と構造物の相対変位

図 7-13 時刻歴波形 (加振振動数：1.0Hz，振幅：160mm)

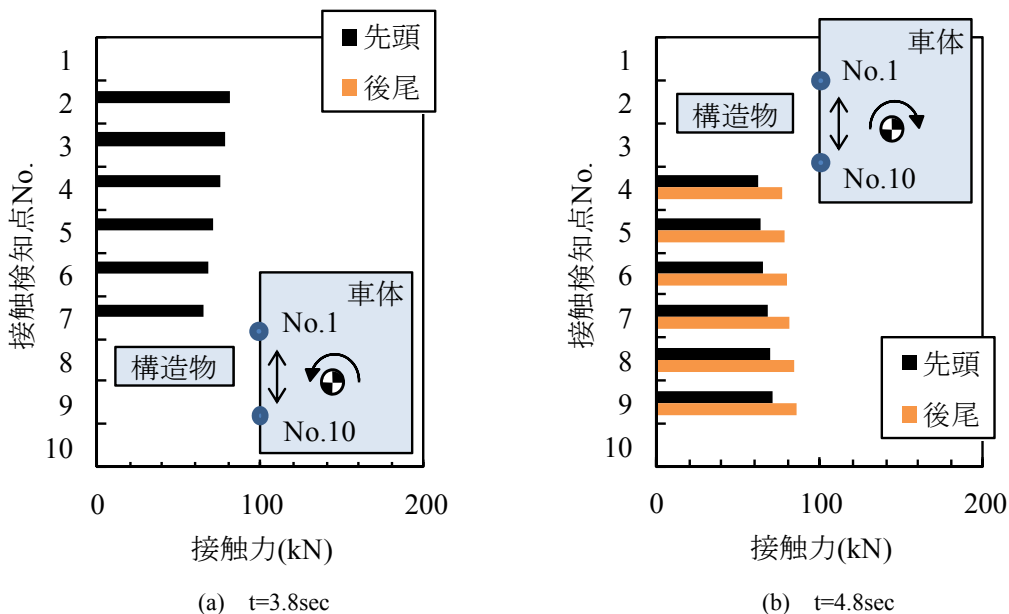


図 7-14 接触力の分布

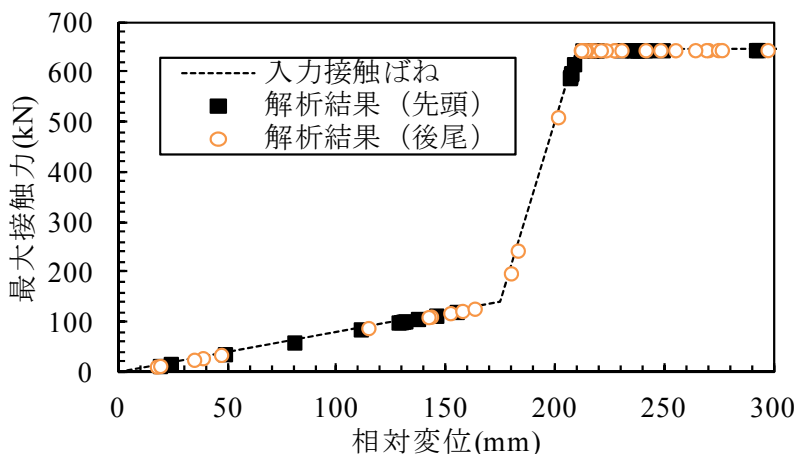


図 7-15 最大接触力と相対変位の関係

(2) 接触力の分布

図 7-14 に時刻 3.8 秒および 4.8 秒での各接触検知点での接触力の分布を示す. 3.8 秒ではヨーイングが生じているため車体先頭のみでの接触となっているが, 図 7-13 の車体の鉛直変位およびローリングに対応した接触力分布となっている. また, 接触面の高さ 550mm に対して, 100mm 間隔で配置した接触検知点が 6 点同時に接触していることから, 妥当な接触判定が行われているものと考えられる.

(3) 最大接触力と相対変位の関係

図 7-15 に最大接触力と相対変位の関係を示す. 脱線前接触である図 7-11 と比較して大きな接触力が発生しているが, 解析結果は仮定した接触ばねのライン上にプロットされていることを確認できる. 即ち, 本手法は初期勾配後の急激な立ち上がりや, その後の軟化勾配に対しても安定した接触計算が可能であることが分かる

以上から，脱線後の車輪と軌道が接触しつつ車体と構造物が接触する場合や，車体と構造物の接触が非線形となる場合についても，本解析手法が接触現象を表現可能であることを確認できた。

7. 5 本章の結論

本章では，車体と線路構造物の接触を効率的に表現可能な接触モデルを提案するとともに，提案手法を用いた試計算を実施した。以下に，本研究のまとめを示す。

- (1) 車体と線路構造物の接触モデルとして，マルチボディー車両モデルに配置した任意の接触検知点と，構造物側FEM情報から構成した接触面との動的相互作用力を，ペナルティ法により計算する手法を提案した。
- (2) 脱線前の車体と構造物の接触に関する試計算により，車体と構造物の接触が線形領域にある基本的な場合，本解析手法がその接触現象を表現可能であることを確認した。
- (3) 脱線後の車体と構造物の接触に関する試計算により，脱線後の車輪と軌道が接触しつつ，車体と構造物が接触する複雑な場合について，また，車体と構造物の接触が非線形領域にある場合についても，本解析手法がその接触現象を表現可能であることを確認した。

参考文献

- 7-1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006.
- 7-2) 森村勉，関雅樹：新潟県中越地震後の東海道新幹線の地震対策について，鉄道技術連合シンポジウム論文集，No.16，pp.545-548，2009.
- 7-3) 浅沼 潔，曾我部正道，渡辺 勉，岡山準也，涌井 一：逸脱防止機能を有するバラストラダー軌道の開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.2，2009.
- 7-4) 宮本岳史，松本信之，曾我部正道，下村隆行，西山幸夫，松尾雅樹：大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験，日本機械学会論文集（C編），Vol.72，No.706，pp.1849-1855，2005.
- 7-5) 森村勉，西村和彦，曄道佳明，曾我部潔：地震時の脱線メカニズムおよび脱線防止ガード機能に関する解析，鉄道技術連合シンポジウム論文集，No.16，pp.561-564，2009.
- 7-6) 後藤恵一，曾我部正道，田辺誠，浅沼潔：脱線後の車輪と軌道の接触モデルに関する研究，鉄道力学論文集，No.15，pp.132-139，2011.
- 7-7) Brabie, D. : Wheel-Sleeper Impact Model in Rail Vehicles Analysis, Journal of System Design and Dynamics, Vol.1, No.3, pp.468-480, 2008.
- 7-8) 角南浩靖，曄道佳明，森村勉，足立昌仁：脱線走行の車両の逸脱防止機能に関する理論解析，日本機械学会論文集（C編），Vol.77，No.781，pp.34-49，2011.
- 7-9) 土木学会構造工学委員会 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：衝撃実験・解析の基礎と応用，丸善，2004.

- 7-10) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.129-138，1995.
- 7-11) 松本信之，田辺誠，涌井一，曾我部正道：非線形応答を考慮した鉄道車両と構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集（A編），Vol.63，No.3，pp.533-551，2007.
- 7-12) 曾我部正道，浅沼潔，涌井一：地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発，鉄道力学論文集，No.11，pp.69-74，2007.
- 7-13) 後藤恵一，曾我部正道，浅沼潔，徳永宗正：有限要素法による車両／軌道の加振モデルの構築，鉄道技術連合シンポジウム論文集，No.18，pp.337-340，2011.
- 7-14) 沖野友洋，宇治田寧：側面からの荷重に対する車体強度特性評価，鉄道総研報告，Vol.25，No.8，pp.23-28，2011.

第8章 実列車の脱線痕に基づく数値解析法の検証

8.1 本章の概要

本章では、前章までに構築した脱線後車両挙動の解析手法の妥当性を検証する。具体的には、これまで未評価であった MBS に導入可能な車輪と軌道スラブ間の接触剛性を、車輪形状の接触子を用いたコンクリート板への静的模型実験により評価するとともに、実列車の脱線により生じたスラブ軌道上・有道床軌道上の車輪痕の調査を実施した。さらに、調査結果の中で、大規模地震により脱線した新幹線軌道スラブ上の車輪痕調査結果と、第8章までに構築した地震時車両挙動による解析結果とを比較することで、構築解析手法の妥当性を確認した。

8.2 模型実験による検討

8.2.1 検討方法

図8-1に供試体の形状寸法を示す。供試体は脱線車輪との接触が想定される新幹線用軌道スラブ⁸⁻¹⁾を参考に、高さ(200mm)、主鉄筋の配置、鉄筋径、かぶり(30mm)を設定した。低荷重での供試体の破壊を防止するために、帯鉄筋を高さ方向に3段配置した。鉄筋は全てSD345、D13とした。プレストレスについては考慮していない。

表8-1に供試体一覧を示す。供試体は、圧縮強度(水セメント比)、主鉄筋の有無、粗骨材の有無(コンクリート又はモルタル)をパラメータとした計4体とした。モルタル供試体は、同じ水

