

中間土の圧縮および強度特性に関する基礎的研究

大嶺, 聖
九州大学工学環境都市

<https://doi.org/10.11501/3065436>

出版情報：九州大学, 1992, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：



中間土の圧縮および強度特性
に関する基礎的研究

平成4年12月

大 嶺 聖

①

中間土の圧縮および強度特性
に関する基礎的研究

平成4年12月

大 嶺 聖

目次

第1章 序論	1
1. 1 研究の位置づけと目的	1
1. 2 中間土の圧縮および強度特性に関する従来の研究	4
1. 3 本論文の内容と構成	6
参考文献	9
第2章 応力分担割合の評価に基づく二種混合体の応力-ひずみ関係	12
2. 1 概説	12
2. 2 混合体の応力-ひずみ関係に関する従来の研究	14
2. 3 二種混合体における応力分担割合の評価	15
2. 3. 1 混合体の平均的な応力とひずみの表示	15
2. 3. 2 二種混合体の応力-ひずみ関係	23
2. 3. 3 応力分担パラメータの決定	25
2. 4 弾性体への適用例	26
2. 4. 1 等方弾性材料から成る二種混合体の弾性係数	26
2. 4. 2 計算結果と実験結果の比較	30
2. 5 結論	35
参考文献	37
第3章 中間土の骨組構造と応力-ひずみ関係の基本式	40
3. 1 概説	40
3. 2 従来 of 構造モデル	42
3. 3 中間土の構造と間隙量の表示	44
3. 3. 1 土の構造の微視的観察	45
3. 3. 2 間隙量の表示	47
3. 4 粗粒子同士の接触割合の評価	49

3. 4. 1	粗粒子同士の接触割合の評価	50
3. 4. 2	粗粒子骨格およびマトリックスの体積含有率の算定	53
3. 5	中間土の応力-ひずみ関係の基本式	58
3. 5. 1	基本的な考え方	58
3. 5. 2	応力-ひずみ関係の基本式	58
3. 6	結論	64
	参考文献	66
第4章 中間土の圧縮特性		68
4. 1	概説	68
4. 2	中間土の圧縮特性に及ぼす細粒分含有率の影響	70
4. 2. 1	試料および実験方法	71
4. 2. 2	一次元圧縮特性	75
4. 3	一次元圧縮状態における応力-間隙比関係	84
4. 3. 1	基本的な考え方	84
4. 3. 2	応力と間隙比の関係	85
4. 3. 3	体積圧縮係数	88
4. 4	実験結果に基づく提案式の検証	90
4. 4. 1	パラメータの決定法	90
4. 4. 2	計算結果と実験結果の比較	93
4. 5	結論	99
	参考文献	101
第5章 中間土の強度特性		103
5. 1	概説	103
5. 2	三軸圧縮応力状態における中間土の応力・変形特性	105
5. 2. 1	試料および供試体の作製方法	105
5. 2. 2	三軸試験装置の概要および実験方法	106
5. 2. 3	応力・変形特性	108
5. 3	限界状態の応力比の算定	113
5. 3. 1	中間土の限界状態の応力比を求めるための基本的な考え方	113
5. 3. 2	粗粒子骨格とマトリックスの材料特性	114
5. 3. 3	応力分担パラメータの決定	115
5. 3. 4	限界状態の応力比	119

5. 4	実験結果に基づく提案式の検証	121
5. 4. 1	パラメータの決定法	121
5. 4. 2	計算結果と実験結果の比較	124
5. 5	内部摩擦角に関する従来の実験結果への適用性	127
5. 6	結論	131
	参考文献	133
第6章 総括		135
記号説明		140
謝辞		145

第1章 序 論

1. 1 研究の位置づけと目的

自然地盤を成す土は、砂、シルトおよび粘土などの粒径の異なる様々な土粒子で構成されており、その力学特性は粒度分布に大きく依存する。このような土は、一般に砂と粘土の中間的な粒度組成を持っており、中間土と呼ばれている。これまで、比較的粒径のそろった砂や粘土については、実験的および理論的に多くの研究がなされており、その力学特性は、かなりの程度明らかにされている。しかしながら、細粒子や粗粒子が様々な割合で混ざっている中間土については、その力学特性が粒度組成とコンシステンシー特性の影響を受けることなど定性的には明らかにされているが、その定量的な評価法が十分に確立されていない。このような中間土の力学特性を解明することは、土質工学における重要な課題の一つである。

中間土の工学的特性を明確にするために、まず、砂と粘土の性質を比較し、その相違点を述べる。砂と粘土の工学的性質の違いを表 1.1¹⁾ に示す。砂と粘土の性質の中で最も大きな違いは、その圧縮性および透水性にある。つまり、砂は透水性が高く、圧縮性が小さく、粘土は透水性が低く、圧縮性が大きい。これは、砂粒子と粘土粒子の粒径の違いだけでなく、物理化学的特性の相違によるものである。このような特性の違いは、圧密速度の違いとして現れる。そのため、土の強度を算定する場合、一般に、粒度組成によって砂質土あるいは粘性土に分類することが多い。しかしながら、中間土に対して、その考え方が必ずしも合理的であるとは言えない。例えば、粘土としての性質を示す土は、細粒分(粘土とシルトの含有量)が40%以上のものとされているが²⁾、港湾構造物基礎の設計³⁾においては、安全側の判断に基づいて砂の含有率が60~80%の中間土に対して粘性土と同様に非排水強度を用いている。また、砂分の多い中間土に対しては、粘土

表 1.1 砂と粘土の工学的特性の比較¹⁾

	砂	粘 土
粒 径	大きい	小さい
透 水 性	高 い	低 い
圧 縮 性	小さい	大きい
圧密速度	早 い	遅 い

の場合のように一軸圧縮試験から非排水強度を求めると実際の強度を過小評価することも実験的に確かめられている⁴⁾。

一方、レキ混じりの中間土地盤について有効応力解析を適用した事例も報告されている⁵⁾。つまり、部分排水と考えられる中間土地盤の応力状態を逐次解析し、施工中の各段階での間隙水圧を予測して有効応力による安定解析を行うものである。この場合、排水速度と施工速度の両者を考慮し、地盤の透水性を正しく評価する必要がある。また、多くの実験結果に基づいて土質定数と塑性指数の関係を求め、従来より提案されている粘土の構成則を用いて、中間土地盤の変形解析を行うことも提案されている^{6),7)}。ただし、このような手法は、非塑性の土には適用できず、 $I_p > 10$ 程度の中間土が対象となる。

砂も粘土も本質的には摩擦性材料であり、その挙動は有効応力に支配される。したがって、粒度組成に大きく依存する中間土の圧縮および強度特性を統一的に捉えるためには、有効応力に基づく評価が必要となる。

中間土の力学特性は、構成要素の材料特性およびそれらの含有割合等に支配されるが、この場合、中間土は細粒子と水から成るマトリックスと粗粒子の二種類の材料で構成される混合体であると見なすことができる。本論文は、このような立場から、中間土を構成する粗粒子とマトリックスの材料特性を用いて、その圧縮および強度特性を定量的に評価する手法を確立することを目的としている。その基礎となる中間土の応力-ひずみ関係を誘導するための着眼点は、次の二つである。

i) 二種混合体の応力-ひずみ関係

ii) 中間土の骨組構造

i)については、介在物とマトリックスから成る二種混合体の応力—ひずみ関係をそれぞれの材料特性を用いて推定する手法を提案するものである。ただし、ここで対象とする混合体は、基になる材料であるマトリックス中に介在物がランダムに分布している場合である。このような混合体の応力—ひずみ関係を介在物とマトリックスの特性から求めるためには、混合体内部の応力分担割合の評価が重要であり、このときの応力分担割合を決定するために仕事量増分の考えを導入する。ii)については、供試体断面の微視的観察に基づいて、中間土が粗粒子骨格とマトリックスで構成される骨組構造を有することを確かめ、その構造に着目して新たな間隙量を導入する。以下では、「土の骨組構造」を単に土の構造と呼ぶこととする。本論文では、このような考えに点に着目して中間土の応力—ひずみ関係の基本式を求め、その圧縮および強度特性を明らかにする。

なお、本論文においては、応力およびひずみの符号は圧縮を正とし、応力については、すべて有効応力を表すものとする。

1. 2 中間土の圧縮および強度特性に関する従来の研究

中間土の力学特性を明らかにするために、砂や粘土などの粒径の異なる材料から成る中間土を用いて、その力学特性に関する実験的研究が行われている。それらは、粒度やコンシステンシーに着目して、中間土の力学特性を調べた研究が多い。本節では、中間土の圧縮および強度特性に関する研究を概観する。

圧縮特性について、鬼塚と吉武⁸⁾は、細粒子として有明粘土およびカオリンを、粗粒子として豊浦砂および石粉を用い、これらを様々な割合で混合した中間土について標準圧密試験を行い、いずれの中間土も圧縮指数および膨張指数と塑性指数の関係がほぼ直線で表されることを報告している。同様に、中瀬ら⁹⁾は、塑性指数の異なる海成粘土の圧縮指数および膨張指数と塑性指数の関係がほぼ直線関係で表されることを確かめている。一方、福江¹⁰⁾らは、細粒分含有率が減少し粗粒子同士の骨格が形成されると中間土の圧縮特性が著しく減少することに着目して、砂質土と粘性土の分類を行うとともに、中間土の圧縮特性に及ぼす塩分の影響を調べ、その結果、粗粒子同士の骨格が形成されている状態では、塩分の影響はほとんど現れないことなどを明らかにしている。

強度特性に関して、Trollope と Zafar¹¹⁾は、カオリンと砂を様々な割合で混合して作製した中間土の排水三軸試験の結果をもとに、粘性土と砂質土の境界を示す細粒分含有率が約20%であると報告している。Holtz と Ellis¹²⁾は、レキ混じり粘土について非排水三軸試験を行い、せん断強度に及ぼすレキ含有率の影響を調べている。Bjerrum と Simons¹³⁾は、塑性指数の異なる様々な種類の不攪乱供試体を用いて三軸圧縮試験を行い、正規圧密された中間土の有効内部摩擦角は、塑性指数の減少とともに次第に増加することを確認している。さらに、Kenny¹⁴⁾は、中間土の有効内部摩擦角と塑性指数の関係は、不攪乱試料と練り返した試料のいずれの場合もほぼ一致することを明らかにしている。Skempton¹⁵⁾は、地すべり粘土および泥岩の残留強度と粘土分含有率の関係を詳細に調べ、粘土分が20%以下では粘土鉱物は残留強度にほとんど影響を与えないが、50%以上になると顕著な影響を与えること、また、砂とベントナイトを混合した中間土についても同様な傾向が認められることを報告している。その他にも Borowicka¹⁶⁾ や Kenny¹⁷⁾ および Voigt¹⁸⁾ や Kanji¹⁹⁾によって、それぞれ残留強度と粘土分含有率の関係および残留強度と粘土分含有率の関係によい相関性のあることが確かめられている。

一方、非排水せん断強度については、Skempton と Henkel²⁰⁾、Bjerrum²¹⁾、Berre と

Bjerrum²²⁾ および Larsson²³⁾ などによって同一の種類の中間土の非排水せん断強度は塑性指数の減少に伴い次第に小さくなることが実験的に明らかにされている。しかしながら、それぞれの中間土に対しては特に明確な関係は認められず、かなりのばらつきのあることが指摘されている^{24),25)}。このことは、同じ塑性指数を持つ場合でも、中間土の種類によって非排水せん断強度が異なることを示している。

わが国では、倉田と藤下³⁾ が一面せん断試験および一軸圧縮試験の結果から細粒分含有率を用いて砂と粘土の混合土の分類を行ったのを端緒として、レキ混じり粘土²⁶⁾ や泥岩土²⁷⁾ あるいは異方性を持つ中間土²⁸⁾ などに対しても同様の分類を目的とした研究が行われている。また、中瀬と亀井^{29),30)} は、中間土の非排水強度異方性が塑性指数の減少とともに大きくなること、さらに、日本各地の海成粘土に対しても、同様の関係が得られることなどを一連の三軸試験の結果から明らかにしている。

上述の研究は、中間土の圧縮特性および強度特性が粒度あるいはコンシステンシー特性の影響を受けることなど定性的に貴重な成果を示している。しかしながら、非塑性の場合を含めて中間土の力学特性を統一的に評価するためには、中間土の特性を支配するメカニズムを考慮することが必要である。このような立場から、Lupini ら³¹⁾ は細粒分含有率の異なる中間土のリングせん断試験を行い、せん断終了後の供試体断面の微視的観察から、その残留強度は中間土内に含まれる粘土粒子の配向の程度に依存することを明らかにしている。また、土の構造に着目して、福江と大草³²⁾ は、中間土内の粗粒子同士が完全に骨格を形成する場合と骨格を形成しない場合の二つの状態を考え、このときの境界を与える間隙比を用いて、中間土の工学的特性を評価する新しい手法を提案している。八尾と平田³³⁾ は、砂・シルト・粘土を含む中間土について、砂粒子あるいはシルト粒子同士が骨格を形成する状態を考え、それぞれの粒子間に作用する有効な応力を定義することによって、新たな中間土の力学モデルを提案している。また、Vallejo³⁴⁾ は、塊状のものと泥質なマトリックスから成る混合物について、粒子配列構造を考慮した斜面の安定解析を行い、斜面の最小傾斜角の予測を行っている。

このように、中間土の力学特性を支配するメカニズムを考える上で、中間土の構造を考慮することは重要なことである。

1. 3 本論文の内容と構成

本論文は、次の6つの章から構成されている。

第1章 序論

第2章 応力分担割合の評価に基づく二種混合体の応力-ひずみ関係

第3章 中間土の骨組構造と応力-ひずみ関係の基本式

第4章 中間土の圧縮特性

第5章 中間土の強度特性

第6章 総括

本論文の内容を各章ごとに述べると以下のようである。

第1章では、研究の位置づけと目的ならびに中間土の圧縮および強度特性に関する従来の研究について述べる。

第2章では、中間土の応力-ひずみ関係を求めるための基礎として、性質の異なる二種類の材料から成る混合体の応力-ひずみ関係を各構成要素の材料特性を用いて推定する方法を提案する。まず、混合体の内部では、応力とひずみが分布しているために、それらの表示法としては、体積平均を用いることが適していることを指摘し、具体的な表示式を与える。次いで、二種混合体の応力-ひずみ関係を誘導するために、混合体内部の応力分担割合を表すパラメータを新たに導入し、仕事量増分の考え方を用いることによって、その定式化を行う。以上の考え方を等方弾性材料から成る二種混合体に適用し、従来の実験結果と計算結果の比較から、提案式の妥当性を検証する。

第3章では、前章で求めた二種混合体の応力-ひずみ関係式を中間土に適用できるように拡張する。そのためには、微視的な土の構造を考察する必要があることを述べ、供試体断面の観察から、中間土は粗粒子骨格とマトリックスで構成される構造を有することを確かめる。また、新たな間隙量を導入し、確率論を援用して粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率の算定式を求める。そして、これらの成果に基づき、土の構造を考慮した中間土の応力-ひずみ関係の基本式を誘導する。

第4章では、まず、三種類の中間土の圧縮特性を実験的に明らかにする。試験では、粗粒子として豊浦砂と珪砂、細粒子としてカオリン、ベントナイトおよび有明粘土を用い、それぞれ種々の割合で混合して供試体を作製する。これらの中間土の圧密試験の結果から、圧縮指数および膨張指数は、細粒分含有率が減少するほど小さくなり、ある細

粒分含有率以下になると粗粒子のみの場合と類似した特性を示すことを明らかにする。次いで、前章で得られた応力-ひずみ関係の基本式を適用することにより、中間土の間隙比が、粗粒子骨格とマトリックスの間隙比、およびそれらの体積含有率を用いて表されることを示す。さらに、中間土内部の応力分担割合を二種混合体の場合と同様に仕事量増分の考えを用いて評価することにより、一次元圧縮における中間土の応力-間隙比関係と体積圧縮係数の算定式を求め、実験結果をもとに提案式の検証を行う。

第5章では、第3章の応力-ひずみ関係の基本式に基づき、正規圧密された中間土の強度を評価する手法を提案する。まず、低塑性および高塑性の細粒子を持つ二種類の中間土について三軸圧縮試験を行い、正規圧密された中間土の強度は、限界状態の応力比で説明できることを示す。次いで、中間土の応力比-せん断ひずみ関係および有効応力経路が細粒分含有率の減少とともに次第に粗粒子のみの特性へと近づくことを明らかにする。さらに、粗粒子骨格とマトリックスの単位体積当たりの仕事量増分を用いて応力分担割合を評価することにより、中間土の限界状態における応力比を算定する。そして、中間土の限界状態における応力比と細粒分含有率について、計算結果と実験結果の比較を行う。さらに、その提案式に基づいて内部摩擦角と細粒分含有率および塑性指数の関係式を求め、既往の実験結果と計算結果を比較することにより、その妥当性を確かめる。

第6章では、各章で得られた成果を要約して全体の結論とし、今後の課題について述べる。

また、本論文の構成を示すと図1.1のようである。

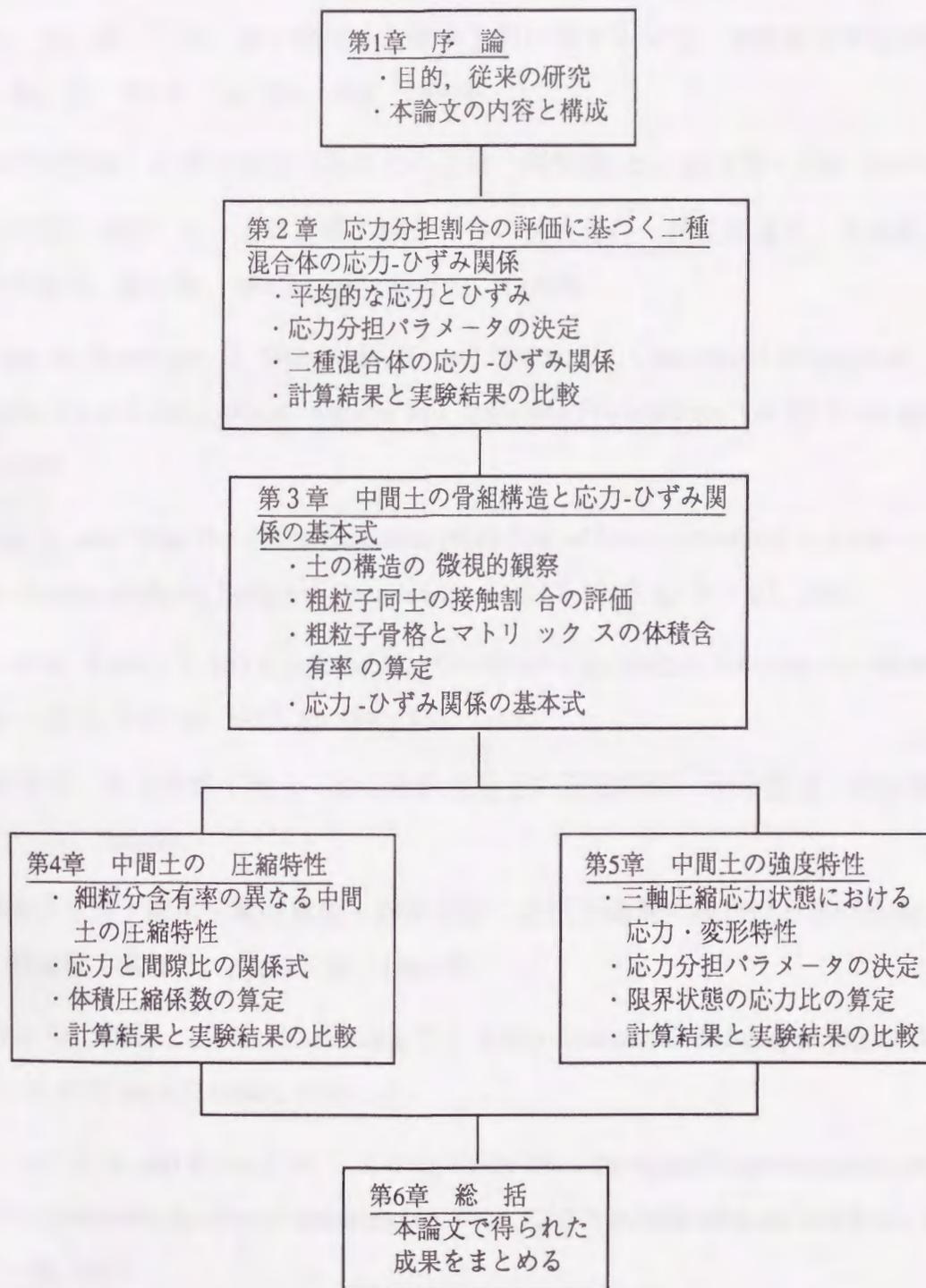


図 1.1 本論文の構成

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：ジオテクノート2 中間土—砂か粘土か，1992年.
- 2) 倉田 進，藤下利夫：砂と粘土の工学的性質に関する研究，運輸省港湾技術研究所報告，第11巻，第9号，pp.389～424，1960年.
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)，pp.173～174，1989年.
- 4) 中瀬明男・勝野 克・小林正樹：砂分の多い粘性土の一軸圧縮強さ，運輸省港湾技術研究所報告，第11巻，第4号，pp.83～102，1972年.
- 5) Nakase, A., Kusakabe, O., Nakanodo, H. and Oneda, H. : Case record of quaywall construction on a coral mixed cohesive soil, *Soils and Foundations*, Vol.25, No.4, pp.103～116, 1985.
- 6) Iizuka, A., and Ohta, H. : A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.3, pp.71～87, 1987.
- 7) Nakase, A., Kamei, T. and Kusakabe, O. : Constitutive parameters estimated by plasticity index, *ASCE*, Vol.114, No.7, pp.844～858, 1988.
- 8) 鬼塚克忠・吉武茂樹：粘土・砂の飽和混合土の圧密特性，土と基礎，第34巻，第7号，pp.73～79，1986年.
- 9) 中瀬明男・日下部治・亀井健史・鈴木弘之：粘性土地盤の異方性と塑性指数，土と基礎，第32巻，第11号，pp.19～24，1984年.
- 10) Fukue, M., Okusa, S., and Nakamura, T. : Consolidation of sand-clay mixtures, *ASTM, STP.*, No.892, pp.627～641, 1986.
- 11) Trollope, D.H. and Zafar, S.M. : A study of the shear strength of saturated sand, and sand/clay mixtures, in triaxial compression, *Proc., 2nd Australia-Newzealand Conf. S.M.F.E.*, pp.7～16, 1965.
- 12) Holtz, W.G. and Willars Ellis : Triaxial shear characteristics of clayey gravel soils, *Proc., 5th Int. Conf. S.M.F.E.*, pp.143～149, 1961.
- 13) Bjerrum, L. and Simons, N.E. : Comparison of shear strength characteristics of normally

- consolidated clays, Proc., ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, pp.711 ~726, 1960.
- 14) Kenny, T.C. : Discussion on Proc. Paper 1732(Wu, 1958), JSMFED, Proc., ASCE, Vol.85, SM3, pp.67~79, 1959.
- 15) Skempton, A.W. : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3~18, 1985.
- 16) Borowicka, H. : The influence of the colloidal content on the shear strength of clay, Proc., 6th Int. Conf. S.M.F.E., No.1, pp.175~178, 1965.
- 17) Kenny, T.C. : Residual strengths of mineral mixtures, Proc., 9th Int. Conf. S.M.F.E., No.1, pp.155~160, 1977.
- 18) Voigt, B. : Correlation between Atterberg plasticity limits and residual shear strength of natural soils, *Geotechnique*, Vol.23, No.2, pp.265~267, 1973.
- 19) Kanji, M.A. : The relationship between drained friction angles and Atterberg limits of natural soils, *Geotechnique*, Vol.24, No.4, pp.671~674, 1974.
- 20) Skempton, A.W. and Henkel, D.J. : The post-glacial clays of the Thames Estuary at Tilbury and Shellhaven, Proc., 3th Int. Conf. S.M.F.E., No.1, pp.302~308, 1953.
- 21) Bjerrum, L. : Geotechnical properties of Norwegian marine clays, *Geotechnique*, Vol.4, No.4, pp.49~69, 1954.
- 22) Berre, T. and Bjerrum, L. : Shear strength of normally consolidated clays, Proc., 8th Int. Conf. S.M.F.E., No.1, pp.39~49, 1973.
- 23) Larsson, R. : Undrained shear strength in stability calculation of embankments and foundations on soft clays, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.17, No.4, pp.591~602, 1980.
- 24) 柴田 徹 : 飽和土の強度増加率 Cu/p について, 第20回土質工学シンポジウム, 1975年.
- 25) 半沢秀郎・吉田信行・鈴木耕司・田中洋行 : Su/p 比についての一考察, 第26回土質工学会研究発表会, pp.605~606, 1991年.

- 26) 川上 浩・阿部広史：飽和れき混り粘土のせん断特性，土木学会論文報告集，183号，pp.55～62，1970年.
- 27) 周藤宜二・上原方成：島尻層混合土の力学的特性に関する研究(第1報)，琉球大学理工学部紀要工学編第14号，pp.215～222，1977年.
- 28) 鬼塚克忠・吉武茂樹：締固めた混合土の強度異方性について，土質工学会論文報告集，第23巻，第4号，pp.149～156，1983年.
- 29) Nakase, A. and Kamei, T. : Undrained shear strength an isotropy of normally consolidated cohesive soils, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.1, pp.91～101,1983.
- 30) Nakase, A. and Kamei, T. : Undrained shear strength of remoulded marine clays, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.1, pp.29～40, 1988.
- 31) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. : The drained residual strength of cohesive soils, *Geotechnique*, Vol.31, No.2, pp.181～213, 1981.
- 32) 福江正治・大草重康：砂と粘土の混合土の工学的性質の新しい評価方法について，東海大学紀要海洋学部，第14号，pp.247～261，1981年.
- 33) 八尾 真太郎，平田茂良：中間土の強度発現機構に関する考察(その2)，第25回土質工学会研究発表会，pp.701～704，1990.
- 34) Vallejo, L.E. : An extension of the particulate model of stability analysis for mudflows, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.3, pp.1～13, 1989.

第2章 応力分担割合の評価に基づく二種混合体の応力-ひずみ関係

2.1 概 説

砂と粘土の中間的な粒度組成を有する中間土の力学特性は、その構成要素である粗粒子とマトリックス(細粒子と水から成る部分)の性質やそれらの含有割合に依存する。そのため、中間土は粗粒子とマトリックスの二つの材料から成る混合体であると見なすことができる。このような中間土の力学特性を明らかにするための基礎的考察として、異なる材料で構成される二種混合体の応力-ひずみ関係を明らかにすることは、有効な手段の一つである。

これまで混合体の力学特性について多くの研究が成されているが、混合体には介在物の形状や組み合わせによって非常に多くの種類があり、材料に応じて評価法が異なってくる¹⁾³⁾。ここで対象とする混合体は、基になる材料であるマトリックスの中に他の材料、すなわち、介在物が不規則に分布している場合である。この場合、マトリックスと介在物の特性を用いて混合体の応力-ひずみ関係をどのように予測するかということが課題となる。

異なる材料で構成される混合体の応力-ひずみ関係を考察する上で、混合体内部の応力分布を評価することは重要である。このことは、最も簡単な例として、混合体の弾性係数を考えた場合でも明らかである。つまり、混合体の内部で応力が一定あるいはひずみが一定と考えた場合には、混合体の弾性係数の上下界の値が得られるが、実際の混合体の弾性係数はその間にあることが理論的および実験的に明らかにされている。したがって、混合体の応力-ひずみ関係をより厳密に求めるためには、混合体内部の応力分布を適切に評価する必要がある。混合体内の応力分布については、これまで理論的な立場か

ら考察したものや数値解析を行って計算により求めたものなどがある。しかしながら、混合体には様々な種類があり、材料に適した評価法を用いることが必要である。

本章では、介在物とマトリックスの材料特性を考慮して混合体内部の応力分担割合の評価を行い、二種混合体の応力-ひずみ関係の定式化を行う。まず、2.2節では、混合体の応力-ひずみ関係に関する従来の研究を概観する。2.3節では、二種混合体における応力分担割合を評価するために、混合体の平均的な応力とひずみの表示について述べ、介在物とマトリックスに作用する応力分担割合を仕事量の考え方を用いて決定し、二種混合体の応力-ひずみ関係を誘導する。2.4節では、提案式を用いて等方弾性材料から成る二種混合体の弾性係数を求め、他の理論式および従来の実験結果と比較することにより、その妥当性を検証する。

最後に、2.5節において、本章で得られた知見をまとめて結論とする。

2. 2 混合体の応力-ひずみ関係に関する従来の研究

異なる材料で構成される混合体は、巨視的には均質体であるが、微視的にみると不均質体である。このとき、混合体内部では応力とひずみが分布しているため、構成要素である介在物とマトリックスの特性から応力-ひずみ関係をどのように求めるかが重要な課題となる。このような分野は微視力学(micromechanics)⁴⁾と呼ばれている。

これまで混合体の力学特性に関する多くの研究が成されている。その中でも、混合体の弾性係数の評価は、古典的な問題の一つである。混合体の弾性係数に対して先駆的な研究を行ったのは、Voigt⁵⁾とReuss⁶⁾である。Voigtは、混合体の弾性係数の近似値を求めるために、混合体内部のひずみは一様であると仮定した。他方、Reussは、混合体内部の応力が一様であると仮定し、混合体の弾性係数を求めた。これらは、混合体内部の応力およびひずみが均一であるという最も簡単な場合を考えたものであるが、Hill⁷⁾は、理論的な立場から、いかなる混合体においても実際の混合体の弾性係数は、VoigtとReussの二つの近似値の間にあることを論証した。つまり、VoigtとReussの提案式は、混合体の弾性係数の上下界を示したものと言える。一方、Hashin⁸⁾およびHashinとShtrikman^{9),10)}は、変分法に基づいて、より厳密な混合体の弾性係数の上下界の値を求め、実験結果との比較によりその妥当性を検証している。また、WattとO'Connell¹¹⁾は、様々な混合体に対して、この手法の適用性を確かめている。ただし、この方法は、介在物とマトリックスの剛性が極端に異なると、解が定まらないので、例えば介在物が剛体の場合などには適用することができない。この上下界の実用的な値は、介在物とマトリックスの剛性の比が約10程度までと言われている¹²⁾。

混合体の弾性係数を介在物とマトリックスの弾性係数を用いて評価する手法は、等方弾性体だけでなく異方性を持つ混合体¹³⁾や複数の異なる介在物を含む混合体など¹⁴⁾についても拡張されている。

一方、混合体の巨視的な挙動を予測するために、混合体内部の応力分布を正確に把握することも行われている。その中の一つに、数値解析により混合体内部の応力分布を求める方法がある。AdamsとDoner¹⁵⁾は、介在物が規則配列した混合体について、数値解析の結果から、介在物とマトリックスのヤング率の比が大きくなるほど介在物により大きな応力が作用することを確認している。HaenerとAshbaugh¹⁶⁾は、混合体内部の三次元的な応力分布を計算により求めている。また、MoschovldisとMura¹⁷⁾は、介在物同士

が相互に影響を及ぼし合う効果を考慮して、混合体内部の応力分布を評価する手法を提案している。

Eshelby¹⁸⁾は、無限弾性体の中に弾性係数の異なる一個の楕円体介在物が混入したときの混合体内部の応力分布について理論的な考察を行い、混合体の応力-ひずみ関係を評価する新しい手法を提案している。この方法では、楕円体は任意の形状でよいので、極端な形状の介在物を含む混合体の弾性係数が求められる。Hillは、ある材料定数を持つ混合体の中にさらに一個の介在物を付加したモデルによる"Self-consistent法"を提案している¹⁹⁾。さらに、Hillは、その考え方を弾塑性体にも適用している^{20),21)}。EshelbyやHillの方法は、マトリックスと介在物の剛性が極端に異なる場合にも用いることができるため、その適用範囲が広い。しかし、これらの方法は、介在物の体積含有率が比較的小さい場合には実際の現象をよく評価することができるが、介在物の体積含有率が大きくなると許容できない誤差が生じる場合のあることが指摘されている²²⁾。

以上のように、混合体の応力-ひずみ関係を介在物とマトリックスの特性から予測する手法には、多くのものが提案されている。しかしながら、混合体の種類によってその適用範囲に制限があるので、混合体の種類に適した合理的な評価手法を用いることが必要となる。

2. 3 二種混合体における応力分担割合の評価

2. 2節の混合体の応力-ひずみ関係に関する研究において示されるように、微視的な立場から混合体の巨視的な応力-ひずみ関係を求めようとする場合、混合体内部の応力分担割合の評価が重要になる。本節では、まず、混合体の平均的な応力とひずみの表示法について述べ、応力分担割合を評価する新たなパラメータを導入することにより、二種混合体の応力-ひずみ関係を誘導する。

2. 3. 1 混合体の平均的な応力とひずみの表示²³⁾

混合体を構成する材料の中で、基になる材料をマトリックス、他の材料を介在物とする。このとき、混合体中に介在物が不規則に分布している場合を考える。混合体に作用する応力を図 2.1 に示す。混合体には、一様な応力 $\bar{\sigma}_{ij(0)}$ が作用し、物体力は働いていないものとする。このときの応力分布は、マトリックスと介在物の材料特性に依存する

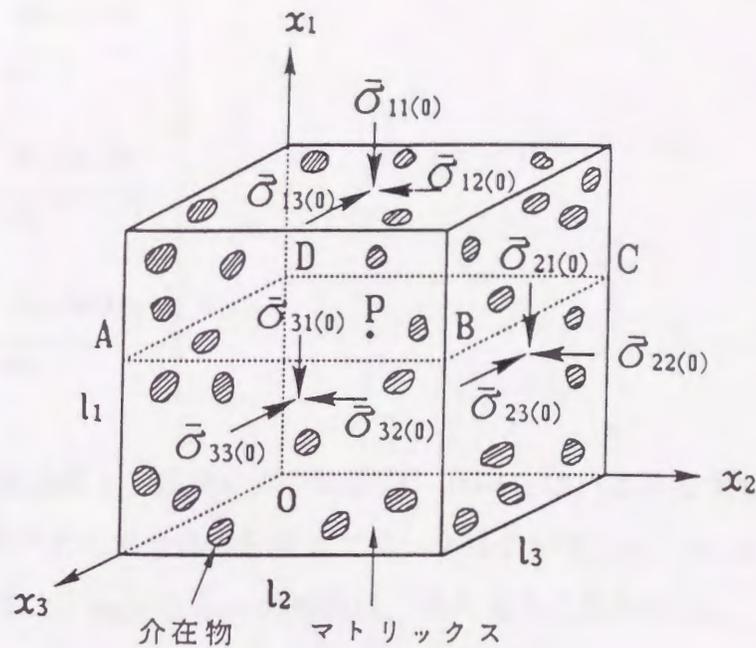


図 2.1 混合体に作用する応力

と考える。このような混合体内部の応力とひずみの分布を考察するために、次の体積平均で定義される混合体の平均応力および平均ひずみを用いる。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{\int_V \sigma_{ij} dV}{V} \quad (2.1)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{\int_V \varepsilon_{ij} dV}{V} \quad (2.2)$$

ここに、 σ_{ij} および ε_{ij} は、混合体の微小体積 dV の応力およびひずみ、 V は、混合体の体積、 $i, j=1, 2, 3$ である。

これらの体積積分で定義される平均値の意味は次のように考えることができる。まず、式(2.1)で定義される混合体の平均応力 $\bar{\sigma}_{ij}$ が、混合体の表面に作用する平均応力 $\bar{\sigma}_{ij(0)}$ とどのような関係にあるかを考える。図 2.1 において、 x_1 軸に直交する ABCD 面の平均応力の各成分を次のように表す。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{11(P)} &= \frac{\int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{11} dx_3 dx_2}{l_2 l_3} \\ \bar{\sigma}_{12(P)} &= \frac{\int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{12} dx_3 dx_2}{l_2 l_3} \\ \bar{\sigma}_{13(P)} &= \frac{\int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{13} dx_3 dx_2}{l_2 l_3} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

ここに、 σ_{ij} は、ABCD面上の任意の点Pの応力、 $dx_3 dx_2$ は、点Pを含む微小断面積を表す。ABCD面で切断された混合体の片側のブロックについて、 x_1 、 x_2 および x_3 方向の力のつり合いを考えると、 $\bar{\sigma}_{ij(0)}$ と $\bar{\sigma}_{ij(P)}$ の関係は、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{11(0)} &= \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{11} dx_3 dx_2 dx_1}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\int_V \sigma_{11} dV}{V} = \bar{\sigma}_{11} \\ \bar{\sigma}_{12(0)} &= \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{12} dx_3 dx_2 dx_1}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\int_V \sigma_{12} dV}{V} = \bar{\sigma}_{12} \\ \bar{\sigma}_{13(0)} &= \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{13} dx_3 dx_2 dx_1}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\int_V \sigma_{13} dV}{V} = \bar{\sigma}_{13} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

式(2.4)は、 x_1 軸に直交するいずれの断面においても成り立つので、式(2.4)の両辺に dx_1 をかけ、積分を行い整理すると次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{11(0)} &= \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{11} dx_3 dx_2 dx_1}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\int_V \sigma_{11} dV}{V} = \bar{\sigma}_{11} \\ \bar{\sigma}_{12(0)} &= \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{12} dx_3 dx_2 dx_1}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\int_V \sigma_{12} dV}{V} = \bar{\sigma}_{12} \\ \bar{\sigma}_{13(0)} &= \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \sigma_{13} dx_3 dx_2 dx_1}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\int_V \sigma_{13} dV}{V} = \bar{\sigma}_{13} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

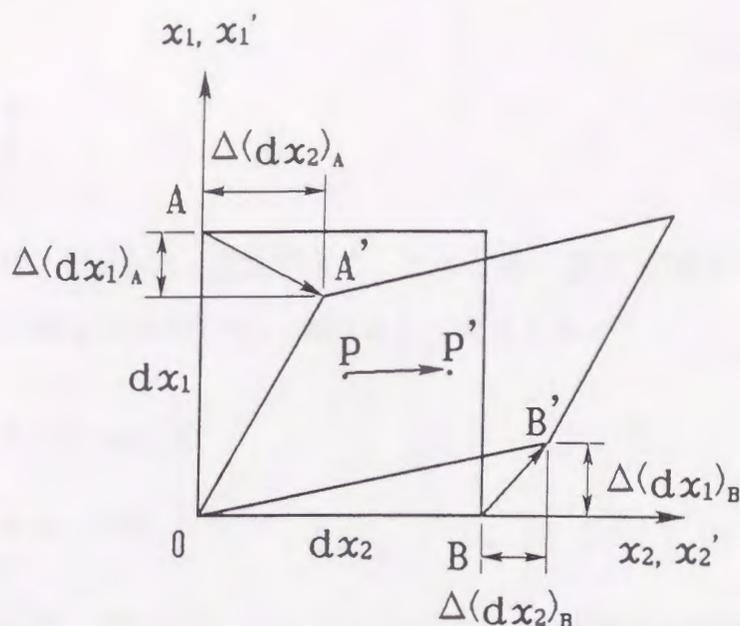


図 2.2 混合体の微小断面の変形

つまり，混合体の表面に作用する平均応力 $\bar{\sigma}_{ij(0)}$ は，式(2.1) の体積平均で定義される混合体の平均応力 $\bar{\sigma}_{ij}$ と一致する．

次に，式(2.2)で定義される混合体の平均ひずみが混合体の表面の変位で定義されるにひずみとどのような関係にあるかを検討する．

混合体の微小断面の変形を図 2.2 に示す．微小変形を考えた場合，このときのひずみは，次のように表される．

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.6)$$

ここに， u_i は，変位ベクトル， x_j は，位置ベクトルを表す．式(2.6) は，物体の変位の幾何学的関係から以下のように説明される．

図 2.2 において，変形前に原点 O にあった点は，変形後も原点 O の位置と一致するように全体を平行移動させている．変形前の物体の任意の点 P が，変形後に点 P' に移動したと考え，このときの座標の変換が，物体のあらゆる点で一対一に対応していると仮定する．式(2.6) の微小ひずみは，変位の一階微分で表されているので，物体内でひずみが均一である場合には，任意の点 P から点 P' の座標の変換が，次のような一次関数で表されることになる．

$$\left. \begin{aligned} x_2' &= a_{22} x_2 + a_{21} x_1 \\ x_1' &= a_{12} x_2 + a_{11} x_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

ここで、 a_{22} , a_{21} , a_{12} および a_{11} は、定数である。このとき、点P が点P' へ移したときの変位成分 u_2 , u_1 は、式(2.7)を用いて、次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= x_2' - x_2 = (a_{22} - 1) x_2 + a_{21} x_1 \\ u_1 &= x_1' - x_1 = a_{12} x_2 + (a_{11} - 1) x_1 \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

ここで、定数 $a_{22} \sim a_{11}$ は、式(2.8) に点A および点B の座標値およびそれらの点の変位量を代入することにより、それぞれ次のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} a_{22} &= \frac{\Delta(dx_2)_B}{dx_2} + 1 \\ a_{21} &= \frac{\Delta(dx_1)_B}{dx_2} \\ a_{12} &= \frac{\Delta(dx_2)_A}{dx_1} \\ a_{11} &= \frac{\Delta(dx_1)_A}{dx_1} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

したがって、微小ひずみ ϵ_{11} および ϵ_{12} は、式(2.6) に式(2.8) および式(2.9) を代入することにより、次のように表される。

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= \frac{\partial u_1}{\partial x_1} = a_{11} - 1 \\ &= \frac{\Delta(x_1)_A}{x_1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) = \frac{1}{2} (a_{21} + a_{12}) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta(x_1)_B}{x_2} + \frac{\Delta(x_2)_A}{x_1} \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

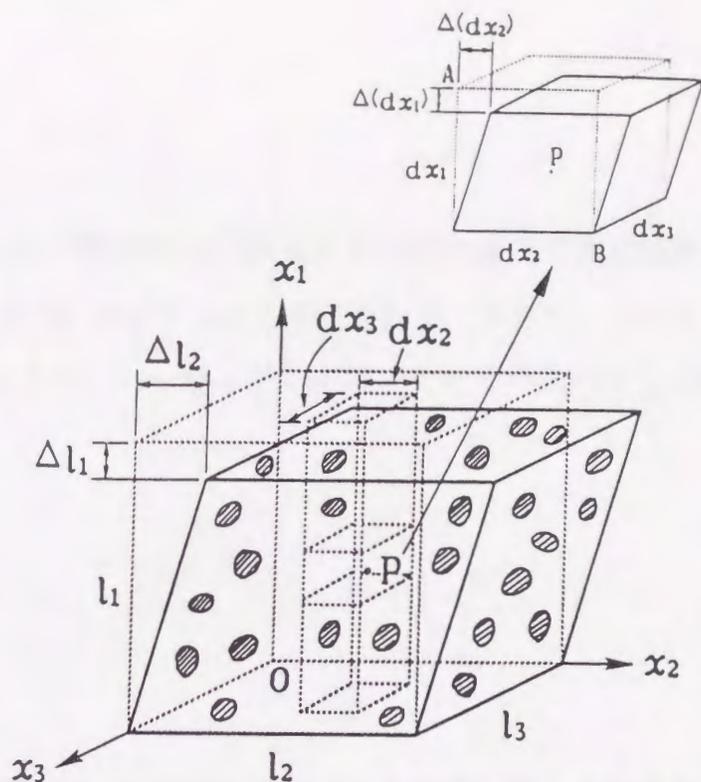


図 2.3 混合体の変形

つまり、式(2.10)の ϵ_{11} は、物体の x_1 方向の単位当りの伸びあるいは縮みを表し、式(2.11)のカッコ内の値は、図 2.2 における角 AOB の変化を表している。

混合体の変形を図 2.3 に示す。混合体の表面は、一様な変位が生じているものとする。微小ひずみを考えると、混合体の表面の変位で定義される平均ひずみ $\bar{\epsilon}_{11(0)}$ および $\bar{\epsilon}_{12(0)}$ は、次のように表される。

$$\epsilon_{11(0)} = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (2.12)$$

$$\epsilon_{12(0)} = \frac{\Delta l_2}{2l_2} \quad (2.13)$$

図 2.3 において、任意の点 P を含む微小六面体および微小面積 $dx_2 dx_3$ を底、長さを l_1 とする角柱を考える。図の点 P を含む微小六面体において B 点の変位を 0 とすると、A 点の変位 $\Delta(dx_1)$ および $\Delta(dx_2)$ は、この微小六面体のひずみ ϵ_{11} および ϵ_{12} を用いて、それぞれ次のように表される。

$$\Delta(dx_1) = \varepsilon_{11} dx_1 \quad (2.14)$$

$$\Delta(dx_2) = 2\varepsilon_{12} dx_1 \quad (2.15)$$

式(2.14) および式(2.15) の微小変位を図 2.3 の角柱の長さ方向に積分した値は、それぞれ混合体の要素の変位 Δl_1 および Δl_2 と等しくなる。さらに、これらの値を式(2.12) および式(2.13) に代入すると、 $\bar{\varepsilon}_{11(0)}$ および $\bar{\varepsilon}_{12(0)}$ は、それぞれ次のように表される。

$$\bar{\varepsilon}_{11(0)} = \frac{\int_0^{l_1} \varepsilon_{11} dx_1}{l_1} \quad (2.16)$$

$$\bar{\varepsilon}_{12(0)} = \frac{\int_0^{l_1} \varepsilon_{12} dx_1}{l_1} \quad (2.17)$$

式(2.16) および式(2.17) は、いずれの点における角柱を考えても成り立つので、これらの式の両辺に $dx_2 dx_3$ をかけ、積分を行うと、次式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{11(0)} &= \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \varepsilon_{11} dx_3 dx_2 dx_1}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\int_V \varepsilon_{11} dV}{V} = \bar{\varepsilon}_{11} \\ \bar{\varepsilon}_{12(0)} &= \frac{\int_0^{l_1} \int_0^{l_2} \int_0^{l_3} \varepsilon_{12} dx_3 dx_2 dx_1}{l_1 l_2 l_3} = \frac{\int_V \varepsilon_{12} dV}{V} = \bar{\varepsilon}_{12} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

つまり、混合体の表面の変位で定義される平均ひずみ $\bar{\varepsilon}_{ij(0)}$ は、式(2.2) の体積積分で定義される混合体の平均ひずみ $\bar{\varepsilon}_{ij}$ と一致する。

このように、混合体の平均応力と平均ひずみは、それぞれ混合体の表面の応力および変位を用いて表される。また、これらの平均応力と平均ひずみは、いずれも体積積分で定義されているので、混合体内部の応力およびひずみの分布の考察が容易になる。

なお、式(2.1) と式(2.2) の混合体の平均応力および平均ひずみは、Gauss の積分定理を用いて、それぞれ次の面積積分にも変換される²⁴⁾。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{\int_S T_i x_j dS}{V} \quad (2.19)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{\int_S (u_i n_j + u_j n_i) dS}{2V} \quad (2.20)$$

ここで、 T_i : 表面力(= $\sigma_{ik}n_k$), n_k : 法線ベクトル, x_j : 位置ベクトル, u_i : 変位ベクトル, S : 表面積である.

