

第 43 回地盤工学研究発表会

DS-2 JGS 原位置岩盤試験データ・ベースとその利用

期 日:平成 20 年 7 月 9 日(水) 17:00 ~ 18:30

座 長:吉中龍之進(埼玉大学名誉教授)

内 容:

1. JGS 原位置岩盤試験データ・ベース〔2008 年度版〕について
 - 1.1 「JGS 岩盤の工学的分類と原位置岩盤物性に関する研究委員会」委員会報告
 - 1) データ・ベースの内容と構成 船戸明雄(応用地質)
 - 2) データ・ベースの分析結果から見た岩盤物性の特徴
 - ・平板載荷試験 細野高康(ダイヤコンサルタント)
 - ・プレッシャーメータ試験 森 孝之(鹿島建設)
 - ・岩盤のせん断試験 西山竜朗(愛媛大学)
 - 1.2 話題提供
原位置岩盤試験値と不連続性を考慮した解析による岩盤物性の検討
岩田直樹(中電技術コンサルタント)
2. ディスカッション
司会 伊藤 洋(電力中央研究所)

資料

- 資料-1 JGS 岩盤の工学的分類と原位置岩盤物性に関する研究委員会
研究報告書(抜粋版)
- 資料-2 原位置岩盤試験結果の解釈に関する一考察と解析的検討

JGS 岩盤の工学的分類と
原位置岩盤物性に関する研究委員会

研究報告書
(抜粋版)

平成 20 年 3 月

社団法人地盤工学会

JGS 岩盤の工学的分類と
原位置岩盤物性に関する研究委員会

研究報告書原版の目次

1. 原位置岩盤試験データ収集の必要性と意義	4
1.1 データ・ベースの必要性と関連機関の協力	4
1.2 原位置岩盤試験データ・ベースの充実への努力と今後の課題	4
2. 委員会活動	6
3. データ収集・整理	8
3.1 データ収集	8
3.2 データ入力	14
4. データの分析結果	16
4.1 平板載荷試験	18
4.1.1 扱うデータについて	18
4.1.2 変形係数について	19
4.1.4 接線弾性係数について	59
4.1.5 変形係数, 割線弾性係数, 接線弾性係数の相関	78
4.2 プレッシュャーメータ試験	84
4.2.1 データ概要	84
4.2.2 プレッシュャーメータ試験結果の岩盤分類別の整理	86
4.2.3 平板載荷試験とプレッシュャーメータ試験の比較	132
4.3 岩盤のせん断試験	141
4.3.1 大分類および中分類の比較	141
4.3.2 硬岩系岩盤・塊状 [H]{M}	142
4.3.3 硬岩系岩盤・葉状 [H]{F}	142
4.3.4 軟岩系岩盤 [S]	143
5. あとがき	175
付録1 データ入力マニュアル	176
付録2 第43回地盤工学研究発表会ディスカッションセッション	185
付録3 (仮称) 原位置岩盤物性値データ・ベース (2008年度版) 出版計画	186

1. 原位置岩盤試験データ収集の必要性和意義

1.1 データ・ベースの必要性和関連機関の協力

- (1) 岩盤試験は、装置・試験箇所の準備が比較的大がかりであるため大規模な岩盤プロジェクト(ダム・原子力発電所・長大橋・大規模岩盤空洞など)では実施されるが、一方、岩盤試験を実施することはほとんどないが、岩盤斜面、トンネル、岩盤に基礎を置く一般規模の橋梁などでも岩盤物性の評価を必要とする。これらの分野では、何らかの方法(一般に、岩盤分類)で推定しているのが実情である。また、岩盤試験が実施された場合も、試験個数が最低限であることが多いため、試験結果の解釈や適用に際しては類似条件の既往の岩盤試験結果を参考に判断することになる。従って、岩盤力学の観点及び客観性のある岩盤・地質情報に基づいて体系的に整理した原位置岩盤物性のデータ・ベースの必要性は極めて高い。収集すべき岩盤物性には様々なものがあるが強度および変形試験データは必須のものである。また、岩盤物性の整理・検討に当該岩盤の地質データ、岩盤構造に関するデータなどの関連情報の収集も必要である。
- (2) 我が国では過去数 10 年にわたり大規模岩盤プロジェクトが数多く実施され、その一環として各現場で岩盤試験が実施された。その内容は、量的・質的共に世界に類を見ないほどのものと考えられる。しかし、今後は、何れのプロジェクトも減少傾向に向かうものと思慮され、同時に岩盤試験も少なくなると思われる。その意味からこれまでに蓄積された貴重な岩盤試験データを、今後、有効に活用できる体制を構築しておくことが極めて重要と考えられる。そのためには早期にデータを収集・整理しなければならない。時の経過と共に、データの逸散、試験関係者からの情報を直接えることが困難となる。
- (3) 国、県、独立行政法人、電力会社など多岐にわたる機関で実施された岩盤試験データの収集は、個人や 1 機関のレベルでできるものではなく学会においてのみ可能と思われる。今回は全国約 120 のプロジェクトからデータを提供して頂いた。