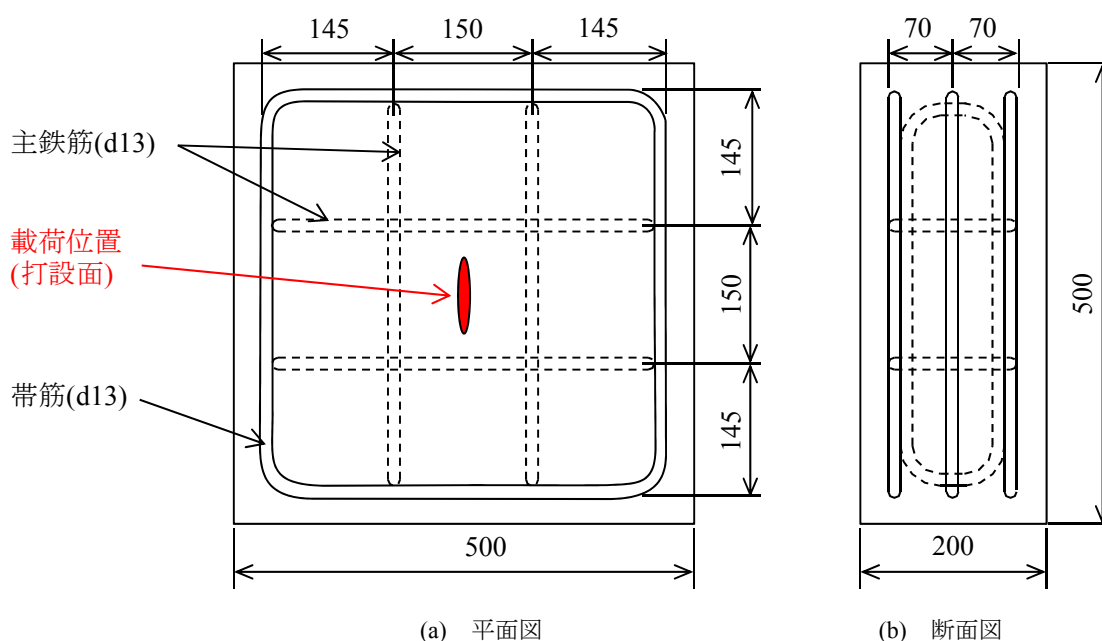


図8-1 供試体の形状寸法 (単位: mm)

表 8-1 供試体一覧

No.	名称	材料	水セメント比 (%)	一軸圧縮強度 (MPa)	主鉄筋の有無
1	C65	コンクリート	65	30.6	無し
2	C45	コンクリート	45	45.4	無し
3	Cs65	コンクリート	65	30.6	有り
4	M65	モルタル	65	35.1	無し

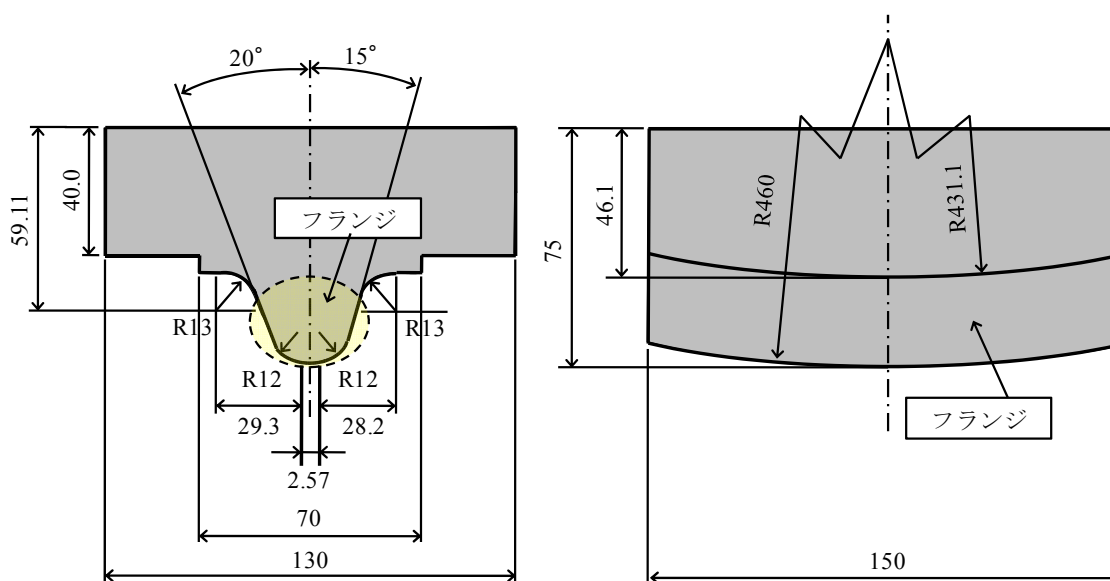


図 8-2 接触子の形状寸法 (単位: mm)

セメント比のコンクリート供試体の練り混ぜ後のコンクリートから、5mm のフィルタでウェットスクリーニングを行って作成した。一般的な新幹線用軌道スラブの設計基準強度が 40MPa であることから、圧縮強度上は C45 供試体が最も設計条件に近い。

図 8-2 に車輪を模擬した接触子の形状寸法を示す。接触力は接触要素の形状に依存するため、新幹線用円弧踏面形状に基づく車輪フランジを模擬した接触子 (材質: S45C) を製作し、これを用いて載荷を行った。

図 8-3 に実験状況を示す。載荷実験は 1000kN の載荷能力を有する万能材料試験機を用い、漸増載荷を行った。載荷は打設面より行った。また、供試体は試験機の平らな台上に直接設置した。測定項目は荷重及び鉛直変位であり、荷重は接触子の上部に配置したロードセルで、変位は接触子に取り付けたターゲットを接触式変位計により測定した。変位計は 90 度ずつ計 4 箇所に配置し、その平均値を接触子の鉛直変位とした。

8.2.2 検討結果

図 8-4 に各供試体の荷重と変位の関係比較を示す。本図では C65 供試体を基準とし、各パラメータの影響を比較している。また、目視により確認できたひび割れ発生点も併せて示している。

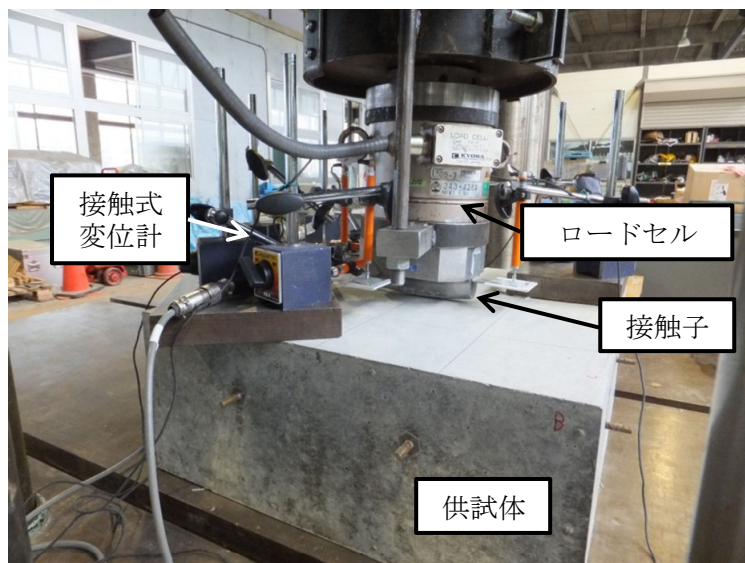


図 8-3 実験状況

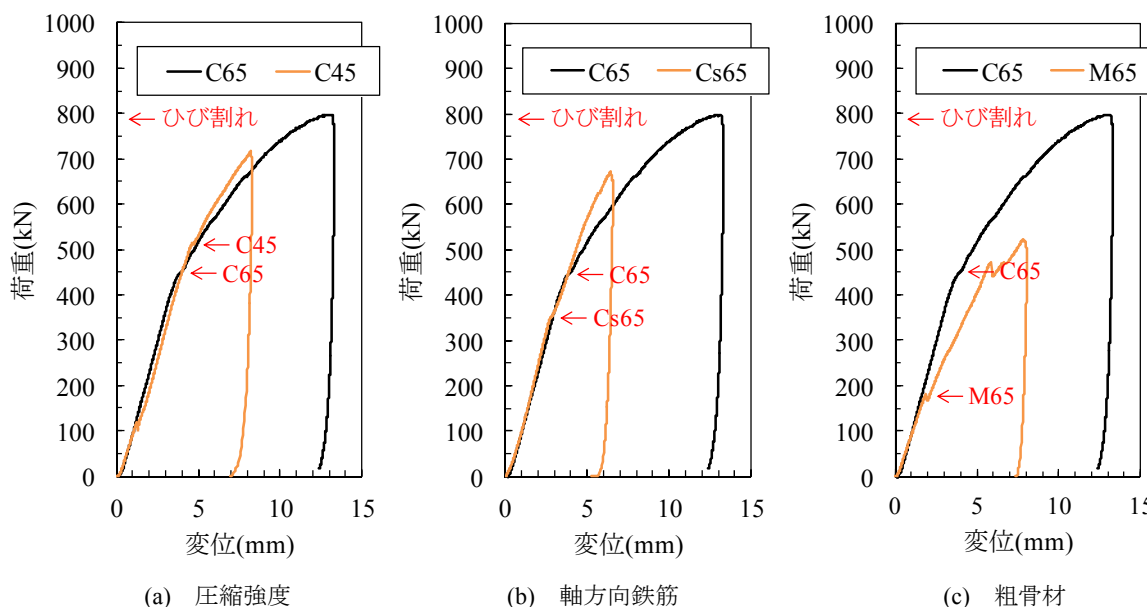
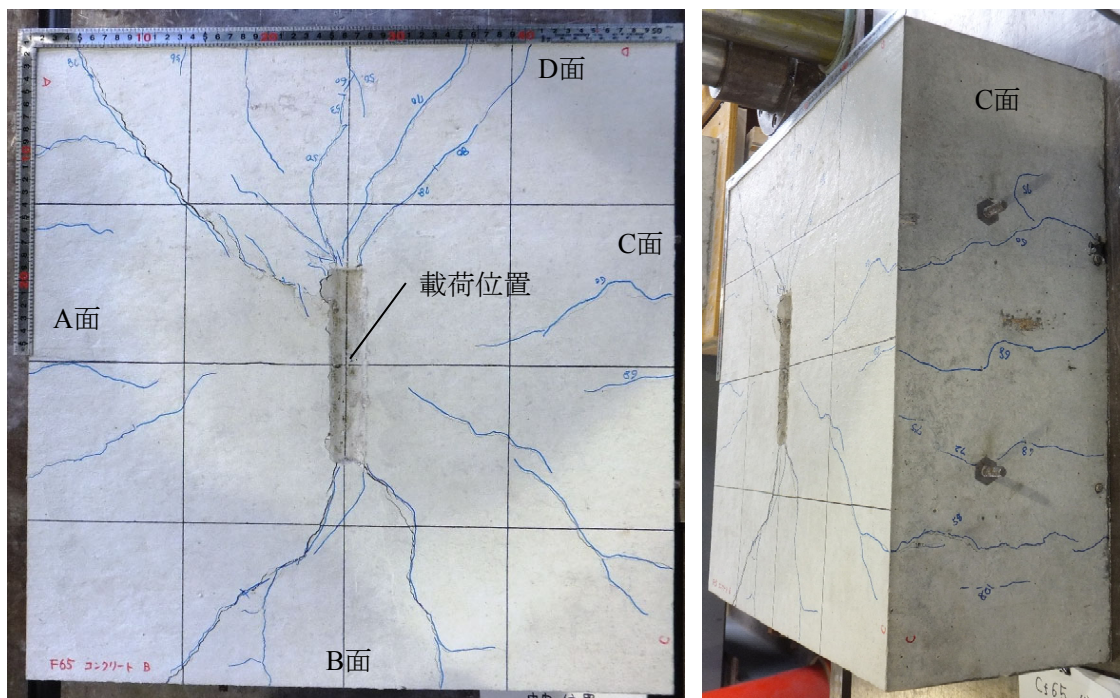