次に、混合体内部の応力とひずみの分布を評価するために、混合体中の介在物およびマトリックスの平均応力を式(2.1)と同様に、それぞれ次のように表す.

$$\bar{\sigma}_{sij} = \frac{\int_{V_s} \sigma_{sij} dV_s}{V_s} \quad (2.21)$$

$$\bar{\sigma}_{ij}^* = \frac{\int_{V^*} \sigma_{ij}^* dV^*}{V^*} \quad (2.22)$$

ここで、 σ_{sij} は、介在物の微小体積 dV_s に作用する応力、 σ_{ij}^* は、マトリックスの微小体積 dV^* に作用する応力を表す. このとき、式(2.1)の混合体の平均応力は、介在物とマトリックスの平均応力を用いて次のように表されるものとする.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{ij} &= \frac{\int_{V_s} \sigma_{sij} dV_s + \int_{V^*} \sigma_{ij}^* dV^*}{V} \\ &= f_s \bar{\sigma}_{sij} + (1 - f_s) \bar{\sigma}_{ij}^* \end{aligned} \quad (2.23)$$

ここに、 $f_s = V_s/V$ (介在物の体積含有率), $V = V_s + V^*$ である. 式(2.23)の混合体の平均応力は、介在物とマトリックスの平均応力を用いて表されるため、混合体内部の応力分布を考える上で非常に有利である.

一方、混合体中の介在物およびマトリックスの平均ひずみについても、式(2.2)と同様に、それぞれ次のように表す.

$$\bar{\varepsilon}_{sij} = \frac{\int_{V_s} \varepsilon_{sij} dV_s}{V_s} \quad (2.24)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij}^* = \frac{\int_{V^*} \varepsilon_{ij}^* dV^*}{V^*} \quad (2.25)$$

ここで、 ε_{sij} は、介在物の微小体積 dV_s に作用する応力、 ε_{ij}^* は、マトリックスの微小体積 dV^* に作用する応力を表す。このとき、式(2.2) の混合体の平均ひずみは、介在物とマトリックスの平均ひずみを用いて次のように表されるものとする。

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{ij} &= \frac{\int_{V_s} \varepsilon_{sij} dV_s + \int_{V^*} \varepsilon_{ij}^* dV^*}{V} \\ &= f_s \bar{\varepsilon}_{sij} + (1 - f_s) \bar{\varepsilon}_{ij}^* \end{aligned} \quad (2.26)$$

式(2.26) の混合体の平均ひずみは、介在物とマトリックスの平均ひずみを用いて表されるため、混合体の内部のひずみの分布を考える上で有利である。

このような考え方は、二種混合体に限らず、複数の材料から構成される混合体に対しても適用される。

2. 3. 2 二種混合体の応力—ひずみ関係²⁵⁾

2. 3. 1 で述べた平均応力および平均ひずみを用いて、二種混合体の応力—ひずみ関係の誘導を行う。

(a) 基本的な考え方

応力—ひずみ関係が応力経路に依存する材料では、応力とひずみが一対一に対応しないので、一般に増分形の構成関係が用いられる。ここにおいても、二種混合体の応力増分—ひずみ増分関係を考察する。以下に、その考え方を述べる。

二種混合体の応力増分—ひずみ増分関係を求めるための基本的な考え方を図 2.4 に示す。まず、混合体を構成する介在物とマトリックスに着目する。混合体中の介在物とマトリックスの体積含有率は既知であるとする。このときの混合体内部の応力分布を評価する必要がある。ここでは、介在物とマトリックスに作用する応力の分担割合を表す新たなパラメータを導入する。このパラメータは、仕事量増分の考えを用いて算定される。すなわち、介在物とマトリックスの材料特性によって決定される。さらに、このときの介在物とマトリックスの応力増分に対応するそれぞれのひずみ増分を求め、その平均値

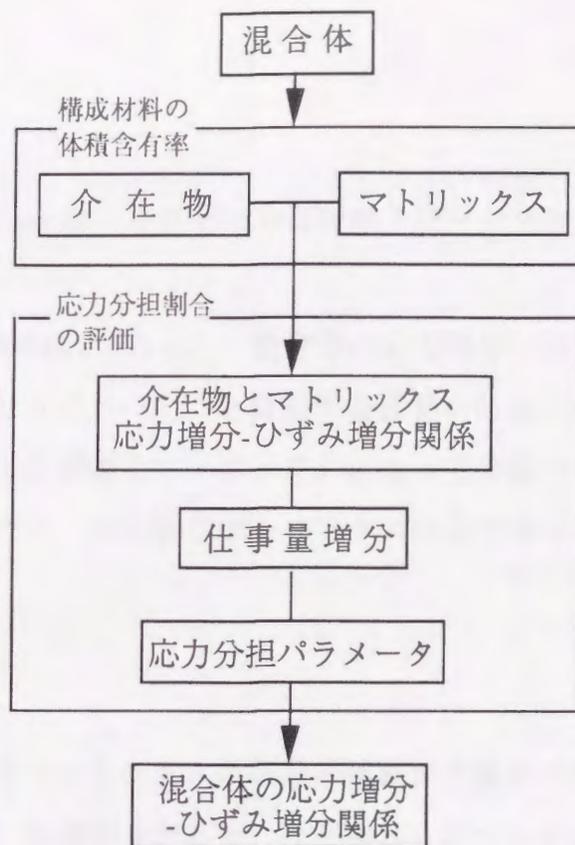


図2.4 混合体の応力増分-ひずみ増分関係を求めるための基本的な考え方

として、混合体の応力増分—ひずみ増分関係が誘導される。

したがって、介在物とマトリックスの特性から混合体の応力増分—ひずみ増分関係が求められる。

(b) 応力増分—ひずみ増分関係

混合体の平均応力増分は、式(2.23)より介在物とマトリックスの応力増分を用いて、次のように表される。

$$d\bar{\sigma}_{ij} = f_s d\bar{\sigma}_{sij} + (1 - f_s) d\bar{\sigma}_{ij}^* \quad (2.27)$$

混合体の平均ひずみ増分についても同様に、式(2.26)より次のように表される。

$$d\bar{\epsilon}_{ij} = f_s d\bar{\epsilon}_{sij} + (1 - f_s) d\bar{\epsilon}_{ij}^* \quad (2.28)$$

このとき、介在物およびマトリックスの応力増分—ひずみ増分関係が、それぞれ次式で与えられるものとする。

$$d\bar{\epsilon}_{sij} = C_{sijkl} d\bar{\sigma}_{skl} \quad (2.29)$$

$$d\bar{\epsilon}_{ij}^* = C_{ijkl}^* d\bar{\sigma}_{kl}^* \quad (2.30)$$

ここで、 C_{sijkl} および C_{ijkl}^* は、それぞれ介在物およびマトリックスの材料特性によって決まる係数である。

式(2.27)~(2.30) の関係式を用いて、混合体の応力増分—ひずみ増分関係を求めるためには、介在物とマトリックスの応力を算定する必要がある。式(2.27) で示されるように、混合体の応力増分は介在物とマトリックスによって分担されるので、このときの応力分担割合を求めるために、介在物とマトリックスの応力増分の関係が、次のように表されるものとする。

$$d\bar{\sigma}_{sij} = b \cdot d\bar{\sigma}_{ij}^* \quad (2.31)$$

ここに、 b は、介在物とマトリックスの応力分担割合を表すパラメータである。このとき、式(2.27) と式(2.31) を連立させると、介在物およびマトリックスの応力増分と混合体の応力増分の関係は、それぞれ次のように表される。

$$d\bar{\sigma}_{sij} = \frac{b}{(b-1)f_s + 1} d\bar{\sigma}_{ij} \quad (2.32)$$

$$d\bar{\sigma}_{ij}^* = \frac{1}{(b-1)f_s + 1} d\bar{\sigma}_{ij} \quad (2.33)$$

したがって、介在物とマトリックスの応力増分は、応力分担パラメータ b と介在物の体積含有率 f_s を用いて算定される。なお、介在物のみ($f_s = 1$)の場合は、 $d\bar{\sigma}_{sij} = d\bar{\sigma}_{ij}$ となり、マトリックスのみ($f_s = 0$)の場合は、 $d\bar{\sigma}_{ij}^* = d\bar{\sigma}_{ij}$ となる。

また、混合体に応力増分 $d\bar{\sigma}_{ij}$ が与えられたときの介在物およびマトリックスのひずみ増分は、式(2.29) および式(2.30) にそれぞれ式(2.32) および式(2.33) を代入することにより、それぞれ次式で表される。

$$d\bar{\epsilon}_{sij} = \frac{C_{sijkl} b}{(b-1)f_s + 1} d\bar{\sigma}_{kl} \quad (2.34)$$

$$d\bar{\epsilon}_{ij}^* = \frac{C_{ijkl}^*}{(b-1)f_s+1} d\bar{\sigma}_{kl} \quad (2.35)$$

式(2.28) で示されるように、混合体のひずみ増分は、介在物とマトリックスのひずみ増分の平均値として表される。したがって、混合体の応力増分—ひずみ増分関係は、式(2.34), (2.35) を式(2.28) に代入することにより、次のように表される。

$$d\bar{\epsilon}_{ij} = \frac{f_s b C_{sijkl} + (1-f_s) C_{ijkl}^*}{(b-1)f_s+1} d\bar{\sigma}_{kl} \quad (2.36)$$

すなわち、混合体の応力増分—ひずみ増分関係は、介在物とマトリックスの材料特性によって決定される係数 C_{sijkl} , C_{ijkl}^* , 応力分担パラメータ b および介在物の体積含有率 f_s を用いて表される。

2. 3. 3 応力分担パラメータの決定

2. 3. 2 で導入した応力分担パラメータ b を決定するために、介在物およびマトリックスの仕事量増分について考察する。

ある応力状態で混合体にひずみ増分が生じたときの介在物およびマトリックスの単位体積当りの仕事量増分は、それぞれ次のように表される。

$$dW_s = \bar{\sigma}_{sij} d\bar{\epsilon}_{sij} = C_{sijkl} \bar{\sigma}_{sij} d\bar{\sigma}_{skl} \quad (2.37)$$

$$dW^* = \bar{\sigma}_{ij}^* d\bar{\epsilon}_{ij}^* = C_{ijkl}^* \bar{\sigma}_{ij}^* d\bar{\sigma}_{kl}^* \quad (2.38)$$

式(2.37) および (2.38) の右辺にそれぞれ式(2.32) および(2.33) を代入すると、介在物およびマトリックスの単位体積当りの仕事量増分は、それぞれ次のように表される。

$$dW_s = \frac{C_{ijkl}^* b \bar{\sigma}_{sij}}{(b-1)f_s+1} d\bar{\sigma}_{ij} \quad (2.39)$$

$$dW^* = \frac{C_{ijkl}^* \bar{\sigma}_{ij}^*}{(b-1)f_s+1} d\bar{\sigma}_{ij} \quad (2.40)$$

介在物に比べてマトリックスの圧縮性が大きい場合、混合体内部の応力が均一であるとすると、マトリックスの変形は、介在物に比べて大きくなるので、 $dW_s < dW^*$ となる。

一方、このとき、混合体内部のひずみが均一であると考え、 $dW_s > dW^*$ となる。前者は、マトリックスの変形を過大に、後者は、介在物の応力を過大に評価することになる。ここでは、介在物とマトリックスの単位体積当たりの仕事量が等しいと仮定する。この場合の応力とひずみは、両者の中間的な値を取るようになる。したがって、 $dW = dW^*$ とおくと、応力分担パラメータ b は、式(2.39), (2.40) から次のように求められる。

$$b = \frac{C_{ijkl}^* \bar{\sigma}_{ij}^* d\bar{\sigma}_{kl}}{C_{smnop} \bar{\sigma}_{smn} d\bar{\sigma}_{op}} \quad (2.41)$$

2. 4 弾性体への適用例²⁵⁾

2. 3節では、混合体内部の応力分担割合を表すパラメータを新たに導入し、二種混合体の応力—ひずみ関係を誘導した。本節では、この提案式を等方弾性材料から成る二種混合体に適用し、その弾性係数を求め、他の理論式および従来の実験結果との比較によりその妥当性を検証する。

2. 4. 1 等方弾性材料から成る二種混合体の弾性係数

介在物およびマトリックスがいずれも等方弾性材料の場合、式(2.29), (2.30) の係数 C_{sijkl} および C_{ijkl}^* は、それぞれ次のように表される。

$$C_{sijkl} = \frac{1+v_s}{E_s} \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{v_s}{E_s} \delta_{ij} \delta_{kl} \quad (2.42)$$

$$C_{ijkl}^* = \frac{1+v^*}{E^*} \delta_{ik} \delta_{jl} - \frac{v^*}{E^*} \delta_{ij} \delta_{kl} \quad (2.43)$$

ここに、

E_s : 介在物のヤング率

v_s : 介在物のポアソン比

E^* : マトリックスのヤング率

v^* : マトリックスのポアソン比

δ_{ij} : クロネッカのデルタ

したがって、等方弾性材料から成る二種混合体の応力増分—ひずみ増分関係は、式(2.36)に式(2.42)および(2.43)を代入することにより、次のように表される。

$$d\bar{\epsilon}_{ij} = \left[\left((1-f_s) \frac{1+\nu^*}{E^*} + f_s b \frac{1+\nu_s}{E_s} \right) d\bar{\sigma}_{ij} - \left((1-f_s) \frac{\nu^*}{E^*} + f_s b \frac{\nu_s}{E_s} \right) d\bar{\sigma}_{kk} \delta_{ij} \right] / \{(b-1)f_s + 1\} \quad (2.44)$$

さらに、式(2.44)における応力分担パラメータ b は、式(2.23)と式(2.31)から、 $\bar{\sigma}_{sij}$ および $\bar{\sigma}_{ij}$ と $\bar{\sigma}_j$ の関係を求め、これらの関係式と式(2.42),(2.43)を式(2.41)に代入することにより、次のように表される。

$$b = \left(\frac{\frac{1+\nu^*}{E^*} \bar{\sigma}_{ij} d\bar{\sigma}_{ij} - \frac{\nu^*}{E^*} \bar{\sigma}_{jj} d\bar{\sigma}_{ii}}{\frac{1+\nu_s}{E_s} \bar{\sigma}_{mn} d\bar{\sigma}_{mn} - \frac{\nu_s}{E_s} \bar{\sigma}_{mm} d\bar{\sigma}_{nn}} \right)^{1/2} \quad (2.45)$$

すなわち、応力分担パラメータ b は、介在物とマトリックスのヤング率、ポアソン比および応力条件 $\bar{\sigma}_{ij}$, $d\bar{\sigma}_{ij}$ を与えることにより算定される。ただし、次に述べるように、このときの b の値は、特定の応力経路に対して定数となる。

式(2.44), (2.45)を用いると、各応力状態における混合体のヤング率、体積弾性係数およびせん断弾性係数は、それぞれ次のように求められる。

(a) ヤング率

一次元応力状態($\bar{\sigma}_{11} \neq 0, \bar{\sigma}_{22} = \bar{\sigma}_{33} = \bar{\sigma}_{12} = \bar{\sigma}_{23} = \bar{\sigma}_{13} = 0$)では、混合体の応力増分—ひずみ増分関係は、混合体のヤング率 E を用いて、 $d\bar{\sigma}_{11} = E d\bar{\epsilon}_{11}$ と表される。このときの応力条件を式(2.44)に代入すると混合体のヤング率 E は、次のように表される。

$$\dot{E} = \frac{(b-1)f_s + 1}{\frac{f_s b}{E_s} + \frac{(1-f_s)}{E^*}} \quad (2.46)$$

また、このとき $\bar{\sigma}_{ij} d\bar{\sigma}_{ij} = \bar{\sigma}_{11} d\bar{\sigma}_{11}$, $\bar{\sigma}_{jj} d\bar{\sigma}_{ii} = \bar{\sigma}_{11} d\bar{\sigma}_{11}$ であるので、これらの関係を式(2.45)に代入することにより、応力分担パラメータの値は、次のように表される。

$$b = \left(\frac{E_s}{E^*} \right)^{1/2} \quad (2.47)$$

(b) 体積弾性係数

等方応力状態($\bar{\sigma}=\bar{\sigma}_{11}=\bar{\sigma}_{22}=\bar{\sigma}_{33}$, $\bar{\sigma}_{12}=\bar{\sigma}_{23}=\bar{\sigma}_{13}=0$)において, $\bar{\epsilon}=\bar{\epsilon}_{11}=\bar{\epsilon}_{22}=\bar{\epsilon}_{33}$ とおくと, このときの混合体の応力増分—ひずみ増分関係は, 混合体の体積弾性係数 K を用いて, $d\bar{\sigma}=3Kd\bar{\epsilon}$ と表される. このときの応力条件を式(2.44) に代入すると混合体の体積弾性係数 K は, 次のように表される.

$$K = \frac{(b-1)f_s + 1}{\frac{f_s b}{K_s} + \frac{(1-f_s)}{K^*}} \quad (2.48)$$

ここに, K_s および K^* は, それぞれ介在物およびマトリックスの体積弾性係数であり, ヤング率およびポアソン比を用いると次式で表される.

$$K_s = \frac{E_s}{3(1-2\nu_s)}$$

$$K^* = \frac{E^*}{3(1-2\nu^*)}$$

また, このとき $\bar{\sigma}_{ij}d\bar{\sigma}_{ij} = 3\bar{\sigma}d\bar{\sigma}$, $\bar{\sigma}_{ij}d\bar{\sigma}_{ii} = 9\bar{\sigma}d\bar{\sigma}$ であるので, これらの関係を式(2.45) に代入すると, 応力分担パラメータの値は, 次のように表される.

$$\begin{aligned} b &= \left(\frac{E_s}{E^*} \frac{1-2\nu^*}{1-2\nu_s} \right)^{1/2} \\ &= \left(\frac{K_s}{K^*} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.49)$$

(c) せん断弾性係数

$\bar{\sigma}_{12} \neq 0$ で, 他のすべての応力成分が 0 の場合の混合体の応力増分—ひずみ増分関係は, 混合体のせん断弾性係数 G を用いて, $d\bar{\sigma}_{12} = 2Gd\bar{\epsilon}_{12}$ と表される. このときの応力条件を式(2.44) に代入すると混合体のせん断弾性係数 G は, 次のように表される.

$$G = \frac{(b-1)f_s + 1}{\frac{f_s b}{G_s} + \frac{(1-f_s)}{G^*}} \quad (2.50)$$

ここに, G_s および G^* は, それぞれ介在物およびマトリックスのせん断弾性係数であり, 次式で表される.

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu_s)}$$

$$G^* = \frac{E^*}{2(1+\nu^*)}$$

また、このとき $\bar{\sigma}_{ij} d\bar{\sigma}_{ij} = 2\bar{\sigma}_{12} d\bar{\sigma}_{12}$, $\bar{\sigma}_{jj} d\bar{\sigma}_{ii} = 0$ であるので、これらの関係を式(2.45) に代入すると、応力分担パラメータの値は、次のように表される。

$$\begin{aligned} b &= \left(\frac{E_s}{E^*} \frac{1+\nu^*}{1+\nu_s} \right)^{1/2} \\ &= \left(\frac{G_s}{G^*} \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.51)$$

2. 4. 2 計算結果と実験結果の比較

上述の各弾性係数の値とこれまでに提案されているいくつかの理論式および実験結果との比較を行い、その妥当性を検証する。

2. 2 節 の従来の研究で述べたように、混合体の内部のひずみが一定と考えたときの Voigt の式(混合体の体積弾性係数およびせん断弾性係数と介在物の体積含有率の関係)は、次のように表される。

$$K = f_s K_s + (1 - f_s) K^* \quad (2.52)$$

$$G = f_s G_s + (1 - f_s) G^* \quad (2.53)$$

一方、混合体内部の応力が一定と考えた Reuss の式は、次のように表される。

$$K = \frac{1}{\frac{f_s}{K_s} + \frac{(1-f_s)}{K^*}} \quad (2.54)$$

$$G = \frac{1}{\frac{f_s}{G_s} + \frac{(1-f_s)}{G^*}} \quad (2.55)$$

また、Hashin と Shtrikman は、混合体の体積弾性係数およびせん断弾性係数の上下界の値を、それぞれ次のように与えている。

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= K^* + \frac{f_s}{\frac{1}{K_s - K^*} + \frac{3(1-f_s)}{3K^* + 4G^*}} \\ K_2 &= K_s + \frac{1-f_s}{\frac{1}{K^* - K_s} + \frac{3f_s}{3K_s + 4G_s}} \end{aligned} \right\} \quad (2.56)$$

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= G^* + \frac{f_s}{\frac{1}{G_s - G^*} + \frac{6(K^* + 2G^*)(1-f_s)}{5G^*(3K^* + 4G^*)}} \\ G_2 &= G_s + \frac{1-f_s}{\frac{1}{G^* - G_s} + \frac{6(K_s + 2G_s)f_s}{5G_s(3K_s + 4G_s)}} \end{aligned} \right\} \quad (2.57)$$

ここで、 $K^* < K_s$, $G^* < G_s$ のとき、 $K_1 < K_2$, $G_1 < G_2$ である。

次に、炭化タングステンとコバルトの混合物の実験結果をもとに、提案された二種混合体の弾性係数の妥当性を検討する。これらの混合物の力学的性質は、すでに、Gurland²⁶⁾ および Nishimatsu と Gurland²⁷⁾ によって実験的に明らかにされている。実験に用いられた試料は、炭化タングステンとコバルトを様々な割合で混合した合金である。それらの材料のヤング率およびポアソン比は、それぞれ次の通りである。

$$E_s = 7.03 \times 10^5 \text{ MN/m}^2, \quad E^* = 2.07 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$$

$$\nu_s = 0.22, \quad \nu^* = 0.30$$

また、これらの材料の体積弾性係数およびせん断弾性係数を、 $K = E / \{3(1-2\nu)\}$ および $G = E / \{2(1+\nu)\}$ の関係から求めると、それぞれ次の通りである。

$$K_s = 4.18 \times 10^5 \text{ MN/m}^2, \quad K^* = 1.72 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$$

$$G_s = 2.88 \times 10^5 \text{ MN/m}^2, \quad G^* = 0.792 \times 10^5 \text{ MN/m}^2$$

式(2.46) および式(2.47) を用いて求めた混合体の体積弾性係数 K と炭化タングステンの体積含有率 f_s の関係を、図 2.5 に示す。比較のため、Voigt の式、Reuss の式および Hashin と Shtrikman の上下界の値も示している。なお、2.2節で述べた Eshelby の式は、介在物の含有率が大きくなると混合体の弾性係数の値を過大に評価するので、ここでは示していない。いずれの式においても、炭化タングステンの体積含有率 $f_s = 0$ および 100% の場合には、実験値を満足する。提案式による混合体の体積弾性係数の値は、

Hashin と Shtrikman が求めた上下界の間にある。また、式(2.48) および式(2.49) を用いて求めた混合体のせん断弾性係数 G と炭化タングステンの体積含有率 f_s の関係を、図 2.6 に示す。せん断弾性係数に対しても、提案式は、Hashin と Shtrikman の上下界のほぼ中間の値を与え、妥当な結果を示している。

次に、式(2.44) および式(2.45) を用いて求めた混合体のヤング率の値と Nishimatsu と Gurland の実験結果²⁷⁾ との比較を図 2.7 に示す。実験結果による混合体のヤング率の値は、炭化タングステンの体積含有率 f_s の増加とともに次第に大きくなる。また、これらの値は、Voigt と Reuss の式のほぼ中間にある。図中の実線で示されるように、提案式は、実験結果を精度よく表すことができる。

このように、2.3 節で誘導された混合体の応力—ひずみ関係は、等方弾性材料で構成される二種混合体の弾性係数の値を精度良く求めることができる。

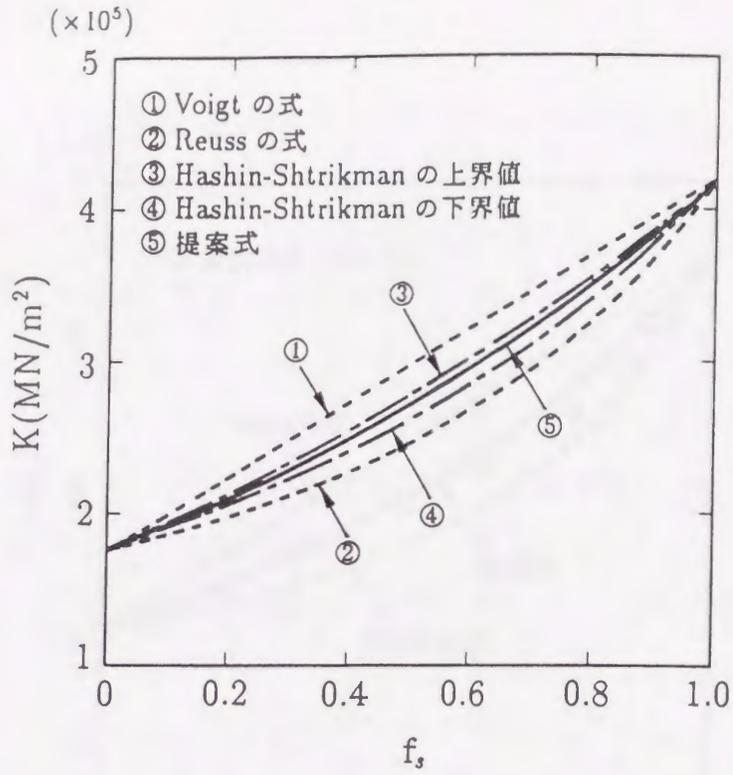


図 2.5 混合体の体積弾性係数 K と f_s の関係

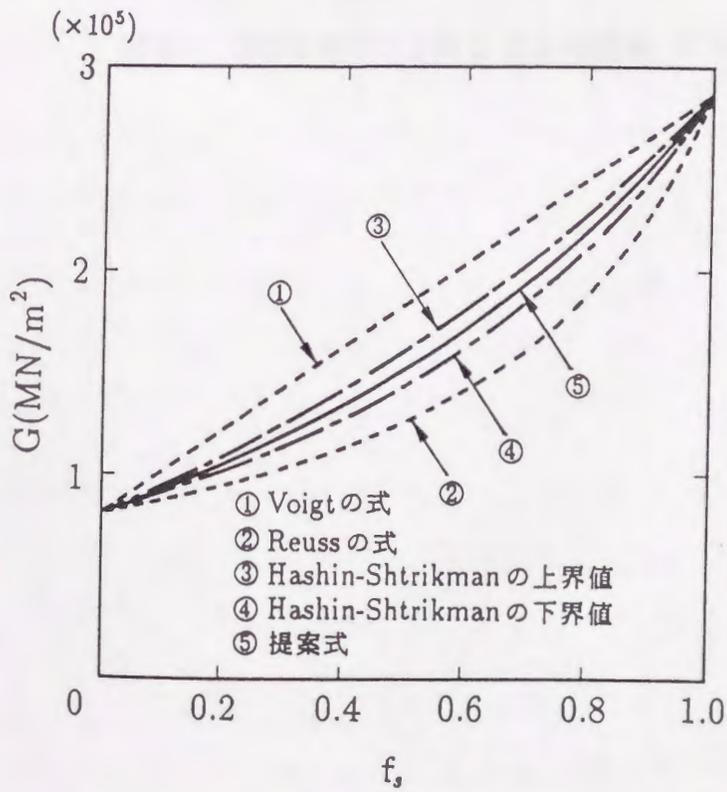


図 2.6 混合体のせん断弾性係数 G と f_s の関係

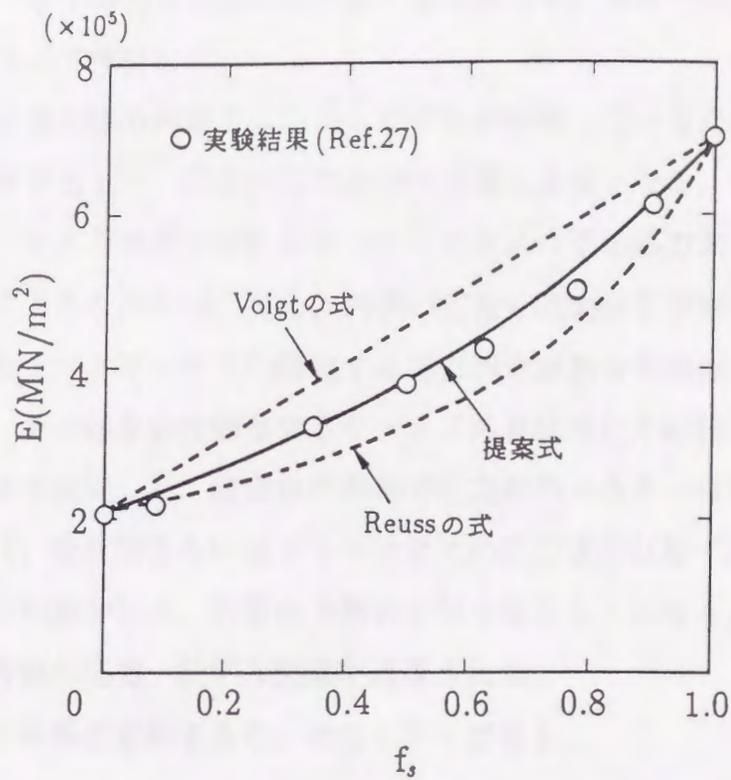


図 2.7 混合体のヤング率 E と f_s の関係

2. 5 結 論

中間土の応力-ひずみ関係を求めるための基礎として、本章では、二種混合体の応力-ひずみ関係について検討した。

微視的にみると混合体の内部では応力とひずみが分布しているため、混合体の応力-ひずみ関係を考察する上で、応力分布の評価は非常に重要となる。そのため、混合体の体積平均を考え、それらの値を介在物とマトリックスの平均応力および平均ひずみを用いて表した。このような表示は、混合体内部の応力分担割合を考察する上で有利である。このときの介在物とマトリックスに作用する応力の分担割合を求めるために新たなパラメータを導入し、その値を介在物とマトリックスの単位当たりの仕事量増分が等しいと仮定することにより決定した。混合体の内部で応力が均一あるいはひずみが一定であると考えた場合には、介在物あるいはマトリックスの応力またはひずみを過大に評価することになるが、この場合には、両者の中間的な値を取ることになる。以上のような考察をもとに二種混合体の応力-ひずみ関係が誘導された。

本章で得られた結果を要約すると、次のとおりである。

- 1) 混合体内部で応力が分布している場合、式(2.1) の体積平均で定義される混合体の平均応力は、混合体の表面に作用する応力と一致することを示した。
- 2) 混合体のひずみについても同様に、式(2.2) の体積平均で定義される混合体のひずみは、混合体の表面の変位で定義されるひずみと一致することを示した。
- 3) 混合体内部の応力分担割合を表す新たなパラメータを導入し、式(2.36) で示される二種混合体の応力増分-ひずみ増分関係を誘導した。このときの応力分担パラメータは、介在物とマトリックスの材料定数を用いて決定される。
- 4) 提案式を弾性体に適用することにより、等方弾性材料から成る二種混合体の各弾性係数（ヤング率、体積弾性係数およびせん断弾性係数）を求めた。これらは、いずれも介在物とマトリックスの弾性係数およびポアソン比を用いた簡単な式で表される。
- 5) 提案された混合体の各弾性係数の値は、混合体の弾性係数の上下界を理論的に求めた Hashin と shtrikman の式のほぼ中間にあり、妥当な結果が得られることを示

した。さらに、この提案式は、Nishimatsu と Gurland によって実験的に求められた炭化タングステンとコバルトの混合物のヤング率の値と良い一致を示すことを確かめた。

- 6) 提案された二種混合体の応力-ひずみ関係は、等方弾性材料で構成される混合体の弾性係数の値を精度良く求めることができる。このことは、混合体内部の応力分担割合を仕事量増分の考えを用いて評価する考え方の妥当性を示すものである。

参 考 文 献

- 1) 日本科学技術連盟編：複合材料シンポジウム，1968年。
- 2) Garg, S.K., Svalbonas, V. and Gurtman, G.A. : Analysis of structural composite Materials, Marcel dekker, INC., 1973.
- 3) 森田幹郎，金原 勳，福田 博：複合材料，日刊工業新聞社，1988年。
- 4) Mura, T. : Micromechanics of defects in solids, Martinus Nijhoff Publishers, 1982.
- 5) Voigt, W. : Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper, Annalen der Physik und Chemie, vol.38, pp.573~587, 1889.
- 6) Reuss, A. : Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, vol.9, pp.49~58, 1929.
- 7) Hill, R. : Elastic properties of reinforced solids : Some theoretical principles, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.11, pp.357~372, 1963.
- 8) Hasin, Z. : The elastic moduli of heterogeneous materials, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.29, pp.143~150, 1962.
- 9) Hasin, Z. and Shtrikman, S. : A variational approach to the theory of the elastic behaviour of polycrystals, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.10, pp.343~352, 1962.
- 10) Hasin, Z. and Shtrikman, S. : A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.11, pp.127~140, 1963.
- 11) Watt, J.P. and O'Connell, R.J. : An experimental investigation of the Hasin-Shtrikman bounds on two-phase aggregate elastic properties, Physics of the Earth and Planetary Interiors, No.21, pp.359~370, 1980.
- 12) Hashin, Z. : Analysis of composite materials, Journal of Applied Mechanics, Vol.50, pp.481~505, 1983.
- 13) Christensen, R.M. and Waals, F.M. : Effective stiffness of randomly oriented fiber

- composites, *Journal of Composite Materials*, Vol.6, pp.518~532, 1972.
- 14) Hasin, Z. : Theory of mechanical behavior of heterogeneous media, *Applied Mechanics Review*, Vol.17, pp.1~9, 1964.
 - 15) Adams, D.F. and Doner, D.R.: Transverse normal loading of a unidirectional composite, *Journal of Composite Materials*, Vol.1, pp.152~164, 1967.
 - 16) Haener, J. and Ashbaugh, N.: Three-dimensional stress distribution in a unidirectional composite, *Journal of Composite Materials*, Vol.1, pp.54~63, 1967.
 - 17) Moschovids, Z.A. and Mura, T. : Two-ellipsoidal inhomogeneities by the equivalent inclusion method, *ASME Journal of Applied Mechanics*, pp.847~852, 1975.
 - 18) Eshelby, J.D. : The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society, London*, Vol.A, No.241, pp.376~396, 1957.
 - 19) Hill, R. : A self-consistent mechanics of composite materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.13, pp.213~222, 1965.
 - 20) Hill, R. : Continuum micro-mechanics of elastoplastic polycrystals, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.13, pp.89~101, 1965.
 - 21) Hill, R. : The essential structure of constitutive laws for metal composites and polycrystals, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.15, pp.79~95, 1967.
 - 22) 岩熊哲夫・堀宗朗・森勉・村外志夫：複合材料の平均的な硬化係数と延性の評価，*構造工学シンポジウム*，1991年。
 - 23) 大嶺聖・落合英俊：異なる弾性係数を持つ二種混合体の応力-ひずみ関係，*九州大学工学集報*，第64巻，第6号，pp.525~532，1991年。
 - 24) S.Nemat-Nasser and M.Hori : Elastic solids with microdefects, *Micromechanics and Inhomogeneity : The Toshio Mura 65th Anniversary Volume* (eds G.JWeng, M.taya and H.Abe), Springer Verlag, pp.297~320, 1989.
 - 25) 大嶺聖・落合英俊：二種混合体の応力-ひずみ関係と混合土の一次元圧縮特性への適用，*土木学会論文集*，No.448/Ⅲ-19, pp.121~130，1992年。

- 26) Gurland, J. : Observations on the structure and sintering mechanism of cemented carbides, Transaction of the Metallurgical Society of AIME, Vol.215, pp.601~608, 1959.
- 27) Nishimatsu, C. and Gurland, J. : Experimental survey of the deformation of the hard-ductile two-phase alloy system Wc-co, Transaction of the American Society for Metals, Vol.52, pp.469~484, 1960.

