

エネルギー基準による落石覆工の安全性照査に関する研究

園田, 佳巨

<https://doi.org/10.11501/3097539>

出版情報：九州大学, 1994, 博士（工学）, 論文博士
バージョン：
権利関係：

エネルギー基準による落石覆工の
安全性照査に関する研究

平成6年2月

園田佳三

①

エネルギー基準による落石覆工の
安全性照査に関する研究

平成6年2月

園 田 佳 巨

目 次

第1章 序 論	1
1.1 緒 言	1
1.2 現行の落石覆工の設計法の問題点と既往の研究	2
1.3 本研究の目的	5
1.4 本研究の概要	6
参考文献	7
第2章 落石覆工へのエネルギー伝達率の算定法に関する検討	9
2.1 緒 言	9
2.2 3質点系モデルによるエネルギー伝達率の簡易算定法	9
2.3 動的同定法による入力パラメータの決定	12
2.3.1 m_1, m_2, m_3, k_3 の決定法	12
2.3.2 動的同定法による k_1, k_2, c_1, c_2 の決定法	13
2.4 数値計算例	17
2.4.1 エネルギー伝達率算定法の妥当性の検討	17
2.4.2 各種緩衝材のパラメータ値の比較	19
2.4.3 各種の砂のパラメータ値の回帰式	20
2.4.4 落石覆工へのエネルギー伝達率の計算例	23
2.5 結 言	25
参考文献	26
第3章 サンドクッションの衝撃緩衝効果に関する検討	27
3.1 緒 言	27
3.2 室内モデル実験による検討	27
3.2.1 サンドクッションの静的載荷実験	28
(1) 静的載荷実験の概要	28
(2) 実験結果および考察	30
3.2.2 落錘式衝撃実験	31
(1) 落錘式衝撃実験の概要	31
(2) 実験結果および考察	32
3.3 個別要素法による解析的検討	34
3.3.1 静的載荷実験実験のシミュレーション	35
(1) 個別要素法 (DEM) の概要	35
(2) 静的載荷実験のシミュレーション結果および考察	36

3.3.2	落錘式衝撃実験のシミュレーション解析	38
(1)	衝撃応答解析の概要	38
(2)	室内衝撃実験のシミュレーション結果および考察	41
(3)	実物大衝撃実験に対するシミュレーション解析	44
3.4	結 言	50
	参考文献	51
第4章	PCはり部材の耐衝撃性能に関する実験的検討	52
4.1	結 言	52
4.2	PCはりの静的载荷実験	52
4.2.1	静的実験の概要	53
(1)	実験装置	53
(2)	供試体	54
4.2.2	静的载荷実験の結果および考察	56
(1)	PCはりの鋼材指数と静的限界吸収エネルギー量	56
(2)	PCはりの鋼材指数と静的荷重による破壊形態	57
(3)	RCはりとPCはりとの静的限界吸収エネルギー量の比較	58
(4)	PCはりの静的限界吸収エネルギー量と圧縮鉄筋量との関係	59
4.3	PCはりの衝撃载荷実験	60
4.3.1	衝撃载荷実験の概要	60
4.3.2	衝撃载荷実験の結果および考察	61
(1)	PCはりの鋼材指数と衝撃応答特性	61
(2)	PCはりの鋼材指数と応答吸収エネルギー量	62
(3)	PCはりの鋼材指数と衝撃荷重による破壊形態	63
4.4	結 言	65
	参考文献	66
第5章	PCはり部材の衝撃応答に関する解析的考察	67
5.1	結 言	67
5.2	断面分割法によるPCはり断面の曲げモーメント～曲率関係の計算方法	67
5.2.1	PC鋼線の高速引張試験	68
(1)	PC鋼単線とより線との静的応力～ひずみ関係の比較	68
(2)	PC鋼線の高速引張試験の概要	69
(3)	PC鋼線の高速引張試験の結果	69
5.2.2	PCはりを構成する各材料の動的応力～ひずみ関係	70
(1)	PC鋼線の応力～ひずみ関係	70
(2)	コンクリートの応力～ひずみ関係	71

(3)鉄筋の応力～ひずみ関係	73
5.2.3 PC部材のM～ ϕ 関係の計算方法	74
(1)プレストレスによる初期応力度の計算	74
(2)PCはり断面の曲げモーメント～曲率関係の計算手順	76
(3)PC部材断面の局部破壊および全体破壊の判定	77
5.3 多質点系剛体ばねモデルによるPCはりの衝撃応答解析	78
5.3.1 PCはりのモデル化	78
5.3.2 衝撃応答解析手法	78
5.4 数値計算例および考察	81
5.4.1 PCはりのM～ ϕ 関係に関する考察	82
(1)PC部材のM～ ϕ 関係と鋼材指数の関係	82
(2)PC部材のM～ ϕ 関係にひずみ速度がおよぼす影響	83
(3)PCはりの衝撃載荷実験に対するシミュレーション	84
5.5 結 言	87
参考文献	88
第6章 PC落石覆工の破壊判定解析	89
6.1 緒 言	89
6.2 PC落石覆工構造系の全体衝撃応答解析	89
6.2.1 PC落石覆工のモデル化	90
6.2.2 サンドクッションのモデル化	93
6.2.3 PC落石覆工の衝撃応答解析手法	93
6.3 数値計算例および考察	95
6.3.1 PCはりおよび柱部材のM～ ϕ 関係	95
6.3.2 設計荷重レベルの落石に対する応答状況	96
6.3.3 大規模な落石に対する応答状況	98
6.4 結 言	102
参考文献	102
第7章 エネルギー基準によるPC落石覆工の安全性照査法	104
7.1 緒 言	104
7.2 エネルギー基準によるPC落石覆工の安全性照査法	104
7.2.1 PC落石覆工の限界吸収エネルギー	105
7.2.2 落石覆工へのエネルギー伝達率	107
7.3 安全性照査法の数値計算例	108
7.3.1 PC落石覆工の限界吸収エネルギー	108
7.3.2 落石覆工へのエネルギー伝達率	110

7.3.3 エネルギー基準による安全性照査	112
7.4 結 言	113
参考文献	114
第8章 結 論	115

第1章 序論

1.1 緒言

日本の交通輸送システムにおいて、かつては鉄道および海運が大きな地位を占めていたが、国民の生活水準の向上や多様化および第3次産業の発達にともない、現在では車による輸送がその主役の座を占めている。その間の道路整備計画として、昭和29年の第1次道路整備5ヶ年計画から昭和63年の第10次道路整備5ヶ年計画まで、主要都市間の高速道路から都市高速道路や都市郊外のバイパス道路へと着々と進められ、全国くまなく道路網が整備されてきた。しかし、日本の国土はその大半を山地山岳で占められているため、道路網整備が地方に進むにつれて、その経路として落石の危険性がある山岳地域を通過することが不可避となり、それにつれて落石事故が多発するようになってきた^{1), 2), 3)}。

落石災害に対してとりうる対策工は、大きく2つに分けられる。1つは、落石となる可能性がある斜面内の浮石や転石を取り除いたり斜面に固定する落石予防工であり、もう1つは、道路際あるいは道路上に設置した施設により落石から人や車両を防護する落石防護工である。このうち、落石防護工には図1-1に示すように、落石が道路に到達する前に阻止するための対策工である落石防止網、落石防止柵、落石防止擁壁等と、道路へ到達した落石に対して最終的に人や車両を守るために道路全体を覆う構造形式の落石覆工があり、これらの選定については、現地の調査を基に予想される落石の規模や落下経路を想定したうえで決定される。

ところが、これら対策工の設計法は基本的な概念が統一されておらず、落石防止網や落石防止柵には既に吸収エネルギーに基づいた設計方法が採用されているが、落石覆工については未だに落石の衝撃力を静的荷重として取り扱い、許容応力度法を用いた設計がなされている。これは、落石覆工が各種対策工の中で最も大規模かつ重要な構造物として安全性が要求されるとともに、永久構造物としての使用が期待されるため、変形を許容するような設計思想が受け入れ難いためである⁴⁾とされている。しかし、本来、落石防護工のように衝撃力を受ける構造物の設計は、その終局耐力および変形性能を考慮することにより吸収エネルギーに基づいた設計を行う方が合理的である⁵⁾と考えられる。そこで、本研究は落石覆工の合理的な設計法を確立するために、エネルギー的観点から安全性照査を行う方法について検討を試みた。