図 8-4 荷重と変位の関係

荷重と変位関係の共通の特徴として、ひび割れ発生前の荷重と変位の関係はマクロ的には線形であり、ひび割れ発生により徐々に剛性が低下していることが確認できる。図 8-5 に C65 供試体の載荷後のひび割れ状況を示す。ひび割れは、図 8-5(a)に示す載荷面の接触子端部から側面に向かって放射状に伸びるものと、図 8-5(b)に示す側面下端から載荷面に向かって伸びるものが見られ、載荷面のひび割れが発生したあとに側面のひび割れが発生した。また、いずれの供試体もひび割れの発生状況は同様であった。

図 8-4(a)に圧縮強度の影響を、図 8-4(b)に主鉄筋の有無の影響を示す。両図ともひび割れ発生以前の剛性については大きな違いは見られず、本検討範囲内であれば圧縮強度と主鉄筋の有無の影響は小さいと考えられる。

図 8-4(c)に粗骨材の有無の影響を示す。粗骨材を有しない M65 供試体は C65 供試体と比較して、



(a) 上面（載荷面） (b) 側面（C面）

図 8-5 載荷後のひび割れ状況（C65 供試体）

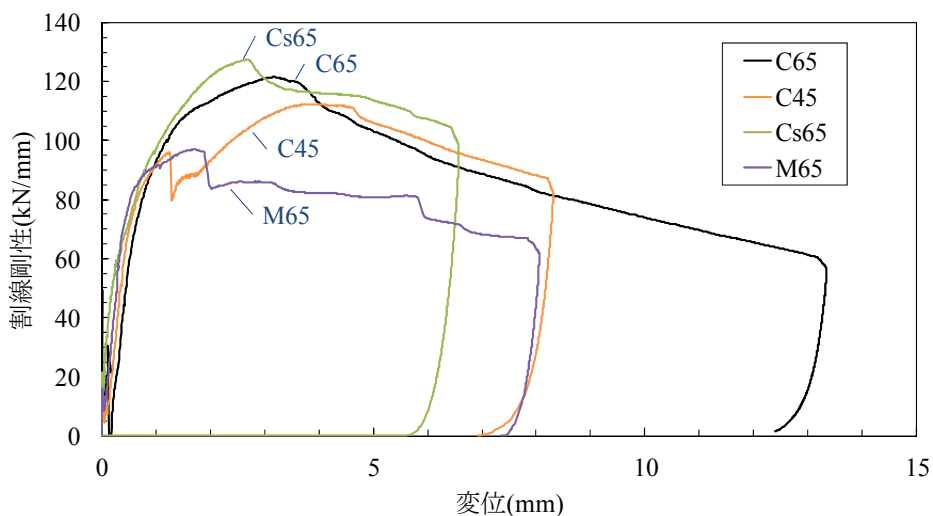


図 8-6 割線剛性と変位の関係

ひび割れ発生荷重が約 170kN と小さく、初期の剛性についても若干ではあるが低くなっていることから、粗骨材の有無による影響は無視できないと考えられる。

図 8-6 に各供試体の割線剛性と変位の関係を示す。割線剛性は、図 8-4 おいて原点と各点を結んだ際の勾配として算出した。この割線剛性は MBS 解析に用いる車輪と軌道部材間の接触剛性として考えることができる。図より、各供試体の割線剛性は変位の増加とともに徐々に増加し、ひび割れ発生後は減少していくことが分かる。特に、変位が 1mm 程度以下の領域において割線剛性が急激に増加しているが、これは変位の増加に伴い供試体と接触子の面積が増加するためで

あると考えられる。第3章のPCまくらぎへの静的実験では、荷重と変位の関係は最大荷重付近まで2次曲線状になっていることから、接触剛性の増加にひび割れの発生が大きく影響しており、PCまくらぎや実際の軌道スラブのようにプレストレスの導入によりひび割れの発生が抑制された場合には、割線剛性がさらに増加する可能性がある。この点については今後の検討課題としたい。本検討において、割線剛性として考えた接触剛性は、コンクリート供試体の場合で120kN/mm程度、モルタル供試体の場合で100kN/mm程度であった。

8.3 車輪痕調査による検討

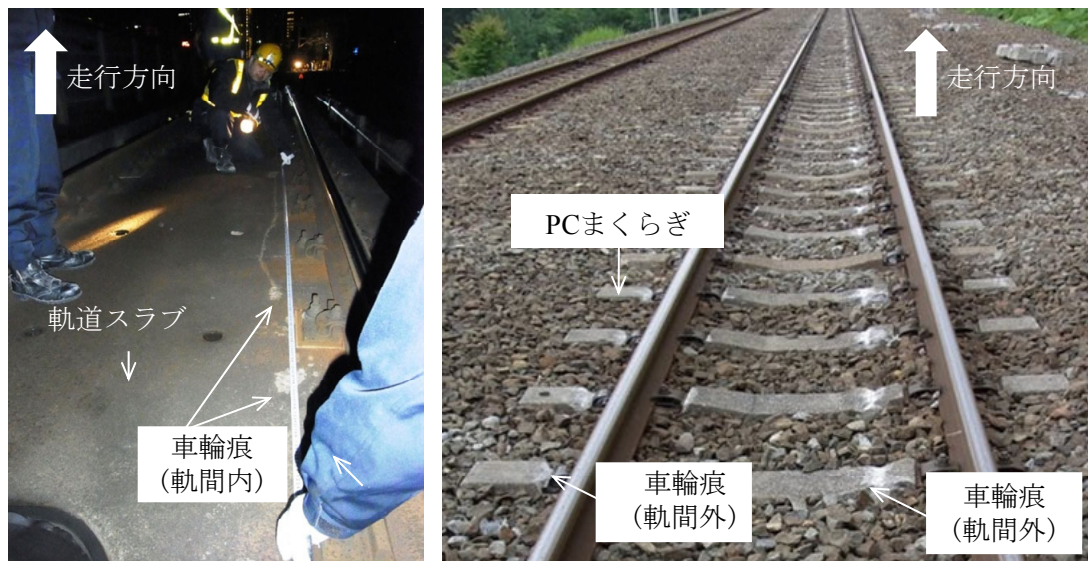
8.3.1 検討方法

表8-2に車輪痕の調査箇所の一覧を、図8-7に調査時の状況を示す。調査は新幹線のスラブ軌道区間2箇所(No.1, No.2)、在来線の有道床軌道区間1箇所(No.3)で行い、それぞれ軌道スラブ及びPCまくらぎ上に発生した車輪痕の深さを測定した。No.1に関しては、車輪痕とそれを生じさせた車輪の推定が可能であったことから、図8-8に示すように、車輪痕を生じさせた軸数(1, 2)、車輪の左右(Left, Right)、何番目の車輪痕であるかにより名称を定義した(1R-1:1軸目右車輪により生じた1つ目の車輪痕)。また、図8-9に示すように、No.1及びNo.2の車輪痕に関しては脱線直後と考えられる深さの大きい打痕状の車輪痕を対象に測定を行い、No.3の車輪痕は脱線後に一定時間経過して車輪の応答がある程度落ち着いたと考えられるまくらぎ上の車輪痕を対象に測定を実施した。なお、No.2の車輪痕に関しては、一部透明な補修材で補修がなされていたが補修材の上面までの深さを測定した。また、No.1, No.2の脱線は地震動により発生したものの、No.3の脱線は事故により発生したものである。

図8-10にNo.1及びNo.2での測定状況を示す。No.1及びNo.2の車輪痕の測定は可搬式治具に取り付けたキーエンス社製の二次元高精度レーザー変位センサLJ-G200により行った。本レーザー変位センサは、レーザー方向0.1mm毎に高さ測定が可能であり、高さ方向に2 μ m、レーザー方向に20 μ mの測定精度を有する。測定はこの可搬式治具を線路方向に10mm程度の間隔にて手動で移動させながら実施した。また、No.3は、図8-9(c)に示すようにPCまくらぎの軌間内外の車輪痕をノギスにより線路方向に3箇所ずつ測定した。

表 8-2 車輪痕の調査箇所の一覧

No.	走行 車両	軌道 種別	車輪痕 調査数	推定走行 速度(km/h)
1	新幹線	スラブ	6	14
2	新幹線	スラブ	3	200
3	在来線	有道床	12	120