第3章 中間土の骨組構造と応力-ひずみ関係の基本式

3.1 概説

粗粒子同士が互いに接触していない状態にある細粒分の卓越する中間土の力学特性は、細粒子と水から成るマトリックスの特性で支配されると考えることにより、その挙動をマトリックスの特性からある程度予測することができる¹⁾。しかしながら、細粒分含有率が減少すると粗粒子同士の接触割合が増加するので、その影響についても考慮しなければならない。したがって、このような中間土においては、第2章で述べた介在物がマトリックス中にランダムに分布している状態とは異なるため、二種混合体の応力-ひずみ関係を中間土に適用できるように拡張するためには、新たに土の構造を考察する必要がある。

土の構造は、土粒子の配列状態を表すものであり、土の変形挙動、つまり外力に対して土がどのように応答するのかに大きな影響を与える。砂と粘土では、粒径だけでなく土粒子の物理化学的特性の違いにより構造が大きく異なるため、粗粒子と細粒子が様々な割合で混ざった中間土はより複雑な構造を有すると考えられる。

本章では、中間土の構造と応力-ひずみ関係の基本式について考察する。各節ごとに内容を述べると、以下のとおりである。

まず、3.2節では、従来より提案されている構造モデルについて述べる。次いで、3.3節では、豊浦砂とカオリンを混合して作製した供試体断面の観察から、中間土の構造がどのような状態にあるのかを確かめ、間隙量の表示法を述べる。3.4節では、その構造を定量的に評価するために、確率論を援用して粗粒子同士の接触割合を求め、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率の算定を行う。さらに、3.5節では、土の構

造を考慮した中間土の応力-ひずみ関係の基本式を誘導する。この基本式は、第4章における中間土の圧縮特性および第5章における中間土の強度特性を明らかにするための基礎となるものである。

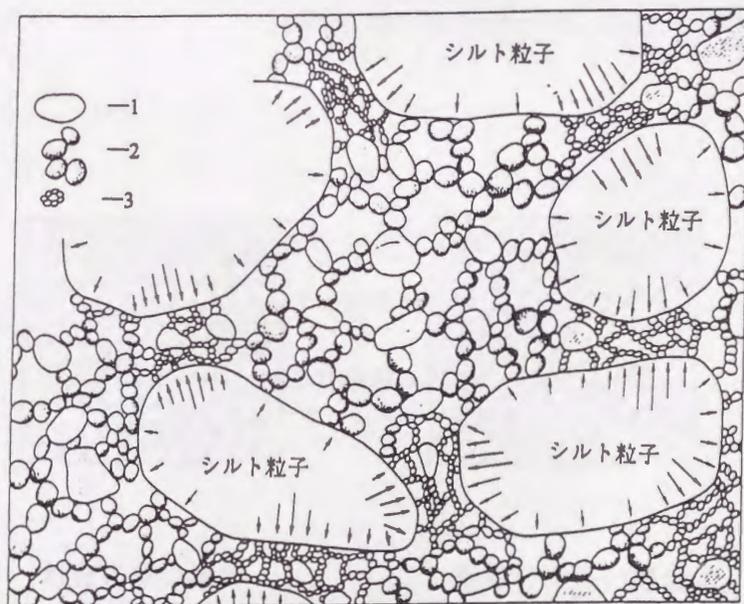
最後に、3.6節において本章で得られた結論を要約する。

3. 2 従来の構造モデル

粘性土の構造は、砂質土と異なり粘土粒子の集合体を考える必要がある。Terzaghi は、粘土粒子の集合体が凝固のさい互いに綿毛状に結合して集積する、いわゆる、綿毛構造を考えた。その後、Casagrande⁵⁾ は、Terzaghi の構造モデルを基に砂、シルトおよび粘土粒子を含む土の構造を提案した。このモデルでは、図 3.1 に示されるように、剛な砂粒子やシルト粒子が粘土粒子の集合体を通して互いにもたれかかって骨格のようなものを作り、その骨格の間隙には未圧密の粘土粒子が満たされている。

Terzaghi や Casagrande のモデルは、概念的なものであるが、最近では、土の微視的な構造の研究において、走査型電子顕微鏡が用いられており、土粒子の配列構造が直接観察できるようになっている。Collins と McGown⁶⁾ は、O'Brien⁷⁾ や Sides and Barden⁸⁾ によって提案された粘土の基本構造モデルを基に不攪乱の自然粘性土の構造について考察している。図 3.2 は、その一例を示したものである。図で示されるように、種々の大きさの土粒子で構成される自然粘性土の構造は、砂粒子やシルト粒子および粘土粒子の集合体であるペットの配列パターンによっていくつかのタイプに分類される。

一方、わが国では、鬼塚と吉武⁹⁾ および柴田¹⁰⁾ が電子顕微鏡観察により締固めた中間土



1—大きな粘土粒子、2—細粒粘土粒子の弱く圧縮された鎖、
3—細粒粘土粒子の強く圧縮された集合、

図 3.1 砂、シルトおよび粘土粒子を含む土の構造のモデル
(Casagrande⁵⁾ による)

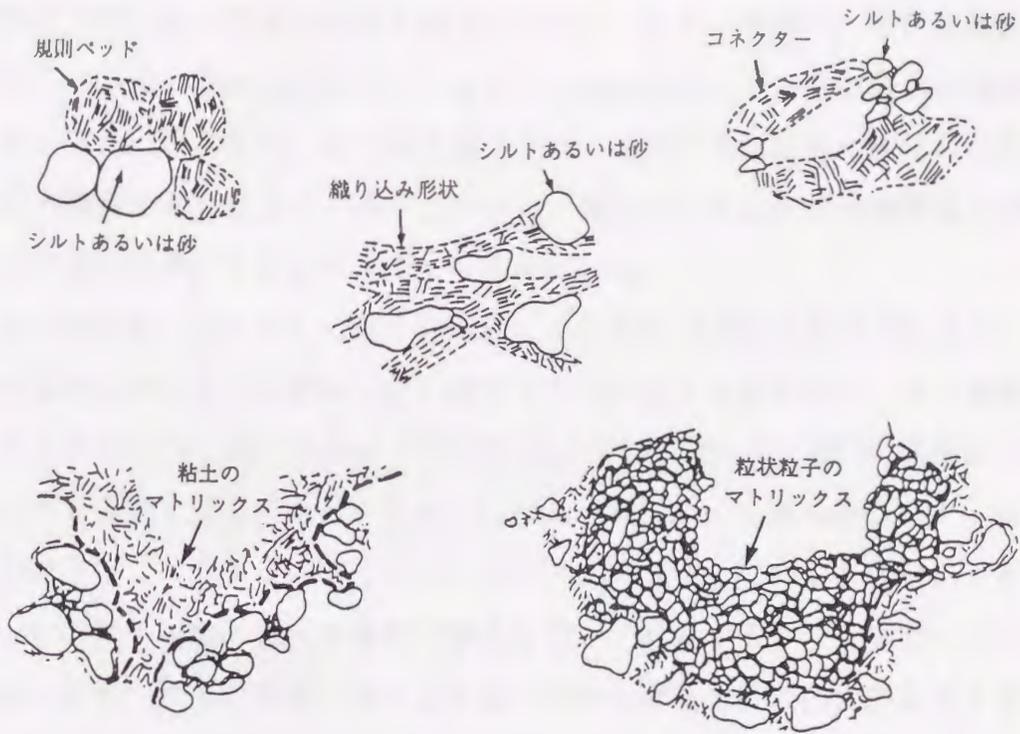


図 3.2 自然粘性土の構造モデル
(Collins and McGown[®] による)

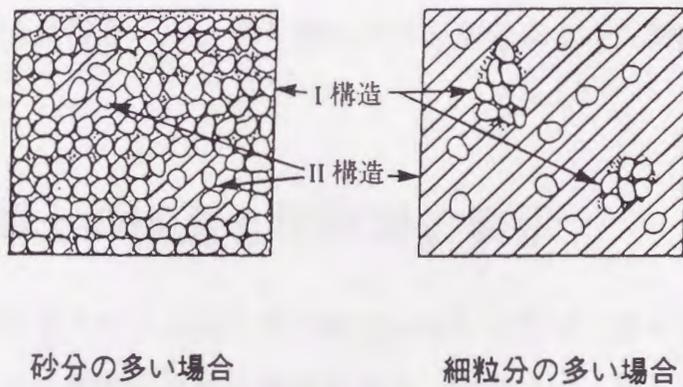


図 3.3 二つの基本構造を有する土の構造モデル
(柴田¹⁰⁾ による)

の構造について考察している。鬼塚と吉武は、砂と粘土を混合した中間土の圧縮および強度異方性が締固め方法によって異なることを明らかにし、その原因として砂粒子と粘土粒子の配列方向の違いが異なる点を指摘している。また、柴田は、供試体断面の観察から、砂粒子の骨格と細粒子を主体とする二つの基本構造を有する中間土の構造モデルを提案している¹¹⁾。図 3.3 は、その基本構造を基に砂分の多い場合と細粒分の多い場合の中間土の土構造を示したものである。さらに、柴田は、これらの基本構造の混合比率を締固めの試験の結果から算定することも試みている。

土の構造を視覚的に捉えるのに電子顕微鏡による観察は非常に有効であるが、その観察結果を定量的に評価する手法は十分に確立されているとは言えない。土の構造を定量的に評価する手法としては、Lafeber の相対的粒子接触を用いる方法¹²⁾や間接的ではあるが間隙径分布を測定する方法などがある。Lafeber は、いくつかの構造パターンの中で、ある成分の粒子が二次元あるいは三次元にランダムに分布していると仮定し、その多成分パターン中の粒子接触の頻度を確率の考えを用いて計算する手法を提案している。この方法を用いると、種々の構造パターンを持つ土の土構造を近似的に表現することができ、さらに、実際に観測して得られる粒子間接触の頻度と比較することにより個々の成分の分布を定量的に求めることができる。一方、間隙径分布を測定する方法は、土の保水性や透水性などを間隙構造の側面から論じられるという利点がある。Bengochea¹³⁾ および Juang and Holtz¹⁴⁾ は、中間土の間隙径分布が二つのピークを有する形状を呈し、第一のピークを示す大きい間隙径の頻度は、粘土含有率の増加に伴い減少すると報告している。また、山口と池永¹⁵⁾ は、粒度組成の異なる種々の締固めた中間土を用いて間隙径を測定し、粗粒土は混合する土質の種類や混合割合によって間隙構造が支配されることを確かめている。

3. 3 中間土の構造と間隙量の表示

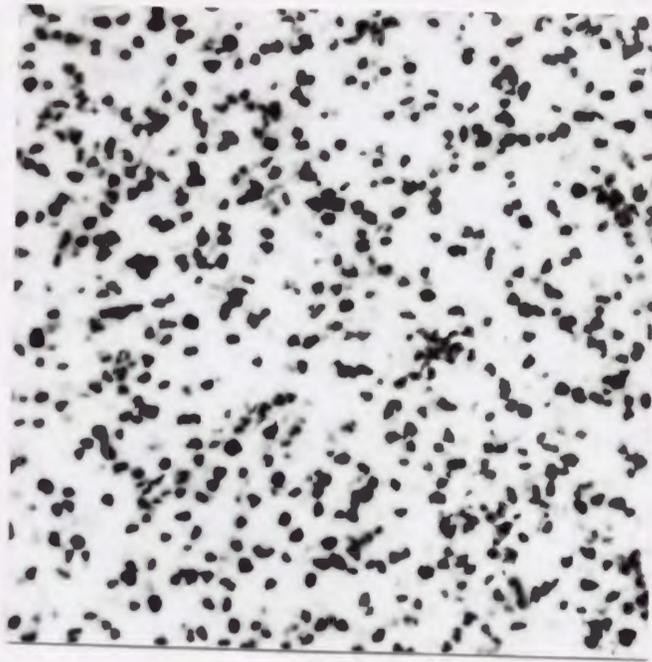
3. 2 節で述べたように、不攪乱土の構造はかなり複雑で様々なタイプに分類されるが、締固めた中間土の構造は比較的単純である。本節では、練り返した中間土の供試体断面の観察結果をもとに、中間土の構造と間隙量の表示法について述べる。

3. 3. 1 土の構造の微視的観察

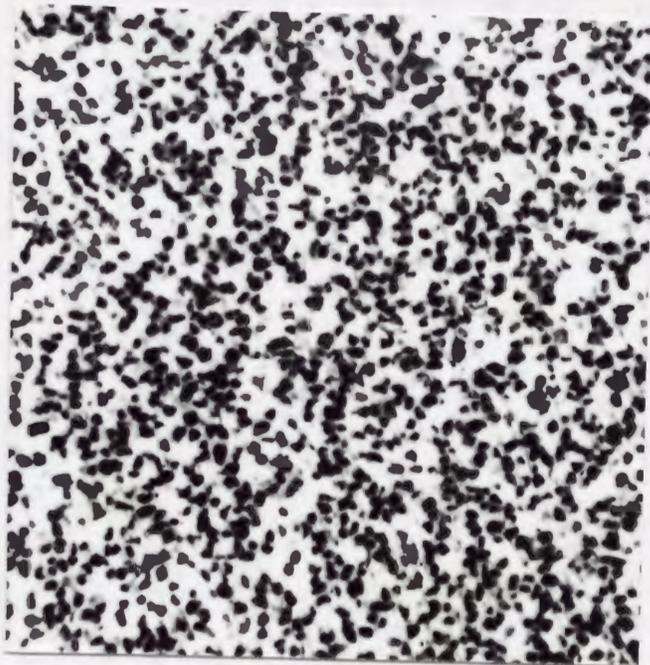
中間土の構造を観察するために、粒径の大きく異なる豊浦砂とカオリンの混合試料をスラリー状態で十分練り返し、圧密圧力 $0.157\text{MN/m}^2(1.6\text{kgf/cm}^2)$ の下で一次元圧密させたときの供試体の水平断面を写真 3.1 に示す。(a)は細粒分含有率 $F=80\%$ 、(b)は $F=60\%$ の場合を示したものである。中間土内の粗粒子の分布状態を明瞭にするために、豊浦砂は墨で色付したものをを用いた。土粒子配列の微視的な観察結果から、練り返した中間土は、次のような構造を持つと考えられる。

- (1) 中間土内には粗粒子同士が互いに接触しているものと接触していないものが混在し、これらが比較的ランダムに分布している。
- (2) 細粒分含有率の減少とともに互いに接触している粗粒子の割合が増え、次第に粗粒子骨格が形成されていく。
- (3) 中間土内に占める粗粒子骨格およびマトリックスの体積の割合は、いずれも細粒分含有率に依存する。

これらのことから、中間土の構造は、粗粒子骨格とマトリックスがある割合で混在している状態にあることが確認される。また、粗粒子骨格の中にも細粒子が含まれていることも認められる。このような中間土の構成模式図は図 3.4 のように示すことができる。すなわち、練り返した中間土は、電子顕微鏡によって観察された締固めた中間土¹⁰⁾ と類似した構造を有することが示される。



(a) $F=80\%$



(b) $F=60\%$

写真 3.1 中間土の構造

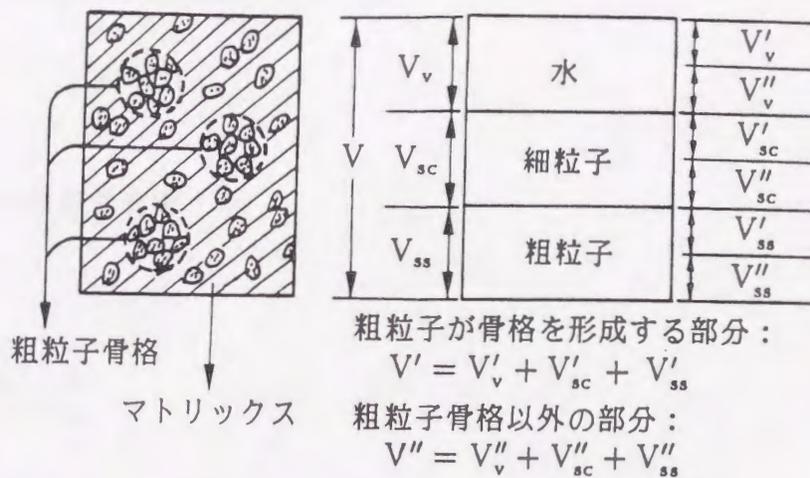


図3.4 中間土の構成模式図

3. 3. 2 間隙量の表示¹⁶⁾

3. 3. 1で示した中間土の土構造を定量的に表すために、粗粒子骨格とマトリックスに着目して、次のような間隙量を導入する。なお、下付き添字 v, sc, ss はそれぞれ中間土内の間隙(水)、細粒子および粗粒子を、さらに、添字の ' は粗粒子同士が互いに接触し骨格を形成している部分を、添字の '' は、それ以外の部分を表し、また、下付き添字 s, c はそれぞれ中間土内の粗粒子骨格およびマトリックスを表すものとする。

i)粗粒子骨格に含まれる細粒子も間隙と見なしたときの間隙比(粗粒子骨格の間比)：

$$e_s = \frac{(V'_v + V'_{sc})}{V'_{ss}} \quad (3.1)$$

ここで、 V'_v 、 V'_{sc} および V'_{ss} は、それぞれ粗粒子骨格における間隙、細粒子および粗粒子の体積である。

ii)マトリックスの間隙比：

$$e_c = \frac{V''_v}{V''_{sc}} \quad (3.2)$$

ここで、 V''_v および V''_{sc} は、それぞれマトリックスにおける間隙および細粒子の体積である。

iii)粗粒子骨格中の細粒子と粗粒子の体積比：

$$r = \frac{V'_{sc}}{V'_{ss}} \quad (3.3)$$

iv)粗粒子骨格の体積含有率：

$$R = \frac{V'}{V} = \frac{V'_v + V''_{sc} + V''_{ss}}{V_v + V_{sc} + V_{ss}} \quad (3.4)$$

ここで、 V' および V は、それぞれ粗粒子骨格および中間土の体積、 V_v 、 V_{sc} および V_{ss} は、それぞれ中間土における空隙、細粒子および粗粒子の体積である。

v)細粒分含有率：

体積百分率を用いた場合

$$F = \frac{V_{sc}}{V_{sc} + V_{ss}} \times 100(\%) \quad (3.5)$$

質量百分率を用いた場合

$$F' = \frac{M_{sc}}{M_{sc} + M_{ss}} \times 100(\%) \quad (3.6)$$

ここで、 M_{sc} および M_{ss} は、それぞれ中間土における細粒子および粗粒子の質量である。粗粒子および細粒子の密度を用いると、体積百分率および質量百分率を用いた場合の細粒分含有率 F と F' の関係は、次のように表される。

$$F = \frac{1}{1 + \left(\frac{100}{F'} - 1 \right) \frac{\rho_{sc}}{\rho_{ss}}} \quad (3.7)$$

ここで、 ρ_{sc} および ρ_{ss} は、それぞれ粗粒子および細粒子の密度である。式(3.7)において、 $\rho_{sc} = \rho_{ss}$ の場合には、 $F = F'$ となる。有機質土を含まない砂および粘土の土粒子の密度は一般に $\rho = 2.60 \sim 2.75 \text{g/cm}^3$ であり、 ρ_{sc} と ρ_{ss} に大きな差は見られないため、 F と F' を特に使い分ける必要はないようである。ここでは、式の展開上有利な F を用いること

とする。

vi)マトリックスの体積含有率：

$$\begin{aligned} f_c &= \frac{V_v'' + V_{sc}''}{V} \\ &= \frac{1+e_c}{1+e_s} \frac{1+e_s - R\{e_s + r(100/F - 1)\}}{100/F + e_c} \end{aligned} \quad (3.8)$$

すなわち、 f_c は、 e_s 、 e_c 、 r 、 R 、 f の5個のパラメータを用いて表される。

vii)中間土の間隙比：

式(3.1)～(3.5) および (3.8) を用いると、中間土の間隙比は、次のように表される。

$$\begin{aligned} e &= \frac{V_v}{V_{ss} + V_{sc}} \\ &= \frac{F/100}{\frac{r}{1+e_s} R + \frac{1}{1+e_s} f_c} \end{aligned} \quad (3.9)$$

式(3.9) の分母は粗粒子骨格中に含まれる細粒子の割合($=r/(1+e_s)$)およびマトリックスに含まれる細粒子の割合($=1/(1+e_c)$)にそれぞれの体積含有率 R および f_c を掛けた値(体積に関する平均値)で表されている。このことは、中間土の間隙比が粗粒子骨格とマトリックスの間隙比およびそれらの体積含有率を評価することによって求められることを意味している。

3. 4 粗粒子同士の間隙割合の評価¹⁷⁾

3. 3節では、土構造の微視的観察に基づき、間隙量の表示を行い、中間土の間隙比が粗粒子骨格とマトリックスの間隙比およびそれらの体積含有率を用いて表されることを示した。本節では、粗粒子同士の間隙割合を確率論を援用して求め、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率の算定を行う。

3. 4. 1 粗粒子同士の間隙割合の評価

3. 3節で述べたように、中間土の構造は、粗粒子が互いに接触しているものと接触していないものが混在している状態にあるが、このときの粗粒子同士の間隙状態をモデ

ル化するために、次の仮定を用いる。

(1) 供試体断面における粗粒子は、均等径の円で表される。

(2) 粗粒子がある位置に存在するか存在しないかという確率は、マトリックスの体積含有率によって決定される。

このとき、粗粒子は中間土内でランダムに分布しているものとする。このような仮定の下で粗粒子同士の接触割合を評価するために、図 3.5 で示されるような一つの粗粒子を中心に、6個の円で囲まれた領域を考える。図中の黒い部分は粗粒子であり、それ以外の部分はマトリックスを表す。また、中心にある粗粒子が接触することのできる粗粒子の個数は、最大6個である。このとき、粗粒子の配置が二項分布に従うものとする、任意の位置に粗粒子が入る確率は中間土内に占める粗粒子の体積含有率 $1-f_c$ に等しく、また、マトリックスである確率は、マトリックスの体積含有率 f_c に等しい。つまり、ある特定の n 個の部分がいずれも粗粒子である確率は、 $(1-f_c)^n$ であり、それ以外の $7-n$ 個の部分がいずれもマトリックスである確率は f_c^{7-n} と表される。したがって、 n 個の粗粒子が互いに接触する確率は、次のように表される。

$$P_n = C_n f_c^{7-n} (1-f_c)^n \quad (3.10)$$

ここで、 C_n は、粗粒子同士が n 個接触するときの組合せ数を表す。この C_n の値を求めするために、三個以上の粗粒子が少なくとも互いに二点以上で接触している場合を粗粒子が骨格を形成している状態にあると考える。図 3.6 は、このときの粗粒子同士の接触の例を示したものである。これより、 n 個の粗粒子が互いに接触し骨格を形成するときの組み合せ数 C_n は、次のように表される。

$$\left. \begin{array}{l} C_3 = 6 \\ C_4 = 18 \\ C_5 = 15 \\ C_6 = 6 \\ C_7 = 1 \end{array} \right\} \quad (3.11)$$

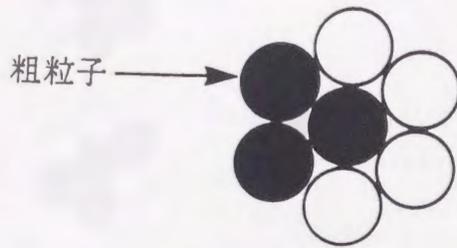


図 3.5 粗粒子同士の接触の評価

式(3.10)における粗粒子同士の接触確率 P_n とマトリックスの体積含有率 f_c の関係を図 3.7 に示す。図は、 n 個の粗粒子が接触するときの確率分布を表しており、このときの粗粒子同士の接触分布は、 n の増加とともにそのピークは次第に左側へ移動していく。つまり、マトリックスの体積含有率が小さくなるほど接触数の大きい粗粒子骨格の割合が増えることを示している。

接触個数

組み合わせ数

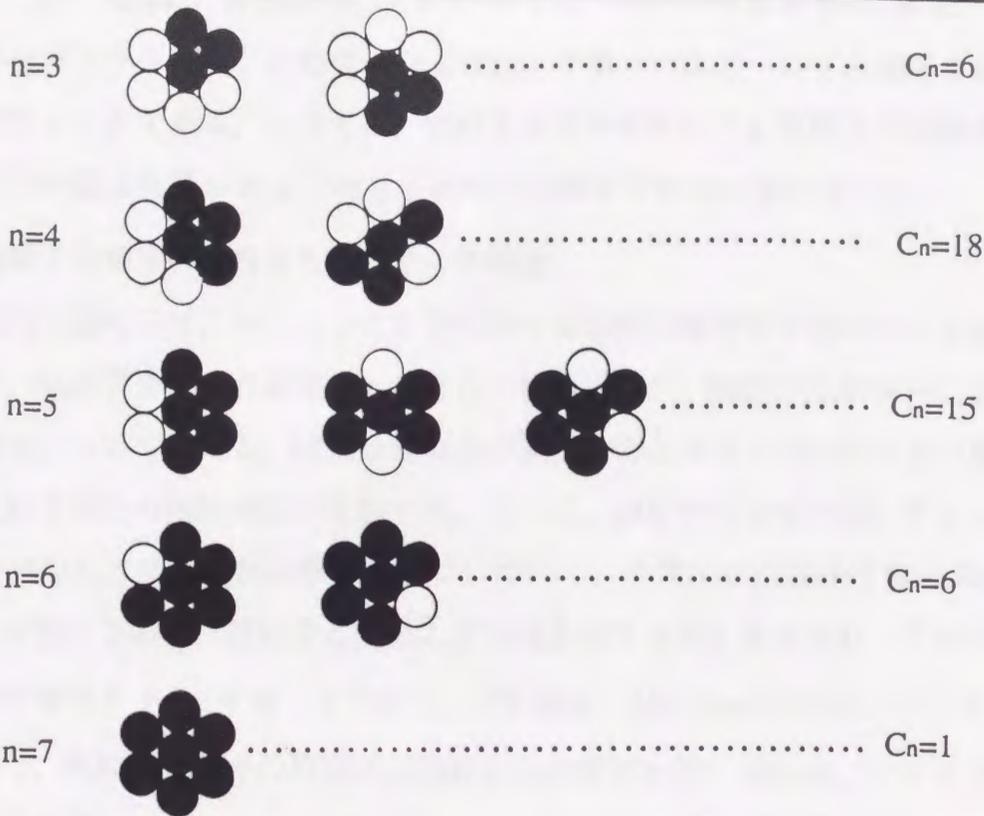


図 3.6 粗粒子同士の接触の例

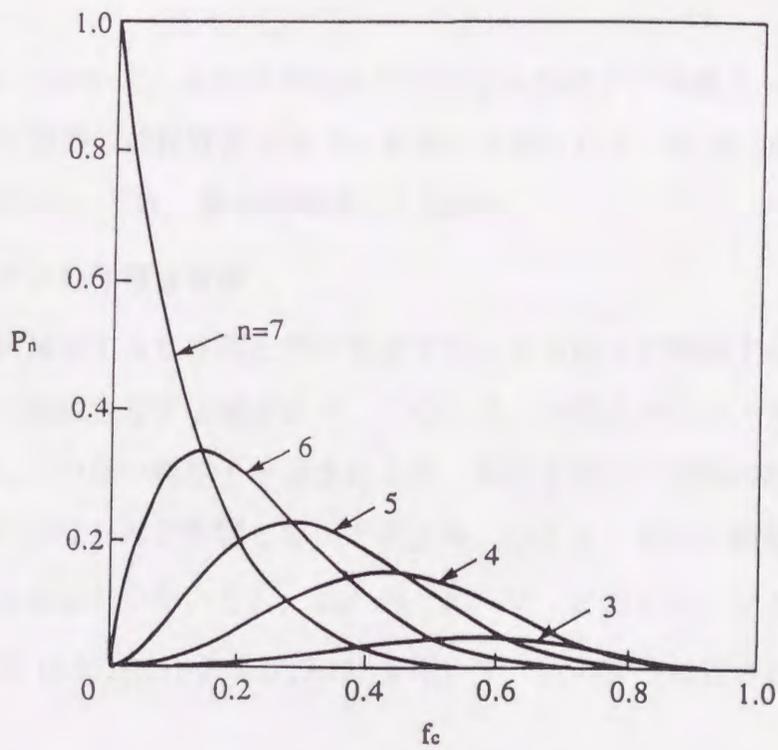


図 3.7 粗粒子同士の接触確率 P_n とマトリックスの体積含有率 f_c の関係

3. 4. 2 粗粒子骨格およびマトリックスの体積含有率の算定

粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率は、中間土の応力-ひずみ関係を求める上で重要なパラメータである。ここでは、粗粒子骨格中の細粒子と粗粒子の体積比 r 、マトリックスの体積含有率 f_c および粗粒子骨格の体積含有率 R の算定を行う。

(a) 粗粒子骨格中の粗粒子と細粒子の体積比

中間土内の細粒子は、マトリックスを形成する以外に粗粒子骨格の中にも含まれる。ここでは、粗粒子骨格中の細粒子と粗粒子の体積比 r が、細粒分含有率 F によらず一定である場合について考える。細粒分含有率が減少すると中間土内の粗粒子の量が増え、次第に粗粒子同士の接触割合が増加する。さらに、細粒分含有率が減少すると中間土が粗粒子骨格のみで構成される状態に近づいていく。中間土が粗粒子骨格のみ ($R=1$) で構成される状態になると、粗粒子と類似した特性を示すものと考えられ、このときの境界の細粒分含有率を F_r とする。すなわち、この場合、 $V_{sc}'=V_{sc}(V_{sc}'=0)$ 、 $V_{ss}''=V_{ss}(V_{ss}''=0)$ であるので、粗粒子骨格中の粗粒子と細粒子の体積比 r は、式(3.4)、(3.5) より、次のように求められる。

$$r = \frac{1}{100/F_r - 1} \quad (3.12)$$

すなわち、 $F \geq F_r$ において、粗粒子骨格中の粗粒子と細粒子の体積比 r は、粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率 F_r を用いて表される。なお、このときのパラメータ F_r の決定法については、第4章で詳しく述べる。

(b) マトリックスの体積含有率

細粒分含有率が減少すると中間土内の粗粒子の占める割合が増加するので、それに伴いマトリックスの体積含有率は減少する。このとき、中間土内には、互いに接触している粗粒子と接触していない粗粒子が含まれるが、粗粒子同士の接触の程度はマトリックスの体積含有率にはほとんど影響しないと考える。つまり、互いに接触していない粗粒子の数は無視できるほど少ないとし、 $V_{ss}''=0$ 、 $V_{ss}'=V'$ とおくと、マトリックスの体積含有率は、式(3.2)、(3.3)、(3.5) および(3.12) を用いて、次のように表される。

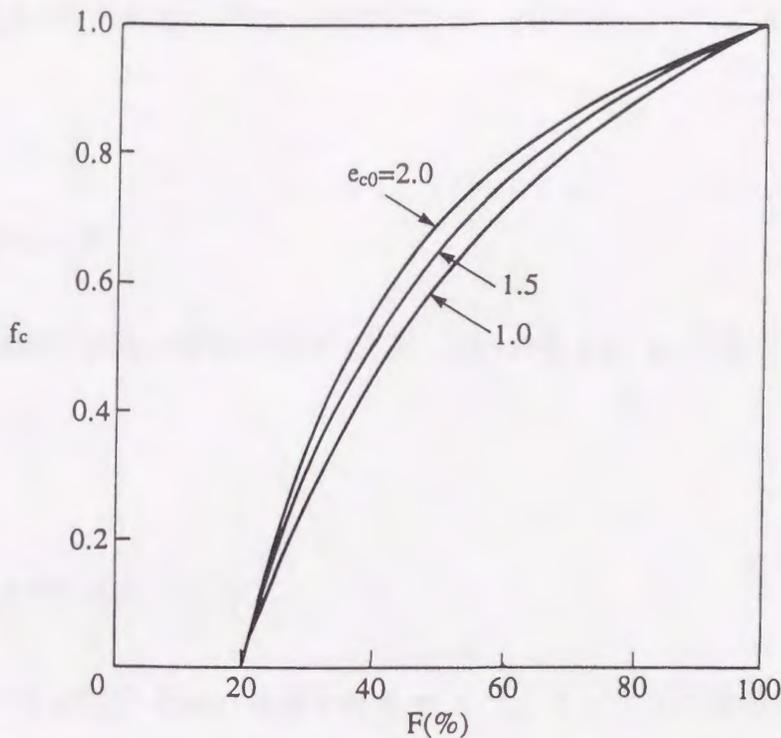


図 3.8 マトリックスの体積含有率と細粒分含有率の関係

$$f_c = 1 - \frac{1}{1 + (1 + e_{c0}) \left(\frac{1}{100/F - 1} - \frac{1}{100/F_r - 1} \right)} \quad (3.13)$$

ここで、 e_{c0} は $F=100\%$ の場合の間隙比であり、マトリックスの間隙比 e_c が近似的に e_{c0} と等しいとした。

式(3.13)におけるマトリックスの体積含有率 f_c と細粒分含有率 F の関係を図 3.8 に示す。 f_c は同一の e_{c0} において、 F が大きいほど大きな値を取り、 $F=F_r$ の場合には $f_c=0$ 、 $F=100\%$ の場合には $f_c=1$ となる。また、同一の細粒分含有率において、 f_c は e_{c0} が小さいほど小さな値を取る。このことは、同じ細粒分含有率の場合でも、圧密圧力が増加し e_{c0} が小さくなると、 f_c が、小さくなることを意味している。

(c) 粗粒子骨格の体積含有率

3.4.1では、いくつかの仮定の下で粗粒子同士の接触確率を求めた。ここでは、その考え方に基づいて粗粒子骨格の体積含有率の算定を行う。

互いに接触している粗粒子の中で、 n 個の粗粒子が接触している状態にある粗粒子骨格の体積含有率を R_n とする。このとき、 R_n は、図 3.5 の領域で n 個の粗粒子が占める

割合(=n/7)に式(3.10)の粗粒子同士の接触確率 P_n を掛けることにより、次のように表される。

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{n}{7} P_n \\ &= \frac{n}{7} C_n f_c^{7-n} (1-f_c)^n \end{aligned} \quad (3.14)$$

したがって、粗粒子骨格の体積含有率 R は、 $n \geq 3$ の場合の R_n の和として、次式のように求められる。

$$\begin{aligned} R &= \sum_{n=3}^7 R_n \\ &= \sum_{n=3}^7 \frac{n}{7} C_n f_c^{7-n} (1-f_c)^n \end{aligned} \quad (3.15)$$

式(3.15)における粗粒子骨格の体積含有率 R とマトリックスの体積含有率 f_c の関係を図3.9に示す。 R は、 f_c の減少に伴い次第に増加し、 $f_c=1$ のとき $R=0$ 、 $f_c=0$ のとき $R=1$ となる。このような R と f_c の関係は、図に示すように、次の簡単な二次関数で近似することができる。

$$R = (1-f_c)^2 \quad (3.16)$$

また、式(3.16)に式(3.13)のマトリックスの体積含有率を代入すると、次式のように任意の細粒分含有率に対する粗粒子骨格の体積含有率 R が求められる。

$$R = \frac{1}{\left\{ 1 + (1+e_{c0}) \left(\frac{1}{100/F-1} - \frac{1}{100/F_r-1} \right) \right\}^2} \quad (3.16)'$$

式(3.16)の関係を満足するようにランダムに配置した粗粒子の分布状態の例を図3.10に示す。図(a)および(b)は、それぞれ写真3.1(a)の $F=80\%$ および (b) の $F=60\%$ の場合に相当する。図は、細粒分含有率が小さいほど粗粒子同士の接触割合が増加する傾向を示しており、近似的に粗粒子同士の接触の分布状態を表すことができる。

なお、Lafeber¹⁸⁾ は、土の構造を定量的に評価するために、粗粒子同士の接触頻度を確率の考えを用いて算定し、実際に測定した値との比較を行っているが、粗粒子骨格の体積含有率については述べていない。

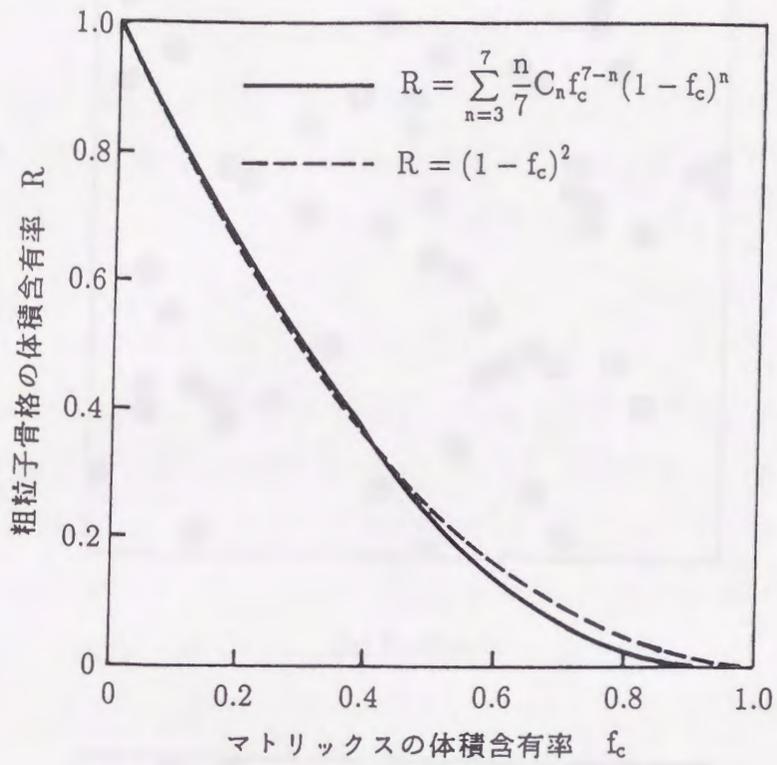
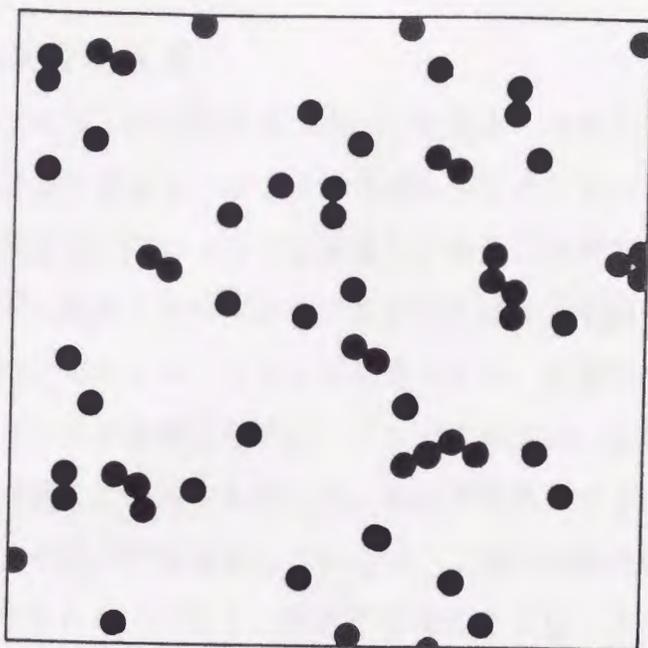
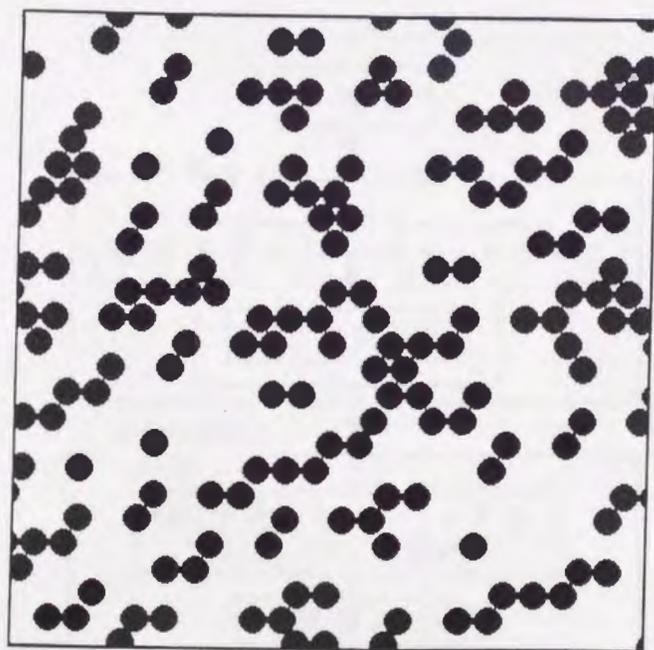


図 3.9 粗粒子骨格の体積含有率とマトリックスの体積含有率の関係



(a) $F=80\%$



(b) $F=60\%$

図 3.10 粗粒子の分布状態の例

3. 5 中間土の応力-ひずみ関係の基本式

3. 5. 1 基本的な考え方

3. 3節で述べたように、供試体断面の微視的観察から中間土は粗粒子骨格とマトリックスがある割合で混在する構造を有することが示した。このような構造を考慮し、第2章で述べた二種混合体の応力-ひずみ関係を中間土に適用できるように拡張する。

中間土の応力-ひずみ関係を求めるための基本的な考え方を図 3.11 に示す。まず、中間土を構成する粗粒子骨格とマトリックスに着目する。任意の細粒分含有率に対する粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率は、それぞれ式(3.13) および式(3.16)' より算定される。このとき、中間土に作用する応力は、粗粒子骨格とマトリックスで分担されるものとする。このときの応力分担割合については、二種混合体の場合と同様に仕事量増分の考えを用いて評価される。つまり、粗粒子骨格とマトリックスの材料特性から、応力分担パラメータが決定される。さらに、粗粒子骨格とマトリックスの応力に対応するそれぞれのひずみを求め、その平均値として、中間土の応力-ひずみ関係が誘導される。