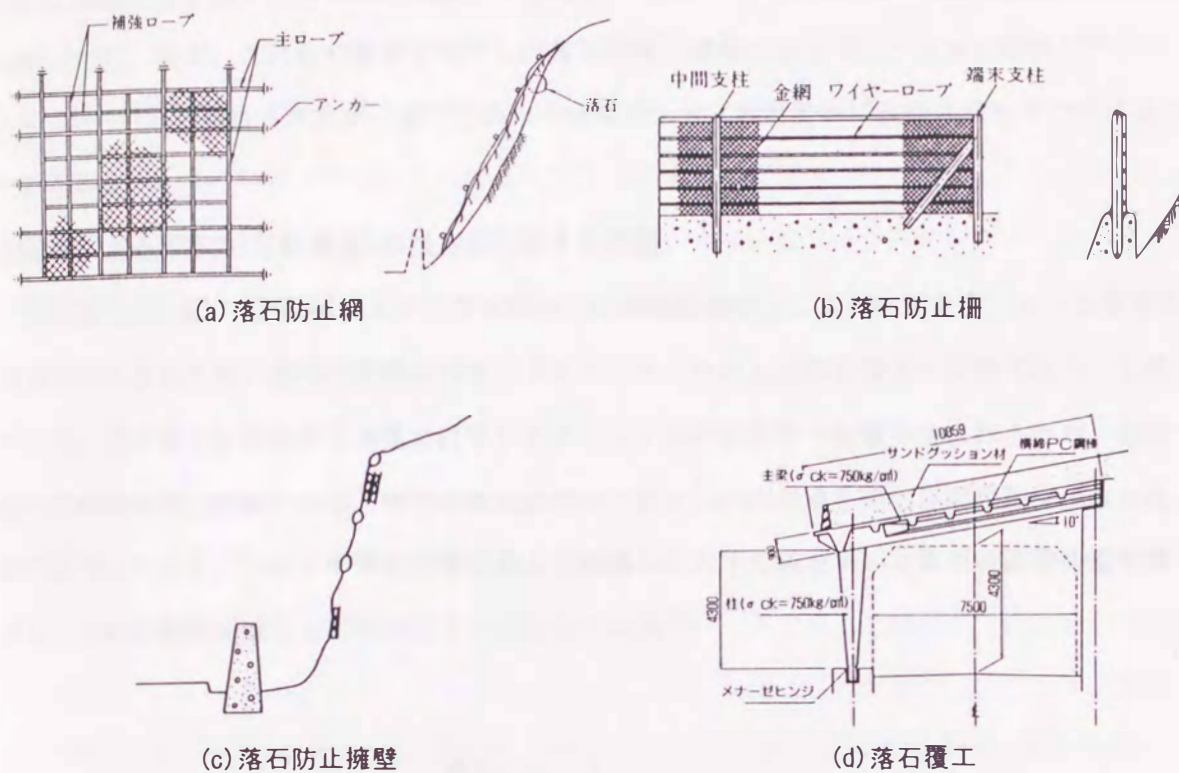


図 1-1 落石防護工の種類

1.2 現行の落石覆工の設計法の問題点と既往の研究

現在、落石覆工の設計法として、落石の衝撃荷重を静的荷重として取り扱ったうえで許容応力度法による計算が採用されている⁴⁾。しかし、現行の設計法に関する数多くの問題点も指摘されており、それぞれに対して数多くの研究が行われてきた。それらを大きく分けると、以下のようになる。

①設計で対象とする落石条件の決定方法に関する問題

設計で対象とする落石条件は、予め、現地で落石となる可能性がある浮石の調査を行ったうえで決定される。しかし、浮石が落石となる確率の予測や、実際に落石として落ちてくるときの規模(崩土を含めて)および落下経路の予測は極めて困難である。したがって、最も重要である設計条件の決定が、設計の過程の中で最も難しいのが実状である。これまで、落石の発生機構については多くの研究がなされており、発生形態の分類、斜面勾配との関係、地質との関係、気象等の発生誘因等について、落石災害の実例の調査をもとに検討が行われてきた^{6), 7)}。また、

落石の落下経路についても斜面の状態と落石の重量や形状等との関係によりどのように変化するか、実際に石を落下させる野外実験による調査^{8), 9), 10), 11)}が行われ、ある程度の資料が得られている。また、これらの資料を利用した落石の落下経路のシミュレーション解析^{12), 13), 14), 15), 16)}も行われてきたが、まだこれらの成果を十分に設計計算に反映させるまでには至っていない。

②落石による衝撃力(設計荷重)の推定法に関する問題

落石覆工は、図1-2に示すように本体屋根上に衝撃緩衝材としてサンドクッションを有する構造形式をとるため、落石の衝撃力はサンドクッションを介して落石覆工に伝達される。したがって、落石覆工に作用する荷重にはサンドクッションの状態等の影響が含まれるため、その値の正確な推定は困難である。現行の設計法では、落石の衝突現象を弾性体間の衝突現象と仮定することにより、ヘルツの弾性接触理論より誘導した以下の式を用いて落石の衝撃荷重を推定し、これを静的荷重として取り扱うこととしている⁴⁾。

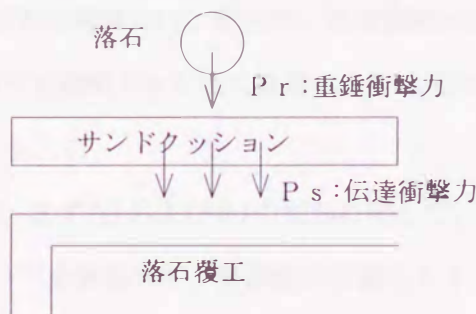


図1-2 重錘衝撃力と伝達衝撃力

$$P = 2.455 \cdot W^{\frac{2}{3}} \cdot \lambda^{\frac{2}{5}} \cdot H^{\frac{3}{5}} \dots\dots\dots (1-1)$$

ここに、 W :落石重量(tf)、 H :落下高さ(m)、 λ :ラーメの定数(t/m^2)

なお、ラーメの定数 λ はサンドクッションの状態を表わす定数で、以下のような値をとるように示されている。

- 非常に軟らかいサンドクッションの場合 100 t/m²
- 軟らかいサンドクッションの場合 300~500 t/m²
- 固いサンドクッションの場合 1000 t/m²

ところで、式(1-1)による値を設計荷重として採用するにあたり、次のような問題点が指摘されている。

(a)落石による衝撃荷重は、サンドクッションの状態により大きく影響を受ける。式(1-1)ではラーメの定数の値により考慮することになっているが、その値の決定方法については明確にはされていない。そのため、現実にはどの程度の値を採用するかは担当者の判断に委ねられているが、一般に $\lambda = 100 \text{ t/m}^2$ の値が広く採用されており、設計荷重自体の根拠が乏しい。

(b)式(1-1)の値は、落石とサンドクッションとの間の衝突面で発生する衝撃力（以下、重錘衝撃力と称する）を弾性接触理論を適用して求めたものである。しかし、落石覆工に作用する衝撃力はサンドクッションを介して伝達する力（以下、伝達衝撃力と称する）であり、明らかに2つの力は異なることから、重錘衝撃力を設計荷重に採用することには矛盾がある。またサンドクッションを半無限の弾性体と仮定することにも無理があるものと考えられる。

(c)式(1-1)の値は、時間的に変動する衝撃荷重の最大値に対応するものを与えるが、それを静的な荷重として取り扱うことは、落石覆工に対してかなり過大な外力評価となる可能性が高い。

(d)本来、衝突現象により発生する衝撃力は、衝突物と被衝突物の双方の剛性の影響等が作用することから、落石覆工に作用する衝撃力を正確に算定するには落石覆工の剛性の影響も考慮する必要があるものと考えられる。

以上のような問題点の中で、まず(a)および(b)の問題に関して、金沢大学の吉田や梶谷らが実物大の落錘式衝撃実験^{18), 19)}を実施して、重錘側の衝撃力とサンドクッション底面へ伝達する衝撃力とをそれぞれ計測し、サンドクッションの状態と式(1-1)におけるラーメの定数の値との関係や、実験結果をもとに伝達衝撃力を基準とした新しい設計荷重式（吉田の式）の提案¹⁸⁾等を行っている。また、室蘭工業大学の岸も、(b)の問題について実物大衝撃実験の結果から、伝達衝撃力の方が重錘衝撃力の2倍程度の衝撃力を示す場合があることを指摘する²⁰⁾など、サンドクッションの衝撃緩衝効果について明らかにされつつある。しかし、現在においてもこれらの問題に関する議論は行われており、まだ統一的な見解が得られるまでには至っていない。一方、(c)の問題については、梶谷が落石覆工の固有周期を考慮することにより、衝撃力に関する動的応答倍率の検討²¹⁾を行っている。

③許容応力度法の適用に関する問題

現在、落石覆工の設計には許容応力度法が採用されているが、これも落石覆工の耐衝撃性に関して未だに不明な点が多いことや、落石覆工の役割（道路まで到達した落石から最終的に人や車両を守る）を考慮すればやむをえないものと考えられる。しかし、許容応力度法を適用するがゆえに、まれにしか発生しないような大規模な落石は設計条件として想定できない等の弊害もあると言われている。したがって、これを解消しうる合理的な設計法の確立が望まれており、いくつかのアプローチが試みられてきた^{5), 22), 23), 24)}。その中の1つとして、大阪市大の園田が提案する二段階照査法²⁴⁾が挙げられる。これは、現行の許容応力度法に加えてエネルギー基準による安全性照査を行うもので、まれにしか発生しないような大規模な落石に対しては、破壊しない限りにおいて落石覆工が変形することを許し、変形により吸収可能なエネルギーと落石の衝撃エネルギーを比較しようという試みである。著者らも、これまで同様の考えを持ち、本研究を通して実際の落石覆工に対してエネルギー基準による照査を適用するための具体的な方法について検討してきた。これらの研究成果は、現時点では落石覆工の設計法自体を変更するにはまだ十分とは言い難いが、少なくとも落石覆工の安全性の照査法としてエネルギー的観点からの検討を行うことは重要であり、今後のより詳細な検討により現実の設計への適用が望まれる。

1.3 本研究の目的

本研究では、落石覆工の合理的な設計法のために、エネルギー的観点に基づいた安全性照査について検討するものである。そのために、まずエネルギー基準による安全性照査という新しい概念について示すとともに、本法に必要な落石覆工へのエネルギー伝達率の簡易算定法について考察する。次に、サンドクッションの衝撃緩衝効果に関する実験的考察とPCはりの衝撃実験を行い、サンドクッションの緩衝効果の評価方法およびPC部材の破壊判定の方法について検討する。次に、落石-サンドクッション-落石覆工間の動的相互作用を考慮した全体系の衝撃応答解析手法を提示し、本法を用いて落石覆工の破壊判定を解析的に行うことを試みる。最後に、エネルギー基準による安全性照査を3種類の方法により行い、各手法の妥当性に対する検討を行う。

1.4 本研究の概要

本論文の概要を各章毎に記述すると、以下のようになる。

第1章では、落石防護工の現状とその中における落石覆工の位置付けを述べるとともに、現行の設計法の問題点と既往の研究の状況について整理し、本研究の目的・意義および本論文の概要について述べた。

第2章では、落石覆工のエネルギー基準による安全性照査に不可欠なエネルギー伝達率の算定法について検討した。すなわち、落石-サンドクッション-落石覆工の3者関係を簡易な3質点系モデルに置換したうえで衝撃応答解析を行い、数値計算により求めた。その際、解析に必要なサンドクッションのパラメータは、過去の実験データを用いた動的同定手法により決定し、種々の落石条件やサンドクッションに対しても適用できるような回帰式を導いた。