(a) No.1：新幹線スラブ軌道 (b) No.3 在来線有道床軌道

図 8-7 調査時の状況

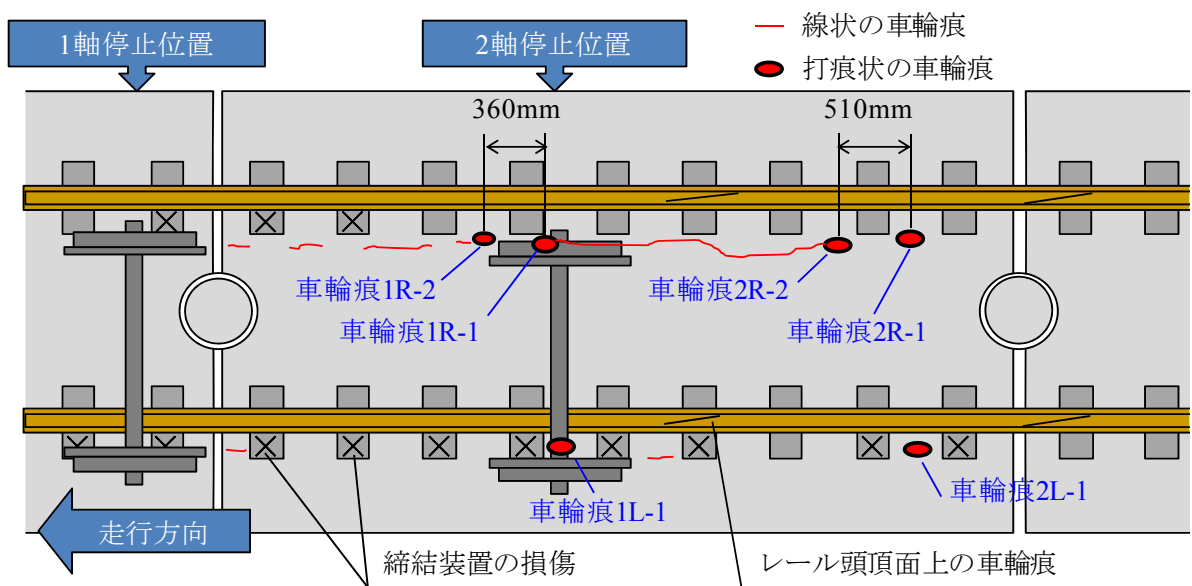


図 8-8 車輪痕の調査概況 (No.1)



(a) No.1 (1R-1)

(b) No.2



(c) No.3 (軌間内)

図 8-9 各調査箇所における車輪痕の例

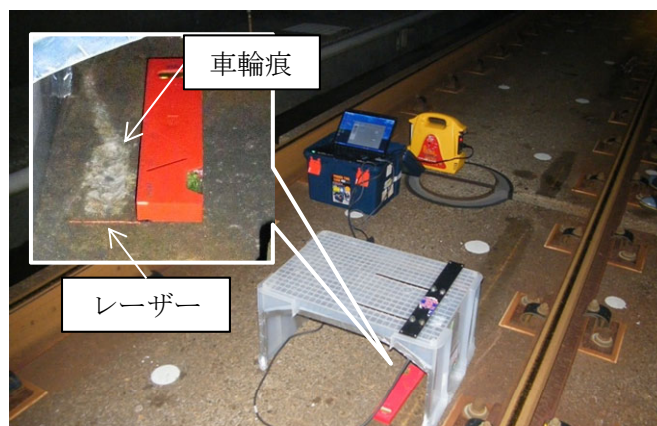


図 8-10 レーザー変位センサによる測定方法

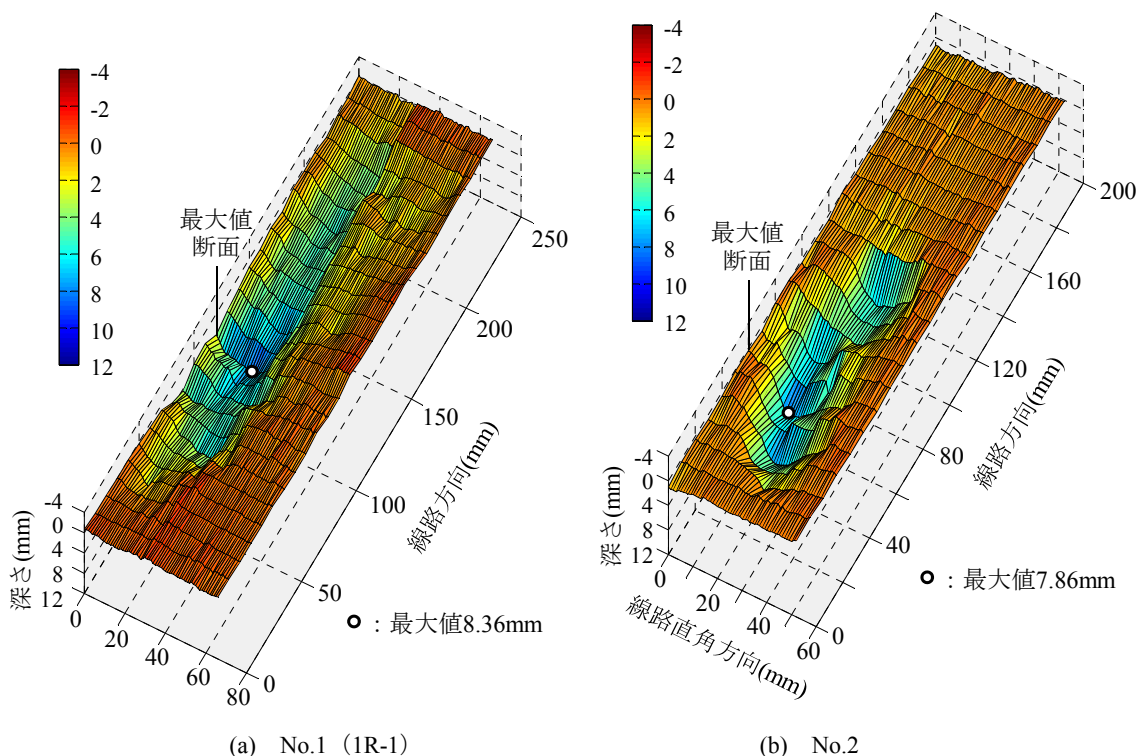


図 8-11 レーザー変位センサによる測定結果の例

8.3.2 検討結果

図 8-11 にレーザー変位センサによる No.1 及び No.2 の測定結果の例を示す。図は、線路直角（レーザー）方向のデータを 10 分の 1 に間引いて表示している。図 8-9(a)(b)と比較すると、レーザー変位センサによる測定結果が車輪痕の形状を良く再現できていることが分かる。

図 8-12 に No.1 及び No.2 の各車輪痕の最大深さを示す。No.1 では、1 軸目右車輪が軌道スラブ上に最初に落下した際に生じた車輪痕 1R-1 が最も深く 8.36mm であった。一方、2 軸目右車輪が軌道スラブ上に最初に落下した際に生じた車輪痕 2R-1 とバウンド後に生じた車輪痕 2R-2 では 2R-2 の車輪痕深さの方が大きくなっている。また、No.2 での車輪痕の最大深さは 10.79mm であり、No.1 よりも深くなっている。これらの違いは、軌道部材との接触や、走行車両の形式、地震動の規模等の違いの影響が考えられるが、本調査結果からこれらの影響度を分析することは困難である。しかしながら、これまで車輪痕に関する定量的なデータはほとんど得られておらず、本調査結果は脱線後の輪軸挙動を検討していく上での有用なデータになると考える。

車輪痕の最大深さについて、模型実験と軌道スラブ上の車輪痕（No.1, 2）を比較すると、模型実験では供試体にひび割れが発生し、割線剛性が低下している変位領域であるが、図 8-9(a)(b)に示すように各車輪痕周辺にはひび割れ等は確認できなかった。これはプレストレスや接触時のひずみ速度効果などの影響と考えられ、実際の接触剛性は模型実験の値よりさらに増加する可能性がある。

図 8-13 に No.3 の車輪痕の深さを示す。図は車両の走行方向に連続する PC まくらぎ上の車輪痕を測定した結果である（5, 9, 12, 13 本目は調査時に交換済みであったため測定結果なし）。軌道スラブ上の車輪痕（No.1, No.2）と比較して最大深さが倍以上となっていることが分かる。

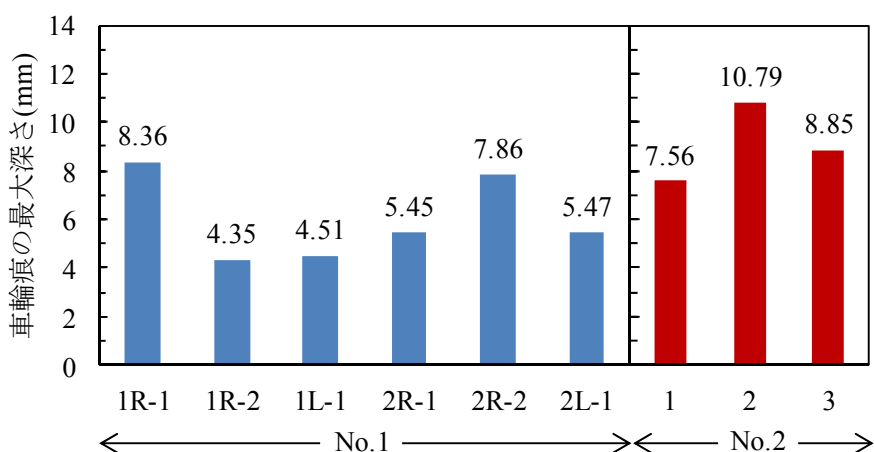


図 8-12 車輪痕の最大深さ (軌道スラブ : No.1, No.2)

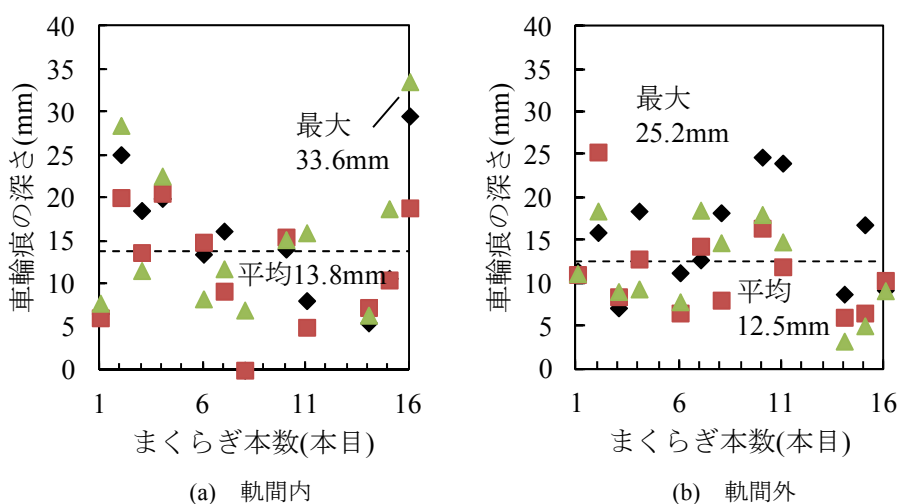


図 8-13 車輪痕の深さ (PC まくらぎ : No3)