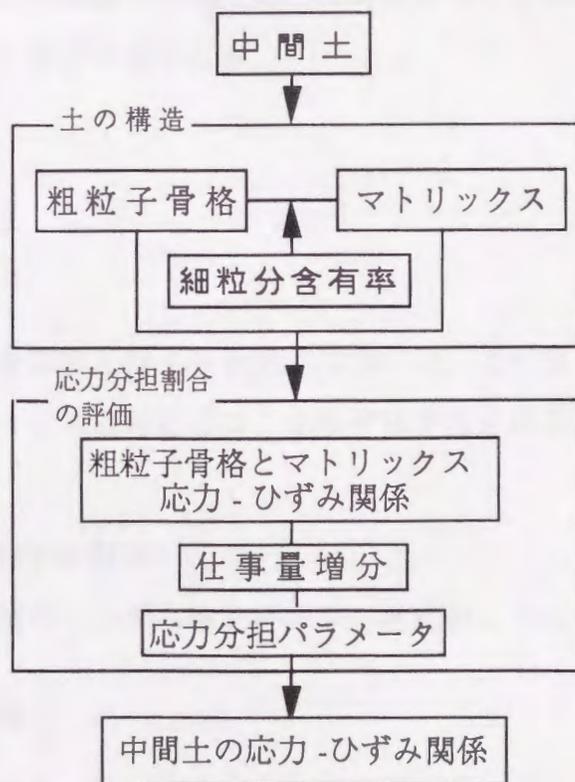


図3.11 中間土の応力-ひずみ関係を求めるための基本的な考え方

したがって、任意の細粒分含有率を持つ中間土の応力-ひずみ関係が、粗粒子骨格とマトリックスの材料特性を用いて求められる。

3. 5. 2 応力-ひずみ関係の基本式¹⁹⁾

土の応力-ひずみ特性を考察する場合、土要素に作用する応力を偏差成分と等方成分に分けると、圧密やダイレイタンスーといった現象が理解し易くなる。ここでは、この点を考慮し、三軸圧縮状態における中間土の応力-ひずみ関係の基本式について考察する。

(a) 応力とひずみのパラメータ

三軸圧縮状態で、偏差応力成分と等方応力成分は、それぞれ次の軸差応力および平均主応力で表される。

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.17)$$

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (3.18)$$

式(3.17),(3.18) の軸差応力および平均主応力に対応するひずみ増分は、次のせん断ひずみ増分および体積ひずみ増分で表される。

$$d\gamma = \frac{2}{3} (d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3) \quad (3.19)$$

$$dv = d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3 \quad (3.20)$$

なお、中間土の平均的な応力とひずみを表す場合には、上付きバーを用いる。また、粗粒子骨格およびマトリックスに対しては、それぞれ下付き添字 s および上付き添字 * を用いて表す。

(b) 中間土の応力-ひずみ関係

まず、中間土の応力増分-ひずみ増分関係が、次式のように表されるものとする。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma} \\ d\bar{v} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (3.21)$$

ここで、 $[\]$ は、 2×2 の行列を表し、 D は、中間土の材料特性によって決まる係数である。式(3.21)における $[D]$ の値を以下のように算定する。

粗粒子骨格およびマトリックスの応力増分—ひずみ増分関係は、式(3.21)と同様にそれぞれ次式のように表されるものとする。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}_s \\ d\bar{v}_s \end{Bmatrix} = [D_s] \begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}^* \\ d\bar{v}^* \end{Bmatrix} = [D^*] \begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} \quad (3.23)$$

ここで、 $[D_s]$ および $[D^*]$ は、それぞれ粗粒子骨格およびマトリックスの材料特性によって決まる係数である。

また、中間土に作用する主応力増分および主ひずみ増分は、混合体の場合と同様に体積に関する平均値を用いると、それぞれ次のように表される。

$$d\bar{\sigma}_i = R d\bar{\sigma}_{si} + (1 - R) d\bar{\sigma}_i^* \quad (3.24)$$

$$d\bar{\epsilon}_i = R d\bar{\epsilon}_{si} + f_c d\bar{\epsilon}_i^* \quad (3.25)$$

ここで、 $i=1,2,3$ である。

なお、式(3.24)の右辺第二項を $1-R$ としたのは、マトリックス中に含まれる互いに接触していない粗粒子にマトリックスと同じ応力が作用しているものと考えたことによる。また、式(3.25)の右辺第二項をマトリックスの体積含有率 f_c としたのは、マトリックス中の粗粒子が剛体で、変形がすべてマトリックス部分で受け持たれると考えたことによる。

式(3.24)を用いると、中間土の軸差応力増分および平均主応力増分は、それぞれ次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} = R \begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} + (1 - R) \begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

このとき、第2章で導入した応力分担パラメータ b を用いると、軸差応力と平均主応力増分の関係は、次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} = b \begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} \quad (3.27)$$

式(3.26) と式(3.27) を連立させると、粗粒子骨格およびマトリックスの軸差応力増分と平均主応力増分は、次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{q}_s \\ d\bar{p}_s \end{Bmatrix} = \frac{b}{(b-1)R+1} \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\begin{Bmatrix} d\bar{q}^* \\ d\bar{p}^* \end{Bmatrix} = \frac{1}{(b-1)R+1} \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

すなわち、粗粒子骨格およびマトリックスの応力増分は、応力分担パラメータ b と粗粒子骨格の体積含有率 R を用いて表される。なお、式(3.28) および式(3.29) は、 $R=1$ の粗粒子骨格のみの場合、 $d\bar{q}_s=d\bar{q}$ 、 $d\bar{p}_s=d\bar{p}$ となり、 $R=0$ のマトリックスのみの場合、 $d\bar{q}^*=d\bar{q}$ 、 $d\bar{p}^*=d\bar{p}$ となる。

さらに、中間土のせん断ひずみ増分および体積ひずみ増分は、式(3.25) より、それぞれ次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma} \\ d\bar{v} \end{Bmatrix} = R \begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}_s \\ d\bar{v}_s \end{Bmatrix} + f_c \begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}^* \\ d\bar{v}^* \end{Bmatrix} \quad (3.30)$$

このときの粗粒子骨格およびマトリックスのせん断ひずみ増分と体積ひずみ増分は、式(3.22) および式(3.23) に、それぞれ式(3.28) および式(3.29) を代入することにより、次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}_s \\ d\bar{v}_s \end{Bmatrix} = \frac{b}{(b-1)R+1} [D_s] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}^* \\ d\bar{v}^* \end{Bmatrix} = \frac{1}{(b-1)R+1} [D^*] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (3.32)$$

式(3.30) で示されるように、中間土のひずみ増分は、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率に関する平均値で表される。したがって、中間土の応力増分-ひずみ増分関係は、式(3.30) に式(3.31), (3.32) を代入することにより、次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} d\bar{\gamma} \\ d\bar{v} \end{Bmatrix} = \frac{bR[D^*] + f_c[D^*]}{(b-1)R+1} \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (3.33)$$

すなわち、中間土の応力-ひずみ関係は、粗粒子骨格とマトリックスの材料特性を用いて表される。

(c) 応力分担パラメータの決定

式(3.33) における応力分担パラメータ b を、二種混合体の場合と同様に仕事量増分の考え方を用いて以下のように決定する。

ある応力状態で中間土にひずみ増分が生じたときの粗粒子骨格およびマトリックスの単位体積当たりの仕事量増分は、それぞれ次のように表される。

$$\begin{aligned} dW_s &= \bar{q}_s d\bar{\gamma}_s + \bar{p}_s d\bar{v}_s \\ &= \{ \bar{q}_s \quad \bar{p}_s \} \begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}_s \\ d\bar{v}_s \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned} dW^* &= \bar{q}^* d\bar{\gamma}^* + \bar{p}^* d\bar{v}^* \\ &= \{ \bar{q}^* \quad \bar{p}^* \} \begin{Bmatrix} d\bar{\gamma}^* \\ d\bar{v}^* \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (3.35)$$

さらに、式(3.34), (3.35) に式(3.31), (3.32) を代入すると粗粒子骨格およびマトリックスの仕事量増分は、それぞれ次のように表される。

$$dW_s = \frac{b}{(b-1)R+1} \{ \bar{q}_s \ \bar{p}_s \} [D_s] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (3.36)$$

$$dW^* = \frac{1}{(b-1)R+1} \{ \bar{q}^* \ \bar{p}^* \} [D^*] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix} \quad (3.37)$$

したがって、粗粒子骨格とマトリックスの単位体積当たりの仕事量増分が等しいと仮定、すなわち、 $dW_s = dW^*$ とおくと、応力分担パラメータ b の値は、次のように表される。

$$b = \frac{\{ \bar{q}^* \ \bar{p}^* \} [D^*] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix}}{\{ \bar{q}_s \ \bar{p}_s \} [D_s] \begin{Bmatrix} d\bar{q} \\ d\bar{p} \end{Bmatrix}} \quad (3.38)$$

式(3.38)で示されるように、応力分担パラメータ b は、粗粒子骨格とマトリックスの特性で決まる係数と応力条件によって決定される。なお、パラメータ b の具体的な決定法については、第4章および第5章で述べる。

3. 6 結 論

本章では、まず、供試体断面の観察結果をもとに中間土の構造について考察し、粗粒子同士の接触割合を確率論を援用して求め、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率の算定を行った。次いで、土の構造を考慮して二種混合体の応力—ひずみ関係を拡張することにより、中間土の応力—ひずみ関係の基本式を求めた。

得られた主な成果を要約すると、次のとおりである。

- 1) 中間土は、粗粒子骨格とマトリックスがある割合で混在している構造を有することを確かめた。すなわち、中間土内には粗粒子同士が互いに接触しているものと接触していないものがランダムに分布し、細粒分含有率の減少とともに互いに接触している粗粒子の割合が増え、次第に粗粒子骨格のみで構成される状態に近づいていくことを明らかにした。
- 2) 中間土の間隙比が、式(3.9) で表されるように粗粒子骨格とマトリックスの間隙比およびそれらの体積含有率を用いて算定されることを示した。
- 3) 式(3.10) で表されるように、粗粒子同士の接触確率をマトリックスの体積含有率の関数として求めた。この関係式により、マトリックスの体積含有率が小さくなるほど接触数の大きい粗粒子骨格の割合が増えることが示された。
- 4) 式(3.13) で表されるように、マトリックスの体積含有率を細粒分含有率 $F=100\%$ のときのマトリックスの間隙比と粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率から算定する式を求めた。
- 5) 粗粒子同士の接触の評価をもとに、粗粒子骨格の体積含有率とマトリックスの体積含有率の関係式を求め、これらの関係が式(3.16) で示されるようなマトリックスの体積含有率の簡単な二次関数で近似できることを示した。
- 6) 式(3.16) の粗粒子骨格の体積含有率とマトリックスの体積含有率の関係から、マトリックスの体積含有率が小さいほど粗粒子同士の接触割合が増加し、近似的に粗粒子同士の接触の分布状態を表すことができることを示した。

7) 粗粒子骨格とマトリックスの材料特性を用いて求められる中間土の応力-ひずみ関係の基本式が式(3.33)のように誘導された。

参 考 文 献

- 1) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・梅崎健夫：砂と粘土の混合土の圧縮特性に関する一考察，九州大学工学集報，第61巻，第6号，pp.747～753，1988年。
- 2) Omine, K., Ochiai, H., Hayashi, S., Umezaki, T., and Otani, J. : Shear Properties of Clay-Sand Composite Soils, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu Univ.*, vol.49, No.4, pp.213～228, 1989.
- 3) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・梅崎健夫・満石孝司：細粒分の卓越する混合土の強度・変形特性，第25回土質工学会研究発表会，pp.607～610，1990年。
- 4) 大嶺 聖，落合英俊，林 重徳，梅崎健夫：異質材料による混合土のせん断特性，土木学会第45回年次学術講演会，pp.192～193，1990年。
- 5) Casagrande, A. : The structure of clay and its importance in foundation engineering, *Contributions to Soil Mechanics, Boston Society of Civil Engineers, 1925-1940*, pp.72～112, 1932.
- 6) Collins, K. and McGown, A. : The form and function of microfabric features in a variety of natural soils, *Geotechnique*, Vol.24, No.2, pp.223～254, 1974.
- 7) O'Brien, N.R. : Fabric of kaolinite and illite floccules, *Clay and Clay Minerals*, Vol.19, pp.353～359, 1971.
- 8) Sides, G. and Barden, L. : The microstructure of dispersed and flocculated samples of kaolinite, illite and montmorillonite, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.8, No.3, pp.391～399, 1971.
- 9) 鬼塚克忠・吉武茂樹：締固めた混合土の強度異方性について，土質工学会論文報告集，第23巻，第4号，pp.149～156，1983年。
- 10) 柴田英明：電子顕微鏡観察による締固めた砂・粘土混合土の構造についての一考察，第18回土質工学会研究発表会，pp.1433～1436，1983年。
- 11) 柴田英明：砂・粘土混合土の締め固め後の構造に関する一提案，土と基礎，第34巻，第12号，pp.17～22，1986年。

- 12) Lafeber, D. : Soil structure concepts, *Engineering Geology*, Vol.1, No.4, pp.261 ~290, 1966.
- 13) Bengochea, I.G., Lovell, C.W. and Diamond, S.D. : Pore size and distribution and permeability of silty clays, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, No.GT7, pp.839~856, 1979.
- 14) Juang, C.H. and Holtz, R.D. : Fabric, Pore size and distribution and permeability of sandy soils, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.112, No.GT9, pp.855~868, 1986.
- 15) 山口晴幸・池永 均：締固め土の間隙構造，土木学会論文集 No.448/Ⅲ-19, pp.35~44, 1992年.
- 16) 大嶺 聖・落合英俊：砂と粘土の混合土の一次元圧縮特性，九州大学工学集報，第64巻，第5号，pp.225~235, 1991年.
- 17) 大嶺 聖・落合英俊：土構造に着目した混合度土の一次元縮特特性，土木学会論文集，No.457/Ⅲ-21, 1992年.
- 18) Lafeber, D. and Willoughby, D.R. : Fabric symmetry and mechanical anisotropy in natural soils, *Proc., Australia-NewZealand Conference on Geotechnics*, Vol.1, pp.165~174, 1971.
- 19) 大嶺 聖，落合英俊：異質材料による混合土のせん断特性，土木学会第46回年次学術講演会，pp.294~295, 1991年.

第4章 中間土の圧縮特性

4.1 概説

砂と粘土の性質の最も大きな違いの一つは、圧縮性にある。第1章の従来の研究で述べたように、中間土の圧縮特性は、塑性指数あるいは細粒分含有率に大きく依存する。このような特性は、土の構造に着目すると、中間土を構成する粗粒子骨格とマトリックス（細粒子と水から成る部分）の含有割合に依存すると考えることができる。粗粒子が互いに接触していない状態にある細粒分の卓越した中間土については、その圧縮特性をマトリックスの特性からほぼ予測することができる¹⁾。しかしながら、細粒分含有率が減少し、粗粒子同士の接触割合が増加すると次第に粗粒子骨格が形成されていくため、その影響についても考慮する必要がある。

第3章では、供試体断面の観察結果をもとに、中間土が粗粒子骨格とマトリックスで構成される構造を有することを確かめ、確率の考えを用いて粗粒子同士の接触割合を評価することにより、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率の算定式を求めた。さらに、このような土の構造を考慮して、第2章で誘導した二種混合体の応力-ひずみ関係を中間土に適用できるように拡張した。

本章では、中間土の圧縮特性を実験的に明らかにし、第3章で提案した中間土の応力-ひずみ関係の基本式に基づいて応力と間隙比の関係および体積圧縮係数を求め、その妥当性を検証する。各節の内容を要約すると次のようである。

第2節では、三種類の間中土を用いて、その圧縮特性に及ぼす細粒分含有率の影響を明かにする。実験では、粗粒子として豊浦砂、珪砂を、細粒子としてカオリン、ベントナイトおよび有明粘土を用い、それぞれ種々の割合で混合して供試体を作製した。中間土の間隙比が、粗粒子骨格とマトリックスの間隙比、およびそれらの体積含有率を用い

て表されることを示し、応力-間隙比関係および体積圧縮係数を誘導する。このときの
応力分担割合については二種混合体の場合と同様に仕事量増分の考えを用いて評価する。
第4節では、提案式に必要なパラメータの決定法を述べ、実験結果と計算結果の比較を
行い、その妥当性を検証する。

最後に、第5節において本章で得られた成果をまとめて結論とする。

4. 2 中間土の圧縮特性に及ぼす細粒分含有率の影響

第3章で述べたように、中間土は、粗粒子骨格とマトリックスで構成される構造を有する。そのため、中間土の圧縮特性は、粗粒子骨格とマトリックスの性質およびそれらの含有割合に依存すると考えることができる。本節では、三種類の中間土について行った圧密試験の結果をもとに、圧縮特性に及ぼす細粒分含有率の影響を考察する。

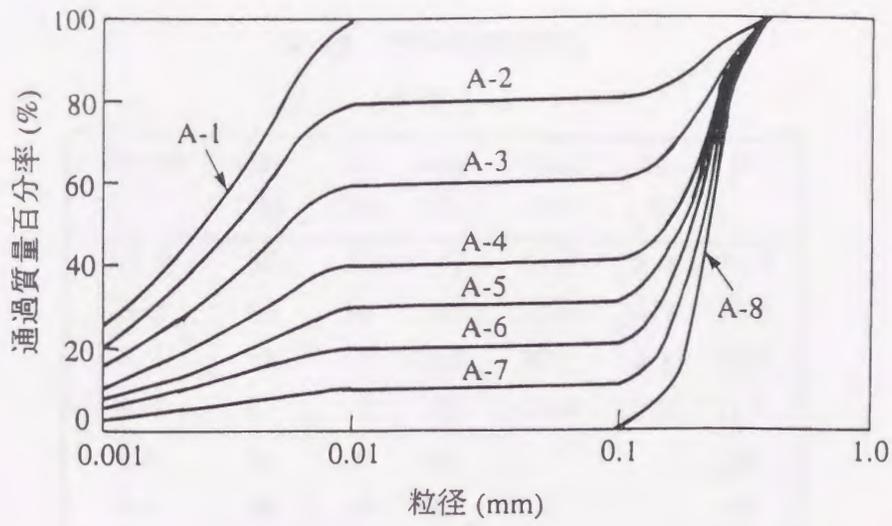
4. 2. 1 試料および実験方法

実験に用いた試料は、粗粒子として豊浦砂と珪砂を、細粒子としてカオリンとベントナイトおよび有明粘土を用い、これらを種々の割合で混合した中間土であり、次の三種類に分けられる。

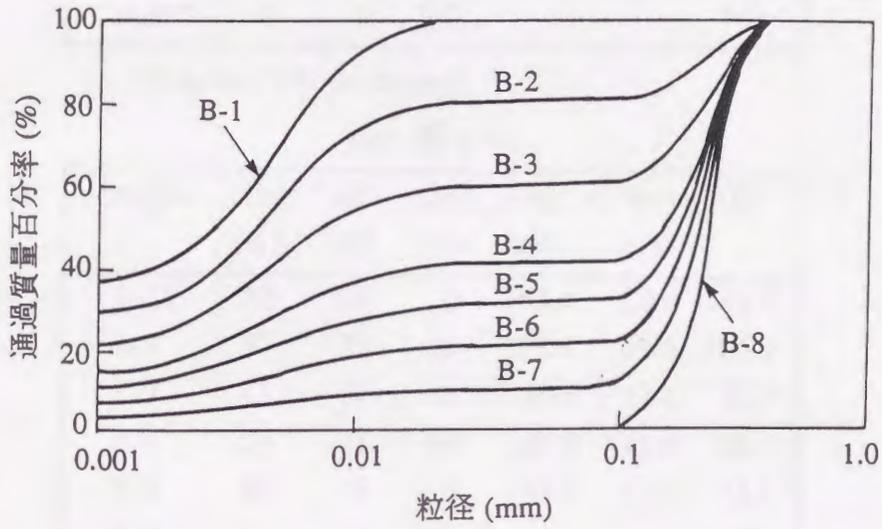
- (1) 中間土-A : 豊浦砂($\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$)にカオリン($\rho_s=2.70\text{g/cm}^3$)を任意の割合で混合した試料
- (2) 中間土-B : 豊浦砂に細粒分として重量比で1:1に配合したカオリンとベントナイト($\rho_s=2.50\text{g/cm}^3$)を任意の割合で混合した試料
- (3) 中間土-C : 珪砂($\rho_s=2.71\text{g/cm}^3$)に有明粘土($\rho_s=2.61\text{g/cm}^3$)を任意の割合で混合した試料

なお、いずれの試料も $420\mu\text{m}$ ふるい通過分を用いた。

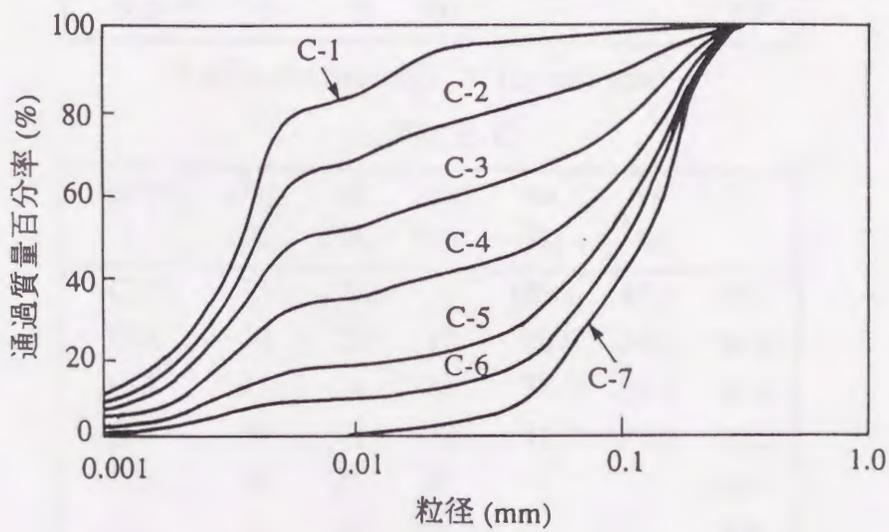
これらの試料の粒径加積曲線を図4.1に、物理特性を表4.1に示す。カオリンとベントナイトの粒径は、豊浦砂の粒径はそれらに比べてかなり小さい。これらを混合して得られる中間土-Aおよび中間土-Bは、粒径の大きく異なる粗粒子と細粒子で構成され、コンシステンシー特性の違いから、中間土-Aは低塑性の細粒子を、中間土-Bは高塑性の細粒子を持つ中間土として区別される。中間土-AおよびBの細粒分含有率Fは、いずれも0,10,20,30,40,60,80および100%の計8種類である。一方、珪砂および有明粘土は、なめらかな粒度分布を持つので、これらを混合して得られる中間土-Cは、砂、シルトおよび粘土を含む中間土となる。この場合、粗粒子と細粒子を明確に区別できないので、ここでは、塑性指数と相関性の最も良い粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の土粒子の含有率で求めた細粒分含有率^{2),3)}を用いることとする。この場合の中間土-Cの細粒分含有率は、0,8,15,33,50,66および83%の計7種類である。中間土-A~Cの液性限界および塑性限界



(a)中間土-A



(b)中間土-B



(c)中間土-C

図 4.1 試料の粒径加積曲線

表 4.1 試料の物理特性

(a) 中間土-A

Sample	clay (%)	silt (%)	sand (%)	wL (%)	wP (%)	Ip
A-1*	80	20	0	51.6	28.0	23.6
A-2	64	16	20	41.9	24.3	17.6
A-3	48	12	40	33.2	18.3	14.9
A-4	32	8	60	24.0	12.7	11.3
A-5	24	6	70	-	-	NP
A-6	16	4	80	-	-	NP
A-7	8	2	90	-	-	NP
A-8**	0	0	100	-	-	NP

*Kaolin, **Toyoura sand

(b) 中間土-B

Sample	clay (%)	silt (%)	sand (%)	wL (%)	wP (%)	Ip
B-1*	72	28	0	163.8	20.9	142.9
B-2	57	23	20	123.4	16.5	106.9
B-3	43	17	40	89.6	12.7	76.9
B-4	29	11	60	60.0	11.5	48.5
B-5	22	8	70	45.6	12.0	33.6
B-6	15	5	80	-	-	NP
B-7	8	2	90	-	-	NP
B-8**	0	0	100	-	-	NP

*Kaolin and Bentonite, **Toyoura sand

(c) 中間土-C

Sample	clay (%)	silt (%)	sand (%)	wL (%)	wP (%)	Ip
C-1*	75	22	3	125.1	45.4	79.7
C-2	60	23	17	98.6	34.0	64.6
C-3	45	24	31	71.7	30.8	40.9
C-4	30	24	33	51.3	23.0	28.3
C-5	15	25	60	-	-	NP
C-6	8	15	77	-	-	NP
C-7**	0	26	74	-	-	NP

*Ariake clay, **Silica sand

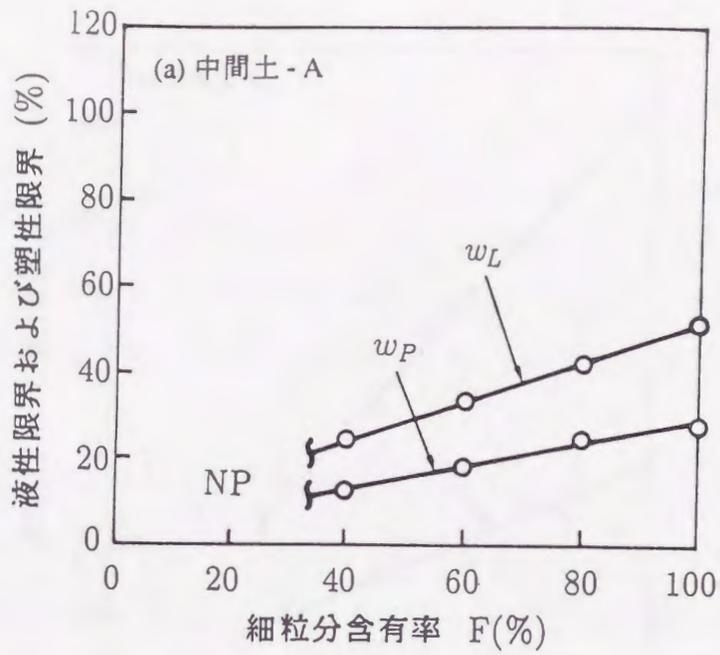


図 4.2(a) 試料の液性限界および塑性限界と細粒分含有率の関係

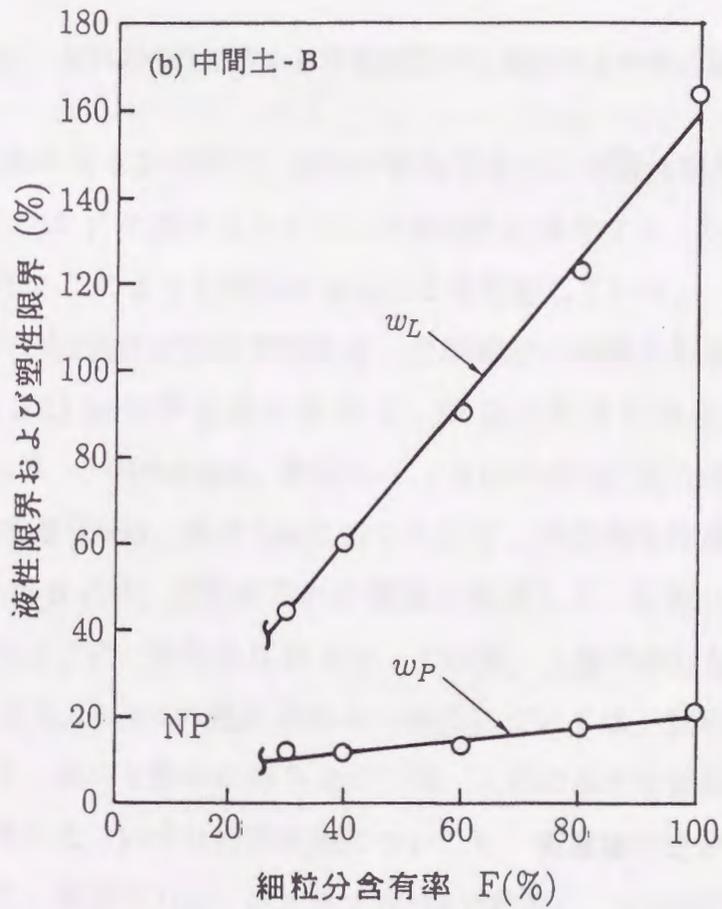


図 4.2(b) 試料の液性限界および塑性限界と細粒分含有率の関係

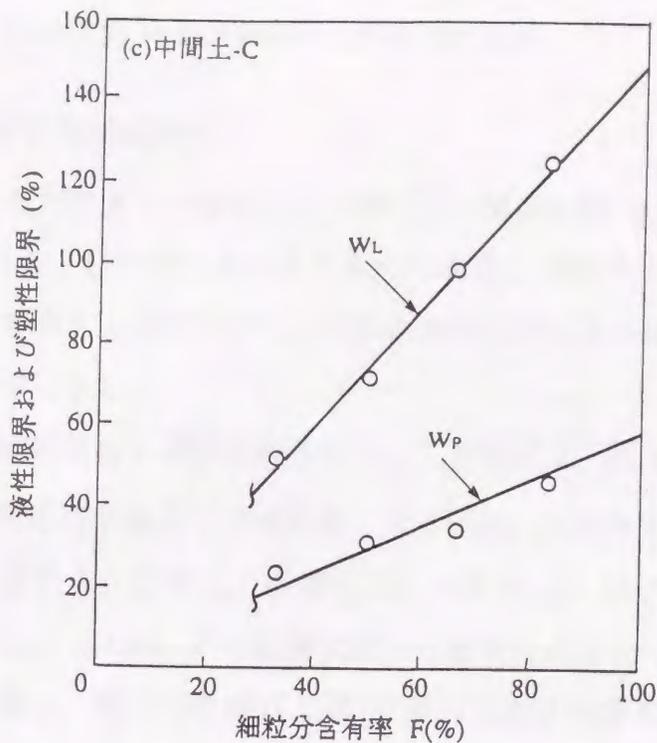


図 4.2(c) 試料の液性限界および塑性限界と細粒分含有率の関係

と細粒分含有率の関係を図 4.2 に示す。試料の液性限界および塑性限界は、細粒分含有率 F が約30%程度までは F の減少とともにほぼ直線的に減少する。なお、Seedら⁹⁾も、多くの中間土について、このような関係があることを報告している。

試料は、液性限界の約2倍の含水比で練り返した細粒分に粗粒子を混入して十分攪拌し、内径15cm、高さ25cmの予圧密容器内で、所定の鉛直圧密圧力(中間土-A : 0.069MN/m^2 , 中間土-B : 0.049MN/m^2 , 中間土-C : 0.049MN/m^2)を作用させて圧密を行った。その後、試料を直径6cm、高さ2cmに切り出して、供試体を作成した。ただし、非塑性(Non-plastic)の場合には、試料の乱れの影響を考慮して、圧密リングにカラーを取り付けたまま圧密リング内で試料を圧密させ、その後、上部の余分な試料を切り取り供試体を作成した。また、 $F=0\%$ の粗粒子のみの場合については、試料を入れた漏斗を圧密リング中央に立て、漏斗を静かに持ち上げた後、上部の余分な試料を切り取り、ゆる詰め供試体を作成した。いずれの供試体についても、荷重増分比が 1 の圧密試験(JIS A 1217)⁹⁾を行った。圧密圧力は、次に示す7段階で載荷し、1つの段階で24時間圧密し、最終段階まで終了した後に、第1段階の圧密圧力まで除荷を行った。

0.0196(0.2) → 0.039(0.4) → 0.078(0.8) → 0.157(1.6) → 0.314(3.2) →
0.627(6.4) → 1.254(12.8) → 0.0196(0.2) MN/m²(kgf/cm²)

4. 2. 2 一次元圧縮特性^{6),7)}

圧密試験より得られた中間土の間隙比と圧密圧力の関係を図 4.3 に示す。図(a)~(c)は、それぞれ中間土-A~Cの場合を示したものである。間隙比と圧密圧力の関係は、中間土の種類によって大きく異なるが、いずれの場合も間隙比の減少割合は、細粒分含有率が小さいほど小さくなる。

次に、中間土の圧縮指数および膨張指数について考察する。図 4.4 で示されるように、圧縮指数は、先行圧密応力を越えてほぼ直線となる領域、すなわち、 $e-\log\sigma$ 曲線の後半部分の傾きにより決定する。ただし、中間土-Bについては、必ずしも直線とはならないので、圧密圧力が 0.2~0.4MN/m² の範囲で見られる変曲点付近の傾きで求めることとする。また、膨張指数は、載荷の最終点と第1段階の応力まで除荷した点を結んだ直線で決定する。

中間土の圧縮指数 C_c と細粒分含有率の関係を図 4.5(a)~(c) に示す。中間土の圧縮指数は、細粒分含有率 F がある値までは、 F の減少とともにほぼ直線的に減少する。また、図で示されるように、 F がある値以下になると、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合に近づいていく。このような傾向は、いずれの中間土についても同様である。中間土の圧縮特性が $F=0\%$ の場合に近づいていくときの境界の細粒分含有率を F_r とする。すなわち、 $F > F_r$ の範囲では、中間土の圧縮指数は、細粒分含有率の減少とともに著しく減少するが、 $F \leq F_r$ の範囲では、細粒分含有率の影響はほとんど見られない。なお、後述するように、 F_r は、中間土の応力-間隙比関係を算定するために必要なパラメータである。

中間土の膨張指数と細粒分含有率の関係を図 4.6(a)~(c) に示す。中間土の膨張指数は、いずれの中間土の場合も、細粒分含有率 F がある値までは F の減少とともに次第に減少し、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合に近づいていく。したがって、膨張指数についても、粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率 F_r が存在する。