第3章では、サンドクッションの衝撃緩衝効果について室内モデル実験を行い、砂の状態(含水比、粒度分布、転圧状況)と衝撃緩衝効果との関係について考察するとともに、緩衝効果が静的載荷実験により得られる砂の締固め度を用いて推定可能であることを示した。次に、個別要素法を用いた静的載荷実験および衝撃実験のシミュレーションを行い、予め解析上の砂のばね係数と締固め度との関係を静的実験に対する数値解析により調べておけば、衝撃実験におけるサンドクッションの緩衝効果を衝撃応答解析を用いて良好にシミュレートできることを示した。

第4章では、PC落石覆工の耐衝撃性について検討するために、プレストレス力の導入度を表わす鋼材指数をパラメータとしたPCはりの静的載荷実験および落錘式衝撃実験を行い、PCはりの静的および衝撃挙動に対して鋼材指数が与える影響について調べるとともに、鋼材指数がPCはりの衝撃破壊メカニズムを知るための1つの目安となることを確認した。

第5章では、4章で実施した衝撃実験を対象とした数値解析を行い、衝撃荷重を受けるPCはりの破壊判定を可能とする解析手法について検討した。すなわち、PCはりをはり軸方向には剛体ばね要素でモデル化し、断面方向には多層に分割することにより、各時刻ではり断面内のひずみ分布や曲げ耐力を確認しながら応答計算を行った。本手法による計算結果と4章の実験結果とを比較することにより、本法がPCはりの衝撃応答特性を精度良くシミュレートするとともに、PCはりの破壊判定も可能であることを確認した。

第6章では、5章の解析手法をPC落石覆工に適用するために、落石とサンドクッションには個別要素モデルを用い、落石覆工には剛体ばね要素モデルを用いることにより、落石-サン

ドクッションー落石覆工の3者間の動的相互作用を考慮した全体解析を行い、PC落石覆工の破壊判定を可能とする衝撃応答解析法について検討した。なお、本章では実物大PC落石覆工の破壊実験を例に数値計算を行い、PC主桁の横締め効果を考慮すれば実際のPC落石覆工の応答状況を把握可能であることを確認した。また、現実の実験結果に比べやや安全側の評価を与えるが、本解析によりPC落石覆工の破壊判定も可能であることを示した。

第7章では、エネルギー基準による安全性照査法について検討した。すなわち、6章の計算に用いた実物大PC落石覆工に対して3種類の方法を用いた安全性照査を行い、各手法による結果と、実験結果や6章の全体解析の結果と比較することにより、各照査法の妥当性について検討した。

第8章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、今後の検討課題についても言及している。

第1章 参 考 文 献

- 1) 馬場亮介、高木寿: 国鉄における落石の実態と対策—四国の場合—, 施工技術, Vol. 6, No. 8, pp. 32~39, 1972年 8月
- 2) 鉄道技術研究報告No. 1260 鉄道沿線の落石の実態調査: 鉄道技術研究所, 1984年 3月
- 3) 川上英男: ロックシェットの崩壊機構, コンクリート工学年次論文報告集, 1990, pp. 701~706
- 4) 日本道路協会: 落石対策便覧, 1983年7月
- 5) 園田恵一郎: 限界状態設計法とロックシェットの設計, 北陸道路研究会35周年記念シンポジウム論文集, pp. 22~34, 1988年10月
- 6) 池田和彦、小橋澄治: 地形・地質からみた落石の傾向と発生予測, 施工技術, Vol. 6, No. 8, pp. 17~21, 1972年 8月
- 7) 馬場和秋、吉川利雄: 落石の予知, 施工技術, Vol. 6, No. 8, pp. 23~31, 1972年 8月
- 8) 佐々木康、谷口栄一、舟見清巳、谷本且、堀口正巳: 落石の跳躍量に関する実験, 第14回日本道路会議特定課題論文集, pp. 113~115, 1981年11月
- 9) 右城猛、村上哲彦: 落石の飛躍高の推定, 第1回落石の衝撃力およびロックシェットの設計に関するシンポジウム論文集, pp. 48~54, 1983年 7月

- 10) 日本道路公団東京支社, 建設企画コンサルタント(株): 落石実験調査報告書, 1973年11月
- 11) 日本道路公団東京支社, 建設企画コンサルタント(株): 愛岐落石防護柵耐衝撃力測定実験報告書,
1973年11月
- 12) 大房高明、福田富男: 落石による擁壁の衝突速度と落下軌跡の算定, 土木技術, Vol. 33, No. 5,
pp. 36~41, 1978年 5月
- 13) 吉田博、荒田久和: マイコンによる落石の飛跡シミュレーション, 第1回落石の衝撃力およびロック
シェットの設計に関するシンポジウム論文集, pp. 55~61, 1983年 7月
- 14) 右城猛、大原健史、明坂宣行、吉崎和人: 実験データを用いた落石の運動軌跡のシミュレーション,
第2回落石の衝撃力およびロックシェットの設計に関するシンポジウム論文集, pp. 88~91, 1986年7月
- 15) 酒井重治、松葉美晴、村田佳久: 設計上に於ける飛躍高の算出方法に関する一提案, 第2回落石の衝撃
力およびロックシェットの設計に関するシンポジウム論文集, pp. 92~97, 1986年 7月
- 16) 斎藤武文、吉田博、榎谷浩: 落石の落下位置および速度に関する一推定法, 第2回落石の衝撃力および
ロックシェットの設計に関するシンポジウム論文集, pp. 98~104, 1986年 7月
- 18) 吉田博、竹島忠、古市進作、石塚健吉: ロックシェット上の落石による衝撃力の推定に関する実験,
道路, No. 428, pp. 35~41, 1976年10月
- 19) 吉田博、榎谷浩、佐藤真、井原明美: 落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価について,
構造工学論文集, Vol. 33A, pp. 571~583, 1987年3月
- 20) 尾山靖史、中野修、岸徳光: 緩衝材として敷砂を用いた場合の重錘衝撃と底部伝達衝撃力の関係,
土木学会第47回年次学術講演会講演概要集 I-486, pp. 1146~1147, 1992年 9月
- 21) 吉田博、榎谷浩、岡衛: 落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について, 土木学会論文集
第362号/ I-4, pp. 461~470, 1985年10月
- 22) 吉田博、榎谷浩、右城猛、柴田健次: 落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ,
土木学会論文集 第421号/VI-13, pp. 213~222, 1990年 9月
- 23) 園田佳巨、佐藤紘志、石川信隆、榎谷浩: 落石覆工への落石のエネルギー伝達率に関する基礎的考察,
土木学会論文集 No. 446/ I-19, pp. 147~155, 1992年 4月
- 24) 園田恵一郎: 落石覆工の設計法についての一提案, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1563~1572, 1993年 3月

第2章 落石覆工へのエネルギー伝達率の算定法に関する検討

2.1 緒言

本章では、エネルギー基準による落石覆工の安全性照査を行うために必要な、落石覆工への落石による衝撃エネルギーの伝達率に関する簡易計算法について検討する。ここで、エネルギー基準による落石覆工の安全性照査とは、落石覆工のもつ限界吸収エネルギー量 (U_A) が、落石覆工へ伝達されるエネルギー量 ($\gamma_0 \times E$, γ_0 : エネルギー伝達率(%), E : 落石の運動エネルギー) よりも大きければ ($U_A \geq \gamma_0 \times E$) 安全とする照査基準である。ところで、落石覆工には一般にサンドクッションが衝撃緩衝材として使用されるため、落石の持つ運動エネルギーの大半はサンドクッションによって吸収されることが予想される。したがって、エネルギー基準により落石覆工の安全性の照査を行うためには、落石のエネルギーの約何%がサンドクッションによって吸収され、約何%が落石覆工へ伝達されるのか、定量的に明らかにする必要がある。ところが、これまでの落石覆工に関する研究は、落石が衝突したときに発生する衝撃力の推定法に関するものが大半を占めており、エネルギー的見地からの研究は非常に少ない。その中で、金沢大学の榎谷が行った実物大のH鋼はり上のサンドクッションに対する落錘式衝撃実験¹⁾は、エネルギー的観点からサンドクッションの緩衝効果について検討を行った数少ない例であり、この実験により、通常規模の落石(落石重量1.0tf, 落下高さ10.0m程度)であれば、落石覆工へは10%程度のエネルギーしか伝達されないことが明らかにされた。

本章では、落石覆工へのエネルギー伝達率を数値計算により算定することを目的として、簡易な3質点系モデルを用いた解析的な検討を試みる。なお、モデル化が困難なサンドクッションについては、落石覆工への伝達衝撃力の計算値を衝撃実験の計測値と一致することを条件にした動的同定手法を用いて決定する。数値計算例として、上述の榎谷が行った衝撃実験の結果と比較することにより本法の妥当性について検討するとともに、鋼製落石覆工およびRC落石覆工へのエネルギー伝達率の計算例を示す。

2.2 3質点系モデルによるエネルギー伝達率の簡易算定法

落石覆工へのエネルギー伝達率を計算するには、落石-サンドクッション-落石覆工の3者間の衝撃応答における相互作用を考慮する必要がある。したがって、ここでは以下の仮定のもとに、図2-1に示すような3質点系モデルを用いて計算することとした。

①図2-1(a)に示すように、落石-サンドクッション-落石覆工の3者間のみでエネルギーの伝達は行われ、基礎地盤等への逸散は考慮しない。

②上記の3者関係を、3質点系モデルに置換できるものとし、サンドクッションおよび落石覆工の衝撃応答特性を図2-1(b)に示すような弾性または弾塑性ばねとダッシュポットを組み合わせたレオロジーモデルで表現できるものとする。