これは間欠的に存在する PC まくらぎの角部に車輪が接触し、車輪の鉛直方向の運動だけでなく、走行方向の運動も接触力として考慮されるためであると考えられる。また、交換済みの PC まくらぎを除いて全てのまくらぎに車輪痕が確認されたことから、脱線後から一定時間経過した後では基本的には車輪は PC まくらぎを飛び越えずに、各まくらぎに接触しながら進むと想定される。

8. 4 解析手法の妥当性の検証

8. 4. 1 検討方法

前章までに構築した脱線後の車両挙動解析手法に関して、車輪と脱線後の走行面間の接触剛性が輪軸挙動及び接触力に及ぼす影響を検討するとともに、解析結果と前節の車輪痕調査結果を比較することで、構築解析手法の妥当性を検証する。

図 8-14 に車両の力学モデルを示す。車両は車体、台車枠、輪軸を剛体と仮定し、これらをばね

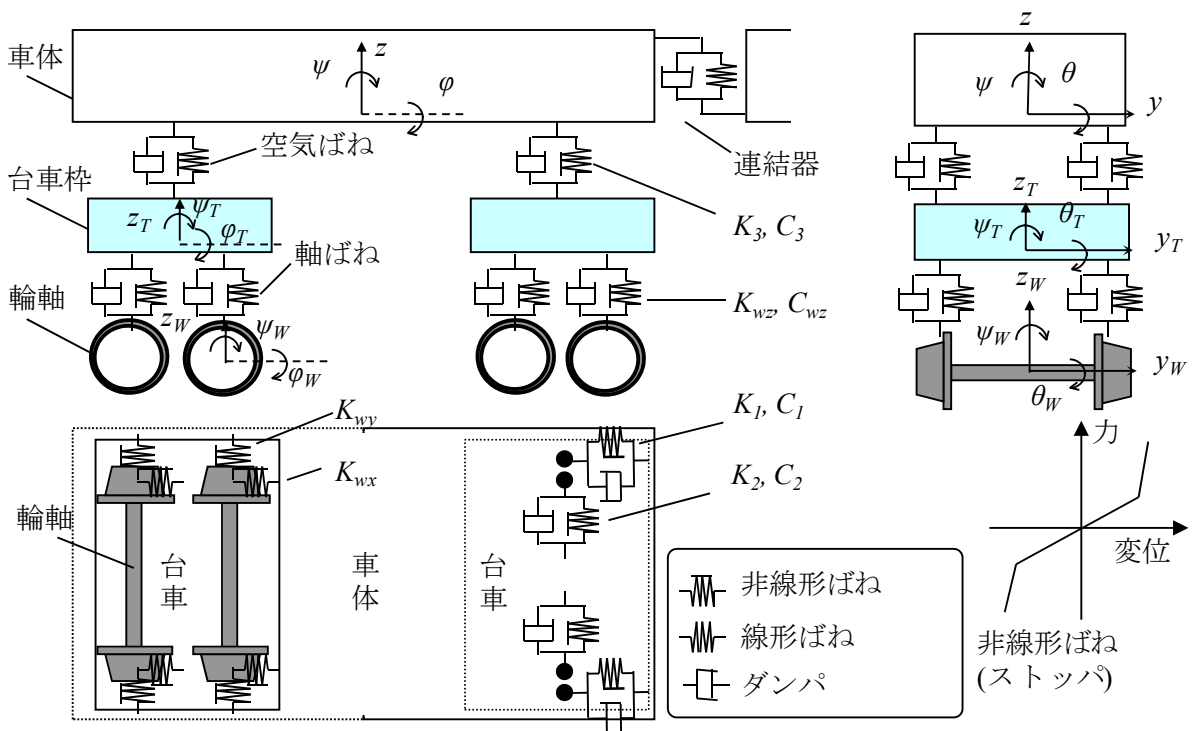


図 8-14 車両の力学モデル

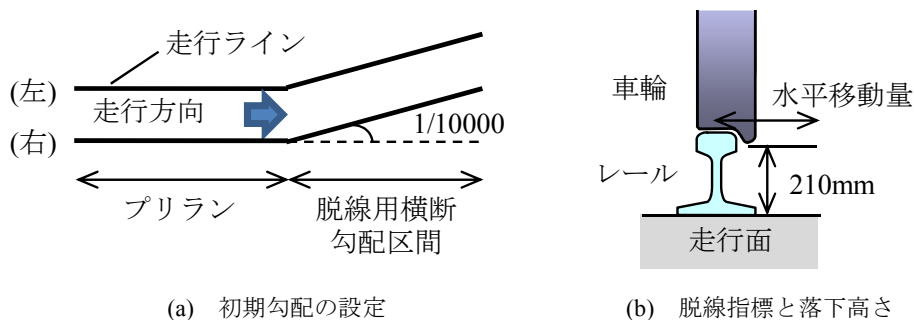


図 8-15 解析条件

とダンパで結合したマルチボディーでモデル化した。1 車両当たり自由度は 31 であり、これを 1 両用いた。車両諸元は近年の新幹線車両を参考に仮定した。構造物は車輪の走行ラインとして扱う 1.435m 間隔で配置された 2 本の剛な梁要素でモデル化した。

図 8-15 に解析条件を示す。走行中の車両の脱線を簡易に表現するために、走行ライン上に軌道不整として 1/10000 の横断勾配を設定した。また、脱線指標は車輪の水平移動量とし、その限界値を非常に小さな値とすることで脱線を簡易的に生じさせた。本解析条件は、地震時の脱線挙動とは異なることが予想されるが、脱線後の基本的な車両挙動を把握するために上記の条件を設定した。脱線時の車輪の落下高さは、実現象において車輪フランジがレール上に乗り上げることを考慮して 210mm とした。車両速度は 8.3 節の調査箇所 No.1 の車両の推定速度である 14km/h とし、等速運動モデルを仮定した。解析パラメータは、脱線後の車輪と走行面間の接触剛性とし、50～

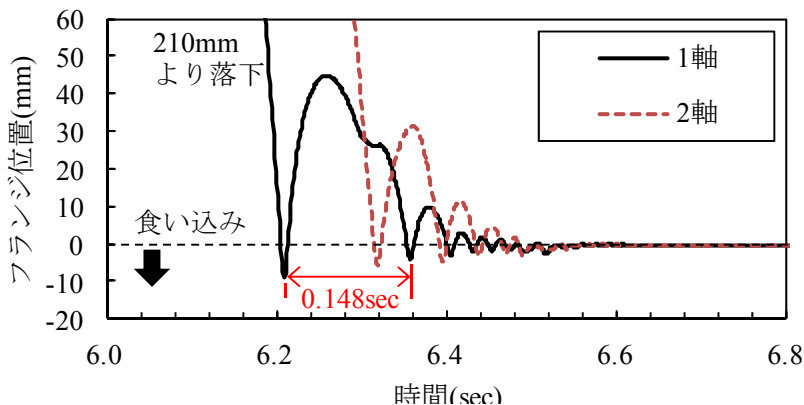


図 8-16 輪軸挙動の時刻歴波形 (150kN/mm)

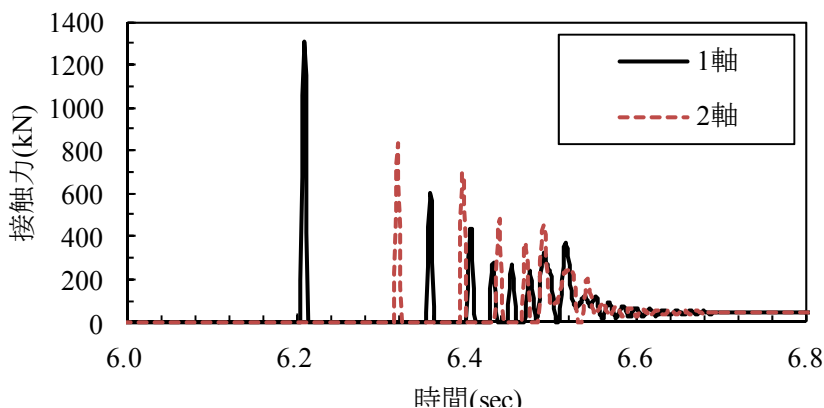


図 8-17 車輪と走行面間の接触力の時刻歴波形 (150kN/mm)

500kN/mm の線形モデルとした。また、車輪と走行面間の接触力計算にはペナルティ法を用い、接触時の減衰は考慮していない。脱線前の車輪とレール間の相互作用力としては、両者の接触面の法線方向には Hertz の接触ばねを、接線方向にはクリープ力を、それぞれ考慮した⁸⁻²⁾。

8.4.2 検討結果

時刻歴波形の例として、図 8-16 に輪軸挙動の時刻歴波形を、図 8-17 に車輪と走行面間の接触力の時刻歴波形を示す。両図とも接触剛性を 150kN/mm とした場合の結果である。図 8-16 より、先に横断勾配区間に入ると 1 軸目がレール上から落下し、次に 2 軸目が落下する様子が確認できる。1 軸目に着目すると、約 6.2 秒で走行面に 9mm 程度の食い込み量、その直後 45mm 程度跳ね上がっていることが分かる。接触力に関しては食い込み量が最大となる最初の落下時に最大となり、1 軸目では 1300kN 程度の接触力が発生している。この時の接触力継続時間は 9msec 程度であり、接触剛性が大きくなるほど短くなった (50kN/mm で約 15msec, 500kN/mm で約 4msec)。