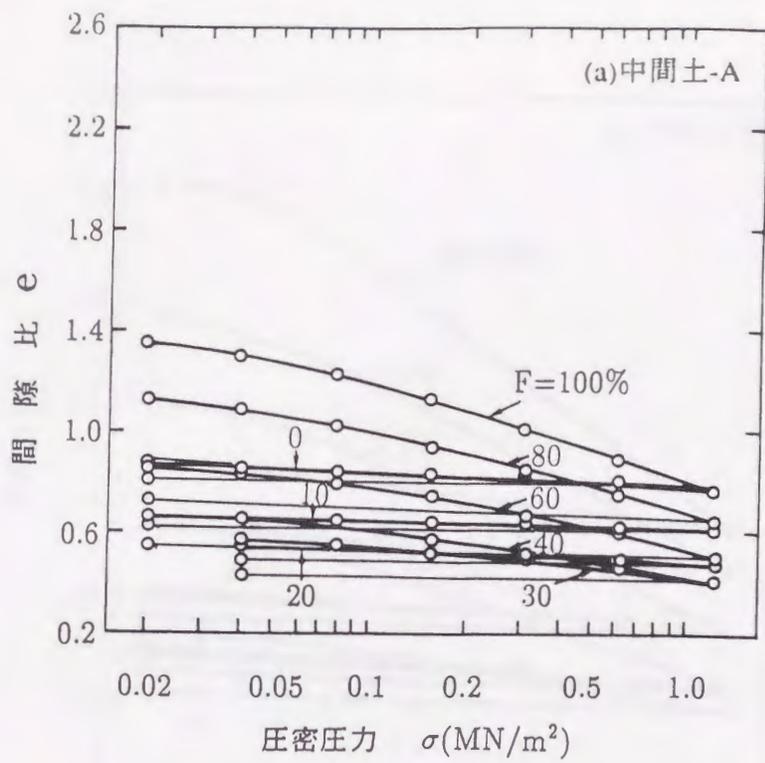


図 4.3(a) 中間土の間隙比と圧密圧力の関係

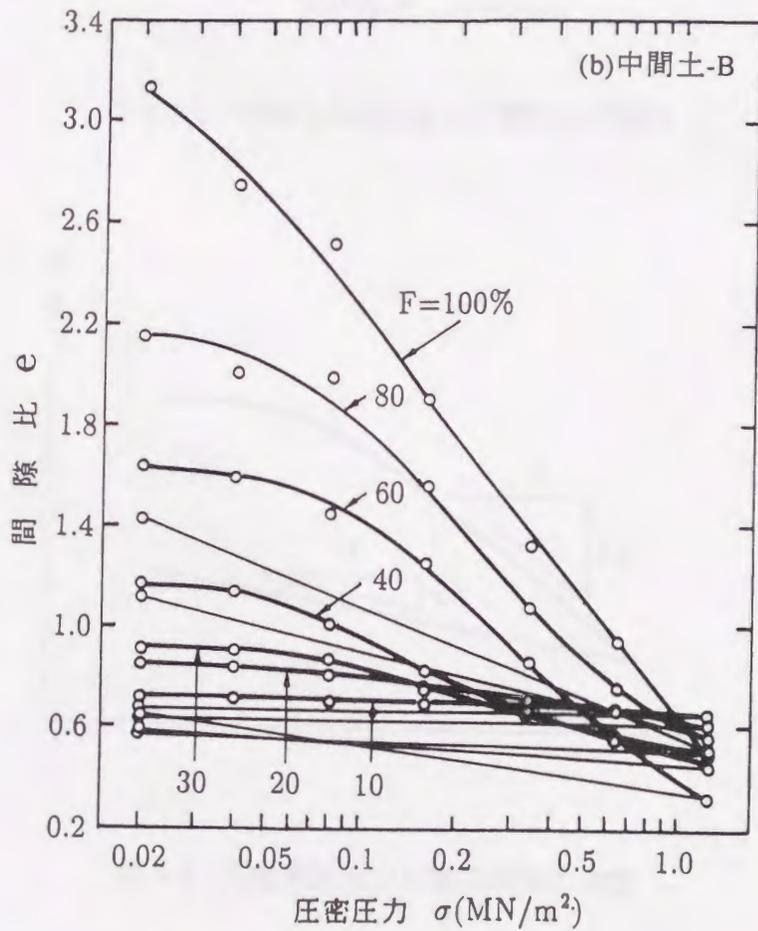


図 4.3(b) 中間土の間隙比と圧密圧力の関係

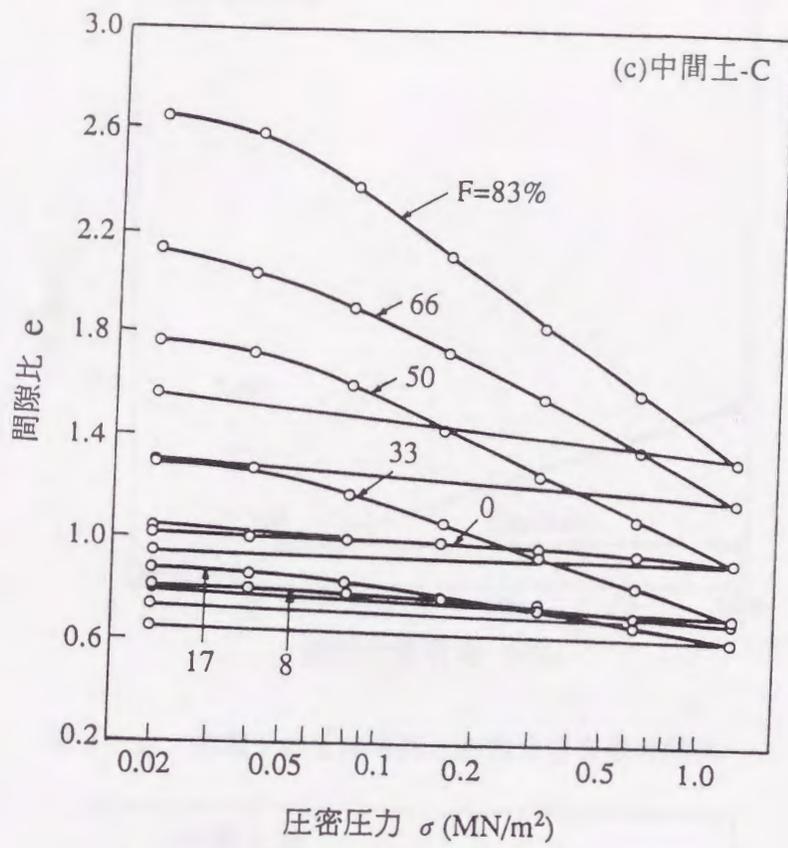


図 4.3(c) 中間土の間隙比と圧密圧力の関係

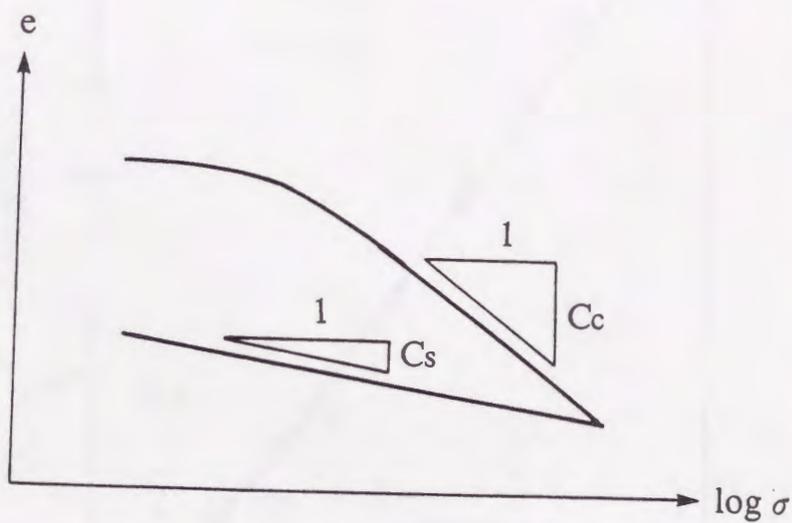


図 4.4 圧縮指数および膨張指数の決定

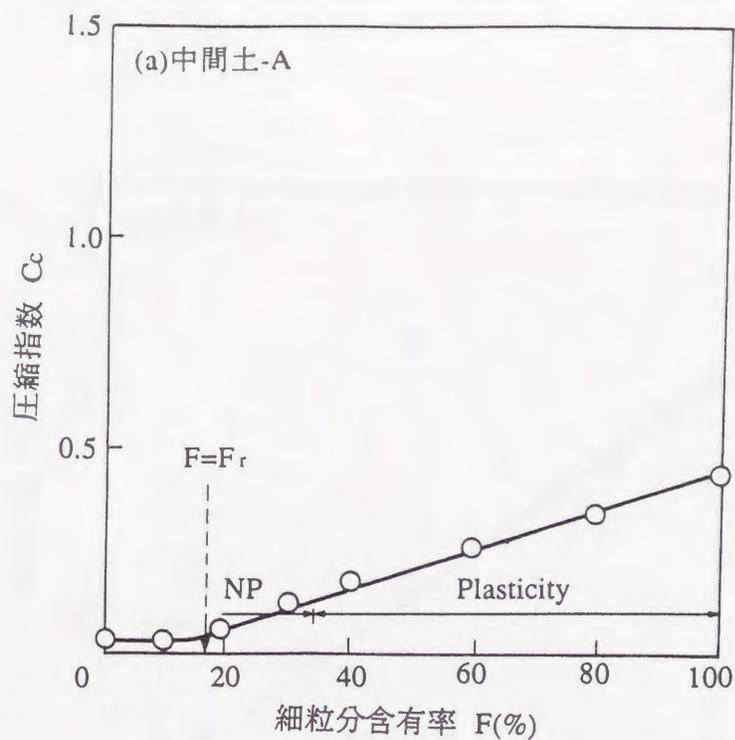


図 4.5(a) 中間土の圧縮指数と細粒分含有率の関係

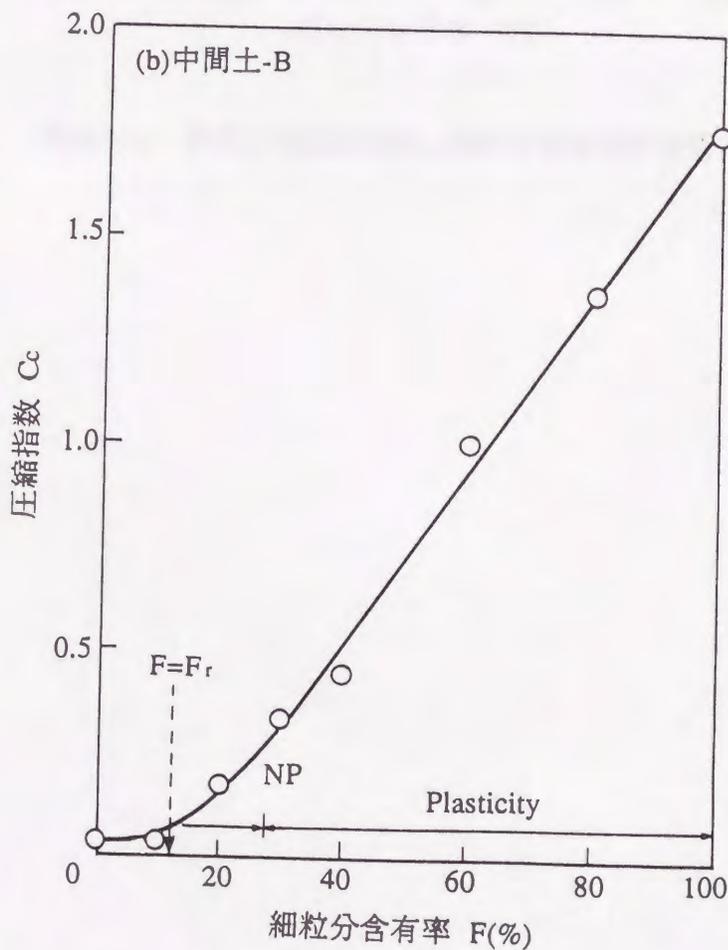


図 4.5(b) 中間土の圧縮指数と細粒分含有率の関係

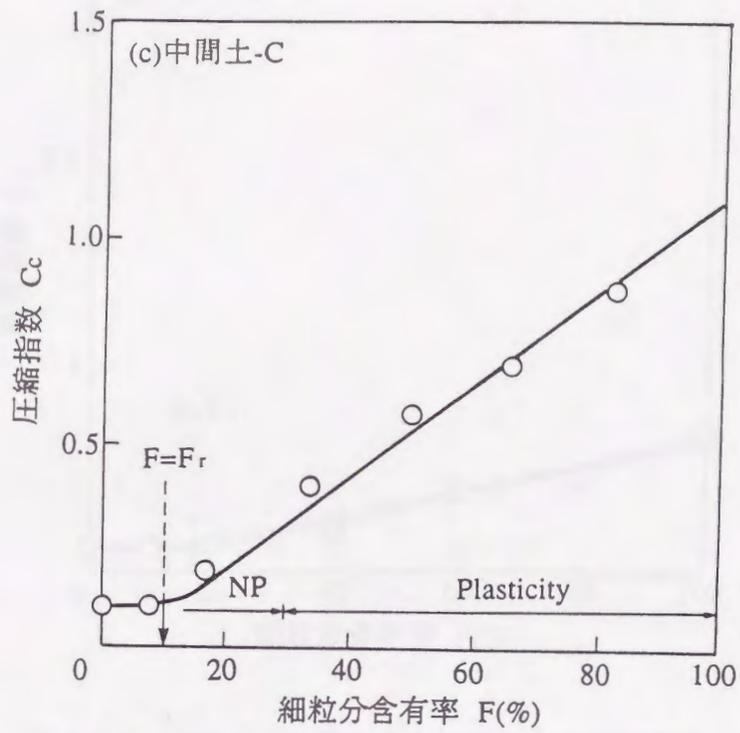


図 4.5(c) 中間土の圧縮指数と細粒分含有率の関係

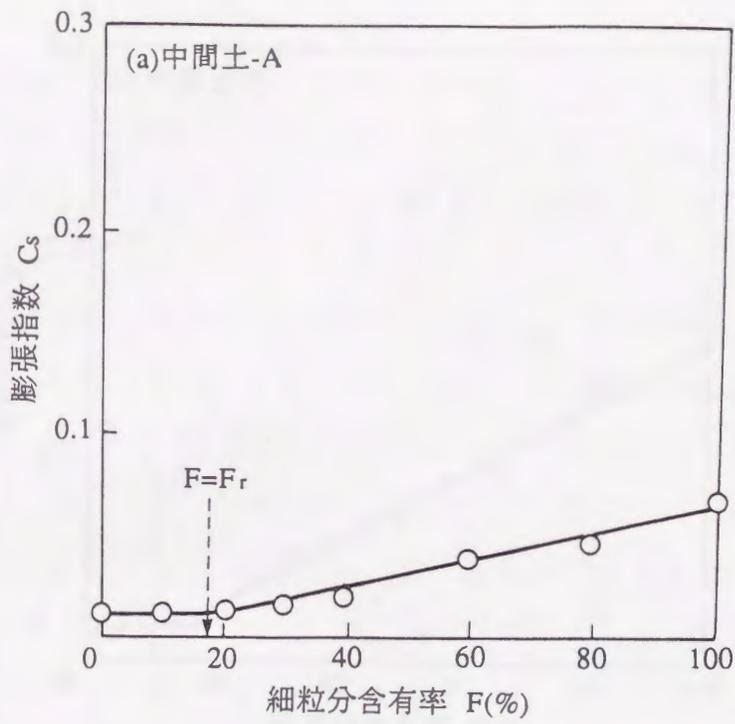


図 4.6(a) 中間土の膨張指数と細粒分含有率の関係

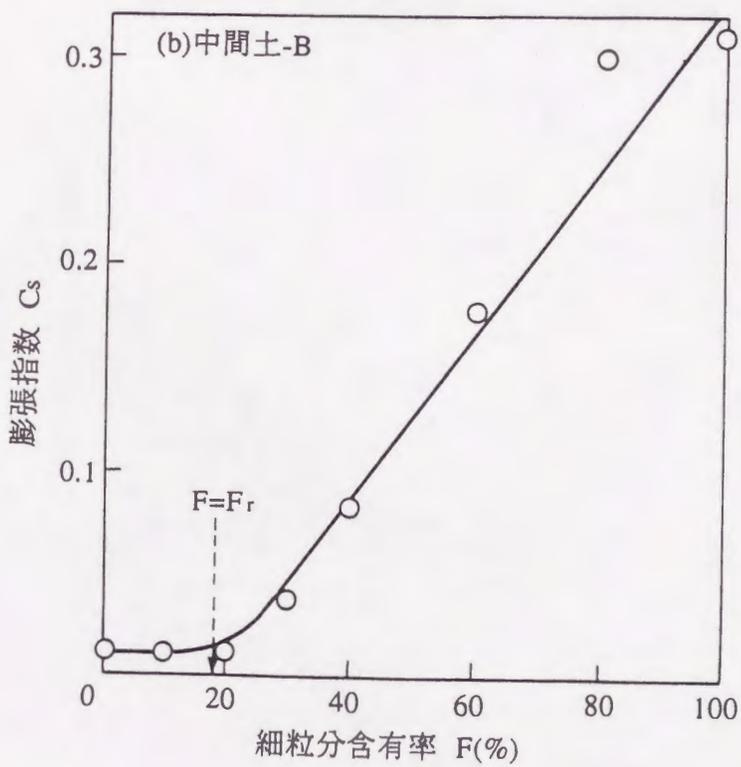


図 4.6(b) 中間土の膨張指数と細粒分含有率の関係

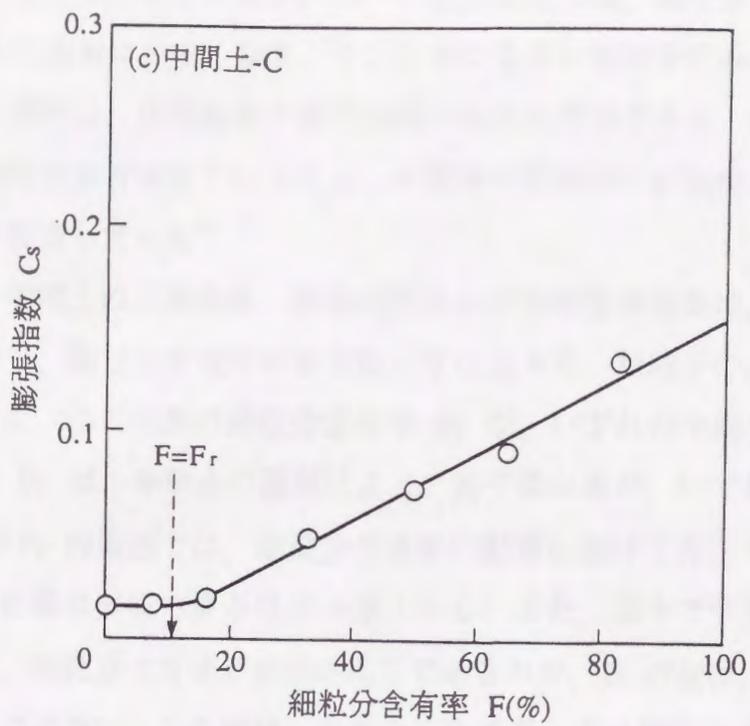


図 4.6(c) 中間土の膨張指数と細粒分含有率の関係

中間土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係を図 4.7(a)~(c) に示す。中間土の体積圧縮係数は、圧密圧力に依存するが、同一の圧密圧力では、細粒分含有率がある値まで、 F の減少とともに次第に小さくなり、それ以下になると粗粒子のみの場合に近づいていく。このような傾向は、圧縮指数や膨張指数の場合と同様である。また、鬼塚と吉武は、同様に、ある細粒分含有率以下になると、中間土の圧縮特性が粗粒子のみの特性と類似してくることを指摘している⁸⁾。

したがって、中間土の圧縮指数、膨張指数および体積圧縮係数は、細粒分含有率の減少とともに減少し、細粒分含有率がある値以下になると、粗粒子のみの場合と類似した特性を示す。また、この境界の細粒分含有率 F_r が、いずれの中間土についても存在する。このときの F_r は、中間土の種類によって若干異なるが、いずれの場合も中間土の圧縮特性は、 $F > F_r$ の範囲では、細粒分含有率の影響を受けて大きく変化し、 $F \leq F_r$ の範囲では、その影響は無視できるほど小さくなる。また、図中で示されるように、非塑性(NP)の領域は、細粒分含有率が約30%以下であるので、 F_r の値は、土が塑性か非塑性かで決まるものではない。ここでは、このような境界となる細粒分含有率の値が、

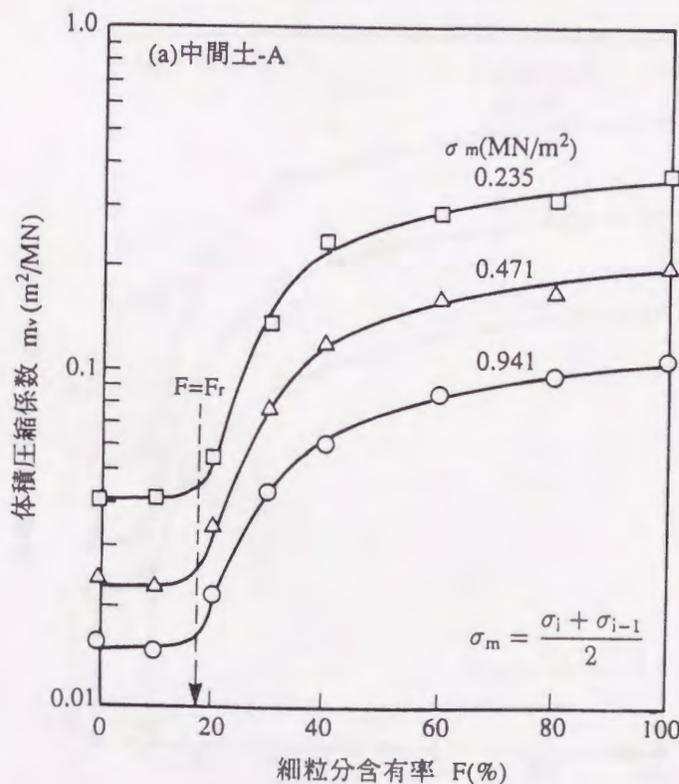


図 4.7(a) 中間土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係

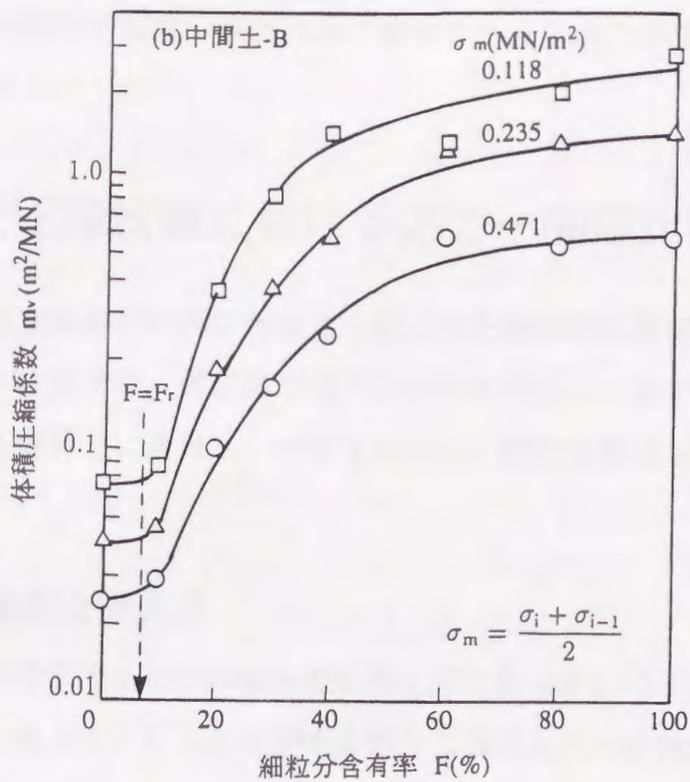


図 4.7(b) 中間土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係

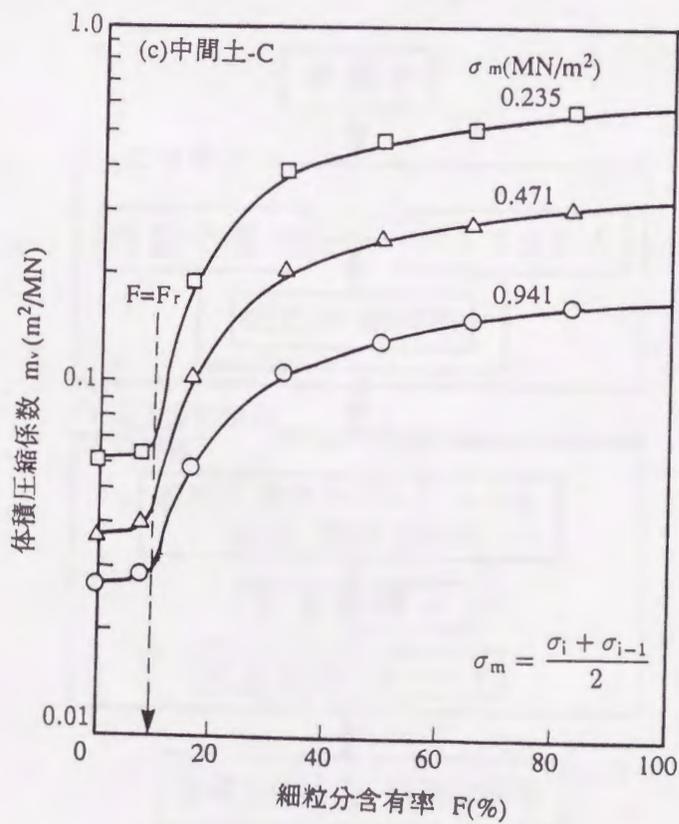


図 4.7(c) 中間土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係

4. 4節で述べる中間土が粗粒子骨格のみで構成されるとき細粒分含有率によって決定されるものとする。

4.3 一次元圧縮状態における応力-間隙比関係

4. 2節では、圧密試験の結果に基づき中間土の圧縮特性に及ぼす細粒分含有率の影響を明らかにした。本節では、第3章で述べた中間土の応力-ひずみ関係を求めるための考え方を一次元圧縮特性に適用し、中間土の応力-間隙比関係および体積圧縮係数を算定する。

4.3.1 基本的な考え方

応力-間隙比関係を求めるための基本的な考え方を図4.8に示す。第3章では、中間土の構造が粗粒子骨格とマトリックスがある割合で混在している状態にあることを確かめ、さらに、中間土の間隙比が、粗粒子骨格とマトリックスの間隙比およびそれらの体積含有率を用いて表されることを示した。このときの粗粒子骨格とマトリックスの体積

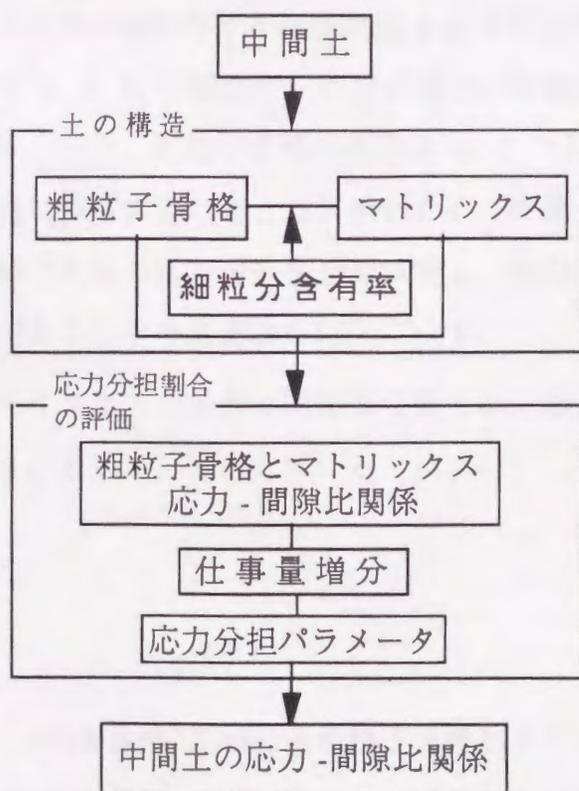


図4.8 中間土の応力と間隙比の関係を求めるための基本的な考え方

含有率については、粗粒子同士の接触割合を確率の考えを用いて評価することにより、それぞれ式(3.13), (3.16)' のように細粒分含有率を用いて算定される。一方、粗粒子骨格とマトリックスの間隙比を求めるためには、粗粒子骨格とマトリックスに作用する応力を評価する必要がある。このときの応力の分担割合については、二種混合体の応力-ひずみ関係を求める場合と同様に仕事量増分の考えを用いて評価する。したがって、中間土の応力-間隙比関係が、粗粒子骨格およびマトリックスの材料特性を用いて誘導される。

4. 3. 2 応力と間隙比の関係

中間土の間隙比は、式(3.9)で示されるように、6個のパラメータ F, r, R, f_c, e_s, e_c を用いて表される。これらのパラメータのうち、細粒分含有率 F は既知の値である。また、 R (粗粒子骨格の体積含有率)と f_c (マトリックスの体積含有率)は式(3.16)で示されるように一義的な関係があるので、中間土の間隙比は、4つのパラメータ r, R, e_s, e_c を用いて表されることになる。図 4.9 は、 $e=f(r, R, e_s, e_c)$ におけるパラメータ間の関係を示したものである。すなわち、粗粒子骨格中の細粒子と粗粒子の体積比 r は、粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率 F_r を用いて求められる。また、マトリックスの体積含有率 f_c は、 F, F_r および $F=100\%$ のときの間隙比 e_{c0} を用いて求められ、このときの粗粒子骨格の体積含有率 R と f_c の関係が、粗粒子同士の接触割合を評価することにより式(3.16)で与えられる。一方、粗粒子骨格の間隙比 e_s とマトリックスの間隙比 e_c は、それぞれに作用する応力に依存すると考える。そのため、中間土の応力と間隙比の関係を求めるためには、中間土内部の応力分担割合を決定し、粗粒子骨格とマトリックスの間隙比の算定する必要がある。その算定法を以下に示す。

粗粒子骨格およびマトリックスの応力と間隙比の関係は、通常用いられている $e\text{-log}\sigma$ の直線関係が成立するものとして、次式を用いる。

$$e_s = N_s - C_{cs} \log \bar{\sigma}_s \quad (4.1)$$

$$e_c = N_c - C_c^* \log \bar{\sigma}^* \quad (4.2)$$

ここで、 N_s および N_c は、 $\bar{\sigma}=1\text{MN/m}^2$ における粗粒子骨格およびマトリックスの間隙比の値、 C_{cs} および C_c^* は、粗粒子骨格およびマトリックスの圧縮指数、 $\bar{\sigma}_s$ および $\bar{\sigma}^*$ は、粗

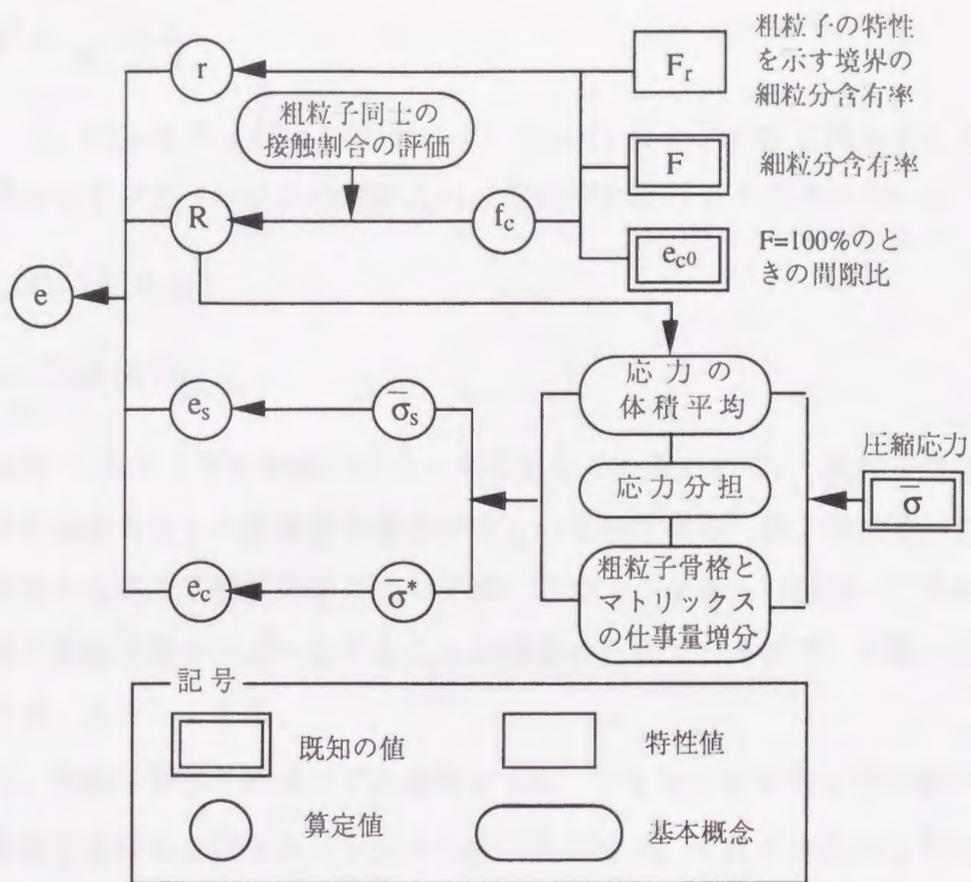


図 4.9 $e=f(r, R, e_s, e_c)$ におけるパラメータ間の関係

粒子骨格およびマトリックスの応力を表す. 一方, 中間土の応力は, 式(3.24)と同様に, 粗粒子骨格とマトリックスの応力を用いて次のように表されるものとする.

$$\bar{\sigma} = R\bar{\sigma}_s + (1-R)\bar{\sigma}^* \quad (4.3)$$

さらに, 式(3.27)で定義される応力分担パラメータ $b(=d\bar{\sigma}_s/d\bar{\sigma}^*)$ を用いると, 粗粒子骨格およびマトリックスの応力と中間土の応力の関係は, それぞれ次のように表される.

$$\bar{\sigma}_s = \frac{b}{(b-1)R+1} \bar{\sigma} = B_s \bar{\sigma} \quad (4.4)$$

$$\bar{\sigma}^* = \frac{1}{(b-1)R+1} \bar{\sigma} = B^* \bar{\sigma} \quad (4.5)$$

ここに,

$$B_s = \frac{b}{(b-1)R+1}$$

$$B^* = \frac{1}{(b-1)R+1}$$

したがって、式(4.4) および(4.5) をそれぞれ式(4.1) および(4.2) に代入することにより、粗粒子骨格およびマトリックスの間隙比は、それぞれ次のように求められる。

$$e_s = N_s - C_{cs} \log(B_s \bar{\sigma}) \quad (4.6)$$

$$e_c = N_c - C_c^* \log(B^* \bar{\sigma}^*) \quad (4.7)$$

式(4.6), (4.7) における応力分担パラメータの値を求めるために、粗粒子骨格とマトリックスの単位体積当たりの仕事量の増分が等しいと仮定する。第2章で述べたように、等方弾性材料から成る二種混合体については、このような考えに基づいて求められる弾性係数の値と実験結果がほぼ一致することが確かめられているので、中間土に対しても、この仮定を用いることとする。

すなわち、粗粒子骨格の体積ひずみ増分を $d\bar{\epsilon}_{vs}$, マトリックスのひずみ増分を $d\bar{\epsilon}_v^*$ とすると、粗粒子骨格およびマトリックスの仕事量増分は、それぞれ次のように表される。

$$dW_s = \bar{\sigma}_s d\bar{\epsilon}_{vs} = m_{vs} \bar{\sigma}_s d\bar{\sigma}_s \quad (4.8)$$

$$dW_s^* = \bar{\sigma}^* d\bar{\epsilon}_v^* = m_v^* \bar{\sigma}^* d\bar{\sigma}^* \quad (4.9)$$

ここで、 m_{vs} および m_v^* は、それぞれ粗粒子骨格およびマトリックスの体積圧縮係数であり、 $e - \log \sigma$ の直線関係を用いると次のように表される。

$$m_{vs} = \frac{0.435 C_{cs}}{\bar{\sigma}_s (1 + N_s - C_{cs} \log \bar{\sigma}_s)}$$

$$m_v^* = \frac{0.435 C_c^*}{\bar{\sigma}^* (1 + N_c - C_c^* \log \bar{\sigma}^*)}$$

上述の仮定より、 $dW_s = dW_s^*$ とすると、応力分担パラメータ b は、式(4.8), (4.9) より次のように表される。

$$b = \left(\frac{m_v^*}{m_{vs}} \right)^{1/2} \quad (4.10)$$

式(4.10) は、 m_v^* と m_{vs} の比が大きくなるほど、粗粒子骨格に作用する応力の分担割合

が大きくなることを意味している。なお、 m_v^* および m_{vs} は、応力に依存するが、その比 m_v^*/m_{vs} を取ると、応力依存性は小さくなるので、ここでは b の値を一定と見なすことにする。

したがって、中間土の応力と間隙比の関係は、式(3.9) に式(3.12),(3.16),(4.6) および(4.7) を代入することにより次のように求められる。

$$e = \frac{F/100}{\frac{R/(100/F_r - 1)}{1 + N_s - C_{cs} \log(B_s \bar{\sigma})} + \frac{f_c}{1 + N_c - C_c^* \log(B^* \bar{\sigma})}} \quad (4.11)$$

ここに、

$$B_s = \frac{b}{(b-1)R+1}$$

$$B^* = \frac{1}{(b-1)R+1}$$

$$b = \left(\frac{m_v^*}{m_{vs}} \right)^{1/2}$$

$$R = \frac{1}{\left\{ 1 + (1 + e_{c0}) \left(\frac{1}{100/F-1} - \frac{1}{100/F_r-1} \right) \right\}^2}$$

4. 3. 3 体積圧縮係数

一次元圧縮状態における応力増分-ひずみ増分関係は、体積圧縮係数 $m_v (= d\bar{e}_v/d\bar{\sigma})$ を用いて表される。ここでは、第3章で述べた中間土の応力-ひずみ関係の基本式をもとに、中間土の体積圧縮係数を算定する。

まず、粗粒子骨格およびマトリックスの応力増分-ひずみ増分関係は、体積圧縮係数を用いて、次のように表される。

$$d\bar{e}_{vs} = m_{vs} d\bar{\sigma}_s \quad (4.12)$$

$$d\bar{e}_v^* = m_v^* d\bar{\sigma}^* \quad (4.13)$$

このときの粗粒子骨格とマトリックスの応力増分は、式(4.4) および式(4.5) より、それぞれ次のように表される。

$$d\bar{\sigma}_s = \frac{b}{(b-1)R+1} d\bar{\sigma} \quad (4.14)$$

$$d\bar{\sigma}^* = \frac{1}{(b-1)R+1} d\bar{\sigma} \quad (4.15)$$

したがって、一次元圧縮状態における中間土の応力増分-ひずみ増分関係は、式(4.14), (4.15) をそれぞれ式(4.12), (4.13) に代入し、このときの粗粒子骨格とマトリックスのひずみ増分を式(3.25) に代入することにより、次のように表される。

$$d\bar{\sigma}^* = \frac{1}{(b-1)R+1} d\bar{\sigma} \quad (4.16)$$

さらに、式(4.16) より、中間土の体積圧縮係数は、粗粒子骨格およびマトリックスの体積圧縮係数を用いて次のように表される。

$$m_v = \frac{R b m_{vs} + f_c m_v^*}{(b-1)R+1} \quad (4.17)$$

式(4.17) は、中間土が粗粒子骨格のみ($R=1, f_c=0$)の場合、 $m_v=m_{vs}$ となり、マトリックスのみ($R=0, f_c=1$)の場合、 $m_v=m_v^*$ となる。

4. 4 実験結果による検証

4. 2 節の実験結果で示したように、中間土の圧縮特性は、細粒分含有率がある値以下になると、粗粒子のみの場合と類似した特性を示し、この境界となる細粒分含有率 F_r が、いずれの中間土についても存在することが確かめられた。すなわち、中間土の圧縮特性は、 $F > F_r$ の範囲では、細粒分含有率の影響を受けて大きく変化し、 $F \leq F_r$ の範囲では、その影響は無視できるほど小さくなる。本節では、4. 3 節で提案した中間土の応力-間隙比関係および体積圧縮係数を求めるためのパラメータの決定法について述べ、実験結果と計算結果の比較を行うことにより、その妥当性を検証する。

4. 4. 1 パラメータの決定

4. 3 節で求めた中間土の応力と間隙比の関係を算定するために必要なパラメータは、粗粒子骨格とマトリックスの材料定数および粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分

含有率である。

粗粒子骨格とマトリックスの材料定数は、細粒分含有率 $F=0$ および 100% のときの $e - \log \sigma$ 関係より決定される。各中間土における粗粒子骨格とマトリックスの材料定数の値は、表 4.2 に示す通りである。

中間土の間隙比と細粒分含有率の関係を図 4.10(a)~(c) に示す。図中の直線は、 $R=1$ ($f_c=0$)の場合の $e-F$ 関係を示したものであり、式(3.9)において、粗粒子骨格の間隙比 e_s が $F=0\%$ のときの間隙比 e_{s0} に等しいとすることにより、次式のように求められる。

$$e = e_{s0} - (1 + e_{s0}) F / 100 \quad (4.18)$$

すなわち、パラメータ F_r は、この直線と実験結果より得られた $e-F$ 関係との交点で表される。図より、 F_r は、中間土-Aの場合に約18%、中間土-Bの場合に約8%、中間土-Cの場合に約9%であり、高塑性の細粒分を含む中間土ほど小さな値を示す。

中間土が粗粒子のみの特性に近づくときの境界の細粒分含有率について、倉田ら¹⁰⁾は、標準圧密試験と一面せん断試験の結果から、Trollopeら¹¹⁾は、三軸圧縮試験の結果から、また、Skempton¹²⁾は、リングせん断試験の結果から、いずれも約20%程度であると報告している。また、福江と大草¹³⁾および八尾と平田¹⁴⁾は、このような境界となる細粒分含有率は、圧密圧力にも依存することを指摘している。なお、福江ら⁹⁾は、乾燥密度、粗粒子骨格とマトリックスの間隙比および粘土分含有率から中間土の工学的性質を分類する方法を提案している。

本実験で用いた中間土に限れば、 F_r の値は、約10~20%の範囲にあり、圧密圧力にはほとんど依存しないことが明らかとなった。

表 4.2 粗粒子骨格とマトリックスの材料定数

	N	C _{cs}	N _c	C _c *
中間土-A	0.85	0.05	1.22	0.36
中間土-B	0.85	0.05	2.31	1.75
中間土-C	0.97	0.07	1.22	0.36

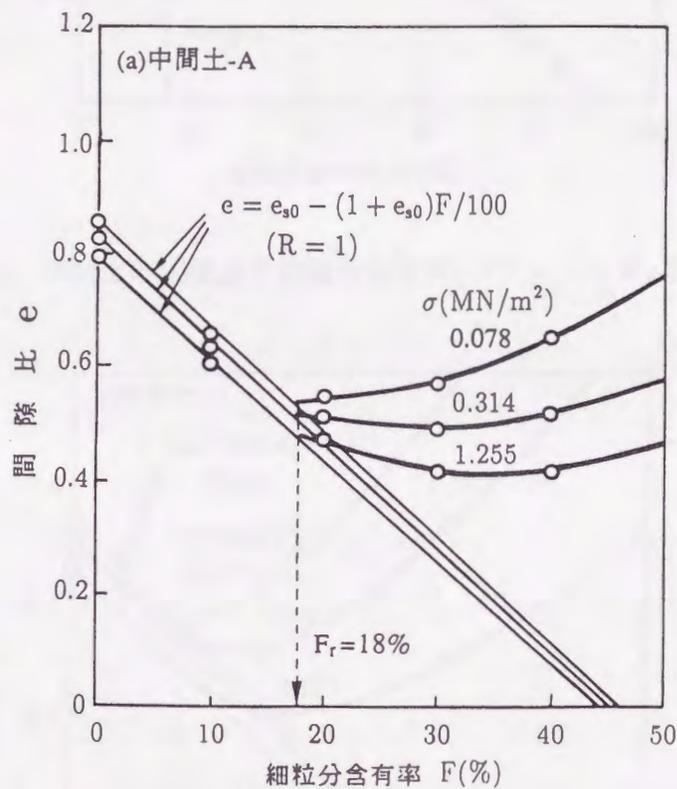


図 4.10(a) 中間土の間隙比と細粒分含有率(パラメータ F_r の決定)

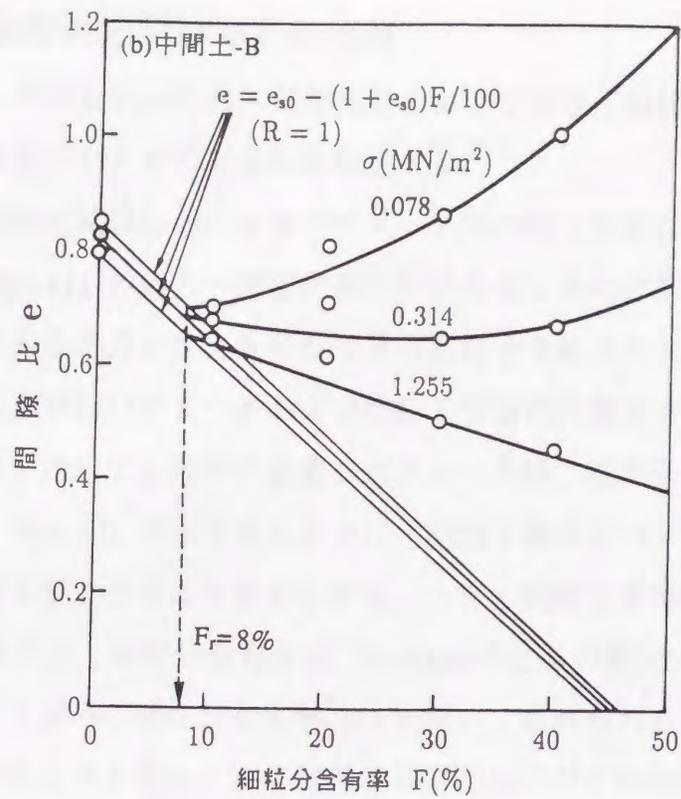


図 4.10(b) 中間土の間隙比と細粒分含有率(パラメータ F_r の決定)

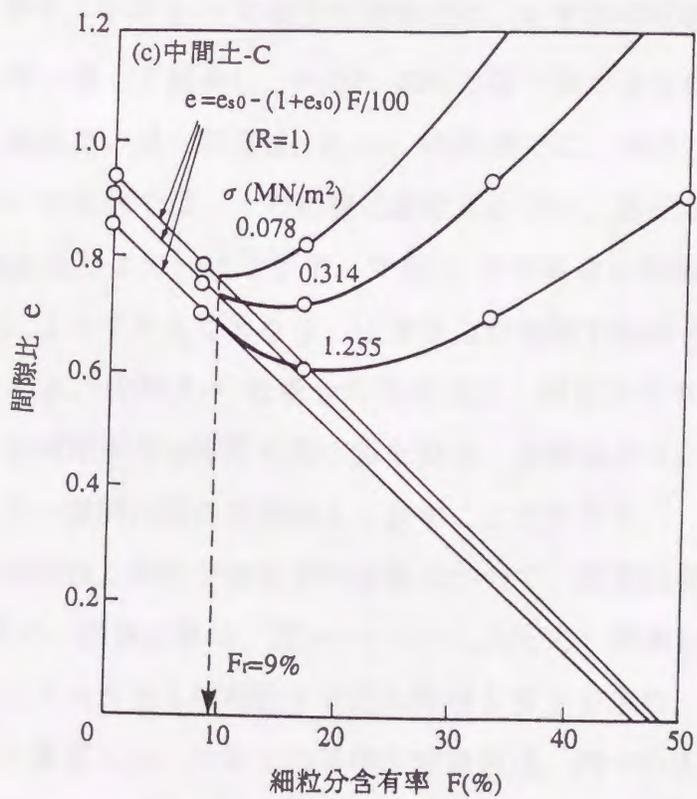


図 4.10(c) 中間土の間隙比と細粒分含有率(パラメータ F_r の決定)

4. 4. 2 計算結果と実験結果の比較

4. 3節で提案した中間土の応力-間隙比関係および体積圧縮係数について、計算結果と実験結果の比較を行い、その妥当性を検証する。

中間土の応力-間隙比関係における各パラメータ間の相互関係については、図4.9で示したが、実際に式(4.11)の応力-間隙比関係を求めるときの計算手順を図4.11に示す。まず、中間土にある応力が与えられたときの粗粒子骨格とマトリックスの応力を算定するためには、応力分担パラメータおよび粗粒子骨格の体積含有率を算定する必要がある。応力分担割合を決定するために必要なパラメータは、粗粒子骨格とマトリックスの材料定数であり、式(4.10)で示されるように、粗粒子骨格とマトリックスの体積圧縮係数の比を一定と見なすことにより求められる。一方、粗粒子骨格の体積含有率は、式(3.16)'で示されるように、細粒分含有率 F 、 $F=100\%$ のときの間隙比 e_{c0} および粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率 F_r を用いて求められる。これらのパラメータを用いて粗粒子骨格とマトリックスに作用する応力およびそれらの間隙比を求めることにより、中間土の間隙比が算定される。

中間土の間隙比と細粒分含有率の関係について、計算結果と実験結果の比較を図4.12(a)~(c)に示す。中間土-Aの場合の間隙比は、いずれの圧密圧力においても細粒分含有率の減少に伴い著しく減少し、 $F=20\sim 40\%$ の間で最小値を取る。すなわち、圧密圧力の増加に伴う間隙比の減少割合は、 $F > F_r$ の範囲では、細粒分含有率の影響を大きく受けるが、 $F \leq F_r$ の範囲では、その影響は非常に小さい。各圧密圧力に対して求めた計算結果は、実験結果とよい一致を示す。中間土-Bの場合の間隙比と細粒分含有率の関係は、圧密圧力によって大きく異なり、圧密圧力が増加するほど F の減少に伴う間隙比の変化は小さくなる。中間土-Cの場合の間隙比は、細粒分含有率の減少に伴い著しく減少し、細粒分含有率が20%付近で最小値を取る。計算結果は、いずれの場合においても、中間土の応力-間隙比関係を精度よく表すことができる。