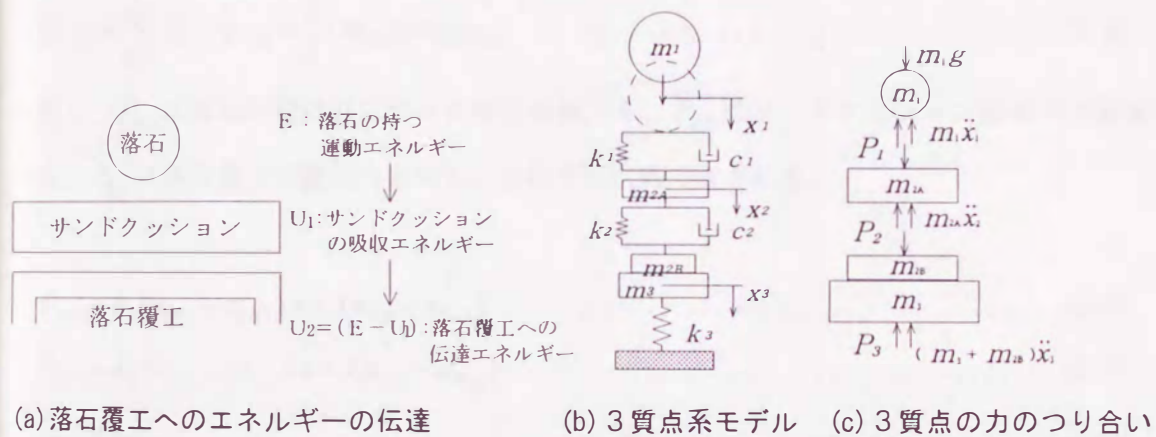


図2-1 エネルギー伝達率算定のための解析モデル

以上の仮定をもとにして、図2-1(c)のような力のつり合いから3質点系モデルの運動方程式は次のように表わされる。

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) = m_1 g \quad \dots \dots \dots (2-1)$$

$$m_{2A} \ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_2(x_2 - x_3) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) = 0 \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

$$(m_{2B} + m_3) \ddot{x}_3 + k_3 x_3 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_2(x_2 - x_3) = 0 \quad \dots \dots \dots (2-3)$$

ただし、 m_1 ：落石の質量、 m_{2A} ：サンドクッションの衝撃力伝播領域の有効質量（図2-2(b)参照）、 m_{2B} ：サンドクッションの衝撃力伝播領域外の有効質量、 m_3 ：落石覆工の等価質量、 g ：重力加速度、 k_1 、 c_1 ：落石とサンドクッションとの接触面のばね係数と減衰係数、 k_3 ：落石覆工のばね係数、 k_2 、 c_2 ：サンドクッションのばね係数と内部減衰係数、

式(2-1)～式(2-3)を解くために、通常の Newmark- β 法 ($\beta = \frac{1}{6}$) を用い、落石の衝突時 ($t = 0$ において $\dot{x}_1 = \sqrt{2gH}$ を与える) から落石覆工の応答が終了するまで ($\dot{x}_3 = 0$ になるまで) 計算を行った。

ここで、式(2-1)～式(2-3) の計算結果より、サンドクッションによって吸収されるエネルギー量 $U_{1(t)}$ および落石覆工へ伝達されるエネルギー量 $U_{2(t)}$ が各時刻ごとに次式により求められる。

$$U_{1(t)} = \sum_{i=0}^t P_{1(i)} (\Delta x_{1(i)} - \Delta x_{2(i)}) + \sum_{i=0}^t P_{2(i)} (\Delta x_{2(i)} - \Delta x_{3(i)}) + \frac{1}{2} m_{2A} \dot{x}_{2(i)}^2 \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

$$U_{2(t)} = \sum_{i=0}^t P_{3(i)} \Delta x_{3(i)} + \frac{1}{2} (m_{2B} + m_3) \dot{x}_{3(i)}^2 \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

ただし、 $P_{1(i)}$ は落石の衝突部における発生衝撃力を、 $P_{2(i)}$ はサンドクッション底面での発生衝撃力を、 $P_{3(i)}$ は落石覆工の復元力を示し、それぞれ次式で表される。

$$P_{1(i)} = k_1 (x_{1(i)} - x_{2(i)}) + c_1 (\dot{x}_{1(i)} - \dot{x}_{2(i)}) \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

$$P_{2(i)} = k_2 (x_{2(i)} - x_{3(i)}) + c_2 (\dot{x}_{2(i)} - \dot{x}_{3(i)}) \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

$$P_{3(i)} = k_3 x_{3(i)} \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

よって、落石覆工のエネルギー伝達率 γ_0 は、式(2-5)から得られる $U_{2(t)}$ の最大値より次式を用いて計算される。

$$\gamma_0 = \frac{U_{2(t)\max}}{E} \times 100 \quad (\%) \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

ただし、 $U_{2(t)\max}$: 落石覆工へ伝達されるエネルギー $U_{2(t)}$ の最大値、

$$E \left\{ = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_{1(t=0)}^2 \right\} : \text{落石が衝突の時に持つ運動エネルギー}$$

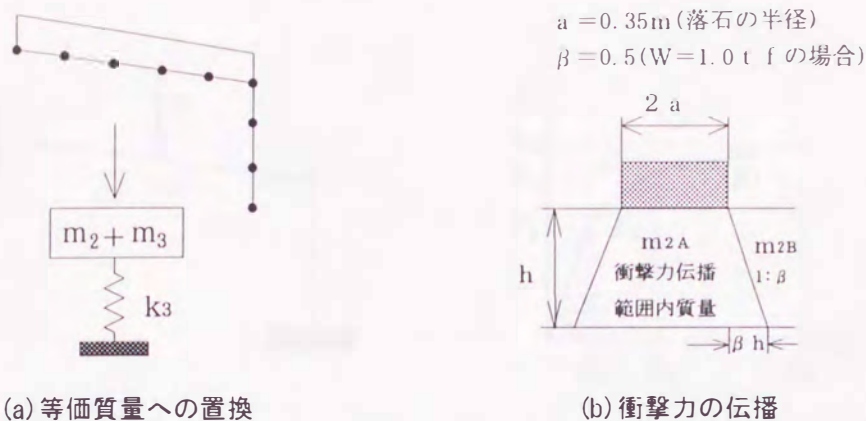


図2-2 有効質量 m_2 , m_3 の算定モデル

2.3 動的同定法による入力パラメータの決定

図2-1の3質点系モデルには、 $m_1, m_2, m_3, k_1, k_2, k_3, c_1, c_2$ の8つのパラメータが存在するが、このうち m_1, m_2, m_3, k_3 は以下のように比較的容易に決めることができる。しかし、 k_1, k_2, c_1, c_2 の値については予め与えることがかなり困難であるので、これらを動的同定法により決定するものとした。

2.3.1 m_1, m_2, m_3, k_3 の決定法

m_1 については落石の質量そのものとし、 m_2, m_3 については、まず図2-2(a)に示すように落石覆工を平面骨組モデルとし、各節点にサンドクッションの死荷重を含めた集中質量を与えたときの固有周期を計算することにより(サンドクッション+落石覆工)系の等価質量 $M=(m_2+m_3)$ を求めることができる。このうち、落石覆工の等価質量 m_3 については落石覆工本体の死荷重のみを集中質量とした固有値解析から求め、サンドクッションの有効質量 m_2 は $m_2=M-m_3$ で計算される。ここで、サンドクッションについては図2-2(b)のように、落石の衝突時に衝撃力の伝播を受け振動する領域(その領域の有効質量を m_{2A} とする)と、衝撃力の伝播範囲外で落石覆工とともに振動する領域(その領域の有効質量を m_{2B} とし、 $m_{2B}=m_2-m_{2A}$ である)とが存在すると仮定し、それらを区別して取扱う。すなわち、サンドクッションとして挙動する質点の有効質量は m_{2A} であり、落石覆工側の有効質量は m_3+m_{2B} とした。なお、伝達衝撃力の分散勾配については、過去の実験結果より静的土圧の分散勾配より小さいことが指摘されており²⁾、1:0.5程度が実状に合っているものと考えられる。したがって、ここでは伝達衝撃力の分散勾配として、 $\beta=0.5$ を用いることとした(図2-2参照)。

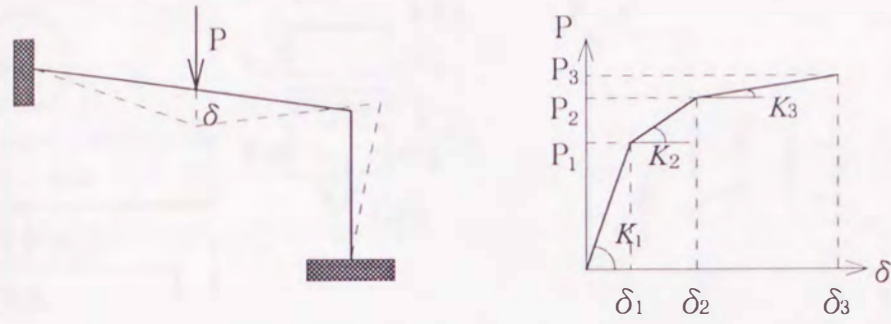


図 2-3 落石覆工の弾塑性ばね係数

また落石覆工の剛性 k_3 は、図 2-3 のように落石覆工を平面骨組モデルに置換（縦断方向の剛性については、主梁間隔で除した平均の値を用いている）したうえで弾塑性増分解析を行い、その荷重-変位曲線の傾きを求めて次のように与えた。

(i) $\Delta P \geq 0$: 載荷時

$$\begin{aligned}
 x_3 < \delta_1 \text{ のとき} & \quad k_3 = K_1 \\
 \delta_1 \leq x_3 < \delta_2 \text{ のとき} & \quad k_3 = K_2 \quad \dots\dots\dots (2-10) \\
 \delta_2 \leq x_3 < \delta_3 \text{ のとき} & \quad k_3 = K_3
 \end{aligned}$$

(ii) $\Delta P < 0$: 除荷時

$$k_3 = K_1 \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

ただし、 x_3 : 落石覆工側の変位で、図 2-1 の 3 質点系モデルによる衝撃応答解析から求められる。 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$: 平面骨組モデルの静的弾塑性解析によって得られる第 1、第 2、第 3 塑性ヒンジが発生したときの変位を示す。 K_1, K_2, K_3 : 第 1、第 2、第 3 塑性ヒンジ発生時までの各段階における落石覆工の剛性を示す。