図 8-18 に接触剛性が各種応答に及ぼす影響を示す。2 軸目は 1 軸目の影響を受けていることから 1 軸目のみに着目する。図 8-18(a)(b)より、接触剛性が大きくなるにつれて車輪と走行面の最大食い込み量は急激に減少し、最大接触力は急激に増加することが分かる。図 8-18(a)には調査結果も併せて示す。脱線条件等が異なるため両者を単純には比較できないが、接触剛性 100～

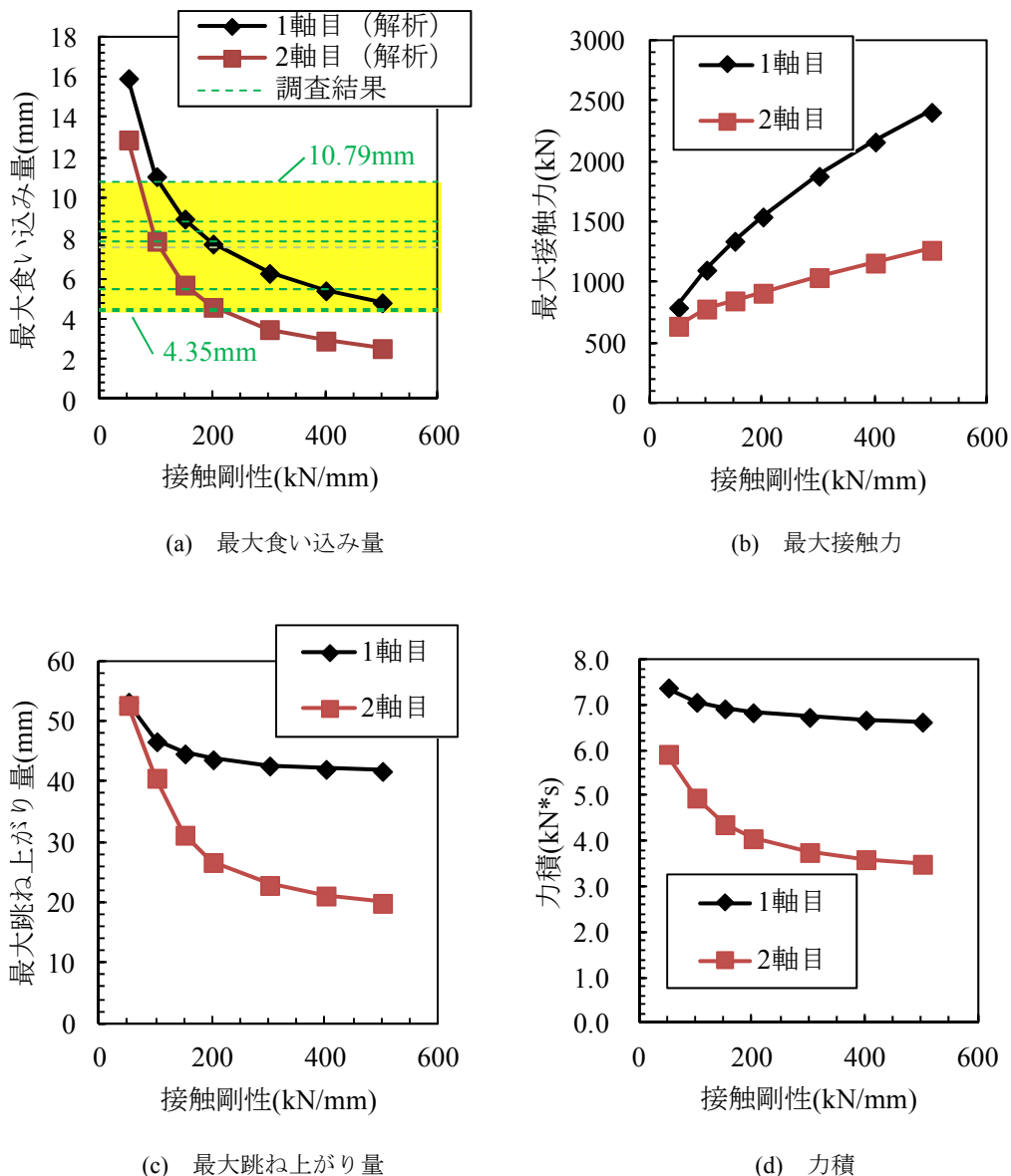


図8-18 接触剛性が各種応答に及ぼす影響

300kN/mm 程度とすると解析結果と調査結果が概ね同等となることが確認できる。図8-18(c)に示す車輪の跳ね上がり量については、接触剛性が増加するにつれて減少していることが分かる。本解析では接触剛性が10倍(50kN/mmから500kN/mm)になると跳ね上がり量は約21%減少した。図8-18(d)に示す力積については接触剛性の影響はほとんど見られなかった。ここで、接触剛性が増加するにつれて跳ね上がり量が減少するのは、本解析での接触モデルが線形であることから車輪のみの自由落下であれば接触剛性に因らず跳ね上がり量は一定になるが、車両が車体、台車、輪軸から構成される振動系であり、接触剛性の変化により車輪の跳ね上がるタイミングが変化し、振動系の影響、特に台車の影響を受けるためである。

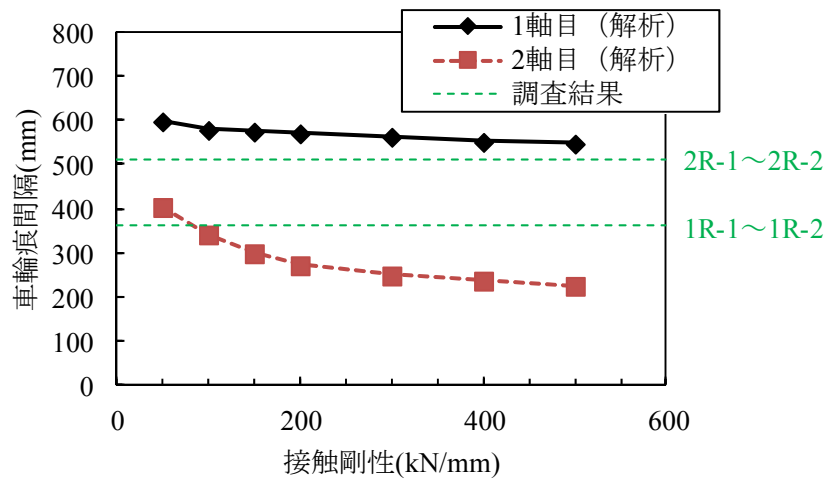
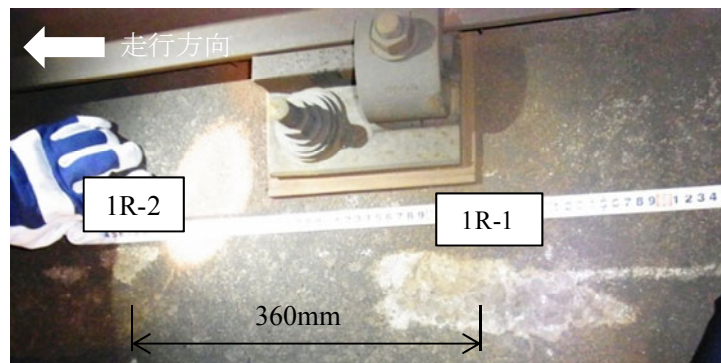
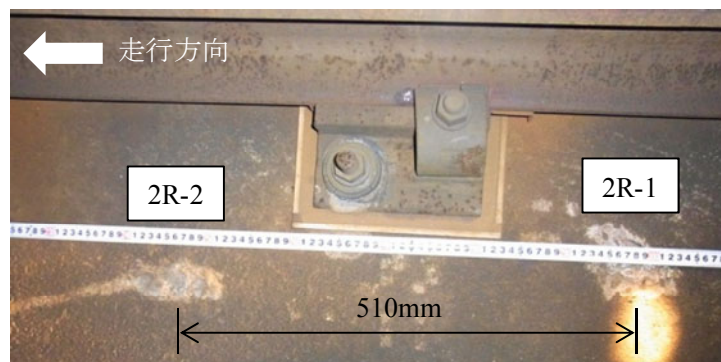


図 8-19 車輪痕間隔の比較



(a) 1R-1~1R-2



(b) 2R-1~2R-2

図 8-20 車輪痕間隔 (No.1 調査結果)

図 8-19 に車輪痕間隔における解析結果と調査結果の比較を示す。解析の車輪痕間隔は図 8-16 に示すように車輪が走行面上でバウンドする時間間隔と解析上の車両速度 14km/h から換算して算出した。調査結果は図 8-8 及び図 8-20 に示す No.1 の調査結果である。食い込み量と同様に脱線条件等が異なるために両者を単純に比較することはできないが、対応する輪軸は入れ替わっているものの、解析が調査結果と同等レベルの車輪痕間隔を算出しており、解析が概ね実現象を捉えていると考えられる。

8. 5 本章の結論

本章では、これまで未評価であったMBSに導入可能な車輪と軌道スラブ間の接触剛性を、車輪形状の接触子を用いたコンクリート板への静的模型実験により評価するとともに、実列車の脱線により生じたスラブ軌道上・有道床軌道上の車輪痕の調査を実施した。さらに、調査結果の中で、大規模地震により脱線した新幹線軌道スラブ上の車輪痕調査結果と、第8章までに構築した地震時車両挙動による解析結果とを比較することで、構築解析手法の妥当性を確認した。

本章で得られた結論は以下の通りである。

- (1) 模型実験により、割線剛性として考えた車輪とコンクリート軌道部材間の接触剛性は120kN/mm程度であることが分かった。この値は、実験供試体にひび割れが発生する時点の接触剛性であり、プレストレス等のひび割れ発生抑制機構によりさらに増加する可能性がある。
- (2) 実際の車輪痕の深さを測定し、軌道スラブ上では最大で10mm程度であること、またPCまくらぎ上では最大で30mm以上と軌道スラブと比較して大きな値となることを確認した。
- (3) MBSを用いた脱線解析により、接触剛性が増加すると車輪の跳ね上がり量が減少する可能性があることが分かった。
- (4) 最大食い込み量と車輪痕間隔に関して解析結果と調査結果を比較し、解析が概ね実現象を捉えていることを確認した。