中間土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係について、計算結果と実験結果の比較を図4.13(a)~(c)に示す。計算結果は、図4.11で示した応力-間隙比関係を求めるときと同様に応力分担パラメータおよび粗粒子骨格の体積含有率を求め、これらを式(4.17)に代入することにより算定した。中間土の体積圧縮係数は、同一の圧密圧力で、 F の減少に伴い次第に減少し、 $F \leq F_r$ となると $F=0\%$ の場合の値に近づいていく。このような傾向は、いずれの中間土に対しても同様である。計算結果は、いずれの場合も、実験結果

と比較的よい一致を示す。

以上のことから、提案式は、実験結果より得られた中間土の応力と間隙比の関係および体積圧縮係数を粗粒子およびマトリックスの特性を求めることができる。

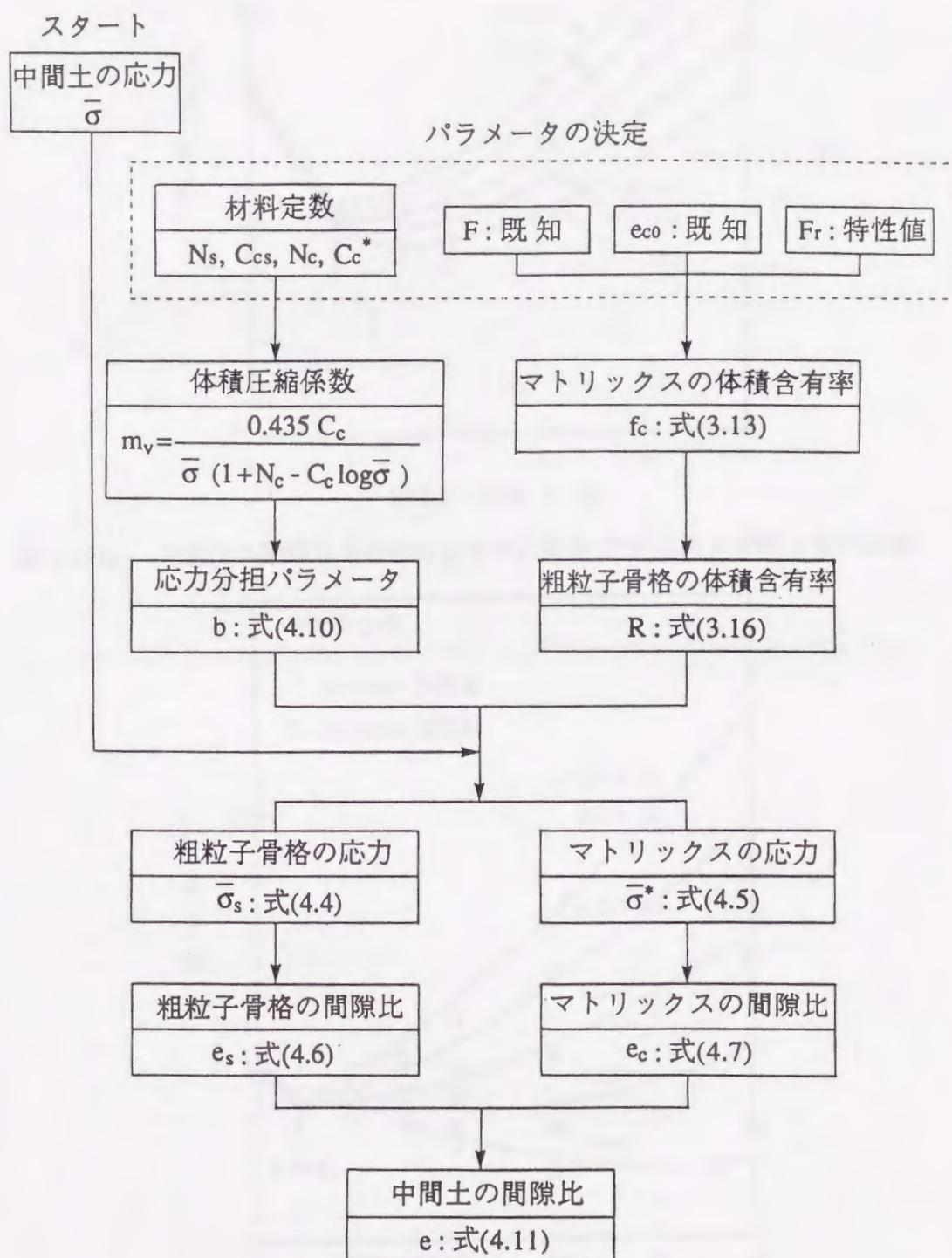


図 4.11 中間土の応力と間隙比の関係を求めるための計算手順

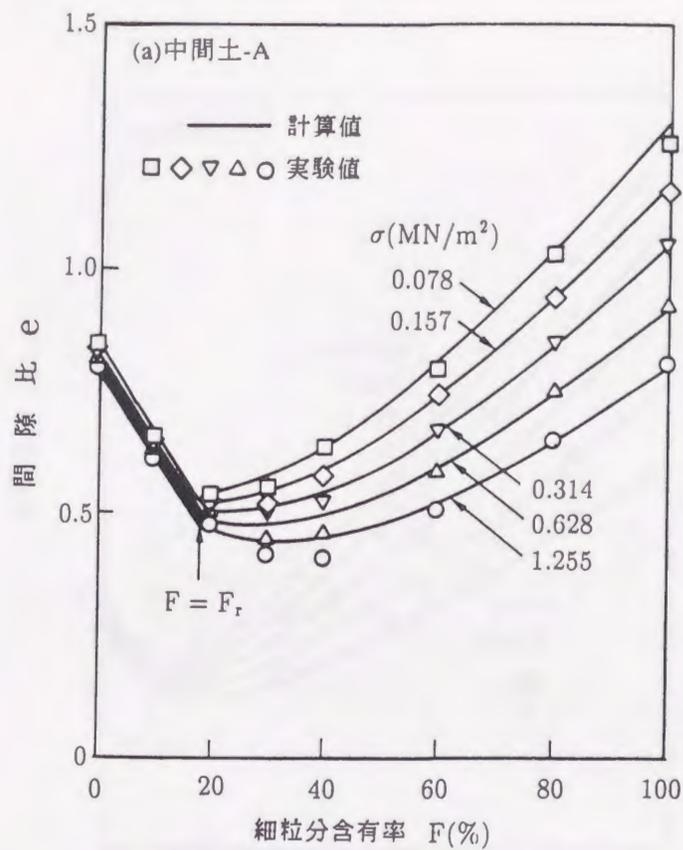


図 4.12(a) 中間土の間隙比と細粒分含有率の関係(計算結果と実験結果の比較)

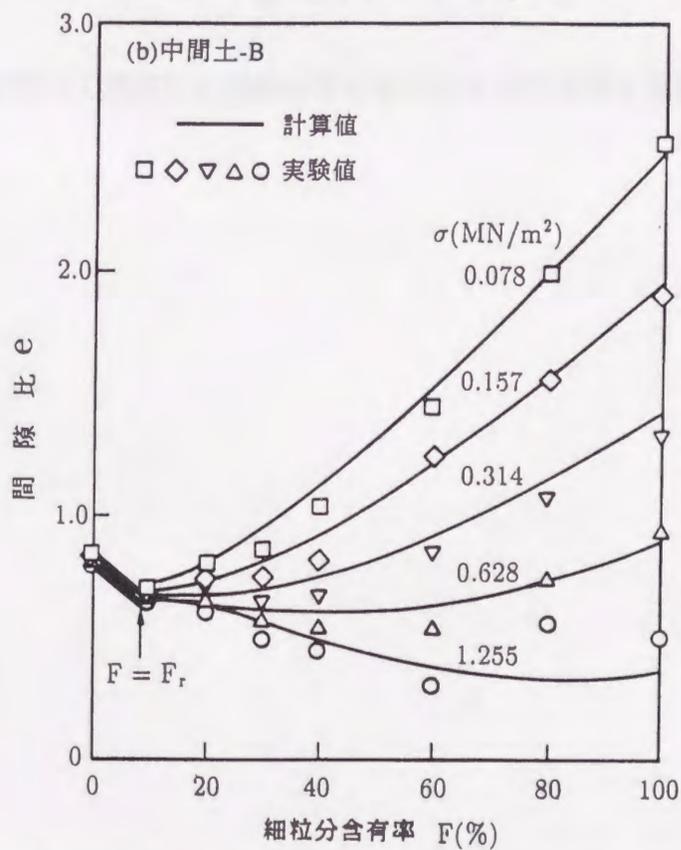


図 4.12(b) 中間土の間隙比と細粒分含有率の関係(計算結果と実験結果の比較)

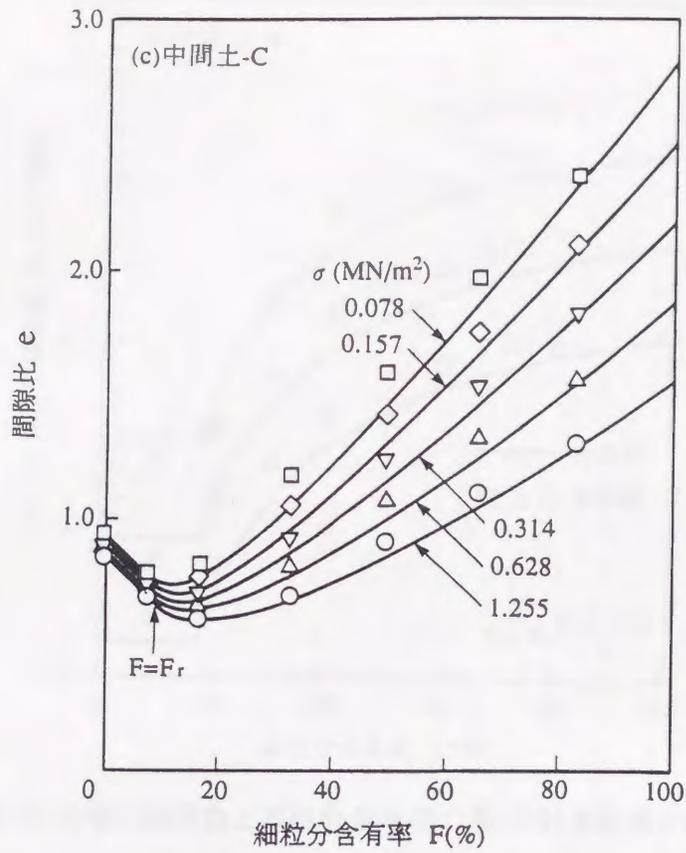


図 4.12(c) 中間土の間隙比と細粒分含有率の関係(計算結果と実験結果の比較)

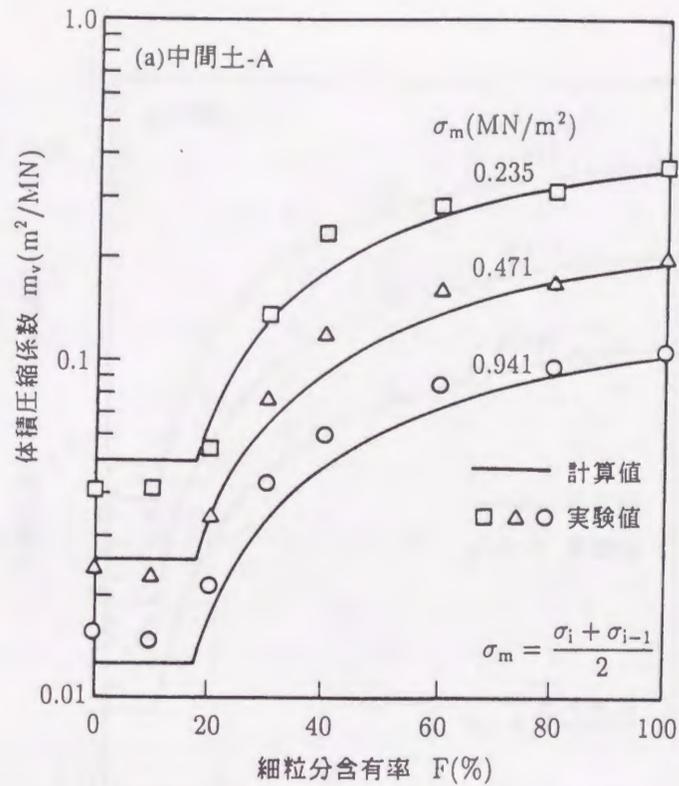


図 4.13(a) 中間土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係(計算結果と実験結果の比較)

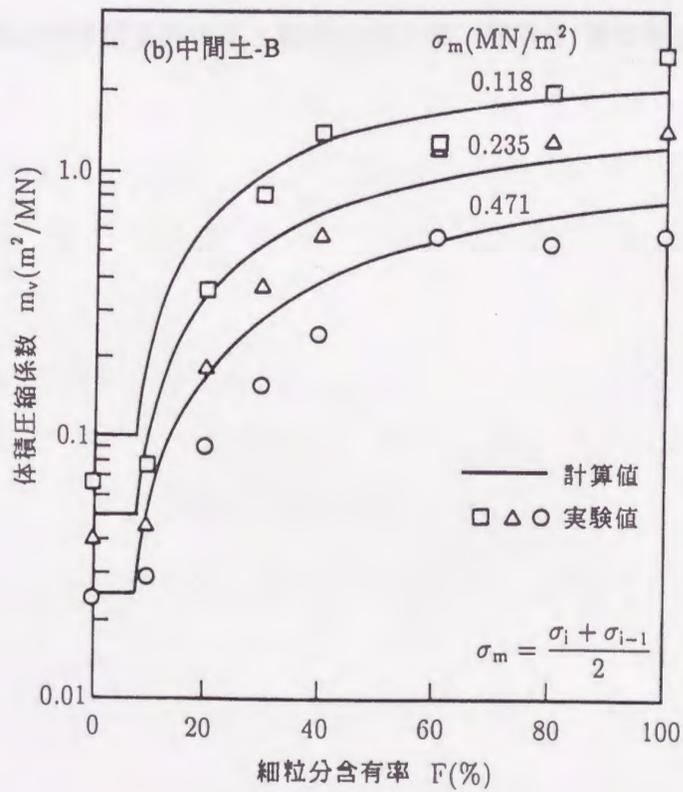


図 4.13(b) 中間土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係(計算結果と実験結果の比較)

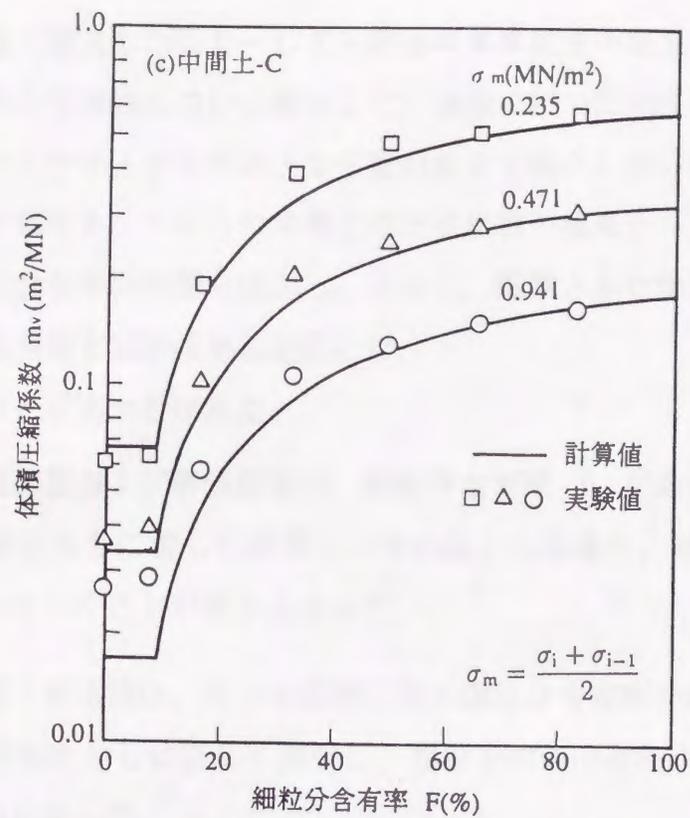


図 4.13(c) 中間土の体積圧縮係数と細粒分含有率の関係(計算結果と実験結果の比較)

4. 5 結 論

本章では、第3章で導入した応力-ひずみ関係の基本式を中間土の圧縮特性に適用し、実験結果をもとにその妥当性について検証した。実験に用いた試料は、豊浦砂と珪砂およびカオリン、ベントナイトと有明粘土を任意の割合で混合した三種類の中間土であり、それぞれ圧縮特性が異なる。これらの中間土の圧密試験の結果から、中間土の一元圧縮特性に及ぼす細粒分含有率の影響を検討し、さらに、提案された中間土の応力-間隙比関係および体積圧縮係数を実験結果と比較した。

その結果、次のことが明かとなった。

- 1) 中間土の圧縮指数および膨張指数は、細粒分含有率 F がある値までは、細粒分含有率の減少とともに著しく減少し、それ以下になると、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合に近づいていくことが明かとなった。
- 2) 中間土の体積圧縮係数は、同一の圧密圧力で細粒分含有率がある値までは、細粒分含有率の減少とともに著しく減少し、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合に近づいていくことが明かとなった。
- 3) 中間土の圧縮特性が粗粒子のみの場合に近づいていくときの境界の細粒分含有率を F_r とすると、 $F > F_r$ の範囲では、中間土の圧縮指数および膨張指数は、細粒分含有率の減少とともに著しく減少するが、 $F \leq F_r$ の範囲では、細粒分含有率の影響はほとんど見られない。また、このときの F_r の値は、中間土の種類によって異なる。
- 4) 中間土の圧縮特性が粗粒子のみの特性に近づくとときの境界の細粒分含有率 F_r の値は、本実験で用いた試料に限れば、約10~20%の範囲にあり、高塑性の細粒子を持つ中間土ほど小さな値を示すことが明かとなった。
- 5) 中間土内部の応力分担割合の評価をもとに、粗粒子骨格とマトリックスに作用する応力を算定し、式(4.11) および式(4.17) で示されるように、粗粒子とマトリックスの材料定数を用いて求められる中間土の応力-間隙比関係および体積圧縮係数を誘導した。
- 6) 中間土の応力-間隙比関係および体積圧縮係数の計算結果は、いずれの中間土に

対しても実験結果を精度よく表すことができる。

- 7) 提案式により、中間土の圧縮特性を粗粒子およびマトリックスの特性から予測することができる。

参 考 文 献

- 1) 大嶺 聖, 落合英俊, 林 重徳, 梅崎健夫: 混合土の圧密特性に関する一考察, 土木学会第44回年次学術講演会, pp.398~399, 1989年.
- 2) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・梅崎健夫・満石孝司: 混合土のせん断特性に及ぼす細粒分の影響, 第24回土質工学会研究発表会, pp.693~696, 1989年.
- 3) Omine, K., Ochiai, H., Hayashi, S., Umezaki, T., and Otani, J.: Shear properties of clay-sand composite soils, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu Univ.*, vol.49, No.4, pp.213~228, 1989.
- 4) Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R. : Fundamental aspects of the atterberg limits, *ASCE, SM6*, pp.75~105, 1964.
- 5) 土質工学会編: 土の試験実習書 - 第二回改訂版 -, 1991年.
- 6) 大嶺 聖・落合英俊: 砂と粘土の混合土の一次元圧縮特性, 九州大学工学集報, 第64巻, 第5号, pp.225~235, 1991年.
- 7) 大嶺 聖, 落合英俊, 林 重徳, 梅崎健夫: 混合土の圧密特性に関する一考察, 土木学会第44回年次学術講演会, pp.398~399, 1989年.
- 8) 鬼塚克忠・吉武茂樹: 粘土・砂の飽和混合土の圧密特性, 土と基礎, 第34巻, 第7号, pp.73~79, 1986年.
- 9) Fukue, M., Okusa, S., and Nakamura, T. : Consolidation of sand-clay mixtures, *ASTM, STP.*, No.892, pp.627~641, 1986.
- 10) 倉田 進, 藤下利夫: 砂と粘土の工学的性質に関する研究, 運輸省港湾技術研究所報告, 第11巻, 第9号, pp.389~424, 1960年.
- 11) Trollope, D.H. and Zafar, S.M. : A study of the shear strength of saturated sand, and sand/clay mixtures, in triaxial compression, *Proc., 2nd Australia-NewZealand Conf. S.M.F.E.*, pp.7~16, 1965.
- 12) Skempton, A.W. : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3~18, 1985.

- 13) 福江正治・大草重康：砂と粘土の混合土の工学的性質の新しい評価方法について，東海大学紀要海洋学部，第14号，pp.247～261，1981年.
- 14) 八尾 真太郎，平田茂良：中間土の強度発現機構に関する考察(その2)，第25回土質工学会研究発表会，pp.701～704，1990年.

第5章 中間土の強度特性

5.1 概説

これまで、比較的粒径のそろった砂や粘土については、実験的および理論的に多くの研究がなされており、その力学特性は、かなりの程度明らかにされている。しかしながら、中間土については、粗粒子と細粒子が様々な割合で混ざっているため、その定量的な評価法が十分に確立されていない。

本章では、第3章の応力—ひずみ関係の基本式に基づき、正規圧密された中間土の強度を評価する手法を提案する。

なお、Schofield ら¹⁾は、土がせん断されるときに、応力履歴とは無関係に最終的にある応力状態に至るとし、このとき土が摩擦流体のように流れる状態を限界状態と名付けた。このような限界状態における土の強度特性を明かにすることは、土の基本的な特性を理解する上で重要なことである。また、正規圧密された土の内部摩擦角 ϕ' は、限界状態における摩擦角 ϕ_{cv} と等しいので、ここでは、正規圧密された中間土の強度を評価するために、限界状態の応力比を用いることとする。

各節の内容について説明すると以下のようなものである。

5.2節では、低塑性および高塑性の細粒子を持つ二種類の中間土の非排水三軸圧縮試験結果をもとに、正規圧密された中間土の強度特性は、限界状態の応力比で表されることを示す。さらに、中間土の有効応力経路、過剰間隙水圧とせん断ひずみの関係および応力比とせん断ひずみの関係が細粒分含有率の減少に伴い、次第に細粒分のみから次第にゆる詰め状態にある粗粒子のみへと変化することを明らかにする。5.3節では、粗粒子骨格とマトリックスの単位体積当たりの仕事量増分を用いて三軸圧縮応力状態における応力分担割合を評価することにより、中間土の限界状態の応力比の算

定する手法を述べる。5.4節では、提案された限界状態の応力比の算定するために必要なパラメータの決定法を述べ、計算結果と実験結果の比較により、その妥当性を検証する。さらに、5.5節では、その提案式に基づいて内部摩擦角と細粒分含有率および塑性指数の関係式を求め、既往の実験結果への適用性を確かめる。最後に、5.6節で本章で得られた成果を要約する。

5. 2 三軸圧縮応力状態における中間土の応力・変形特性

5. 2. 1 試料および供試体の作製方法

実験に用いた試料は、豊浦砂、カオリンおよびベントナイトを所定の割合で混合して作製した中間土であり、次の2つの種類に分けられる。

- (1) 中間土-A：豊浦砂に細粒分としてカオリンを混合した試料
- (2) 中間土-B：豊浦砂に細粒分として重量比で1:1に配合したカオリンとベントナイトを混合した試料

中間土-AおよびBは、それぞれ低塑性および高塑性の細粒子を持つ中間土である。細粒分含有率 F は、中間土-Aの場合、0,30,50,70および100%、中間土-Bの場合、0,20,40,60および100%で、いずれも計5種類とした。これらの試料の物理的性質を表 4.1 に示す。

試料は、液性限界の約2倍の含水比の細粒分に豊浦砂を混合して十分攪拌し、80kPa程度の負圧をかけて十分脱気を行った後、内径15cm、高さ25cmの予圧密容器を用いて鉛直圧密圧力(中間土-A;68.6kPa、中間土-B;49kPa)を作用させて一次元圧密させた。圧密終了後、試料を抜き取り、4つに切ってそれぞれをパラフィンで固め、試験時にそれを切り出して供試体を作製した。ただし、 $F=20$ および 30% の非塑性の場合は、非常に柔らかく、上述の方法では供試体を作製することができなかつたため、図 5.1 に示すように供試体と同じ大きさのモールドを三軸セル内に設置し、その中で試料を所定の鉛直圧密圧力で圧密させ、上部の余分な試料を切り取って供試体を作製した。このときの試料の含水比は、細粒子と粗粒子が分離しない程度のできるだけ高い値とした。また、 $F=0\%$ の粗粒子のみの場合は、空中落下法によりゆる詰め供試体を作り、29.4kPaの負圧で自立させた状態で通水を行った。さらに、ろ紙、ゴムスリーブと供試体の間、排水経路を飽和させるために、二重負圧法²⁾を用いた。供試体の大きさは、いずれも直径 5cm、高さ 12cmである。また、供試体の上下端面には、シリコングリースを塗布したメンブレンを貼付けて摩擦を軽減した。

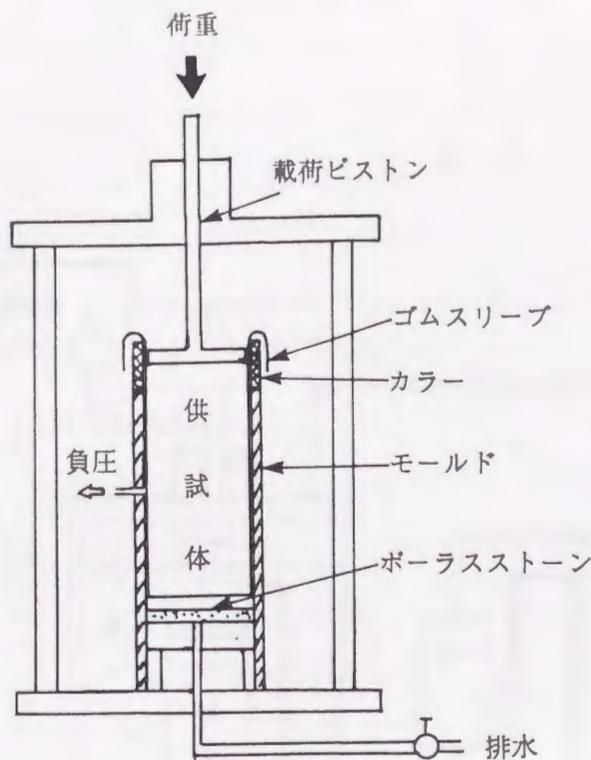


図 5.1 非塑性の場合の供試体の作製方法

5. 2. 2 三軸試験装置の概要および実験方法

三軸試験装置の概要を図 5.2 に示す。三軸セルは、ピストン部、アクリルセル、キャップおよびペダスタルを主体として構成される。ピストン部には、ベローフラムを取り付けて摩擦の影響を軽減させている。軸力は、ピストン上部に取り付けたロードセル(容量 4.9kN) により、また、軸方向変位は、セル外部に取り付けたダイヤルゲージ(最大 20mm)により計測する。間隙水圧は、供試体側面のろ紙を通して水圧計(容量 490kPa)により計測する。側圧およびバックプレッシャーの計測は、ブルドン管(最小目盛り 1.96kPa)によっている。ひずみ制御は、電気モータによる駆動装置により行う。計測データは、各アンプからAD変換を行って直接マイクロコンピュータに電送し、自動的にデータの処理および図化が行えるようになっている。

実施した試験は、等方圧密非排水三軸圧縮試験である。196kPaのバックプレッシャーを作用を約20時間作用させた後、圧密圧力 98kPaのもとで、一次圧密が終了するまで等方圧密させた。圧密時間は、中間土-Aの場合は約4時間、中間土-Bの場合は約24時間

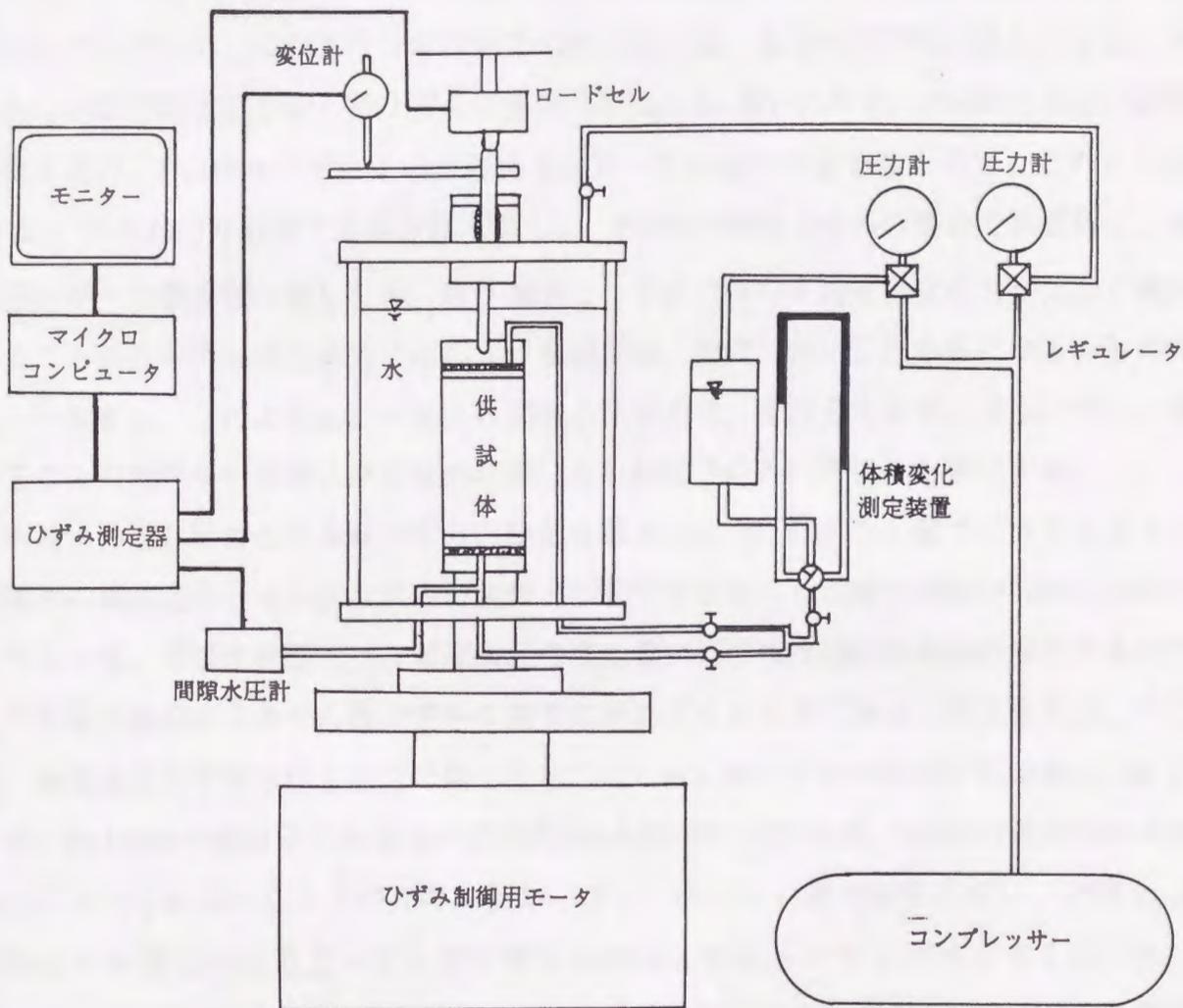


図 5.2 三軸試験装置の概要

である。ただし、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合は、圧密が短時間で終了するので、圧密時間を約1時間とした。また、排水は供試体側面のペーパードレーンを用いて行った。せん断は、軸ひずみ速度約 $0.07\%/min$ で行った。圧密開始前に測定した B 値は、いずれの供試体についても 0.97 以上であった。

5. 2. 3 応力・変形特性

非排水三軸圧縮試験より得られた中間土の有効応力経路を図 5.3 に示す。図(a)は、低塑性の細粒分を含む中間土-A、図(b)は、高塑性の細粒分を含む中間土-B の場合を示したものである。中間土の有効応力経路は、細粒分含有率の影響を受けて大きく変化するが、いずれの中間土についても細粒分含有率の減少とともに次第に粗粒子のみの特性に近づいていく。このような有効応力経路の違いは、間隙水圧特性に現れてくる。中間土の過剰間隙水圧とせん断ひずみの関係を図 5.4(a), (b) に示す。F=0%の場合の過剰間隙水圧は、F=100%の細粒子のみの場合に比べてかなり大きな値を示す。このことは、図 5.1 の有効応力経路でも示されるように、F=0%の粗粒子のみの場合の供試体は、軸差応力が一旦最大値に達した後、再び減少し、それに伴い平均有効主応力が大きく減少することからも明らかである。このような傾向は、龍岡³⁾ が示した非常にゆるい砂の特性と一致する。このように、中間土の間隙水圧挙動は、細粒分含有率の減少に伴い、細粒子のみの特性から次第にゆる詰め状態にある粗粒子のみの特性へと変化する。

中間土の軸差応力とせん断ひずみの関係を図 5.5(a), (b) に示す。図で示されるように、中間土の軸差応力とせん断ひずみの関係と細粒分含有率には明瞭な関係は認められない。このことは、非排水状態では、間隙水圧の発生量に応じて有効応力経路が変化するので、その影響が軸差応力とせん断ひずみの関係に現れてくるためであると考えられる。そこで、軸差応力を平均有効主応力で除した応力比とせん断ひずみの関係を図 5.6(a), (b) に示す。F=100%の細粒子のみ場合の応力比-せん断ひずみ関係は、F=0%の粗粒子のみの場合に比べて初期の立ち上がりの勾配が小さく、応力比の最大値も小さい。中間土-A の場合の中間土の応力比-せん断ひずみ関係は、細粒分含有率が減少するにつれ、F=100%の場合の特性から次第に F=0%の場合の特性に近づいていく。このような傾向は、中間土-B に対しても同様である。

以上のことから、正規圧密された中間土の応力-ひずみ関係は、細粒分含有率の減少に伴い、細粒子のみの特性から次第にゆる詰め状態にある粗粒子のみの特性へと変化する事が明かとなった。このような中間土の変形特性は、第3章で述べた土の構造に着目すると中間土内の粗粒子骨格およびマトリックスの体積含有率に依存するものと考えられることができる。

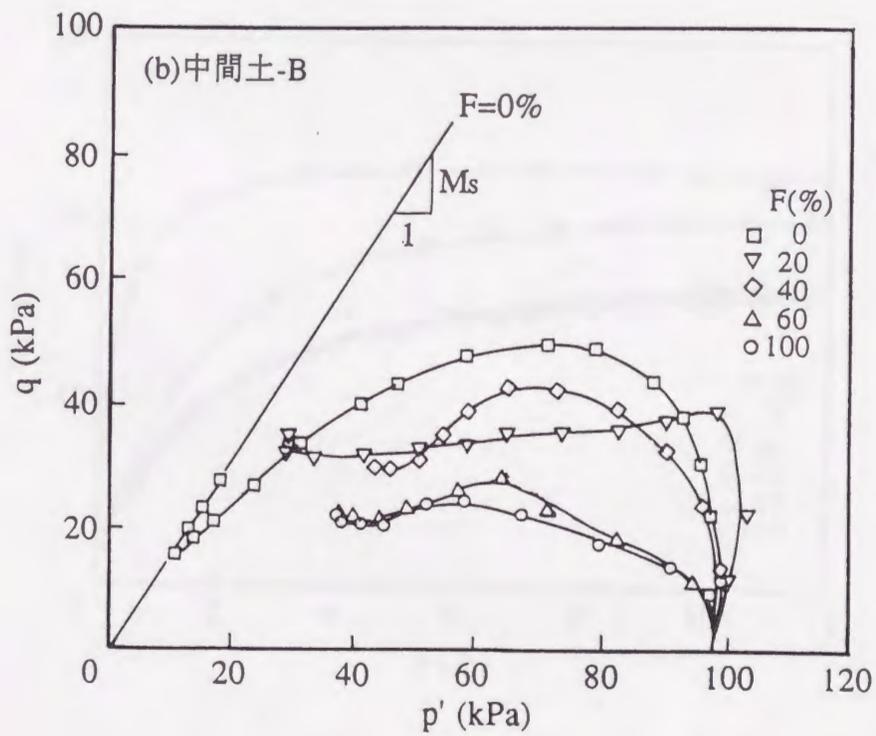
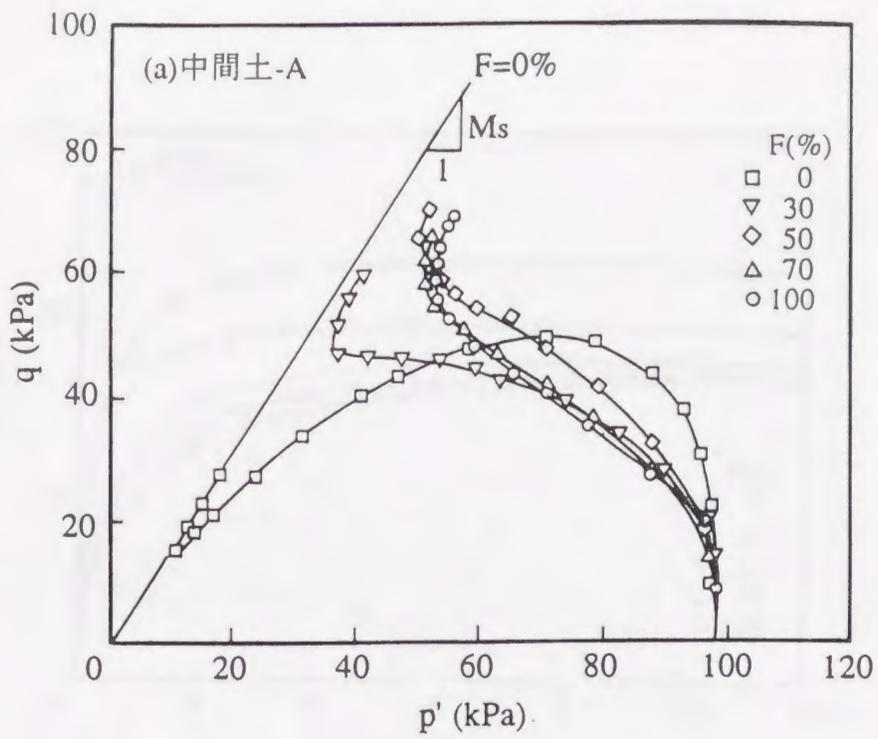


図 5.3 中間土の有効応力経路

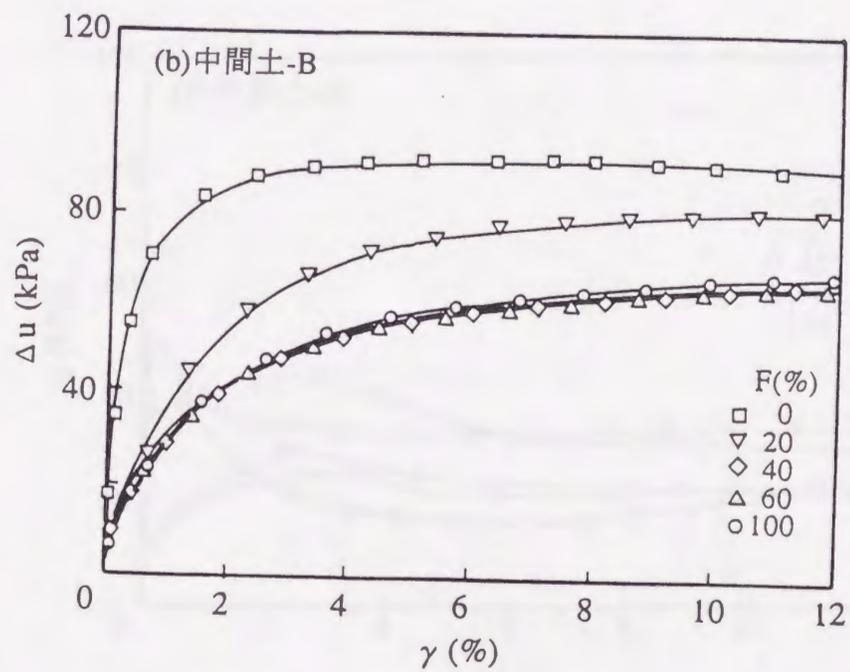
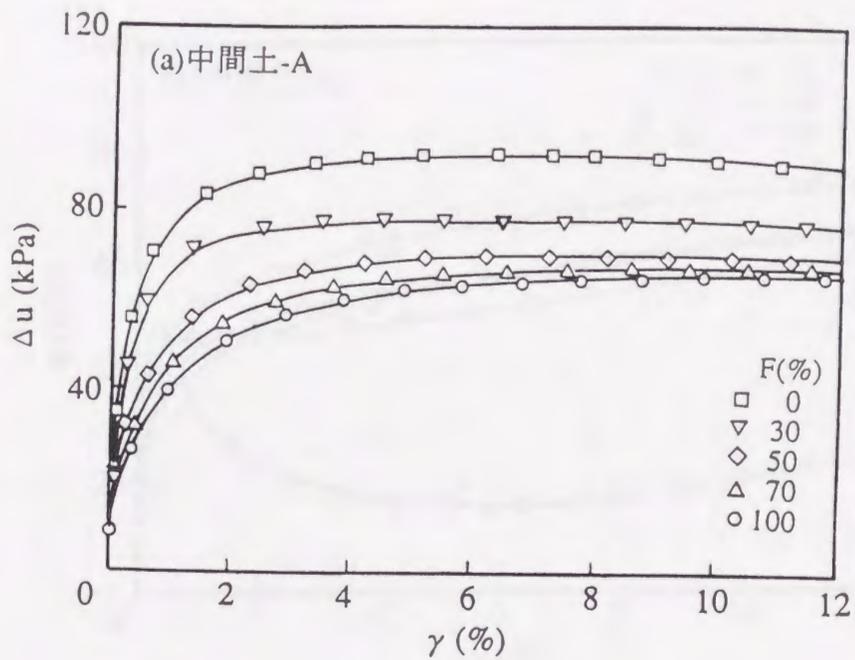