1.2 原位置岩盤試験データ・ベースの充実への努力和今後の課題

- (1) 土質地盤は、過去、多くの機関で、また、多くの地域を対象に”地盤図”にまとめられ多用されてきた。しかし、岩盤試験データは、機関別あるいは構造物別に提案された”岩盤分類”との関係で利用されてきた。従って、この手法には当事者の主観的判断が入り易いことが指摘されてきた。すなわち、岩盤に係わる技術者間での岩盤情報に関する共通認識が得にくい。このような現状に対する問題認識および地盤工学分野での国際規格(ISO)の制定の流れを背景に、地盤工学会は、JGS 3811-2004 ; 「岩盤の工学的分類方法」を制定した。この基準は、国内外の上記問題点を整理し、岩盤力学の観点から、かつ、国際的に認知された岩盤情報の取り扱い方(ISO14689-1 ; 岩の判別と記載)をベースに作成したものである。従って、本データ・ベースは情報の共

有化に整合したものと思われる。

- (2) 今回のデータ・ベースは岩盤では初めての試みである。約 120 の事業の貴重な岩盤試験のデータ(試験数：平板板載荷試験，プレッシャーメータ試験および岩盤せん断試験の各々は約 1300 件，1000 件および 1500 件)収録できたが，一方で，収録できなかった多くの事業のデータも少なくない。

データ・ベースの価値は，入力データの数に大きく依存する。現在進行中のプロジェクトも少なくないので，適切な時期にデータの追加及びシステムの改良が必要と考えられたので本データ・ベースは〔2008 年度版〕とした。

データの収集は，試験岩盤の情報を「JGS 工学的岩盤分類」の分類要素の大分類～細分類に基づいて行ったが，細分類に関する情報はほとんど得られなかった。今後，実施される原位置試験では調査し記録して頂きたい岩盤情報と考えられる。

- (3) 岩盤は基本的に不連続性である。原位置岩盤試験による物性値は，岩盤を連続体と仮定して岩盤の物性値とするのが一般である。また，採用した試験方法の違いで試験物性値が異なることが多い。原位置試験の対象となる岩盤の領域・寸法は，実構造物が対象とする岩盤寸法と桁違いに小さい。岩盤試験による試験値と実構造物の挙動を支配する物性値の関係を，先に述べた岩盤の実態，特に不連続性，非線形性の問題に関してどのように評価し，関連付けるのが適切かは今後顧慮すべき重要な課題である。

3. データ収集・整理

3.1 データ収集

データ収集は、データ収集 WG 内で収集の方法を検討した上で、収集作業を行った。データの項目については、総括 WG で内容を検討し、データシートとして明示した。データ収集は次の手順で行うこととした。

- (1) データシートのフォーマットの検討(提供をお願いするデータの質の明示)
- (2) データの入力方法の検討(誰が、どのようにして入力するのか)
- (3) データ提供依頼先の抽出(何処に依頼するか)
- (4) データ提供の依頼

各々の内容に以下に述べる。

3.1.1 データシートのフォーマットの検討

岩盤物性データ・ベースの作成においては、どの程度の質のデータを必要とするかによって収集方法や入力の方法も異なってくる。したがって、最初に総括 WG でデータシートのフォーマット(案)を検討した。作成したフォーマットを表 3.1-1 に示す。データシートは、せん断試験、平板載荷試験、プレッシャーメータ試験の試験毎に作成し、それぞれ地点情報と試験情報から構成することとした。本 DB は、最終的には委員会の成果として公表することを念頭に考えているため、地点情報の公開の可否をあらかじめ問い合わせることとしてデータシートを作成した。

3.1.2 データの入力方法の検討

本委員会では、JGS 岩盤の工学的分類と岩盤物性との関係を示すことが主な狙いとなっていることから、データシートの試験情報はかなり詳細な内容で構成されている。このフォーマットにデータを入力するには、公表されている文献のみではシートを構成する項目に空が出ることが想定された。岩盤分類と岩盤物性の関係の分析に資するデータを得るためには、調査時の報告書レベルの情報に基づいて入力することが必要と考えられた。

また、データシートの作成は、岩盤試験及び岩盤分類を理解していることが必要と考えられた。この要件は、データの質を一定水準に確保するためにも必要である。さらに、データシート作成の作業量は膨大になるものと想定された。

以上のことを踏まえ、データの入力は情報提供者から調査時の報告書を当委員会が借用し、その報告書に基づいて入力することとした。データの入力作業は、種々の方法を検討し、最終的には外部資金を獲得することによって、調査会社に入力作業を委託する方法をとることとした。