2.3.2 動的同定法による k_1, k_2, c_1, c_2 の決定法

ここでは、サンドクッションのモデル化に必要なパラメータ k_1, k_2, c_1, c_2 の 4 つを、落石衝突実験¹⁾ で得られるサンドクッション底面への伝達衝撃力 $P_{e(t)}$ と図 2-4 (a) に示す 2 質点系モデルによる衝撃力 $P_{a(t)}$ とがほぼ一致するように (図 2-4 (b) 参照)、最適化手法による動的同定法を用いて決定する。

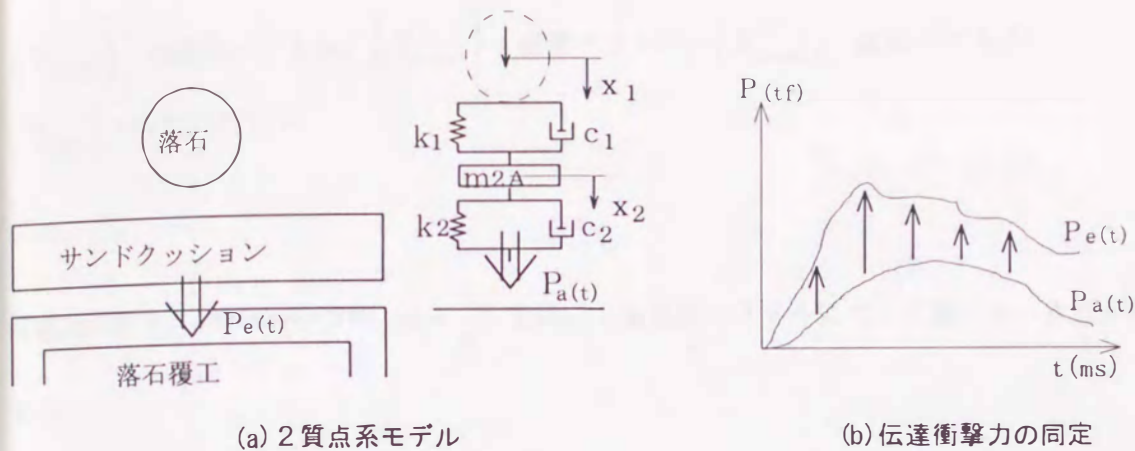


図2-4 動的同定法によるサンドクッションのパラメータ k_1, k_2, c_1, c_2 の決定

すなわち、その基本式は以下のようなになる³⁾。

未知数: k_1, k_2, c_1, c_2

$$\text{目的関数: } Z = \sum_{t=0}^t \{P_{e(t)} - P_{a(t)}\}^2 \rightarrow \min \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

$$\text{制約条件: } m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) = m_1 g \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + P_{a(t)} - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) = 0 \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

$$P_{a(t)} = k_2 x_2 + c_2 \dot{x}_2 \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

$$k_1 \geq 0, k_2 \geq 0, c_1 \geq 0, c_2 \geq 0$$

ただし、 $P_{e(t)}$: 落石衝突実験で測定されたサンドクッション底面への伝達衝撃力、

$P_{a(t)}$: 2質点系モデルで計算される伝達衝撃力

式(2-12)において、目的関数が時刻歴な応答関数として表わされるため、各パラメータによる1次偏導関数が解析的にしか得られない。したがって、ここでは以下に示すような計算手順に基づいて、目的関数の1次偏導関数を求めたうえで、準ニュートン法を用いた計算を行った。

①時刻 $(t + \Delta t)$ における各質点の運動方程式を次式のように表わす。

$$[M] \left\{ \ddot{X}_{(t+\Delta t)} \right\} + [C] \left\{ \dot{X}_{(t+\Delta t)} \right\} + [K] \left\{ X_{(t+\Delta t)} \right\} = \left\{ P_{(t+\Delta t)} \right\} \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

ここに、 $[M]$: 質量マトリックス、 $[C]$: 減衰マトリックス、 $[K]$: 剛性マトリックス、

$\{X_{(t+\Delta t)}^{\ddot{\cdot\cdot}}\}$: 加速度ベクトル、 $\{X_{(t+\Delta t)}^{\dot{\cdot}}$: 速度ベクトル、 $\{X_{(t+\Delta t)}\}$: 変位ベクトル、
 $\{P_{(t+\Delta t)}\}$: 外力ベクトル

②式(2-16)を、Newmark- β 法 ($\beta = \frac{1}{6}$) を用いて加速度ベクトルについて解くと、次式が得られる。

$$\begin{aligned}
 \{X_{(t+\Delta t)}^{\ddot{\cdot\cdot}}\} = & \left\{ [M] + \frac{\Delta t [C]}{2} + \frac{\Delta t^2 [K]}{6} \right\}^{-1} \times \left\{ \{P_{(t+\Delta t)}\} - [C] \left(\{X_{(t)}^{\dot{\cdot}}\} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \{X_{(t)}^{\ddot{\cdot\cdot}}\} \right) \right. \\
 & \left. - [K] \left(\{X_{(t)}\} + \Delta t \cdot \{X_{(t)}^{\dot{\cdot}}\} + \frac{\Delta t^2}{3} \cdot \{X_{(t)}^{\ddot{\cdot\cdot}}\} \right) \right\} \dots\dots\dots (2-17)
 \end{aligned}$$

③式(2-17)を、サンドクッションに関する各パラメータ (k_1, k_2, c_1, c_2) について偏微分すると、次式のような時刻 ($t + \Delta t$) における加速度ベクトルの1次偏導関数が求められる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \{X_{(t+\Delta t)}^{\ddot{\cdot\cdot}}\}}{\partial V_i} = & - \left\{ [M] + \frac{\Delta t [C]}{2} + \frac{\Delta t^2 [K]}{6} \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial [K]}{\partial V_i} \cdot \{X_{(t)}\} + \left(\frac{\partial [C]}{\partial V_i} + \Delta t \cdot \frac{\partial [K]}{\partial V_i} \right) \cdot \{X_{(t)}^{\dot{\cdot}}\} \cdot \right. \\
 & \left(\frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{\partial [C]}{\partial V_i} + \frac{\Delta t^2}{3} \cdot \frac{\partial [K]}{\partial V_i} \right) \cdot \{X_{(t)}^{\ddot{\cdot\cdot}}\} + [K] \cdot \frac{\partial \{X_{(t)}\}}{\partial V_i} + \{ [C] + \Delta t \cdot [K] \} \cdot \frac{\partial \{X_{(t)}^{\dot{\cdot}}\}}{\partial V_i} \\
 & \left. + \left\{ \frac{\Delta t}{2} [C] + \frac{\Delta t^2}{3} [K] \right\} \cdot \frac{\partial \{X_{(t)}^{\ddot{\cdot\cdot}}\}}{\partial V_i} + \left\{ \frac{\partial [M]}{\partial V_i} + \frac{\Delta t}{2} \cdot \frac{\partial [C]}{\partial V_i} + \frac{\Delta t^2}{6} \cdot \frac{\partial [K]}{\partial V_i} \right\} \cdot \{X_{(t+\Delta t)}^{\ddot{\cdot\cdot}}\} \dots (2-18)
 \end{aligned}$$

ここに、 V_i : サンドクッションの各パラメータ (k_1, k_2, c_1, c_2) を示す。

④次に、時刻 ($t + \Delta t$) における速度ベクトル、変位ベクトルの1次偏導関数が、次式のようにそれぞれ求められる。

$$\frac{\partial \{X_{(t+\Delta t)}\}}{\partial V_i} = \frac{\partial \{X_{(t)}\}}{\partial V_i} + \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{\partial \{\ddot{X}_{(t)}\}}{\partial V_i} + \frac{\partial \{\ddot{X}_{(t+\Delta t)}\}}{\partial V_i} \right\} \dots \dots \dots (2-19)$$

$$\frac{\partial \{X_{(t+\Delta t)}\}}{\partial V_i} = \frac{\partial \{X_{(t)}\}}{\partial V_i} + \Delta t \cdot \frac{\partial \{\dot{X}_{(t)}\}}{\partial V_i} + \Delta t^2 \cdot \frac{\partial \{X_{(t)}\}}{\partial V_i} \cdot \left\{ \frac{1}{3} \frac{\partial \{\ddot{X}_{(t)}\}}{\partial V_i} + \frac{1}{6} \frac{\partial \{\dot{X}_{(t+\Delta t)}\}}{\partial V_i} \right\} \dots (2-20)$$

⑤よって、式(2-12)の目的関数の1次偏導関数は、次式で得られることになる。

$$\frac{\partial Z_{(t-j)}}{\partial V_i} = \sum_{j=1}^m 2 \{P_{e(t-j)} - P_{a(t-j)}\} \cdot \left\{ -\frac{\partial P_{a(t-j)}}{\partial V_i} \right\} \dots \dots \dots (2-21)$$

ここに、m:実験による衝撃力と計算による衝撃力を同定させるように選定した時刻の数

$$\frac{\partial P_{a(t-j)}}{\partial V_i} = \frac{\partial k_2}{\partial V_i} \cdot x_{2(t)} + \frac{\partial c_2}{\partial V_i} \cdot \dot{X}_{2(t)} + k_2 \cdot \frac{\partial x_{2(t)}}{\partial V_i} + c_2 \cdot \frac{\partial \dot{X}_{2(t)}}{\partial V_i} \dots \dots \dots (2-22)$$

各パラメータ別に、式(2-18)～(2-20)により得られた加速度、速度、変位ベクトルの1次偏導関数の値により、同一時刻の目的関数の1次偏導関数が式(2-21)を用いて計算される。したがって、予め、実験値と計算値とを同定させるように選定した時刻の目的関数の1次偏導関数の値を加算していくことにより、目的関数の各パラメータ (k_1 , k_2 , c_1 , c_2) に関する1次偏導関数が得られることになる。以上のような手順で計算した目的関数の1次偏導関数を用いて、衝撃力の同定を行うために最適な各パラメータの値を探索していくが、このとき各パラメータの修正方向に対するステップ幅の検討には、最も簡易な黄金分割法を適用した。これらの計算手順を示すと、図2-5のようになる。