図 5.4 中間土の過剰間隙水圧とせん断ひずみの関係

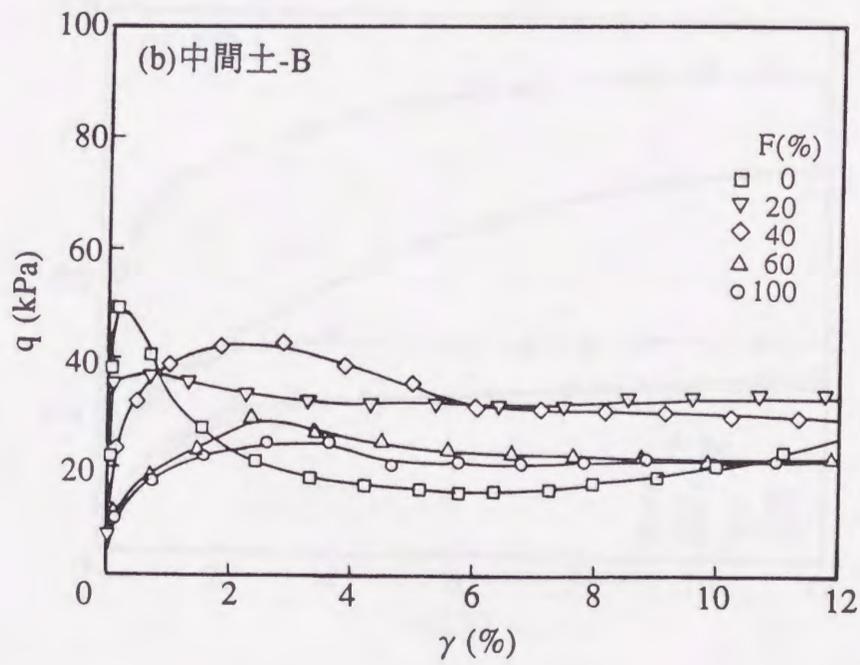
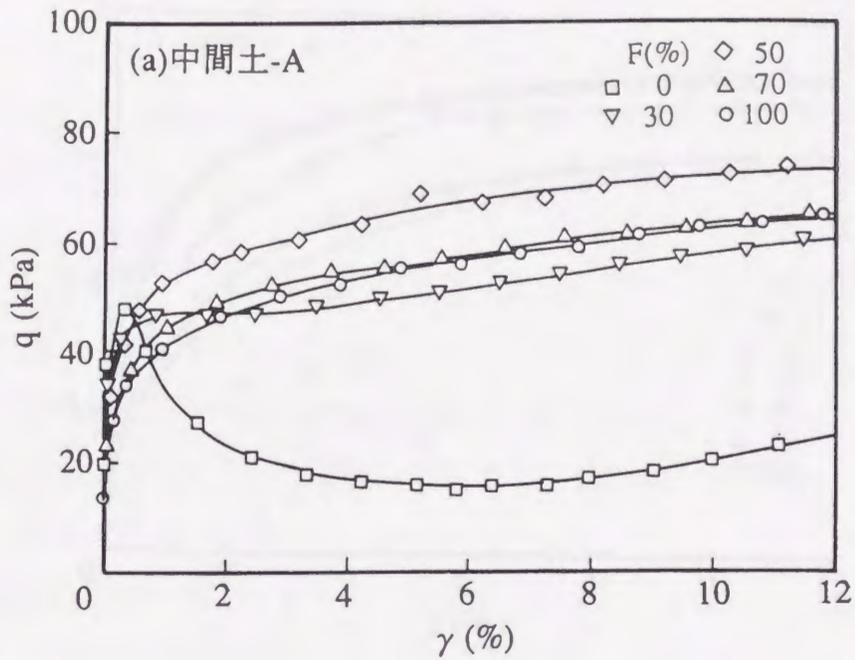


図 5.5 中間土の軸差応力とせん断ひずみの関係

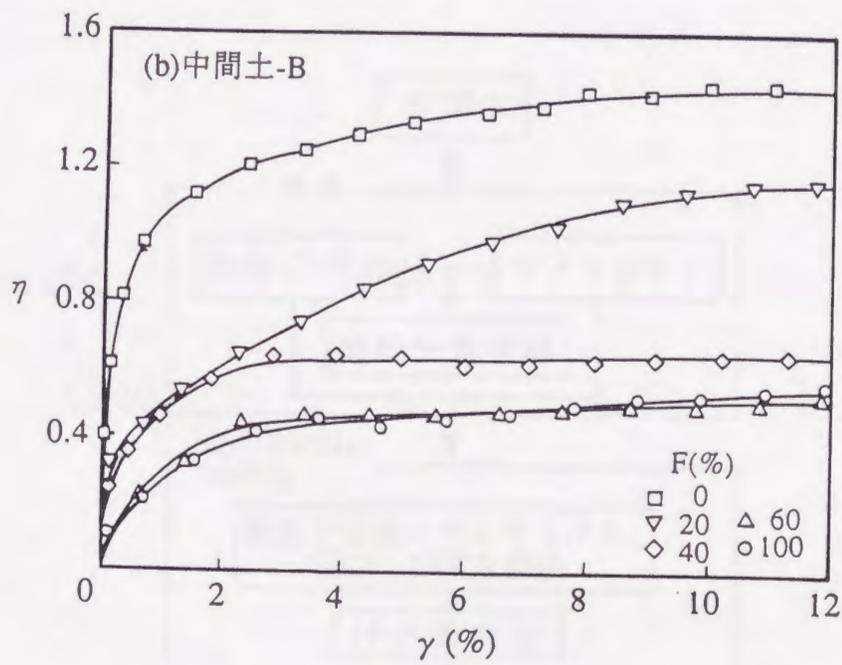
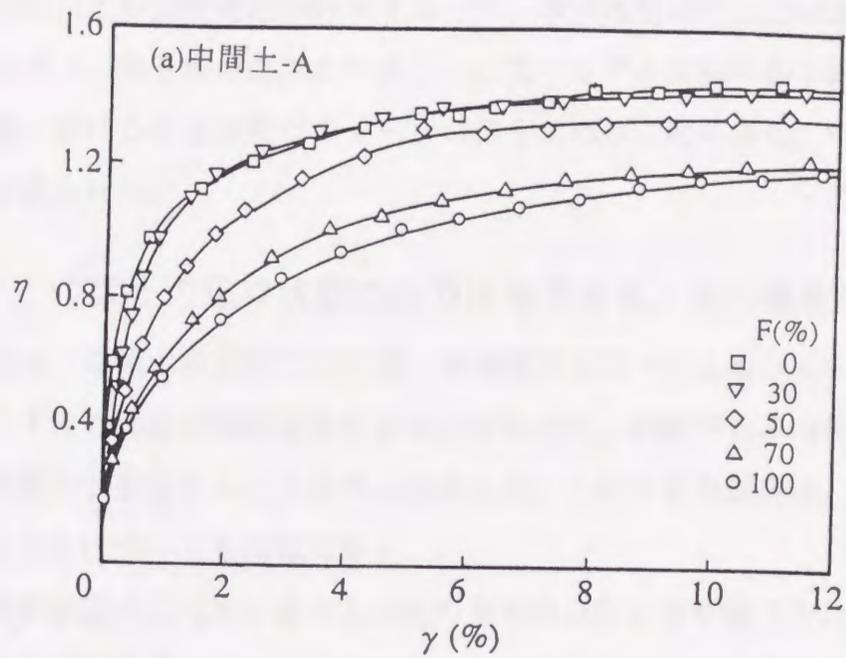


図 5.6 中間土の応力比とせん断ひずみの関係

5.3 限界状態の応力比の算定⁴⁾

正規圧密された土の強度特性を評価する上で、限界状態の応力比は重要なパラメータである。本節では、第3章で述べた中間土の応力-ひずみ関係の基本式に基づいて三軸圧縮応力状態における応力分担パラメータの値を求めることにより、中間土の限界状態の応力比の算定を行う。

5.3.1 中間土の限界状態の応力比を求めるための基本的な考え方

5.2節では、中間土の有効応力経路、過剰間隙水圧-せん断ひずみ関係および応力比-せん断ひずみの関係が細粒分含有率の減少に伴い、細粒子のみの特性から次第に粗粒子のみの特性へと変化することを明らかにした。このような傾向は、中間土の限界状態における応力比についても同様である。

中間土の限界状態の応力比を求めるための基本的な考え方を図5.7に示す。まず、中間土を構成する粗粒子骨格とマトリックスに着目する。マトリックスおよび粗粒子骨格の体積含有率は、細粒分含有率を用いて、それぞれ式(3.13)および(3.16)から算定され

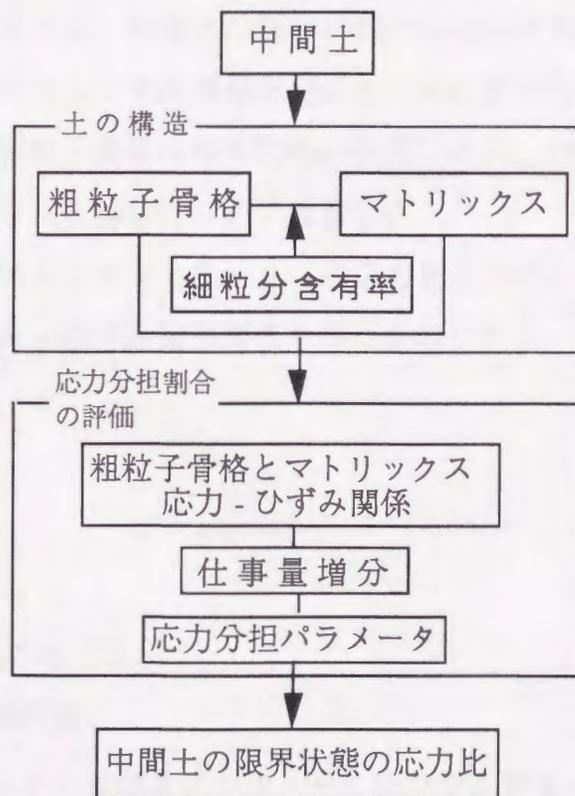


図5.7 中間土の限界状態の応力比を求めるための基本的な考え方

る。このときに必要なパラメータは、 $F=100\%$ のときの間隙比 e_{c0} と粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率 F_r であり、等方圧密時の間隙比と細粒分含有率の関係から決定される。一方、第2章で述べたように、弾性材料から成る二種混合体については、内部の応力とひずみの分布が、応力およびひずみを一定と考えた場合の間にあることが理論的に確かめられている⁹⁾。そのため、中間土についても、応力とひずみの関係を考察する場合、内部の応力とひずみの分布を考慮する必要がある。仮に、中間土内部で応力が一定であるとする、粗粒子骨格とマトリックスの内、強度の低い方が先に限界状態に達し、その材料で中間土の強度が規定されることになるので、中間土の強度の違いを説明するためには、応力分担割合の評価が重要となる。ここでは、粗粒子骨格とマトリックスの単位体積当たりの仕事量増分を用いて応力分担割合を決定し、中間土の限界状態における応力比を算定する。

したがって、中間土の限界状態の応力比を求めるためには、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率の算定および応力分担割合の評価が必要となる。

5. 3. 2 粗粒子骨格とマトリックスの材料特性

5. 3. 1で述べたように、中間土の限界状態の応力比を算定するためには、粗粒子骨格とマトリックスの応力-ひずみ関係を定式化する必要がある。ここでは、マトリックスは正規圧密状態、粗粒子骨格はゆる詰め状態にあり、いずれも以下に示すような応力-ひずみ関係で表される場合について考察する。

すなわち、粗粒子骨格およびマトリックスの応力比とひずみ増分比が直線関係にあり、次に示すような応力増分-ひずみ増分関係を持つものとする。

$$d\gamma = \frac{k\eta}{M-\eta} d\eta \quad (5.1)$$

$$dv = m_v dp + k'\eta d\eta \quad (5.2)$$

ここに、 M ：限界状態の応力比

M_v ：体積圧縮係数

k ： $\eta=M/2$ の点における応力比-せん断ひずみ関係の接線勾配の逆数

$k'=k/\alpha$ (α ：応力比-ひずみ増分比関係の直線勾配)

式(5.1)のせん断ひずみは、応力比のみの関数として表され、 $\eta=M$ のとき $dy = \infty$ となり、限界状態に達する。また、式(5.2)の体積ひずみは、平均主応力および応力比の変化によって生じる二つの成分の和で表されることを意味している。これらの式は、少ないパラメータで粗粒子骨格およびマトリックスの応力-ひずみ関係を比較的よく表すことができる。なお、大槓⁶⁾ や池浦ら⁷⁾ によって報告されているように、土の応力比-せん断ひずみ関係は、応力経路に依存するが、その影響を考慮すると複雑になるので、ここでは、式(5.1)で示されるように、せん断ひずみ増分 dy が 応力比増分 $d\eta$ によって一義的に決まるものとする。

5. 3. 3 応力分担パラメータの決定

第4章では、中間土の一次元圧縮状態における応力分担パラメータの決定法を述べたが、ここでは、等方応力状態および p 一定で q が変化する場合の応力分担パラメータの決定を行う。

(a) 等方応力状態の場合

等方応力状態($\bar{q}=0$)において、粗粒子骨格とマトリックスの平均主応力増分の関係は、応力分担パラメータ $b(=b_0)$ を用いて、式(3.27) より次のように表される。

$$d\bar{p}_{s0} = b_0 d\bar{p}_0^* \quad (5.3)$$

ここで、 $d\bar{p}_{s0}$ および $d\bar{p}_0^*$ は、それぞれ等方応力状態における粗粒子骨格およびマトリックスの平均主応力増分を表す。さらに、中間土に作用する応力が粗粒子骨格とマトリックスの体積に関する平均値で表されるものとする、粗粒子骨格とマトリックスの平均主応力増分は、式(3.28)、(3.29) より次のように表される。

$$d\bar{p}_{s0} = \frac{b_0}{(b_0 - 1)R + 1} d\bar{p}_0 \quad (5.4)$$

$$d\bar{p}_0^* = \frac{1}{(b_0 - 1)R + 1} d\bar{p}_0 \quad (5.5)$$

すなわち、応力分担パラメータ b_0 を求めることにより、粗粒子骨格とマトリックスに作用する平均主応力増分の値が算定される。このときの応力分担パラメータを決定するために、仕事量増分について考察する。

粗粒子骨格およびマトリックスの仕事量増分は、それぞれ次のように表される。

$$dW_s = \bar{p}_s d\bar{v}_s = m_{vs} \bar{p}_s d\bar{p}_s \quad (5.6)$$

$$dW^* = \bar{p}^* d\bar{v}^* = m_v^* \bar{p}^* d\bar{p}^* \quad (5.7)$$

ここで、 m_{vs} および m_v^* は、等方応力状態における粗粒子骨格およびマトリックスの体積圧縮係数である。このとき、粗粒子骨格とマトリックスの仕事量増分が等しいと仮定する。すなわち、 $dW_s = dW^*$ とおくと、 b_0 は、式(5.6), (5.7) より次のように表される。

$$b_0 = \left(\frac{m_v^*}{m_{vs}} \right)^{1/2} \quad (5.8)$$

式(5.8) は、 m_v^* と m_{vs} の比が大きくなるほど粗粒子骨格に作用する応力の分担割合が大きくなることを示している。なお、第4章で述べたように、 m_v^* および m_{vs} は、応力に依存するが、その比 m_v^*/m_{vs} を取ると、応力依存性は小さくなるので、ここでは b_0 の値を一定と見なすことにする。

したがって、等方応力状態における粗粒子骨格およびマトリックスの平均主応力は、式(5.8) の応力分担パラメータを式(5.4), (5.5) に代入し、 $\bar{p}_s = \bar{p}^* = 0$ の条件で積分することにより、それぞれ次のように表される。

$$\bar{p}_{s0} = \frac{b_0}{(b_0 - 1)R + 1} \bar{p}_0 \quad (5.9)$$

$$\bar{p}_0^* = \frac{1}{(b_0 - 1)R + 1} \bar{p}_0 \quad (5.10)$$

式(5.9), (5.10) の粗粒子骨格とマトリックスの平均主応力は、粗粒子のみの場合 ($R=1$)、 $\bar{p}_{s0} = \bar{p}_0$ となり、マトリックスのみの場合 ($R=0$)、 $\bar{p}_0^* = \bar{p}_0$ となる。また、 $b_0 \geq 1$ 、すなわち、 $m_v^* \geq m_{vs}$ の場合には、 $\bar{p}_{s0} \geq \bar{p}_0$ 、 $\bar{p}_0^* \leq \bar{p}_0$ となる。

(b) p 一定で q が変化する場合

粗粒子骨格とマトリックスの軸差応力増分の関係は、式(3.27)より、次のように表される。

$$d\bar{q}_s = b d\bar{q}^* \quad (5.11)$$

このときの粗粒子骨格とマトリックスの軸差応力増分は、式(3.28) および式(3.29) より次のように表される。

$$d\bar{q}_s = \frac{b}{(b-1)R+1} d\bar{q} \quad (5.12)$$

$$d\bar{q}^* = \frac{1}{(b-1)R+1} d\bar{q} \quad (5.13)$$

式(5.12) および (5.13) における応力分担パラメータの値を決定するために、平均主応力 \bar{p} が一定で、軸差応力 \bar{q} が変化する場合の仕事量増分について考察する。

せん断変形時の粗粒子骨格とマトリックスの仕事量増分は、式(5.1) のせん断ひずみ増分、式(5.2) の体積ひずみ増分を用いて、それぞれ次のように表される。

$$\begin{aligned} dW_s &= \bar{q}_s d\bar{\gamma}_s + \bar{p}_s d\bar{v}_s \\ &= \frac{\bar{q}_s k_s \bar{\eta}_s}{M_s - \bar{\eta}_s} d\bar{\eta}_s + \bar{p}_s k'_s \bar{\eta}_s d\bar{\eta}_s \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} dW^* &= \bar{q}^* d\bar{\gamma}^* + \bar{p}^* d\bar{v}^* \\ &= \frac{\bar{q}^* k^* \bar{\eta}^*}{M^* - \bar{\eta}^*} d\bar{\eta}^* + \bar{p}^* k^* \bar{\eta}^* d\bar{\eta}^* \end{aligned} \quad (5.15)$$

等方応力状態の場合と同様に、粗粒子骨格とマトリックスの仕事量増分が等しい、すなわち、 $dW_s = dW^*$ と仮定すると、 \bar{p} 一定で \bar{q} が変化するときの応力分担パラメータ b は、次のように表される。

$$b = \frac{k^* M^*}{k_s M_s} \frac{1 - M_s / \bar{\eta}_s}{1 - M^* / \bar{\eta}^*} \quad (5.16)$$

なお、ここでは、粗粒子骨格およびマトリックスの応力比-ひずみ増分比関係の直線勾配 α を 1, すなわち、 $k' = k/\alpha = k$ とした。

図 5.8 は、式(5.16) を用いて計算により求めた $\bar{\eta}_s/M_s$ および $\bar{\eta}^*/M^*$ と $\bar{\eta}/M$ の関係を示したものである。計算では、各応力増分ごとに粗粒子骨格とマトリックスの仕事量増分が等しいとして粗粒子骨格とマトリックスの応力を算定した。また、このときのパラメータとしては、後で述べる豊浦砂とカオリンの材料定数を用いた。図において、

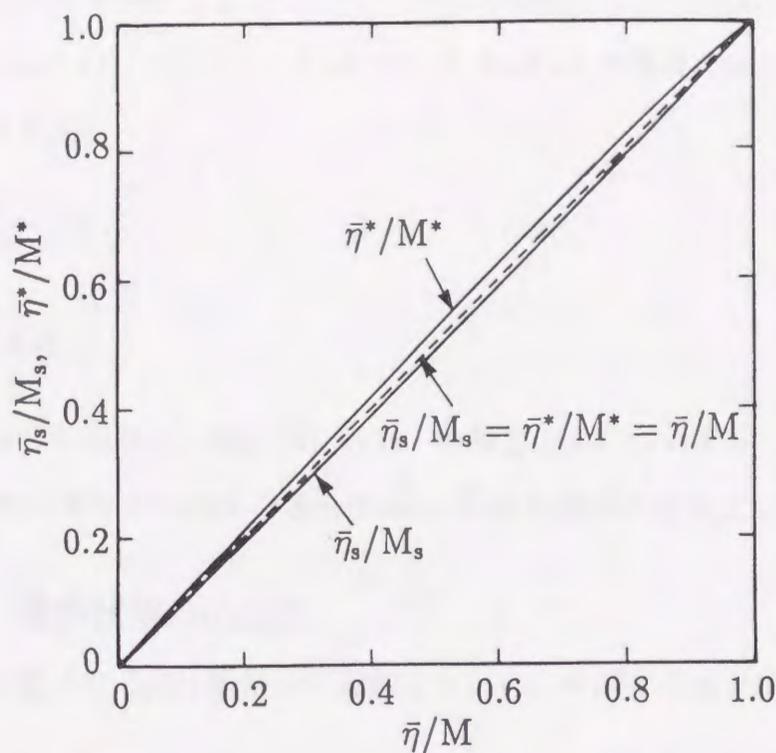


図 5.8 $\bar{\eta}_s/M_s$ および $\bar{\eta}^*/M^*$ と $\bar{\eta}/M$ の関係

$\bar{\eta}_s/M_s = \bar{\eta}^*/M^* = \bar{\eta}/M$ の線は、応力比を限界状態の値で除した値が中間土内部で一定の状態を示すものである。せん断初期では、応力比が 0 であるので、 $\bar{\eta}_s/M_s = \bar{\eta}^*/M^* = \bar{\eta}/M = 0$ となる。また、限界状態に達するまで、粗粒子骨格とマトリックスの仕事量増分が等しいとすると、粗粒子骨格とマトリックスは同時に限界状態に達することになるので、このとき、 $\bar{\eta}_s/M_s = \bar{\eta}^*/M^* = \bar{\eta}/M = 1$ となる。図より、せん断初期から限界状態に至るまで、 $\bar{\eta}_s/M_s = \bar{\eta}^*/M^* = \bar{\eta}/M$ の関係が近似的に成立すると考えることができる。このとき、式(5.16)は次のように表される。

$$b = \frac{k^*}{k_s} \frac{M^*}{M_s} \quad (5.17)$$

式(5.17)は、 k^* と k_s の比あるいは M^* と M_s の比が大きくなるほど粗粒子骨格に作用する応力の分担割合が大きくなることを意味している。このように、 \bar{p} 一定で \bar{q} が変化する場合の応力分担パラメータ b は、粗粒子骨格およびマトリックスの材料定数を用いて表される。

したがって、粗粒子骨格およびマトリックスの軸差応力は、式(5.17)の応力分担パラメータを式(5.12),(5.13)に代入し、 $\bar{q} = 0$ のとき $\bar{q}_s = \bar{q}^* = 0$ の条件で積分することにより、次のように表される。

$$\bar{q}_s = \frac{b}{(b-1)R+1} \bar{q} \quad (5.18)$$

$$\bar{q}_s^* = \frac{1}{(b-1)R+1} \bar{q} \quad (5.19)$$

平均主応力の場合と同様に、式(5.18), (5.19)の軸差応力についても、粗粒子のみの場合($R=1$), $\bar{q}_s = \bar{q}$, マトリックスのみの場合($R=0$), $\bar{q}^* = \bar{q}$ の関係が成り立つ。

5. 3. 4 限界状態の応力比

5. 3. 3で述べた応力分担割合の評価をもとに、中間土の限界状態の応力比の算定を行う。

\bar{p} 一定で \bar{q} が変化する場合、 $\bar{p} = \bar{p}_0$, $\bar{p}_s = \bar{p}_{s0}$, $\bar{p}^* = \bar{p}^*_0$ となるので、このときの粗粒子骨格およびマトリックスの応力比は、式(5.9), (5.10) および (5.18),(5.19) より、それぞれ次のように表される。

$$\bar{\eta}_s = \frac{q_s}{p_s} = \frac{b}{b_0} \frac{(b_0-1)R+1}{(b-1)R+1} \bar{\eta} \quad (5.20)$$

$$\bar{\eta}^* = \frac{q^*}{p^*} = \frac{(b_0-1)R+1}{(b-1)R+1} \bar{\eta} \quad (5.21)$$

上述したように、中間土が限界状態に達すると、粗粒子骨格とマトリックスのいずれとも限界状態にあると見なしてもよいので、式(5.20), (5.21)において、 $\bar{\eta} = M$ のとき $\bar{\eta}_s = M_s$, $\bar{\eta}^* = M^*$ とおくと、粗粒子骨格およびマトリックスの限界状態の応力比は、それぞれ次のように表される。

$$M_s = \frac{b}{b_0} \frac{(b_0-1)R+1}{(b-1)R+1} M \quad (5.22)$$

$$M^* = \frac{(b_0-1)R+1}{(b-1)R+1} M \quad (5.23)$$

さらに、式(5.22),(5.23)より b_0 を消去すると、最終的に中間土の限界状態の応力比 M は、次のように表される。

$$M = \frac{(b-1)R+1}{\frac{bR}{M_s} + \frac{1-R}{M^*}} \quad (5.24)$$

すなわち、中間土の限界状態の応力比は、粗粒子骨格とマトリックスの限界状態の応力比 M_s , M^* , 応力分担パラメータ b および粗粒子骨格の体積含有率 R を用いて表される。また、式(5.24)は、 $R=1$ の粗粒子骨格のみの場合、 $M=M_s$ となり、 $R=0$ のマトリックスのみの場合、 $M=M^*$ の関係を満足する。図 5.9 は、式(5.24)の応力分担パラメータ b の値を変化させた場合の中間土の限界状態の応力比と細粒分含有率の関係を示したものである。計算では、粗粒子骨格の体積含有率 R を式(3.16)'により求め、各パラメータの値を $M_s=1.4$, $M^*=1.0$, $F_r=20\%$ および $e_{c0}=1.5$ とした。中間土の限界状態の応力比は、 $F=100\%$ のとき、 $M=M^*$, $F=F_r$ のとき、 $M=M_s$, となり、細粒分含有率の減少にともない次第に M^* から M_s の値に近づいていく。このときの限界状態の応力比 M の増加割合は、 b の値が大きいほど大きくなる。ただし、 $F \leq F_r$ の範囲では、 $R=1$ と考えているので、 $M=M_s$ となる。

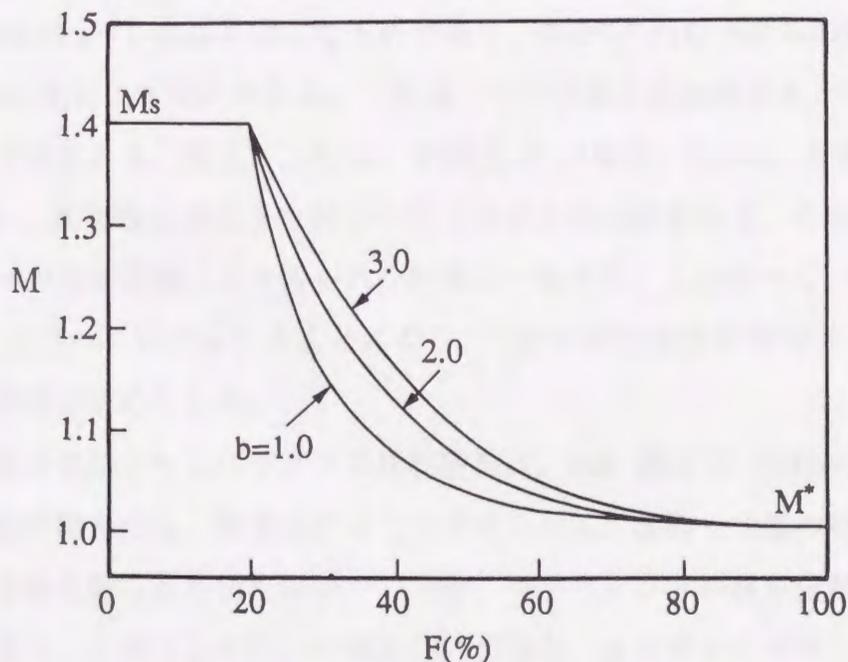


図 5.9 中間土の限界状態の応力比 M と細粒分含有率 F の関係
(応力分担パラメータ b を変化させた場合)

5. 4 実験結果による提案式の検証^{8),9)}

5. 3節では、三軸圧縮状態における応力分担割合を評価することにより、中間土の限界状態における応力比を誘導した。本節では、その提案式の妥当性を検証するために、パラメータの決定法を示し、実験結果と計算結果の比較を行う。

5. 4. 1 パラメータの決定法

中間土の限界状態の応力比を求めるために必要なパラメータの個数は、粗粒子骨格の体積含有率を算定するために2個、粗粒子骨格とマトリックスの材料定数として4個の計6個である。前者の2個は、 $F=100\%$ のときの間隙比 e_{c0} と粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率 F_r であり、等方圧密時の間隙比と細粒分含有率の関係から決定される。また、後者の4個は、粗粒子骨格とマトリックスの材料定数、 M_s , k_s および M^* , k^* であり、それぞれ $F=0$ および 100% の場合の応力比—せん断ひずみ関係から決定される。

圧密圧力 $p_c=98\text{kPa}$ のときの、中間土の間隙比と細粒分含有率の関係を図 5.10 に示す。際電分含有率 $F=100\%$ のときの間隙比については、実験結果より中間土-A の場合は、 $e_{c0}=1.64$ 、中間土-B の場合は、 $e_{c0}=3.54$ である。図中の直線は、粗粒子骨格の体積含有率 $R=1$ の場合の $e-F$ 関係を示したものであり、 $F=0\%$ の粗粒子のみの場合の間隙比 e_{s0} を用いて式(4.18)により求められる。 F_r は、この直線と実験結果より得られた $e-F$ 関係との交点で表される。図より、 F_r は、中間土-A の場合、約24%、中間土-B の場合、約12%であり、高塑性の細粒子を持つ中間土ほど小さな値を示す。このような傾向は、第4章で述べた圧密試験により得られた結果と一致する。したがって、パラメータ e_{c0} および F_r を式(3.16)' に代入することにより、任意の細粒分含有率 F に対する粗粒子骨格の体積含有率が求められる。

一方、粗粒子骨格とマトリックスの材料定数は、 $F=0$ および 100% の場合についての三軸圧縮試験の結果から、表 5.1 のように与えられる。粗粒子骨格の材料定数は、豊浦砂の実験結果から得られた値を用いているが、マトリックスの材料定数については、中間土-A の場合、カオリンから、中間土-B の場合、カオリンとベントナイトの混合試料を用いた供試体の実験結果から得られた値を用いている。限界状態の応力比 M はいずれの場合も応力比の最大値により求めた。 k は $\eta=M/2$ の点における応力比—せん断ひ

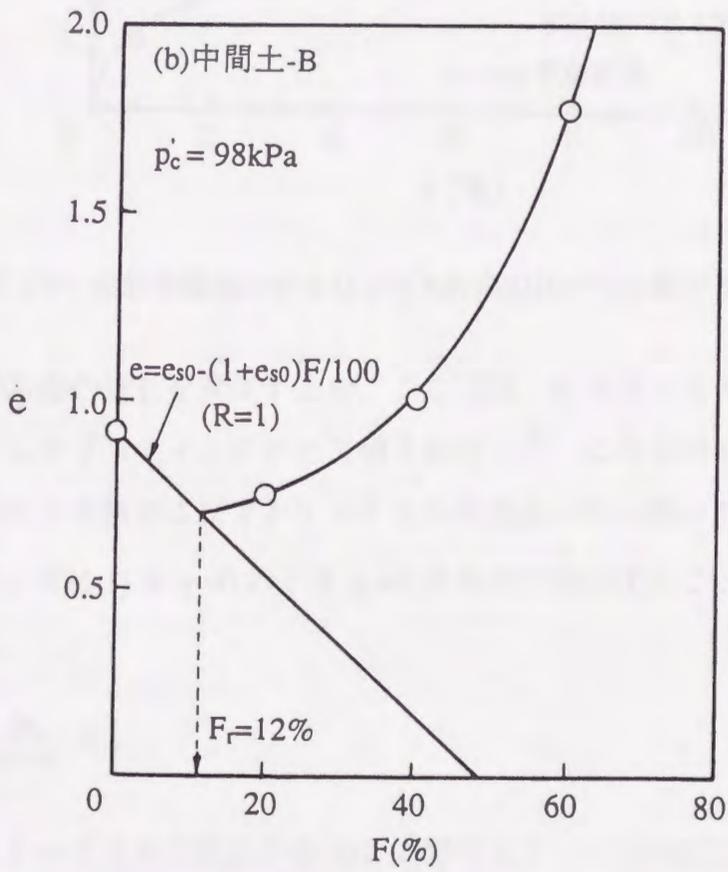
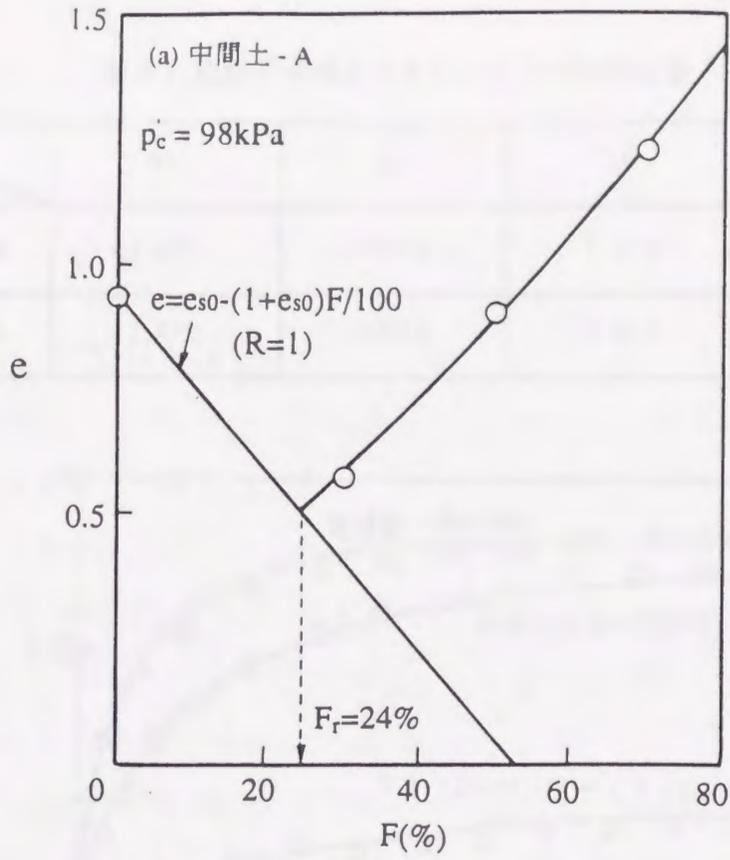


図 5.10 中間土の間隙比と細粒分含有率の関係
(パラメータ F_r の決定)

表 5.1 粗粒子骨格とマトリックスの材料定数

	M_s	k_s	M^*	k^*
中間土-A	1.479	0.014	1.259	0.036
中間土-B	1.479	0.014	0.618	0.102

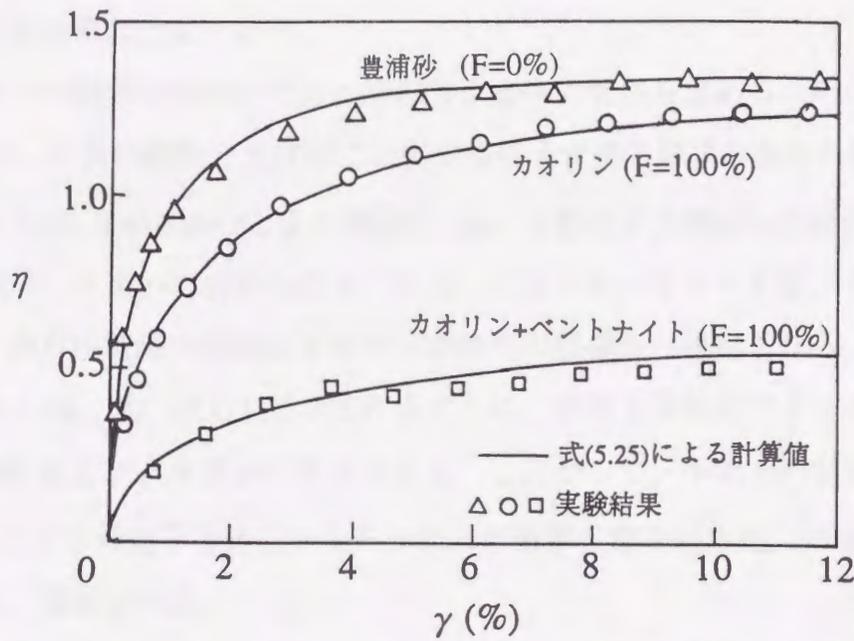


図 5.11 粗粒子骨格とマトリックスの応力比—せん断ひずみ関係

ずみ関係の接線勾配の逆数を意味するが、ここでは、応力比—せん断ひずみ関係を最もよく表せるようにフィッティングさせて値を決定した。これらの材料定数を用いて計算により求めた粗粒子骨格およびマトリックスの応力比—せん断ひずみ関係を図 5.11 に示す。計算値は、式(5.1)を $\gamma=0$ のとき $\eta=0$ の条件で積分することにより得られる次式によって求めた。

$$\gamma = k \left(M \ln \frac{M}{M-\eta} - \eta \right) \quad (5.25)$$

図より、計算によって求めた粗粒子骨格およびマトリックスの応力比—せん断ひずみ関係は、細粒分含有率 $F=0$ および 100% の場合の実験結果を比較的精度良く表すことができる。

一方、表 5.1 の粗粒子骨格とマトリックスの材料定数を用いると、式(5.17) の応力分担パラメータの値は、中間土-A に対して $b=2.19$ 、中間土-B に対して $b=3.04$ となる。ここで用いた中間土に限れば、応力分担パラメータの b の値は、ほぼ 2~3 の範囲にあり、高塑性の細粒子を持つ中間土ほど大きな値を示す。

5. 4. 2 計算結果と実験結果の比較

5. 3 節で提案した中間土の限界状態の応力比の算定式の妥当性を検証するために、実験結果と計算結果の比較を行う。

まず、中間土の限界状態の応力比と細粒分含有率の関係を求めるための計算手順を図 5.12 に示す。任意の細粒分含有率に対する粗粒子骨格の体積含有率の値は、式(3.16)' で示されるように、 $F=100\%$ のときの空隙比 e_{c0} と粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率 F_r を用いて求められる。また、これらのパラメータは、5. 4. 1 で述べたように、等方圧密時の空隙比と細粒分含有率の関係から決定される。一方、応力分担パラメータ b は、式 (5.17) で示されるように、粗粒子骨格とマトリックスの材料定数 M_s , k_s , M^* および k^* を用いて求められる。したがって、中間土の限界状態の応力比は、式(5.24) により粗粒子骨格とマトリックスの限界状態の応力比、パラメータ R および b を用いて、算定される。

中間土の限界状態の応力比と細粒分含有率の関係について計算結果と実験結果の比較を図 5.13(a), (b) に示す。 $F=0\%$ の場合の M は、粗粒子の応力比 M_s に等しく、 $F=100\%$ の場合の M は、マトリックスの応力比 M^* に等しい。中間土-A の場合の M は、細粒分含有率が約 20% までは、 F の減少に伴い次第に増加し、 $F=0\%$ のときの値に近づいていく。計算結果は、このような中間土の傾向を表すことができる。また、中間土-B の場合、 M_s と M^* の値が大きく異なるが、このときの M は、中間土-A の場合と同様に F の減少に伴い、次第に $F=0\%$ のときの値に近づいていく。図(b) で示されるように、中間土-B についての計算結果は、実験結果と比較的よい一致を示す。また、 $F \geq F_r$ の範囲で中間土の特性が細粒分含有率の影響を大きく受ける傾向は、第 4 章で述べた中間土の圧縮特性と同様である。なお、Skempton¹⁰⁾ は、地すべり粘土の残留強度と細粒分含有率の関係を詳細に調べ、粘土分含有率が約 20% 程度までは残留強度が粘土分含有率の減少とともに増加し、それ以下になるとほぼ一定値を示すと報告しており、このような特性は、