参考文献

- 8-1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造，丸善，2012.1
- 8-2) 後藤恵一，曾我部正道，田辺誠，浅沼潔：脱線後の車輪と軌道の接触モデルに関する研究，鉄道力学論文集，No.15，pp.132-139，2011.7

第9章 結論

大規模地震に対しては、地震早期検知システム、構造物の補強、軌道・車両の安全対策等を利用し、鉄道システム全体として減災に努める必要がある。そのうち、特に車両脱線後の被害軽減に重点を置いた軌道側・車両側の地震対策工については、その効果を評価可能な手法が存在していないため、本論では、特に軌道側での地震対策工について、その効果を評価可能かつ、より効果的な対策工の開発に資することができる検討手法の構築、すなわち、脱線後の車両挙動を適切に表現可能なシミュレーション解析手法を構築することを論文の目的とした。

本論では、まず第3章、第4章において要素実験に基づく基礎的な接触剛性の評価を行った。次に第5章では、脱線後の車両挙動解析手法としてFEMとMBSを組み合わせた手法を提案した。第6章では、この開発した手法を用いて、逸脱防止ガードの性能評価を行った。第7章では、軌道側だけでなく車両側など様々なタイプの逸脱防止装置を定量的に評価可能な数値解析手法を構築するために、解析手法をさらに拡張し、走行車両と様々な線路構造物の接触手法を提案した。第8章では、実列車の脱線痕調査を実施するとともに、構築した解析手法による解析結果と比較することで、本研究の構築手法の妥当性を検証した。

得られた結果を以下に要約するとともに、今後の課題を述べ、本論の結論とする。

9.1 本論で得られた成果

「第3章 鉄道車輪とPCまくらぎの接触力」では、地震時に脱線した車輪とまくらぎの間で生じる接触力に関して、車輪形状を模擬した接触子を用いた、まくらぎの静的及び衝撃実験を実施し、載荷位置ごとの最大荷重および破壊モードを明らかにするとともに、MBSモデルに導入可能な車輪とまくらぎ間の接触剛性について評価した。また、衝撃実験に関する数値シミュレーションを実施することで、車輪とまくらぎ間で発生する接触力を精度よく表現可能な解析手法について検討した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 最大荷重に関して、載荷位置における静的最大荷重に対する衝撃最大荷重の比は、まくらぎ長手方向125mm位置（端部）での載荷を除けば0.73～1.25倍であり、静的及び衝撃最大荷重はほぼ同程度であった。
- (2) 破壊モードに関して、まくらぎ直角方向の載荷位置によって破壊モードが異なる結果となった。まくらぎ直角方向中央部に載荷した場合は、載荷部のコンクリートの圧壊及び下面から上面に向かうひび割れが発生する曲げ破壊であったのに対し、端部に載荷した場合は側面が剥がれるような破壊モードであった。また、まくらぎ長手方向端部に載荷した場合は、直角方向の載荷位置に関わらず、載荷位置から長手方向端部に向かう大きなひび割れを生じるせん断破壊であった。静的及び衝撃載荷での破壊モードはほぼ同様であった。
- (3) 接触剛性に関して、本実験では、静的載荷に対する衝撃載荷の接触剛性の比が、まくらぎ直角方向中央部載荷の場合で4.7倍、端部載荷で2.7倍となった。また、まくらぎ直角方向の載

- 荷位置に関しても、端部载荷に対する中央部载荷の接触剛性が、衝撃载荷の場合で6.3倍となり、载荷位置に関しても異なる値となった。今回の実験により算出された接触剛性は厳密なものとは言えないが、MBS解析を行う際に要求される接触剛性の精度はオーダーレベルであるため、本実験によりMBS解析を実施するための一定のオーダーは示されたものとする。
- (4) 本数値解析により得られた重錘衝撃力波形は、実験結果と比べて最大衝撃力は約半分程度小さく、衝撃力継続時間は2倍程度長くなる結果となった。
 - (5) 実験と解析の差異を考察した結果、本解析に用いた材料物性モデルでは载荷点近傍の要素のみが降伏し、まくらぎ全体として荷重に抵抗できていない可能性があることが分かった。
 - (6) 静的実験の荷重-変位関係と比較する形で解析モデルの各種材料物性モデルの影響について検討した結果、コンクリートの圧縮強度を簡易に3倍にすることで重錘衝撃力波形をある程度再現可能であることが分かった。

「第4章 鉄道車輪と走行案内路の接触力」では、分岐器部の逸脱防止装置として提案されている走行案内路について、脱線車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、走行案内路のタイプごとの耐荷力及び破壊モードを静的及び衝撃実験により評価した。また、上記実験より、脱線後の車両挙動解析に用いる走行案内路と車輪間の接触剛性を評価するとともに、一部について数値解析により検証を行った。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、縁端距離と耐力の関係を定量的に示した。例えば、縁端距離35mmの位置に载荷した場合の耐力は約216kNであった。
- (2) 箱抜き部の天板の厚さにより破壊モードが縁端破壊と押し抜き破壊に分類される。その境界厚さは80mmから150mmの間に存在すると考えられる。
- (3) 衝撃実験での耐力は静的実験での耐力の2.5倍程度となった。耐力は衝撃力の作用時間にもよるが、実務上はより小さな値である静的実験の値を設計に用いれば安全側である。
- (4) 地震時に車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配は、静的に217kN/mm程度であった。フランジを縁端に対して直角に接触させた場合の、初期勾配は静的に89kN/mm程度であった。これらの値は厳密なものとは言えないが、MBSにより数値解析を実施するための一定のオーダーは示されたものとする。
- (5) 実験の一部について有限要素法を用いた数値解析により検証を試み、車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配、最大衝撃力、ひび割れ分布等が概ね一致することを確認した。

「第5章 脱線後の鉄道車輪と軌道の接触モデル」では、脱線後の車両挙動解析手法の開発を行ったものである。具体的にはFEMとMBSを組み合わせた手法を提案するとともに、線路方向及び線路直角方向に軌道不整及び接触ばねを定義する手法を構築した。さらに、脱線後車輪のレールへの衝突及び飛び越え現象を表現する手法についても構築した。また、これまで著者らが構築してきた車両と構造物の動的相互作用解析プログラムに上記の手法を取り込み、試算を実施することで、本手法の適用性を検討した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 左右の各車輪の走行面に関して、軌間内および軌間外の走行面をそれぞれ線路直角方向に2つ（合計8つ）の領域に分割するとともに、各走行面に対して凹凸形状の不整および接触ばねを線路方向の関数として離散的に定義する手法を提案した。この手法はFEMにより軌道全

体モデルを構築するのに比べれば表現力は劣るが、同一構造が連続し、かつ単純なパーツの組み合わせで構成される軌道の力学モデルとしては、十分な再現性を有していると考える。基本的な寸法諸元と材料特性が得られれば、大規模なモデル化作業を経ることなく、有効な軌道モデルを構築することができる。

- (2) 脱線後車輪の跳ね上がりに伴うレールへの衝突および飛び越え現象を表現する手法として、車輪とレールを剛体矩形断面によりそれぞれ近似して、複雑な挙動を実用的に解く方法を提案した。ただし、脱線後の車輪のレール上への再載線は現実的には考えにくいいため、考慮しないモデルとした。また、このため車輪とレールの相互作用力は水平方向のみとした。
- (3) 上記手法を用いた検討解析により、走行面の形状および接触ばねの違いによる車両挙動の変化を確認した。具体的には、横まくらぎ、締結装置、平坦路盤面を組み合わせたサンプル軌道モデルを用いて数値解析を行い、各領域を変化させながら、それぞれの特性に応じた妥当な解が得られていることを確認した。また、走行面に高低差を付けて、レール高さまで車輪の走行位置を持ちあげた解析により、レール衝突およびレールの飛び越え現象を表現できていることを確認した。

「第6章 逸脱防止ガードの基本性能評価」では、第5章で開発した脱線後の車両挙動解析手法を用い、逸脱防止装置の一つである逸脱防止ガードを対象として、振動変位及び不同変位に関する基本性能を確認した。次に、これらの基本性能確認を踏まえ、長さ 6.3km のモデル線区に対して、逸脱防止ガードの効果を推定するとともに、脱線後の車両走行に有道床軌道が及ぼす影響について検討した、得られた結論は以下の通りである。

- (1) 脱線後の車両挙動を評価できる手法を用いて、逸脱防止ガードの振動変位及び不同変位に対する基本性能を評価した。その結果、振動変位及び不同変位の両者に対して大きな効果があることを示した。具体的には、高さ 174mm の逸脱防止ガードを軌間内に設置した場合、脱線限界に対する逸脱限界の振幅比は、正弦波 1 波での左右加振で 1.1~2.3、正弦波 5 波で 1.0~2.6 であることを示した。また、不同変位に対しても、列車速度 270km/h の場合で、限界値が 1.8 倍以上向上することを示した。
- (2) 脱線後における有道床軌道上での車両挙動の検討のため、モデル線区での地震時車両走行性解析を実施し、当該線区におけるフラジリティ曲線を算出した。その結果、高さ 235mm の逸脱防止ガードを軌間外に設置した場合、海溝型 L2 スペクトル I 及び内陸活断層型 L2 スペクトル II の元波に対して逸脱被害発生確率 10%程度であり、かなりの大規模地震動に対しても効果を発揮することを確認した。
- (3) 脱線後にコンクリート平板上を走行した場合も、有道床軌道上を走行した場合も逸脱に関するフラジリティ曲線に大きな差がないことが分かった。
- (4) 平坦なコンクリート上を走行する場合に比べ、まくらぎ上を走行する場合はやや跳ね上がり大きい傾向にあることが分かった。また、車輪落下直後に車輪とまくらぎ間には 1500kN の著大な力が生じたが、その後の走行ではまくらぎの耐荷力を超える接触力は生じなかった。

「第7章 車体と軌道、構造物等の簡易な接触解析法」では、軌道側だけでなく車両側など様々なタイプの逸脱防止装置が開発される中で、その効果を定量的に評価可能な柔軟な数値解析手法