2.3.1と本節で示した手順で得られた8つの入力データを用いて、式(2-1)～(2-9)を計算すれば、エネルギー伝達率 γ_0 が算定される。

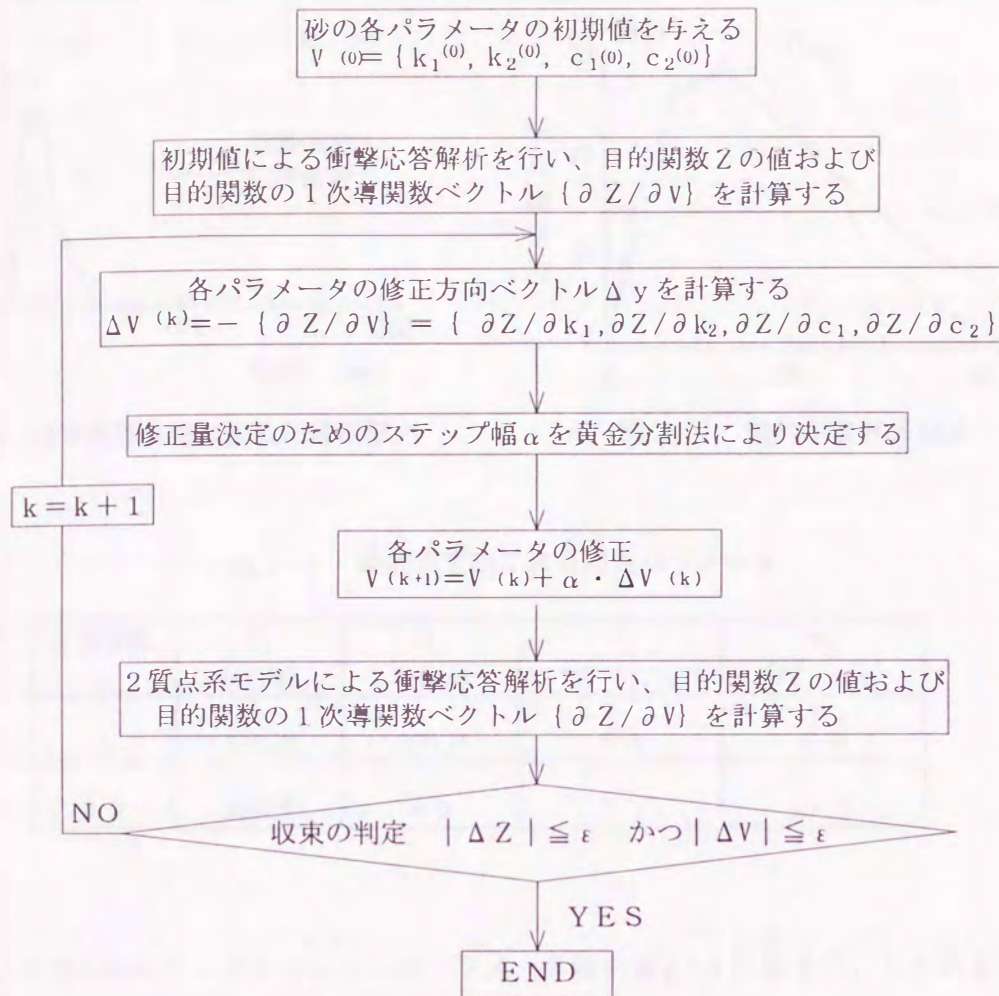


図2-5 動的同定法の計算手順

2.4 数値計算例

2.4.1 エネルギー伝達率算定法の妥当性の検討

まず、本法の妥当性を検討するために、図2-6に示すような金沢大学で行われた落石衝突実験¹⁾ (重錘重量 $W=1.0 \text{ t f}$, 落下高さ $H=10.0 \text{ m}$) の伝達衝撃力-時間曲線 $P_{e(t)}$ に対する同定計算を行った。式(2-12)~(2-15)を用いてサンドクッションのパラメータ k_1 , k_2 , c_1 , c_2 を求めると、図2-7に示すような衝撃力-時間曲線の同定結果が得られ、良好にシミュレートしていることがわかる。ただし、実際には重錘がサンドクッションに衝突してからサンドクッションの底部に衝撃土圧が伝播するまでには約10ms程度のタイムラグがあるが、ここではこれを考慮していない。

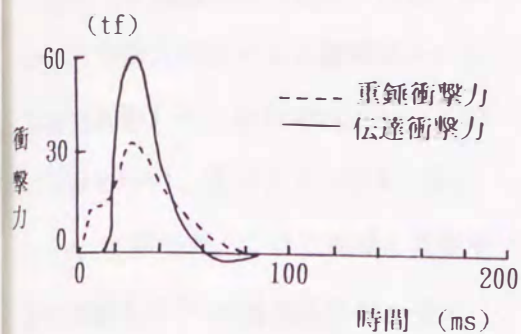


図2-6 落石衝突実験による伝達衝撃力

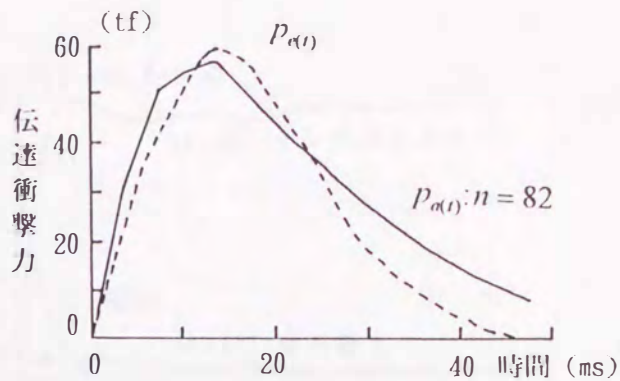


図2-7 動的同定計算結果

表2-1 動的同定法による同定パラメータ

計算回数 n	k_1 (tf/m)	k_2 (tf/m)	c_1 (tf · s/m)	c_2 (tf · s/m)
1	200.0	200.0	5.0	5.0
82	309.0	4.9	9.1	27.2

このとき得られたサンドクッションのパラメータ値を表2-1に示すが、この表よりサンドクッション内のばね定数 k_2 が非常に小さく、 c_2 がやや大きいことが注目される。これは、衝撃荷重が作用した時のサンドクッションの状態を粘弾性体として評価した方が良いことを示しているものと考えられ、したがって落石対策便覧の評価式²⁾のように弾性体と仮定することにはやや無理があるものと思われる。次に、この値を用いて実際の衝突実験における落石-サンドクッション-落石覆工(H型鋼による単純梁)系のエネルギー伝達率の算定を行った。図2-8は、落石の運動エネルギー E 、サンドクッションの吸収エネルギー $U_{1(t)}$ 、落石覆工の吸収エネルギー $U_{2(t)}$ の時間的变化を示したもので、時刻約70(ms)における落石覆工への伝達エネルギーは $U_{2(t)}=0.64$ (tf·m)と最大になり、このときのエネルギー伝達率は $\gamma_0=6.4\%$ と算定される。一方、衝突実験においてH型鋼梁のたわみから求めたエネルギー伝達率は $\gamma_0=6.9\%$ ¹⁾と報告されており、本法による値は良好な推定値を与えることが確認された。

2.4.2 各種緩衝材のパラメータ値の比較

次に、3種類の砂（山砂、川砂、砕砂）と発泡スチロールを緩衝材とした場合を想定して、それぞれについて同定計算を行い、各パラメータ k_1 、 k_2 、 c_1 、 c_2 を求めた。ここで使用した落石衝突実験⁴⁾・⁵⁾の重錘条件は、全て重錘重量 $W=3.0\text{tf}$ 、落下高さ $H=10.0\text{m}$ である。まず検討を行った3種類の砂の粒径加積曲線を図2-9に示す。

図2-9から、この実験で用いた山砂は、川砂や砕砂に比べて粒径が揃っていることが認められる。一般に粒径が不均一な砂の場合には、大きい粒径の砂粒の間に小さい砂粒が詰まることにより、締め固まりやすい傾向にあると考えられる。したがって、山砂は他の砂に比べてあまり締め固まらないために、柔軟な緩衝材となりうるものと考えられ、現実にも過去の吉田らの実験⁴⁾においても衝撃荷重の低減効果は3種類の砂の中で最も優れていることが確認されている。

図2-10～図2-12はそれぞれ山砂、川砂、砕砂を、図2-13は発泡スチロールを緩衝材としたときの衝撃力を同定した結果を示したものであるが、4ケースとも比較的良く同定できていることがわかる。3種類の砂について最大衝撃荷重を比較すると、山砂、砕砂、川砂の順に大きいが、逆に衝撃荷重の時間的な減衰性に関しては山砂が

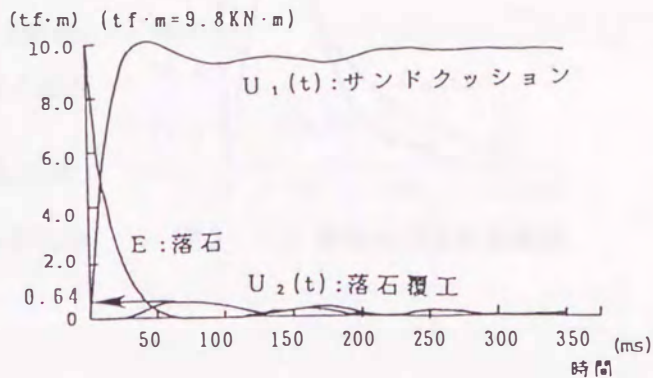


図2-8 各エネルギーの時間的变化

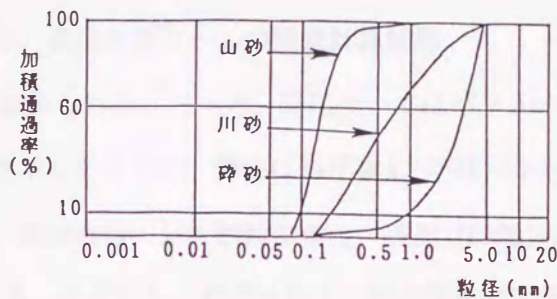


図2-9 各種の砂の粒径加積曲線

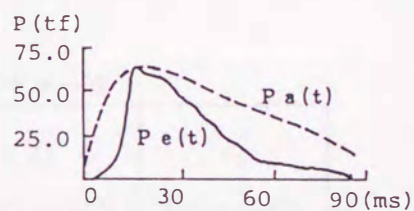


図2-10 山砂の同定計算結果

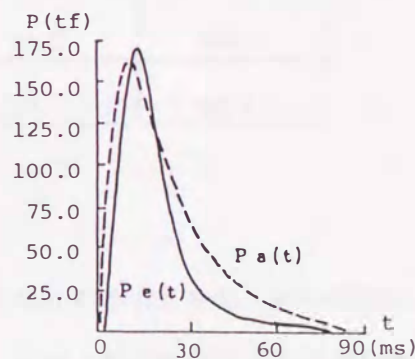


図2-11 川砂の同定計算結果

最も小さく、荷重の継続時間が長くなる傾向にある。また、発泡スチロールについては3種類の砂に比べて最大衝撃荷重が非常に小さくなる反面(山砂の約 $\frac{1}{2}$)、荷重の継続時間が2~3倍に長くなるなど顕著な相違が認められる。次に、これらの同定計算で得られた各パラメータの値を表2-2に示す。