本実験で用いた中間土の強度特性と類似している。

以上のことから、提案式は、中間土の限界状態の応力比を粗粒子とマトリックスの材料特性を用いてほぼ予測することができる。

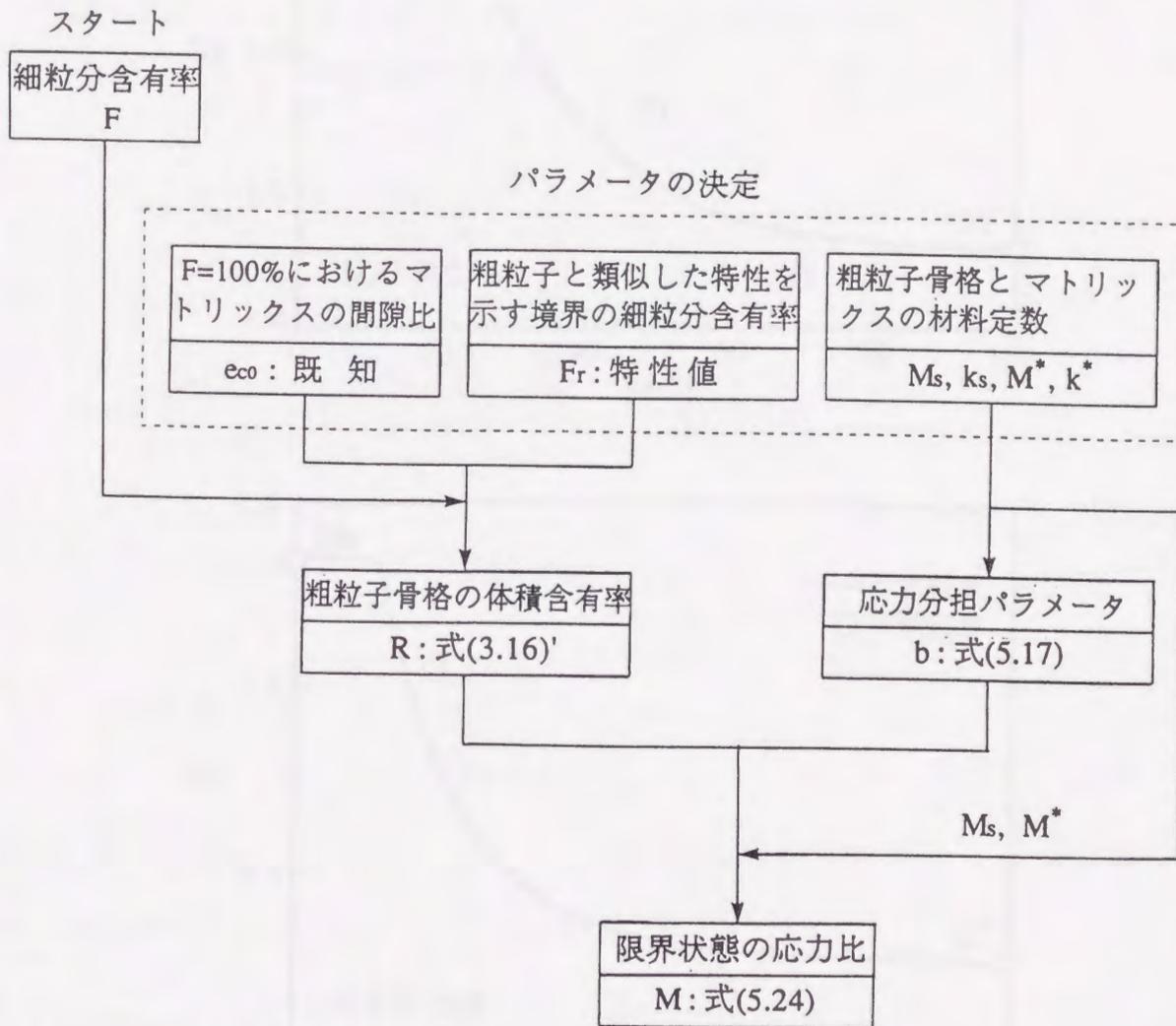


図 5.12 中間土の限界状態の応力比と細粒分含有率の関係を求めるための計算手順

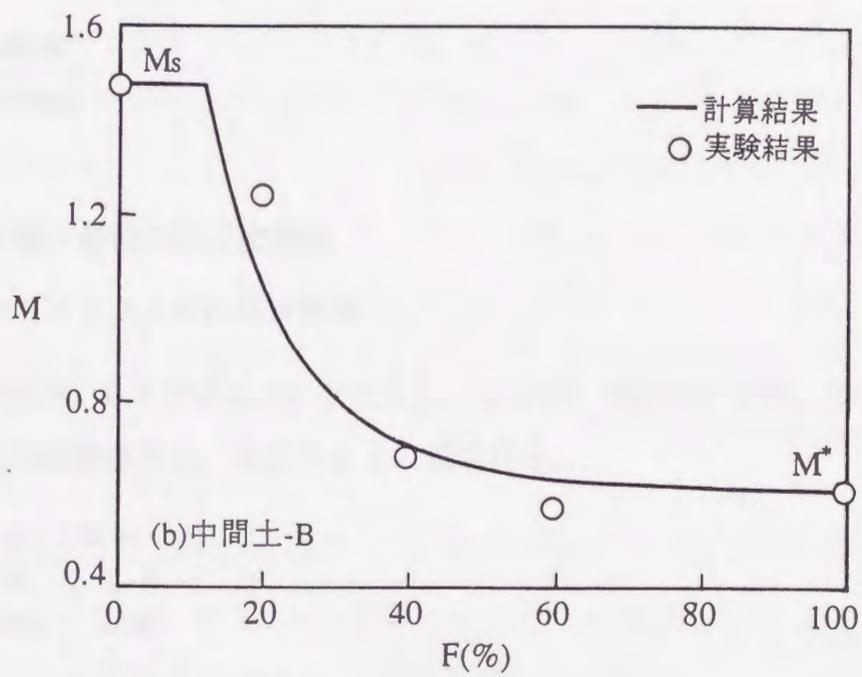
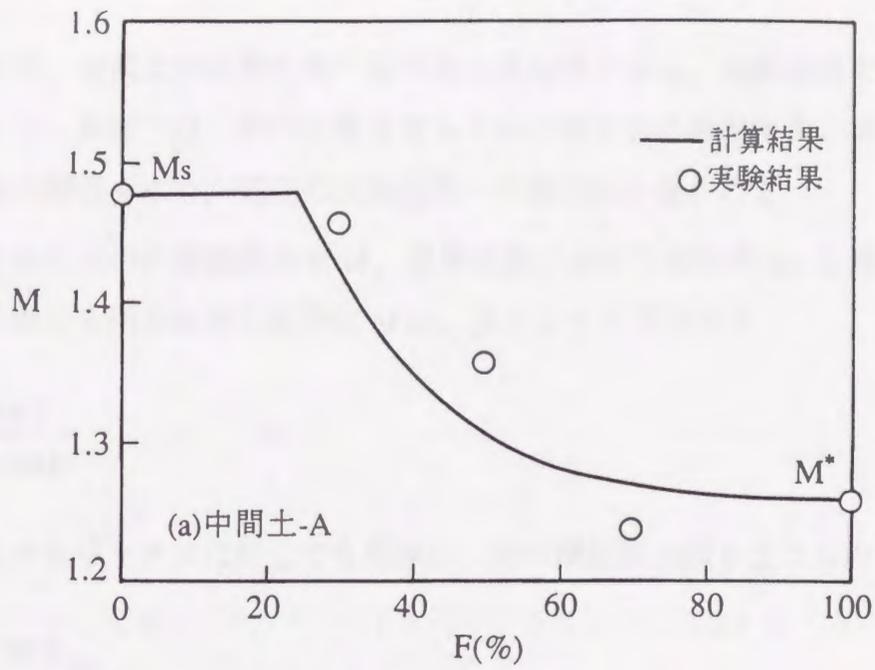


図 5.13 中間土の限界状態の応力比と細粒分含有率の関係についての
計算結果と実験結果の比較

5. 5 内部摩擦角に関する既往の実験結果への適用性

5. 4節では、中間土の限界状態の応力比の算定法を示し、実験結果をもとにその妥当性を検証した。本節では、その提案式をもとに中間土の内部摩擦角と細粒分含有率および塑性指数の関係を求め、既往の実験結果への適用性を確かめる。

正規圧密された土の内部摩擦角 ϕ' は、限界状態における摩擦角 ϕ_{cv} と等しいため、三軸圧縮状態における限界状態の応力比 M は、次のように表される。

$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 + \sin \phi'} \quad (5.26)$$

粗粒子骨格とマトリックスに対しても同様に、次の関係式が成り立つものとする。

$$M_s = \frac{6 \sin \phi'_s}{3 + \sin \phi'_s} \quad (5.27)$$

$$M^* = \frac{6 \sin \phi^{*'}}{3 + \sin \phi^{*'}} \quad (5.28)$$

ここに、

ϕ'_s : 粗粒子骨格の内部摩擦角

$\phi^{*'}$: マトリックスの内部摩擦角

式(5.24) に式(5.27) および式(5.28) を代入し、さらに、式(5.26) を用いて M を消去すると、中間土の内部摩擦角は、次式のように表される。

$$\sin \phi' = \frac{(b-1)R + 1}{\frac{bR}{\sin \phi'_s} + \frac{1-R}{\sin \phi^{*'}}} \quad (5.29)$$

すなわち、 $\sin \phi'$ についても、式(5.24)と同様に、粗粒子骨格とマトリックスの材料特性を用いて表される。さらに、式(5.29) に式(3.16)' の粗粒子骨格の体積含有率 R を代入すると、中間土の内部摩擦角と細粒分含有率の関係が求められる。

正規圧密された中間土の内部摩擦角 ϕ' と細粒分含有率 F の関係について、Lupiniら¹¹⁾ によって行われたリングせん断試験の結果と計算結果の比較を図 5.14 に示す。試料は、

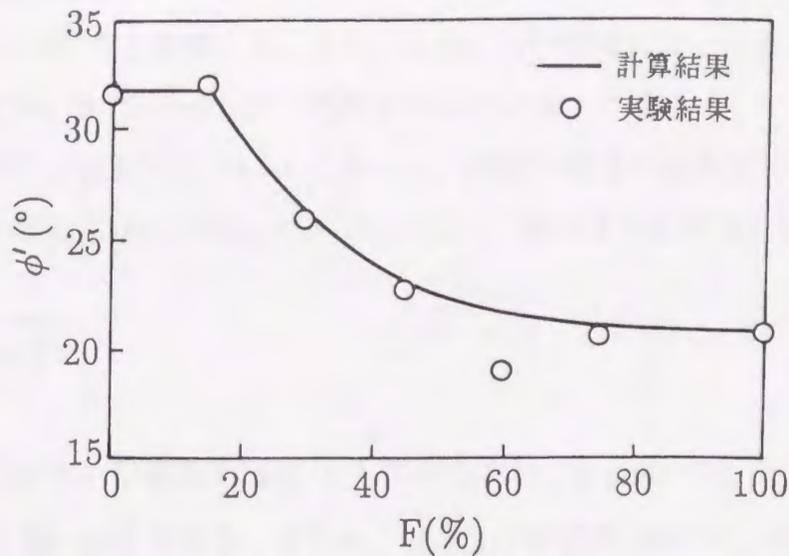


図5.14 正規圧密された中間土の内部摩擦角 ϕ' と細粒分含有率 F の関係
(Lupiniら¹¹⁾の実験結果との比較)

砂とベントナイトを混合して得られた中間土である。計算結果は、式(5.29)に式(3.16)'を代入することにより求めた。粗粒子骨格およびマトリックスの内部摩擦角は、 $\phi_s'=31.7^\circ$ 、 $\phi_m'=20.9^\circ$ であり、また、 k_s および k^* の値は測定されていないため、応力分担パラメータ b の値を 3.0 とした。その他に、粗粒子骨格の体積含有率を求めるパラメータとして、 $e_{c0}=1.89$ 、 $F_r=15\%$ を用いた。図で示されるように、正規圧密された中間土の内部摩擦角は、ある細粒分含有率までは、 F の減少とともに次第に大きくなり、粗粒子のみの値に近づいていく。計算結果は、中間土の内部摩擦角と細粒分含有率の関係を精度よく表すことができる。

一方、これまでの多くの実験結果から、内部摩擦角 ϕ' は、塑性指数 I_p と密接な関係のあることが知られているが、以下では、上述の内部摩擦角 ϕ' の算定式を用いて、中間土の内部摩擦角と塑性指数との関係を考察する。

まず、塑性指数と細粒分含有率の関係について、次式のような比例関係が成り立つものとする。

$$I_p = a \cdot F \quad (5.30)$$

ここで、 a は、定数である。Skempton¹²⁾ は、 $2\mu\text{m}$ 以下の土粒子の含有率で求めた細粒分

含有率と塑性指数の関係について、式(5.30)のような関係が存在することを確かめ、このときの傾き a を活性度と定義した。また、 a は、土の種類によって変化するが、普通の活性度を持つ土は、 $0.75 < a < 1.25$ であるとしている。ここでは、その平均値として $a=1$ を用い、さらに、近似的に $Fr=0$ とおくと、粗粒子骨格の体積含有率と塑性指数の関係は、式(5.30)を式(3.16)'に代入することにより、次のように表される。

$$R = \frac{1}{\left(1 + \frac{1+e_{c0}}{100/I_p-1}\right)^2} \quad (5.31)$$

式(5.31)では、式(5.30)の定数を $a=1$ としているため、 $I_p=100$ のとき、 $R=0$ となり、 $I_p=0$ の非塑性のとき、 $R=1$ となる。さらに、式(5.31)を式(5.29)に代入すると、 $\sin \phi'$ と I_p の関係として次式が得られる。

$$\sin \phi' = \frac{2 + \left(1 + \frac{3}{100/I_p-1}\right)^2}{\frac{3}{\sin \phi'_s} + \frac{\left(1 + \frac{3}{100/I_p-1}\right)^2 - 1}{\sin \phi'^*}} \quad (5.32)$$

なお、応力分担パラメータおよびマトリックスの間隙比は、内部摩擦角 ϕ' の値にそれほど大きな影響を及ぼさないので、ここでは、それらの値として $b=3.0$ および $e_{c0}=2.0$ を用いた。

不攪乱正規圧密粘性土の三軸圧縮試験による内部摩擦角と塑性指数の関係¹³⁾を図5.15に示す。実験結果にはかなりのばらつきが見られるが、塑性指数が減少するほど内部摩擦角が増加する傾向が示される。図中の斜線で示した範囲は、式(5.32)において、 $\phi'_s=35\sim40^\circ$ および $\phi'^*=20\sim25^\circ$ として、内部摩擦角の概算値を求めたものである。このときの計算結果は、従来の実験結果の傾向をほぼ表すことができる。さらに、Bjerrum and Simons の曲線¹⁴⁾ および Kenney¹⁵⁾ の求めた実験式についても計算値の範囲内にあることが示される。また、Kenney は、内部摩擦角と塑性指数の関係について、不攪乱試料と練り返した試料でほぼ同様の関係が見られることを確かめている。以上のことから、式(5.32)の提案式は、中間土の内部摩擦角と塑性指数の関係を比較的よく表すことができる。

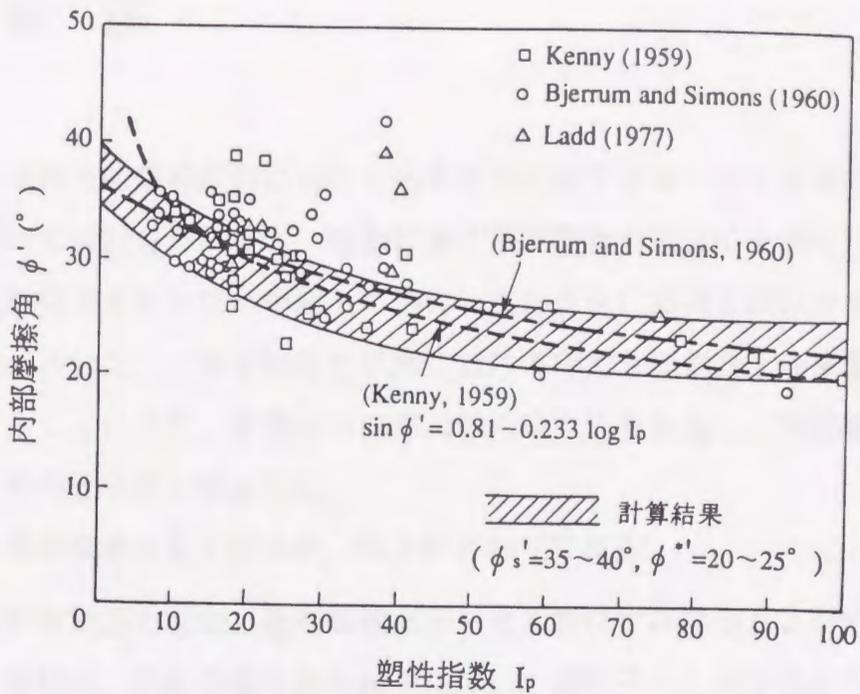


図 5.15 不攪乱正規圧密粘性土の三軸圧縮試験による内部摩擦角と塑性指数の関係¹³⁾

なお、わが国におけるいくつかの海成粘土について¹⁶⁾ は、三軸圧縮試験によって得られた内部摩擦角が塑性指数に依らずほぼ一定値を示すことから、図 5.15 に示される他の多くの粘性土とは異なる特性を持つ。

5. 6 結 論

本章では、中間土の限界状態における応力比を粗粒子とマトリックスの特性から算定する手法について検討した。まず、低塑性および高塑性の細粒子を持つ二種類の中間土の三軸圧縮試験結果をもとに、中間土の応力・変形特性に及ぼす細粒分含有率の影響を明らかにした。次いで、三軸圧縮応力状態における応力分担割合を仕事量増分の考えを用いて評価することにより、中間土の限界状態の応力比を算定し、計算結果と実験結果の比較によりその妥当性を検証した。

本章で得られた成果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 中間土の有効応力経路、過剰間隙水圧-せん断ひずみ関係および応力比-せん断ひずみ関係は、細粒分含有率の減少に伴い、細粒子のみの特性から次第にゆる詰め状態にある粗粒子のみの特性へと変化することが明かとなった。
- 2) 中間土の限界状態における応力比は、ある細粒分含有率までは、細粒分含有率の減少とともに大きくなり、次第に粗粒子のみの値に近づいていくことが明かとなった。
- 3) 中間土の限界状態の応力比が粗粒子のみの場合の特性に近づくときの境界の細粒分含有率は、等方圧密時の間隙比と細粒分含有率の関係からほぼ推定することができる。このときの細粒分含有率の値は中間土の種類によって異なるが、約10~25%の範囲にあり、高塑性の細粒子を持つ中間土ほど小さな値を示す。
- 4) 式(3.24)で示されるように、中間土内部の応力分担割合の評価をもとに粗粒子骨格およびマトリックスの特性を用いて求められる中間土の限界状態の応力比を誘導した。
- 5) 中間土の限界状態の応力比と細粒分含有率の関係についての計算結果は、低塑性および高塑性の細粒子を持つ二種類の中間土の三軸圧縮試験結果と比較的良好一致を示すことを確かめた。
- 6) 中間土の限界状態の応力比を算定するために必要な応力分担パラメータ b の値は、本実験で用いた試料に限れば、ほぼ2~3の範囲にある。

- 7) 正規圧密された中間土の内部摩擦角 ϕ' と細粒分含有率の関係の計算結果は、リングせん断試験により得られた既往の実験結果を精度よく表すことができる。
- 8) 提案された中間土の内部摩擦角 ϕ' と塑性指数の関係は、不攪乱正規圧密粘性土の三軸圧縮試験による既往の実験結果および Bjerrum and Simons の曲線、Kenney の求めた実験式を比較的よく表すことができる。
- 9) 提案式により正規圧密された中間土の強度を粗粒子およびマトリックスの特性から予測することができる。

参 考 文 献

- 1) Schofield, A.N. and Wroth, C.P. : Critical state soil mechanics, McGraw-Hill, New York, 1968.
- 2) 龍岡 文夫 : 第 3 回 三軸圧縮試験実技講習会報告, 学会活動から, 土と基礎, Vol.35, No.11, pp.89~93, 1987年.
- 3) 龍岡 文夫 : 「非常にゆるい砂」の非排水せん断特性についての一考察, ディスカッション, 土質工学会論文報告集, Vol.15, No.3, pp.93~95, 1975年.
- 4) 大嶺 聖・落合英俊 : 混合土の非排水三軸圧縮状態における応力-ひずみ関係, 九州大学工学集報, 第65巻, 第2号, pp.97~104, 1992年.
- 5) Hill, R. : Elastic properties of reinforced solids : Some theoretical principles, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol.11, pp.357~372, 1963.
- 6) Ohmaki, S. : A mechanical model for the stress-strain behaviour of normally consolidated cohesive soil, Soils and Foundations, Vol.19, No.3, pp.29~44, 1979.
- 7) 池浦 勲・三田地 利之 : 異方圧密粘土の応力-ひずみ関係に及ぼす応力経路の影響, 土質工学会論文報告集, Vol.26, No.3, pp.157~168, 1986年.
- 8) 大嶺 聖・落合英俊・林 重徳・北尾秀光 : 三軸圧縮応力状態における中間土の応力-ひずみ関係, 第27回土質工学会研究発表会, pp.735~738, 1992年.
- 9) 大嶺 聖, 落合英俊 : 中間土の強度特性に関する一考察, 土木学会第47回年次学術講演会, pp.418~419, 1992年.
- 10) Skempton, A.W. : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, Géotechnique, Vol.35, No.1, pp.3~18, 1985.
- 11) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. : The drained residual strength of cohesive soils, Géotechnique, Vol.31, No.2, pp.181~213, 1981.
- 12) Skempton, A.W. : The colloidal activity of clay, Proc., 3th Int. Conf. S.M.F.E., No.1, pp.57~61, 1953.

- 13) Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H.G. : Stress-deformation and strength characteristics, State-of-the-Art Reports, Proc., 9th Int. Conf. S.M.F.E., No.2, pp.421~494, 1977.
- 14) Bjerrum, L. and Simons, N.E. : Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays, Proc., ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils, pp.711~726, 1960.
- 15) Kenny, T.C. : Discussion on Proc. Paper 1732(Wu, 1958), JSMFED, Proc., ASCE, Vol.85, NO.SM3, pp.67~79, 1959.
- 16) Nakase, A. and Kamei, T. : Undrained shear strength of remoulded marine clays, Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.29~40, 1988.

第6章 総括

粗粒子と細粒子が様々な割合で混ざっている中間土の力学特性は、構成要素の材料特性やそれらの含有割合等に依存する。本論文は、中間土が粗粒子とマトリックス(細粒子と水から成る部分)の二つの材料で構成される混合体であるという立場から、土の構造を考慮した中間土の応力-ひずみ関係の基本式を誘導し、その圧縮および強度特性を明らかにしたものである。

得られた成果は各章ごとにまとめられているが、本章ではそれらを総括し、今後の課題を述べる。

第1章 序論

本章では、研究の位置づけと目的ならびに中間土の圧縮および強度特性に関する従来の研究について述べた。また、本論文の内容と構成を簡単に紹介し、各章の相互の関係を示した。

第2章 応力分担割合の評価に基づく二種混合体の応力-ひずみ関係

本章では、性質の異なる二種類の材料から成る混合体の応力-ひずみ関係を各構成要素の材料特性から推定する手法を提案した。まず、混合体の内部では、応力とひずみが分布しているため、その応力とひずみには体積平均を用いることが適していることを指摘し、その表示法を与えた。次いで、二種混合体の応力-ひずみ関係を誘導するために、混合体内部の応力分担割合を表すパラメータを新たに導入し、その定式化を行った。このときの応力分担パラメータは仕事量増分の考え方を用いることによって決定できることを示した。さらに、提案式を等方弾性材料から成る二種混合体に適用し、従来の実験結果と計算結果を比較することによりその妥当性を検証した。その結果、次の事項が明らかとなった。

- 1) 混合体の内部で応力が分布している場合、式(2.1) の体積平均で定義される混合体の平均応力は、混合体の表面に作用する応力と一致することを示した。また、混合体のひずみについても同様に、式(2.2) の体積平均で定義される混合体のひずみは、混合体の表面の変位で定義されるひずみと一致することを示した。
- 2) 混合体内部の応力分担割合を表す新たなパラメータを導入し、式(2.36) で示される二種混合体の応力増分—ひずみ増分関係を誘導した。このときの応力分担パラメータは、介在物とマトリックスの材料定数を用いて決定される。
- 3) 提案式を弾性体に適用することにより、等方弾性材料から成る二種混合体の各弾性係数（ヤング率、体積弾性係数およびせん断弾性係数）を求めた。これらは、いずれも介在物とマトリックスの弾性係数およびポアソン比を用いた比較的簡単な式で表される。
- 4) 提案された混合体の各弾性係数の値は、混合体の弾性係数の上下界を理論的に求めた Hashin と shtrikman の式の間であり、ほぼ妥当な結果を示している。さらに、提案式は、Nishimatsu と Gurland によって実験的に求められた炭化タングステンとコバルトの混合物のヤング率の値と良い一致を示すことを確かめた。
- 5) 提案された二種混合体の応力—ひずみ関係は、等方弾性材料で構成される混合体の弾性係数の値を精度良く求めることができる。

第3章 中間土の土構造の評価と応力—ひずみ関係の基本式

本章では、前章で求めた二種混合体の応力—ひずみ関係式を中間土に適用できるように拡張した。中間土の構造を考察するために、供試体断面の観察を行い、新たな間隙量を導入した。また、粗粒子同士の接触割合を確率の考えを用いて求めることにより、粗粒子骨格とマトリックスの体積含有率を算定した。そして、このような土の構造を考慮した中間土の応力—ひずみ関係の基本式を誘導した。

得られた成果を要約すると、次のとおりである。

- 1) 中間土は、粗粒子骨格とマトリックスがある割合で混在している構造を有することを確かめた。すなわち、中間土内には粗粒子同士が互いに接触しているものと接触していないものがランダムに分布し、細粒分含有率の減少とともに互いに接触している粗粒子の割合が増え、次第に粗粒子骨格のみで構成される状態に近づ

いていくことを明らかにした。

- 2) 中間土の間隙比が、式(3.9) で表されるように、粗粒子骨格とマトリックスの間隙比およびそれらの体積含有率を用いて算定されることを示した。
- 3) 式(3.13) で表されるように、マトリックスの体積含有率を細粒分含有率 $F=100\%$ のときのマトリックスの間隙比と粗粒子と類似した特性を示す境界の細粒分含有率から算定する式を求めた。
- 4) 粗粒子骨格の体積含有率とマトリックスの体積含有率の関係式を求め、粗粒子骨格の体積含有率が式(3.16) で示されるようにマトリックスの体積含有率の簡単な二次関数で近似できることを示した。また、この式は、細粒分含有率が小さいほど粗粒子同士の接触割合が増加することを示しており、近似的に粗粒子同士の接触の分布状態を表すことができる。
- 5) 式(3.33) で示されるように、粗粒子骨格とマトリックスの材料特性を用いて表される中間土の応力-ひずみ関係の基本式が誘導された。

第4章 中間土の圧縮特性

第4章では、前章で誘導された応力-ひずみ関係の基本式に基づいて、中間土の圧縮特性を考察した。まず、三種類の中間土の圧縮特性を実験的に明らかにした。試験では、粗粒子として豊浦砂と珪砂、細粒子としてカオリン、ベントナイトおよび有明粘土を用い、それぞれ種々の割合で混合して供試体を作製した。圧密試験の結果から、中間土の圧縮指数および膨張指数と細粒分含有率の関係を明らかにした。次いで、中間土の間隙比が、粗粒子骨格とマトリックスの間隙比、およびそれらの体積含有率を用いて表されることを示した。さらに、中間土内部の応力分担割合を二種混合体の場合と同様に仕事量増分の考えを用いて評価し、一次元圧縮における中間土の応力-間隙比関係と体積圧縮係数の算定式を求めた。そして、計算結果と実験結果を比較することにより提案式の妥当性を検証した。

その結果、次の事項が明らかとなった

- 1) 中間土の圧縮指数および膨張指数は、細粒分含有率 F がある値までは、細粒分含有率の減少とともに著しく減少し、それ以下になると、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合に近づいていくことが明らかとなった。

- 2) 中間土の体積圧縮係数についても同様に、細粒分含有率がある値までは、細粒分含有率の減少とともに著しく減少し、粗粒子のみ($F=0\%$)の場合に近づいていくことが明かとなった。
- 3) 中間土の圧縮特性が粗粒子のみの特性に近づくときの境界の細粒分含有率は約10~20%の範囲にあり、高塑性の細粒子を持つ中間土ほど小さな値を示す。
- 4) 中間土内の応力分担割合の評価を行い、中間土の応力と間隙比の関係および体積圧縮係数を誘導した。これらは、いずれも粗粒子とマトリックスの特性を用いてそれぞれ式(4.11) および式(4.13) のように表される。
- 5) 中間土の応力と間隙比の関係および体積圧縮係数の計算結果は、中間土の実験結果をよく表すことができる。すなわち、提案式により、中間土の圧縮特性を粗粒子およびマトリックスの特性からほぼ予測することができる。

第5章 中間土の強度特性

本章では、第3章の応力-ひずみ関係の基本式に基づき、正規圧密された中間土の強度を評価する手法を提案した。まず、低塑性および高塑性の細粒子を持つ二種類の中間土の三軸圧縮試験の結果をもとに、正規圧密された中間土の強度特性は、限界状態の応力比で説明できることを示した。次いで、中間土の応力比-せん断ひずみ関係および有効応力経路に及ぼす細粒分含有率の影響を明らかにした。さらに、粗粒子骨格とマトリックスの単位体積当たりの仕事量増分を用いて応力分担割合を評価することにより、中間土の限界状態の応力比を算定した。中間土の限界状態の応力比と細粒分含有率について、計算結果と実験結果の比較を行い、提案式の妥当性を検証した。さらに、その提案式に基づいて内部摩擦角と細粒分含有率および塑性指数の関係式を求め、既往の実験結果への適用性について確かめた。

得られた結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 中間土の有効応力経路、過剰間隙水圧-せん断ひずみ関係および応力比-せん断ひずみ関係は、細粒分含有率の減少に伴い、細粒子の特性から次第にゆる詰め状態にある粗粒子のみの特性へと変化することが明かとなった。
- 2) 中間土の限界状態の応力比が粗粒子のみの場合の特性に近づくときの境界の細粒分含有率は、等方圧密時の間隙比と細粒分含有率の関係からほぼ推定することが

できる。このときの細粒分含有率の値は中間土の種類によって異なるが、約10～25%の範囲にあり、高塑性の細粒子を持つ中間土ほど小さな値を示す。

- 3) 式(3.24) で示されるように、中間土の限界状態の応力比を粗粒子骨格およびマトリックスの特性を用いて予測するための算定式を誘導した。このときに必要な応力分担パラメータは、粗粒子骨格とマトリックスの材料定数により決定される。
- 4) 中間土の限界状態の応力比と細粒分含有率の関係についての計算結果は、低塑性および高塑性の細粒分を含む二種類の中間土の三軸圧縮試験結果と比較的良好一致を示す。
- 5) 中間土の限界状態の応力比を算定するために必要な応力分担パラメータ b の値は、本実験で用いた試料に限れば、ほぼ2～3の範囲にある。
- 6) 正規圧密された中間土の内部摩擦角と細粒分含有率の関係の計算結果は、リングせん断試験により得られた既往の実験結果を精度よく表すことができる。また、計算により求めた内部摩擦角と塑性指数の関係は、不攪乱正規圧密粘性土の三軸圧縮試験による既往の実験結果を比較的良好に表すことができる。
- 7) 提案式により正規圧密された中間土の強度特性を粗粒子およびマトリックスの特性から予測することができる。

以上、本論文で得られた結論を要約したが、それらを受けて最後に、今後の課題を述べる。

本論文では、中間土を構成する粗粒子骨格とマトリックスの特性から、その圧縮および強度特性を推定する手法を示したが、今後はこの考え方を土構造物の変形解析に用いるための基礎となる応力—ひずみ関係式を求める必要がある。そのためには、非排水せん断特性だけでなく排水せん断特性を含めて、中間土の応力・変形特性を明らかにしていくことが必要である。また、正規圧密された中間土の強度特性は、限界状態の応力比を用いて表されることを示したが、土の強度はダイレイタンス特性に依存するので、このような点を考慮してさらに提案式を拡張していきたい。なお、第1章で述べたように、砂と粘土の性質の最も大きな違いは、圧縮性および透水性にあるが、透水性については本論文の主眼でないため、ここでは取り扱っていない。しかしながら、透水性の問題は、中間土地盤の変形解析を行う上で極めて重要であるので、今後検討を加えていきたい。

記号説明

a_{ij}	座標変換のための定数
b	応力分担パラメータ
b_0	等方応力状態における応力分担パラメータ
B_s	粗粒子骨格の応力と中間土の応力の関係を表す係数
B^*	マトリックスの応力と中間土の応力の関係を表す係数
C_{cs}	粗粒子骨格の圧縮指数
C_c^*	マトリックスの圧縮指数
C_n	n 個の粗粒子が互いに接触するときの組み合わせ数
C_{sijkl}	介在物の材料特性によって決まる定数
C_{ijkl}^*	マトリックスの材料特性によって決まる定数
e_c	マトリックスの間隙比
e_{c0}	$F=100\%$ のときのマトリックスの間隙比
e_s	粗粒子骨格の間隙比
e_{s0}	$F=0\%$ のときの粗粒子骨格の間隙比
D	中間土の材料特性によって決まる係数
D_s	粗粒子骨格の材料特性によって決まる係数
D^*	マトリックスの材料特性によって決まる係数
E_s	介在物のヤング係数
E^*	マトリックスのヤング係数
f_c	マトリックスの体積含有率
f_s	介在物の体積含有率
F	体積百分率で定義した細粒分含有率
F_r	粗粒子と類似した性質を示す境界の細粒分含有率

F'	質量百分率で定義した細粒分含有率
G_1, G_2	混合体のせん断弾性係数の上下界の値
G_s	介在物のせん断弾性係数
G^*	マトリックスのせん断弾性係数
k	$\eta=M/2$ の点における応力比—せん断ひずみ関係の接線勾配の逆数
k'	$=k/\alpha$
k_s	$\eta=M/2$ の点における粗粒子骨格の応力比—せん断ひずみ関係の接線勾配の逆数
k_s'	$=k_s/\alpha_s$
k^*	$\eta=M/2$ の点におけるマトリックスの応力比—せん断ひずみ関係の接線勾配の逆数
k^{**}	$=k^*/\alpha^*$
K_1, K_2	混合体の体積弾性係数の上下界の値
K_s	介在物の体積弾性係数
K^*	マトリックスの体積弾性係数
l_i	正六面体要素の一辺の長さ
m_{vs}	粗粒子骨格の体積圧縮係数
m_v^*	マトリックスの体積圧縮係数
M_{sc}	中間土における細粒子の質量
M_{ss}	中間土における粗粒子の質量
n	粗粒子の接触数
n_k	法線ベクトル
N_s	$\sigma=1MN/m^2$ における粗粒子骨格の間隙比
N_c	$\sigma=1MN/m^2$ におけるマトリックスの間隙比
p	平均主応力 ($=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$)
p_0	等方応力状態における平均主応力
p_s	粗粒子骨格の平均主応力

p_{s0}	等方応力状態における粗粒子骨格の平均主応力
p^*	マトリックスの平均主応力
p_0^*	等方応力状態におけるマトリックスの平均主応力
P_n	n 個の粗粒子が互いに接触する確率
q	軸差応力 ($=\sigma_1 - \sigma_3$)
q_s	粗粒子骨格の軸差応力
q^*	マトリックスの軸差応力
r	粗粒子骨格中の細粒子と粗粒子の体積比
R	粗粒子骨格の体積含有率
R_n	n 個の粗粒子が互いに接触している状態にある粗粒子骨格の体積含有率
S	表面積
T_i	表面力
u_i	変位ベクトル
v	体積ひずみ ($=\epsilon_1 + 2\epsilon_3$)
v_s	粗粒子骨格の体積ひずみ
v^*	マトリックスの体積ひずみ
V	混合体および中間土の体積
V'	粗粒子骨格の体積
V_{sc}	中間土における細粒子の体積
V_{ss}	中間土における粗粒子の体積
V_{sc}'	粗粒子骨格における細粒子の体積
V_{ss}'	粗粒子骨格における粗粒子の体積
V_v'	粗粒子骨格における間隙の体積
V_{sc}''	マトリックスにおける細粒子の体積
V_v''	マトリックスにおける間隙の体積
W_s	介在物または粗粒子骨格の単位体積当たりの仕事量
W^*	マトリックスの単位体積当たりの仕事量

x_i	変形前の位置ベクトル
x_i'	変形後の位置ベクトル
α	応力比-せん断ひずみ関係の接線勾配の逆数
α_s	粗粒子骨格の応力比-せん断ひずみ関係の接線勾配の逆数
α^*	マトリックスの応力比-せん断ひずみ関係の接線勾配の逆数
γ	せん断ひずみ ($=2(\epsilon_1 - \epsilon_3)/3$)
γ_s	粗粒子骨格のせん断ひずみ
γ^*	マトリックスのせん断ひずみ
δ_{ij}	クロネッカのデルタ
ϵ_v	圧縮ひずみ
ϵ_{sij}	介在物または粗粒子骨格のひずみ
ϵ^*_{ij}	マトリックスのひずみ
η	応力比 ($=q/p$)
η_s	粗粒子骨格の応力比
η^*	マトリックスの応力比
ν_s	介在物のポアソン比
ν^*	マトリックスのポアソン比
ρ_{sc}	細粒子の密度
ρ_{ss}	粗粒子の密度
σ	圧縮応力
$\sigma_{ij(0)}$	混合体の表面に作用する平均応力
$\sigma_{ij(P)}$	x_i 軸に直交し, 点 P を通る断面の平均応力
σ_{sij}	介在物または粗粒子骨格に作用する応力
σ^*_{ij}	マトリックスに作用する応力
ϕ_s'	粗粒子骨格の有効内部摩擦角

- ϕ^* マトリックスの有効内部摩擦角
- M 中間土の限界状態における応力比
- M_s 粗粒子骨格の限界状態における応力比
- M^* マトリックスの限界状態における応力比

謝 辞

本論文は、九州大学教授 落合英俊先生の御指導のもとに、著者が九州大学大学院修士および博士課程に在学中の研究成果をまとめたものです。本論文をまとめあげることができずには、多くの方々の御支援と御助力をいただきました。

落合教授には、著者が修士課程に入学してから終始変わらぬ御指導と御鞭撻を賜りました。厳しくかつ熱心な指導に、著者は大変刺激を受けました。本研究を進める上で、先生には幾度も長時間に及ぶ議論をしていただきました。先生の熱意ある御指導により本論文をまとめあげることができ、深く感謝しております。また、九州大学教授 彦坂 熙先生ならびに同教授 神野健二先生には、本論文をまとめるにあたり懇切丁寧な御指導を賜りました。厚くお礼申し上げます。

日頃から御指導と御援助をいただいている福岡大学教授 吉田信夫先生には、力強く暖かい励ましの御言葉を賜りました。厚く感謝の意を表します。

九州大学助教授 林 重徳先生には、発散しがちな著者の研究について常に的確な御助言と御教示を賜りました。先生の厳しくも温かい御言葉に著者はとても励まされました。九州大学助手 大谷 順先生ならびに同助手 梅崎健夫先生には、研究上の指導だけでなく、公私にわたる多くの御指導を賜りました。大谷先生には、連続体力学などに関するアドバイスや英語の論文の書き方について丁寧に御指導していただきました。梅崎先生には、研究全般にわたって数多くの御教示をいただきました。特に、研究や実験上の悩みを何度となく聞いていただき、著者にとって良き相談相手となって下さいました。以上の心温まる御指導に深く感謝いたします。

琉球大学教授 上原方成先生には、研究者としての道を進む機会を与えていただいたばかりでなく、著者が琉球大学を卒業して以来、終始変わらぬ御指導と御鞭撻を賜りました。先生の期待に応えられるよう、今後もより一層努力していきたいと思っております。また、琉球大学助手 原 久夫先生には、卒業研究以来、多くの御指導を賜りました。特に、先生の指導のもとで行った粘土の変形特性に関する研究は、土の基本的な性質を理解する上で大

変役に立ちました。

長崎大学助教授 棚橋由彦先生，山口大学助教授 兵動正幸先生，同助手 安福規之先生，熊本大学助教授 北園芳人先生，佐賀大学助手 吉武茂樹先生，同助教授 坂井 晃先生および鹿児島大学助教授 三隅浩二先生はじめ，九州地区土質工学研究会の諸先生方には，本研究に対する有益な御助言をいただきました。また，学会や土質工学若手セミナーなどを通して，多くの先生方に貴重な御意見を賜りました。ここに，厚く感謝の意を表します。

九州大学技官 中島通夫氏には，実験に関して多大な御助力をいただきました。特に，試験装置の作製や改良において無理な注文に対しても快く引き受けて下さいました。また，九州大学大学院博士課程に在籍中の楊 俊傑氏および梅村 順氏には，ゼミや日常の議論の中で多くの御意見や御助言をいただいただけでなく，心温まる励ましに幾度も勇気づけられました。さらに，九州大学土質工学研究室の先輩，後輩の方々には，実験および研究に関する御協力や暖かい励ましをいただきました。ここに，深く感謝いたします。

福岡大学土木工学科の諸先生方や職員の方々には，本論文をまとめるにあたり数々の便宜を図っていただきました。ここに，深く感謝の意を表します。

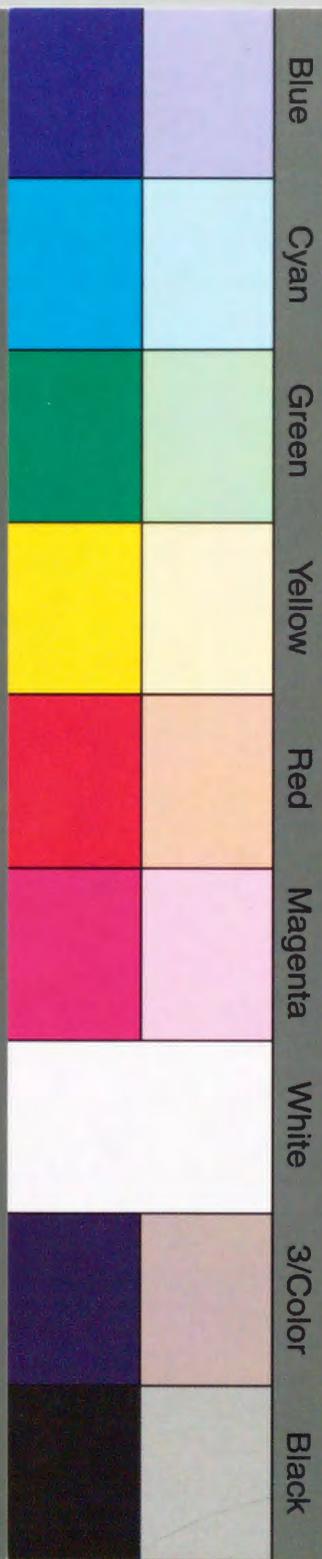
本論文を遂行するにあたり，その他多くの方々から暖かい御支援を賜りました。今後は，この論文を第一ステップとして，さらに広い視野に立って研究を進めて行きたいと思っています。最後に，これまで変わることなく暖かい励ましを与えてくれた両親に深く感謝いたします。



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