を構築するために、第5章で構築した脱線後の車両挙動解析手法を更に拡張し、走行車両と様々な線路構造物の接触手法を提案するとともに、脱線後の車両挙動を表現可能な既存の解析プログラムに組み込み、両者間の動的相互作用を考慮可能な地震時車両挙動の解析手法を構築した。また、車体と構造物の接触に関する試計算を実施することで構築手法の実用性を検討した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 車体と線路構造物の接触モデルとして、マルチボディー車両モデルに配置した任意の接触検知点と、構造物側 FEM 情報から構成した接触面との動的相互作用力を、ペナルティ法により計算する手法を提案した。
- (2) 脱線前の車体と構造物の接触に関する試計算により、車体と構造物の接触が線形領域にある基本的な場合、本解析手法がその接触現象を表現可能であることを確認した。
- (3) 脱線後の車体と構造物の接触に関する試計算により、脱線後の車輪と軌道が接触しつつ、車体と構造物が接触する複雑な場合について、また、車体と構造物の接触が非線形領域にある場合についても、本解析手法がその接触現象を表現可能であることを確認した。

「第8章 実列車の脱線痕に基づく数値解析法の検証」では、これまで未評価であった MBS に導入可能な車輪と軌道スラブ間の接触剛性を、車輪形状の接触子を用いたコンクリート板への静的模型実験により評価するとともに、実列車の脱線により生じたスラブ軌道上・有道床軌道上の車輪痕の調査を実施した。さらに、調査結果の中で、大規模地震により脱線した新幹線軌道スラブ上の車輪痕調査結果と、第8章までに構築した地震時車両挙動による解析結果とを比較することで、研究の妥当性を確認した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) 模型実験により、割線剛性として考えた車輪とコンクリート軌道部材間の接触剛性は 120kN/mm 程度であることが分かった。この値は、実験供試体にひび割れが発生する時点の接触剛性であり、プレストレス等のひび割れ発生の抑制機構によりさらに増加する可能性がある。
- (2) 実際の車輪痕の深さを測定し、軌道スラブ上では最大で 10mm 程度であること、また PC まくらぎ上では最大で 30mm 以上と軌道スラブと比較して大きな値となることを確認した。
- (3) MBD を用いた脱線解析により、接触剛性が増加すると車輪の跳ね上がり量が減少する可能性があることが分かった。また、最大食い込み量と車輪痕間隔に関して解析結果と調査結果を比較し、解析が概ね実現象を捉えていることを確認した。

9.2 今後の課題

本論の成果を用いれば、現在提案されている様々な対策工に関して、実用的なレベルで定量的な評価が行える。本論では、一般的な検討結果を中心に論述したが、今後、各鉄道事業者の具体的な施策の評価に活用していきたい。

一方で、学術的な現象解明の観点からは以下のような課題が残されている。

9.2.1 検証について

本論では、高速で走行する車両の脱線と、脱線後の車両の走行、地上側の軌道や構造物との接

触を取り扱っている。新幹線車両は、編成両数も多く、地震時に車両が走行する距離も km オーダーである。一方で、車両と軌道や構造物との接触は、作用時間の短い実際に表現することは困難な現象を取り扱っており、マルチスケールの大規模問題をフルスケールで再現することは困難である。このため実物大の要素実験、模型実験と数値解析を組み合わせた効率的な検証を行う必要がある。

実物大実験については、本論では、車輪と軌道部材の要素実験や、既往の車体模型の静的実験の結果を活用した。また、車両が脱線に至るまでについては、半車体の実物大の模型実験により検証されたコードを用いている。

今後の開発の中では、この他に詳細かつ大規模な非線形解析による数値実験が有効であると考ええる。本論でも LS-DYNA による検証を一部併用したが、本論で示したようなマルチボディー手法と大規模な非線形数値解析手法を併用することにより、効率的な技術開発が可能となると考える。既に鉄道以外での技術分野、例えば航空機、自動車等の分野においても試作数量を減らし、かなりの部分をデジタル試作機やデジタル要素実験で補う動きが顕著となっている。本論の研究内容を更に拡張、検証していくためには、接触の部位、現象、接触段階ごとに問題を切り分けて目的と条件を明確にし、それぞれ得意な部分を組み合わせ、総合的に検証を進めて行く必要がある。一方で、縮尺模型実験を用いるべきという考え方もあるが、この種の問題に対する縮尺実験に関しては相似則の観点から課題が多く、取り組みには慎重さが求められる。縮尺模型は、全体の現象を俯瞰して確認できるという点でアピール効果は大きいですが、学術的な検証という意味では留意が必要である。今後、単純な力学挙動の再現であれば、Adams や LS-DYNA 等の信頼されたコードへの代替が進んで行くであろう。縮尺模型を採用する場合については、何を明らかにしようとしているのか、何を再現すべきかについて、充分留意した取り組みが必要である。

9.2.2 車輪と軌道との接触モデルについて

本論で用いた手法では、輪軸や構造物を幾何学形状とペナルティ関数法により表現している。対策工に対する実用レベルでの評価に関しては、マルチボディーを用いた本論の手法により必要な知見は得られるが、逸脱と非逸脱の限界点での見極めについて焦点を当てると、課題が残されている。

実際の走行中の車輪は回転しており、回転トルクにより車輪が逸脱防止ガード等に乗ること、車輪とガード等の摩擦による車輪の上昇成分、あるいは逸脱防止装置の局所変形に車輪が掛かり、乗ること等が想定される。

現状の計算機の能力では、この種の問題に関してはより詳細な FEM 解析で個別に現象解明を進めるのが現実的であり、本論で用いた手法で初期条件を提供して、個々の要因に関して深度化していくのが良いと考える。

9.2.3 車両と構造物との接触モデルについて

本論で用いた手法では、車体と構造物を幾何学形状とペナルティ関数法により表現している。ただし、接触方向については、線路直角の水平方向と鉛直方向にのみ適用可能であり、線路方向に対する接触は考慮していない。いわゆる車体と構造物のなんらかの壁面とが正面衝突、あるいはオフセット衝突するような現象は取り扱えないものとなっている。本論の研究の目的自体が上

記のような著大な衝突を回避するための対策の研究であるため、本論ではターゲットとして外しているが、車体が潰れてしまうような大変形問題はともかくとしても、今後、軽微なオフセット衝突程度まで検討できるようにモデルを拡張していく必要があると考える。ただし、車両の力学モデルに自由度を持たせるとともに、車両速度も制御する必要があるため、相当の改良が必要となるため、今後の課題としたい。

また、本研究では、線路構造物との接触を車体に限定したが、今後は台車および輪軸にも同一手法を拡張する予定である。既に輪軸に関しては、拡張作業を終えており、試計算において、例えば輪軸のギアボックスと軌道が接触する挙動等についても、本解析手法がその接触現象を表現可能であることを確認している。

一方で、車両を構成する各部位と軌道・構造物の部材との間には様々な接触の組み合わせが考えられる。本論では主要な接触問題を検討の対象としたが、今後これらの課題についても、接触検知点の適切な配置方法や接触ばね剛性の与え方を検討し、脱線後のより詳細な車両挙動の評価を実施していく予定である。

謝辞

本学位論文を結ぶにあたり、ご指導、ご協力を頂いた全ての方々に、深く感謝の意を表します。

本学位論文の審査におきまして、主査を務めて頂きました九州大学大学院教授 園田佳巨博士には、論文を作成するにあたっての心構えから、論文の構成と内容など、細部にわたりご指導、ご助言を頂きました。また、著者の学部生時代から、研究者としての基礎を教えて頂き、鉄道総研への入所以降も、共同研究等で長い期間多くのご指導を賜りました。心より御礼申し上げます。また、論文審査の副査を務めて頂きました九州大学大学院教授 日野伸一博士、九州大学大学院准教授 梶田幸秀博士には、貴重な時間を割いて有益なご指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

本学位論文は、著者が2008年に鉄道総合技術研究所に入所して以来、業務の主たる部分として取り組んできた内容を取りまとめたものです。入社当時より、研究者としても社会人としても未熟な筆者に、直接の上司として、社会人の基礎、研究者としての心構え、基礎知識・専門知識の習得など、様々な面において懇切丁寧にご指導を頂いた鉄道総研 曾我部正道博士には、ここに改めて深甚の謝意を表します。また、構造力学研究室関係者の涌井一博士、浅沼潔博士、上半文昭博士、渡辺勉博士、徳永宗正博士、箕浦慎太郎氏、松岡弘大博士、村井佐和子氏、高木秀典氏には、多大なるご助言とご支援を頂きましたおかげで、研究を円滑に進めることができるとともに、本論文を取りまとめることができました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行においては、鉄道総研の関係各所の皆様、また、OBの方々に、多くのご指導とご助言、ご協力を頂きました。特に、石田弘明博士、池田充博士、谷村幸裕博士、宮本岳史博士、岡本大博士、田所敏弥博士、仁平達也博士、渡辺健博士、轟俊太郎氏、山崎由紀氏には、様々な面から貴重なご助言とご協力を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究では、鉄道車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS を改良することで、脱線後の車両挙動を表現可能な新たな解析手法を構築しました。神奈川工科大学教授 田辺誠博士、計算力学研究所社長 田辺泰子氏には、数値解析の基礎から実際の動的相互作用解析に至るまで、多岐にわたるご指導、ご助言を賜りました。心より御礼申し上げます。

以上の方々をはじめ、個々にお名前を上げることができなかった数多くの方々のご助言やご協力の基に、本論文は取りまとめることができました。今後は、本研究成果を基に、鉄道の更なる安全性向上のために尽力していく所存ですので、引き続き厳しくご指導頂ければ幸いです。

最後に、私事ではありますが、筆者にこのような機会を与えてくれるとともに、様々な支援をしてくれた祖母 アサエ、父 教生、母 恵美子、弟 祐介、妹 生恵、弟 元気、また、終始応援し心の支えとなってくれた妻 早苗、明るい笑顔と元気をくれた息子 一希に心から感謝し、本論文の結びとします。