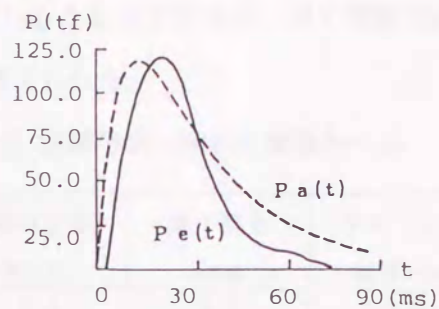


図2-12 砕砂の同定計算結果

この表より、砂と発泡スチロールを比較すると、発泡スチロールの衝突部における弾性ばね係数 k_1 が小さく、逆に k_2 の値は大きい。

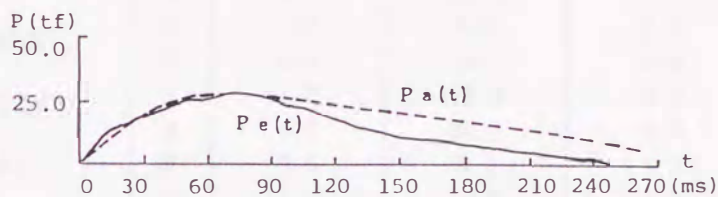


図2-13 発泡スチロールの同定計算結果

また粘性減衰係数 c_1 、 c_2 が非常に小さいことが認められる。一方、砂についてはパラメータの値も種類別により異なるが、2.4.1の考察で示したように、弾性ばね係数 k_2 の値がかなり小さくなる傾向にあることが認められる。また、衝突直後の最大衝撃荷重は、緩衝材の粘性減衰係数 c_2 の値が大きいほど大きくなる傾向にある。すなわち、式(2-15)より衝突直後の応答量は、 \dot{x}_2 の方が x_2 より大きいので、衝撃荷重 P_a は k_2 より c_2 に大きく影響されるものと思われる。

表2-2 各種緩衝材のパラメータ

パラメータ 緩衝材	k_1 (tf/m)	k_2 (tf/m)	c_1 (tf·s/m ²)	c_2 (tf·s/m ²)
山砂	300.7	0.2	29.8	25.1
川砂	72.1	55.3	38.2	89.8
砕砂	176.0	3.1	29.7	65.9

2.4.3 各種の砂のパラメータ値の回帰式

前節の計算例(重量 $W=3.0\text{ tf}$ 、落下高さ $H=1.0\text{ m}$ の場合)から、砂の種類によってモデルのパラメータ値が異なることが明らかとなった。また、落石の条件(重量 W や落下高さ

Hの値) が違えばサンドクッションの応答性状も変わることが予想され、同じ種類の砂であっても同定計算で得られるパラメータは異なるものと考えられる。

したがって、本節では各種の砂のパラメータ値 k_1, k_2, c_1, c_2 を、落石の条件(重量 W 、落下高さ H)およびサンドクッションの層厚 h の3変数が多少変化しても適用しうるように、任意の状態に対する一般式として表わすことを試みる。すなわち、落石重量 W 、落下高さ H 、サンドクッションの層厚 h がそれぞれ異なる過去の実験データ⁶⁾(山砂、

表2-3 回帰分析に用いた実験ケース

No	落石重量 W(tf)	落下高さ H(m)	サンドクッション 層厚h(m)
1	0.3	5.0	0.9
2	0.3	10.0	0.9
3	0.3	15.0	0.9
4	0.3	20.0	0.9
5	1.0	5.0	0.9
6	1.0	10.0	0.9
7	1.0	15.0	0.9
8	1.0	20.0	0.9
9	3.0	5.0	1.2
10	3.0	10.0	1.2
11	3.0	15.0	1.2
12	3.0	20.0	1.2

川砂、砕砂ともに表2-3に示す12ケースを選んだ)をもとに、次に示すような最適化手法により各パラメータの回帰式を求めることとする。

未知係数 a, b, c, d

$$\text{目的関数 } Z = \sum_{i=1}^{12} (x_i - y_i)^2 \rightarrow \min \quad \dots\dots\dots (2-23)$$

$$\text{回帰式 } y_i = a \cdot W_i^b \cdot H_i^c \cdot h_i^d \quad \dots\dots\dots (2-24)$$

ここに、 y_i : それぞれ各パラメータ k_1, k_2, c_1, c_2 の回帰式の値。

x_i : 同定計算により得られるパラメータ値を示す。

i : 計算に用いた落石条件のケース数を示し、ここでは $i=1\sim 12$ である。

なお、同じ落石条件およびサンドクッション層厚でも、実際の衝突実験で計測される伝達衝撃力波形にはばらつきが大きい⁶⁾ので、ここでは同一の落石・サンドクッション層厚の条件下で行った多数回の実験データの平均波形を用いた。以上の計算手順により、各種の砂について求めた各パラメータの回帰式を次に示す。ただし、本回帰式の適用範囲は、表2-3の実験の条

件内に限られるため、 $0.3 \text{ tf} \leq W \leq 3.0 \text{ tf}$ 、 $5.0 \text{ m} \leq H \leq 20.0 \text{ m}$ 、 $0.9 \text{ m} \leq h \leq 1.2 \text{ m}$ である。

山 砂

$$c_1 = 7.70 \cdot W^{0.313} \cdot H^{0.410} \cdot h^{-0.146}$$

$$c_2 = 4.30 \cdot W^{0.317} \cdot H^{0.412} \cdot h^{-0.104}$$

$$k_1 = 20.6 \cdot W^{0.251} \cdot H^{0.296} \cdot h^{-0.273}$$

$$k_2 = 2.90 \cdot W^{0.214} \cdot H^{0.416} \cdot h^{-0.090}$$

川 砂

$$c_1 = 5.33 \cdot W^{0.304} \cdot H^{0.497} \cdot h^{-0.080}$$

$$c_2 = 15.4 \cdot W^{0.571} \cdot H^{0.433} \cdot h^{-0.833}$$

$$k_1 = 72.6 \cdot W^{0.427} \cdot H^{0.205} \cdot h^{-1.080}$$

$$k_2 = 1.70 \cdot W^{0.412} \cdot H^{0.138} \cdot h^{-0.100}$$

砕 砂

$$c_1 = 6.79 \cdot W^{0.256} \cdot H^{0.483} \cdot h^{-0.100}$$

$$c_2 = 11.4 \cdot W^{0.515} \cdot H^{0.428} \cdot h^{-0.937}$$

$$k_1 = 80.7 \cdot W^{0.354} \cdot H^{0.166} \cdot h^{-0.935}$$

$$k_2 = 2.20 \cdot W^{0.779} \cdot H^{0.098} \cdot h^{-0.910}$$

ここで、図2-14および図2-15に山砂と砕砂を用いた場合の伝達衝撃力について、回帰式によるパラメータを用いたときの計算値と衝撃実験で得た平均波形との比較を示す。

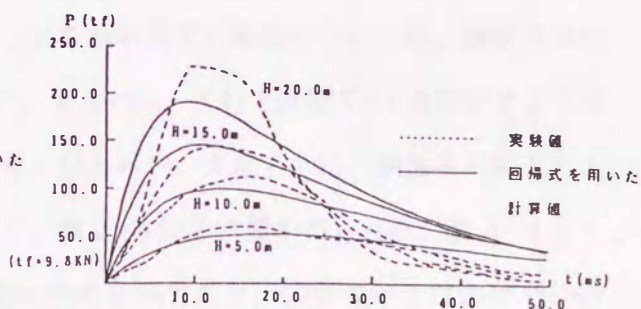
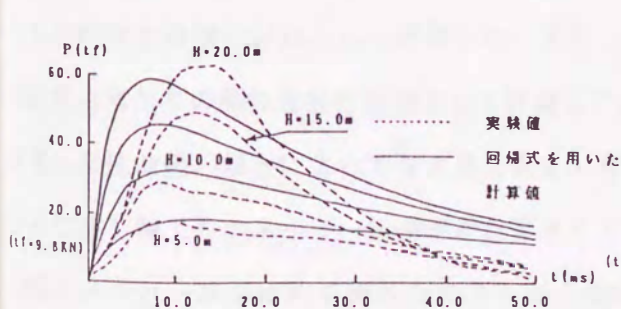


図2-14 山砂を用いた場合の伝達衝撃力 図2-15 砕砂を用いた場合の伝達衝撃力

これらの図より、山砂の場合には計算値の方が最大衝撃力を示す時刻がやや早くなる傾向にあるが、最大衝撃力は良好にシミュレートしていることが認められる。一方、砕砂の場合には落下高さ20.0mのケースで最大衝撃力に約20%の相違が見られるが、その他のケースではほぼ良好に一致することが認められた。したがって、回帰式を用いた計算結果は実験で得た伝達衝撃力を比較的良好にシミュレートしているものと考えられ、これらの回帰式はほぼ妥当であると思われる。

2.4.4 落石覆工へのエネルギー伝達率の計算例

ここでは、2.4.2 で求めた各緩衝材のパラメータ値を用いて、それらを使用した場合の落石覆工へのエネルギー伝達率の比較を行った結果を示す。落石の条件は同定計算で用いた実験条件と同様に、落石重量3.0 t f, 落下高さ10.0mとし、落石覆工としては、図2-16に示す鋼製落石覆工⁷⁾ および図2-17に示すRC落石覆工²⁾ の2通りについて検討した。

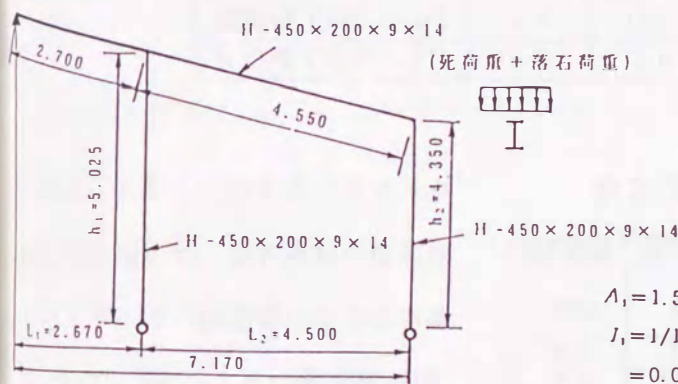
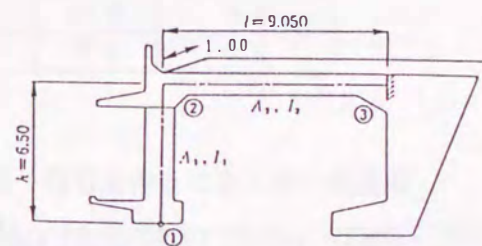


図2-16 鋼製落石覆工



$$\begin{aligned}
 A_1 &= 1.50 \times 1.10 \times 1/5.0 = 0.330\text{m}^2 & A_2 &= 1.00 \times 0.80 = 0.800\text{m}^2 \\
 I_1 &= 1/12 \times 1.50 \times 1.10^3 \times 1/5.0 & I_2 &= 1/12 \times 1.00 \times 0.80^3 \\
 &= 0.033\text{m}^4 & &= 0.043\text{m}^4
 \end{aligned}$$

図2-17 RC落石覆工

ただし、鋼製落石覆工の剛性については、縦断方向隣接桁の荷重分担は見込まず、主桁1本当たりの剛性を弾塑性ばねとして評価した。また、RC落石覆工の剛性については、縦断方向の単位長さ当たりの剛性を弾性ばねとして評価した。すなわち、それぞれ図2-18に示すような荷重-変位曲線の傾きによって与えることとした。以上のデータをもとに、鋼製落石覆工およびRC落石覆工のエネルギー伝達率を計算すると、表2-4に示す値が得られた。表2-4より、①発泡スチロールが極めて優れたエネルギー吸収効果を示すこと、②砂の中では山砂が砕砂、川砂に比べて優れていることが認められる。この結果より、理想的な衝撃緩衝材とは緩衝材自

体の剛性は小さく変形性に富んだ材料であることが推察される。ただし、衝突物に対して貫通されない程度の厚さが必要なことは言うまでもない。

また、③鋼製落石覆工とRC落石覆工の比較を行うと、剛性が高いRC落石覆工のエネルギー伝達率の方が小さいことがわかった。これは落石覆工の剛性が高いほど落石への衝撃反力も大きくなり、落石への反射エネルギー量が多くなるためと考えられる。したがって、仮に許容変形量が同じであるならば剛性が高いほど耐衝撃性に優れた構造であると考えられる。

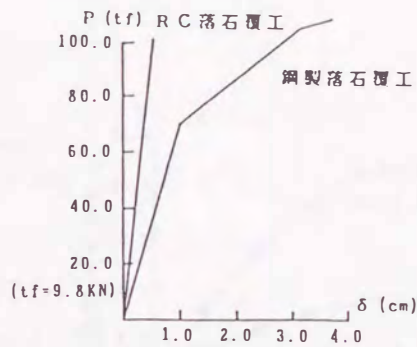


図2-18 荷重～変位曲線

表2-4 鋼製およびRC落石覆工へのエネルギー伝達率

落石覆工	緩衝材	山砂	川砂	砕砂	発泡スチロール
鋼製覆工(図2-16)		4.6	16.2	14.0	0.4
RC覆工(図2-17)		3.8	7.0	5.9	0.2

次に、2.4.3 で示したパラメータ回帰式を用いて、落石条件が落石覆工のエネルギー伝達率に与える影響について、図2-16の鋼製落石覆工を対象に検討した。表2-5および図2-19に各種の砂を用いたときのエネルギー伝達率を示す。

図2-19より、①落石条件が小さい場合には同一重量の落石についてはエネルギー伝達率はほぼ一定で

表2-5 落石条件とエネルギー伝達率

落石重量 W(t)	落下高さ H(m)	落石の運動 エネルギー E(t·m)	エネルギー伝達率 γ_0 (%)		
			山砂	川砂	砕砂
0.3	5.0	1.5	0.7	2.3	1.9
0.3	10.0	3.0	1.0	2.9	2.6
0.3	15.0	4.5	1.3	3.3	3.0
0.3	20.0	6.0	1.5	3.6	3.2
1.0	5.0	5.0	1.2	4.8	4.2
1.0	10.0	10.0	1.9	7.2	6.2
1.0	15.0	15.0	2.5	9.2	8.0
1.0	20.0	20.0	3.1	10.4	9.1
3.0	5.0	15.0	2.2	9.2	7.7
3.0	10.0	30.0	4.4	16.2	14.0
3.0	15.0	45.0	6.9	20.8	18.6
3.0	20.0	60.0	9.8	23.5	21.6

ある。②しかし、落石条件が大きくなり、落石覆工の応答が弾性範囲内におさまらなくなると、エネルギー伝達率が急激に増加していくことがわかる。したがって、落石条件が厳しくなるほど落石覆工への入力エネルギー量は急激に増加する可能性があることが認められた。

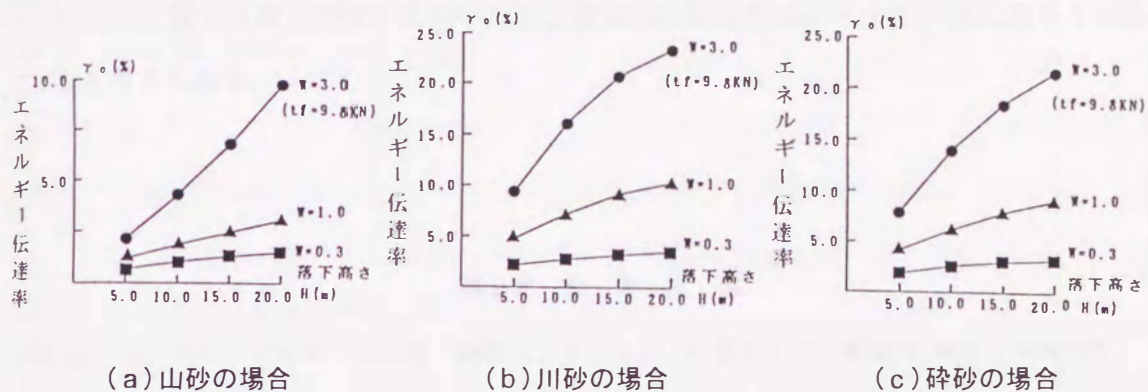


図2-19 鋼製落石覆工のエネルギー伝達率の変化

2.5 結言

本章では、エネルギー基準による安全性照査を行うために、落石覆工へのエネルギー伝達率を簡易な3質点系モデルにより算定する方法について検討を行った。ここで得られた結果を要約すると以下のようなになる。

- (1) 3質点系モデルにおけるサンドクッションの力学的パラメータを、最適化手法による動的同定法を用いて決定可能であることが認められた。
- (2) 3質点系モデルにより計算されたエネルギー伝達率は、衝突実験において求められたエネルギー伝達率と良く一致することが確認された。
- (3) 山砂、川砂、砕砂および発泡スチロールに対する同定計算結果は、実験値を良好にシミュレートしており、また発泡スチロールがほぼ弾性体と見なせること、砂については粘弾性体として評価する必要があることが推察された。
- (4) 12ケースの実験データと同定計算結果を基に、山砂、川砂、砕砂に対する力学的パラメータの回帰式を、 $W \leq 3.0 \text{ t f}$, $H \leq 20.0 \text{ m}$, $h \leq 1.2 \text{ m}$ の範囲内で導くことができた。

(5) 各種の緩衝材を用いた落石覆工のエネルギー伝達率を計算すると、発泡スチロールは、山砂の約 $\frac{1}{10}$ 程度で極めて優れた緩衝材となりうること、また砂の中では山砂が砕砂、川砂よりも優

れたエネルギー吸収効果を示すことが認められた。

(6) RC落石覆工の方が鋼製落石覆工よりもエネルギー伝達率が小さいことが認められた。これは、RC落石覆工自体の剛性が大きいいため、落石へ反射されるエネルギー量も大きくなるためであると考えられる。

第2章 参 考 文 献

- 1) 榎谷浩・前川幸次・水木彰・吉田博：鋼製ロックシェットの落石による衝撃力，構造工学論文集，Vol. 36A, pp. 41～49, 1990年3月
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，1983年7月
- 3) 松井邦人・栗田哲史：応答加速度波を用いた構造特性の同定，構造工学論文集，Vol. 35A, pp. 689～698, 1987年3月
- 4) 吉田博・竹島忠・古市進作・石塚賢吉：ロックシェット上の落石による衝撃力の推定に関する実験，道路，No. 428, pp. 35～41, 1976年10月
- 5) 日本サミコン(株)・太陽工業(株)・(株)長野技研：発泡スチロールの落石による衝撃力の緩衝効果に関する実験報告書，平成2年2月
- 6) 吉田博・榎谷浩・佐藤真・井原明美：落石実験データベースの作成と落石の衝撃力評価について，構造工学論文集，Vol. 33A, pp. 571～583, 1987年3月
- 7) 三上善蔵：落石防止防護工法，p. 191, 理工図書