表 3.1-1 データシートの様式

種別	項目	入力欄	備考
ID情報	報告書ID 試験ID 試験面ID 単位系ID [A: (kgf/cm ²) B: (MN/m ² , MPa)]	〇〇01 D R31 A	報告書リスト、フォルダー名と共通 2, 3文字の英数字 ton, ton/m2は換算する
地点情報	対象となる構造物 サイトの名称 場所 調査件名 試験情報の所有者 サイト名・場所・調査件名・所有者の公開の可否 試験の実施年	ダム基礎 〇〇ダム 山口県 〇〇ダムサイト 山口県.. 1983	岩盤直接せん断試験
岩石・岩盤に関する情報	岩石名 (地点固有の名称) 岩石名 (ISOの名称) 地質時代 地層名 岩盤等級 岩盤分類の基準 岩石の一軸圧縮強さ (単位系ID) 一軸圧縮強さを推定した方法 P波 (縦波) 速度 (m/s) S波 (横波) 速度 (m/s)	粘板岩 粘板岩 CM	範囲で表す場合には、“CH~M”ではなく“CH~CM”と記入 原位置の速度 "
JGS岩盤分類要素に関する情報	大分類 中分類 H: 岩石の強さ H: 不連続面の間隔 SM: 岩石の強さ SM: 卓越粒径 SR: マトリクスの強さ SR: 塊の含有率 SB: 層の強さ区分の差 SB: 弱層の構成比率 風化度	H F B IV 1	
試験箇所に関する情報 (平板載荷試験)	試験面の名称 試験箇所の形式 地表面からの深度 (GL~*m) 試験箇所の掘削方法 試験面の整形方法 試験面の凹凸の最大値 (cm) 主要な割れ目と載荷方向の角度 (*度) フェーシング材		報告書の試験面の名称 (記号、番号) 鉛直方向の被り厚 横坑、立坑、トレンチなどの掘削方法 10 0~90度の数値で記入
試験方法に関する情報 (平板載荷試験)	載荷板の種類 載荷板の形状 載荷板の直径または一辺の寸法 (cm) 載荷の方向 載荷速度 (単位系ID) 基準梁の長さ (*m)		30 載荷時 (保持時は除く) の速度を分速で記入
試験結果に関する情報 (平板載荷試験)	変形係数E _d (単位系ID) 上記の値を求めた圧力範囲の下限 (単位系ID) 上記の値を求めた圧力範囲の上限 (単位系ID) 接線弾性係数E _t (単位系ID) 上記の値を求めた圧力範囲の下限 (単位系ID) 上記の値を求めた圧力範囲の上限 (単位系ID) 割線弾性係数E _s (単位系ID) 上記の値を求めた圧力範囲の下限 (単位系ID) 上記の値を求めた圧力範囲の上限 (単位系ID) 上限降伏値 (単位系ID) 極限支持力 (単位系ID) 持続 (クリープ) 応力 (単位系ID) 荷重保持時間 (時間) クリープ率C _f		複数の値がある場合には平均的な値または代表値を記入 支持力試験で数値が得られた場合に記入 得られていない場合には最大応力を記入 クリープ試験の結果を記入 C _f =δ c / δ e
試験箇所に関する情報 (せん断試験)	試験体の名称 試験箇所の形式 地表面からの深度 (GL~*m) 試験箇所の掘削方法 試験面・試験体の整形方法 試験体の切り出し方法 (ロックせん断試験) 主要な割れ目と載荷方向の角度 (*度) コンクリートの圧縮強度 (単位系ID)	R-3-1 試験横坑 11.8 発破掘削 手掘り 10 350	報告書の試験体の名称 (記号、番号) 鉛直方向の被り厚 横坑、立坑、トレンチなどの掘削方法 流れ目を負、差し目を正として-90~90度の数値を記入
試験方法に関する情報 (せん断試験)	試験の種類 せん断面の一辺の寸法 (cm) せん断面の傾斜 (水平からの角度*度) せん断荷重とせん断面の角度 (*度) せん断荷重の載荷速度 (単位系ID)	ブロックせん断 60 0 15 0.5	正方形以外の場合は等価面積の正方形に換算 0~90度の数値で記入 0~90度の数値で記入 載荷時 (保持時は除く) の速度を分速で記入
試験結果に関する情報 (せん断試験)	初期垂直応力 (単位系ID) 破壊点での垂直応力 (単位系ID) 破壊点でのせん断応力 (単位系ID) 破壊点での試験体の垂直変位 (mm) 破壊点での試験体のせん断変位 (mm) 残留強さ (単位系ID) 摩擦抵抗 (単位系ID)	10.3 30	本載荷と同じ初期垂直応力での結果を記入
試験箇所に関する情報 (フレッシャーマー試験)	試験の名称 試験孔の位置 地表面からの深度 (GL~*m) 柱状図		報告書の試験箇所の名称 (記号、番号) ボーリング孔口からの深度
試験方法に関する情報 (フレッシャーマー試験)	試験孔の掘削方法 試験孔の傾斜 (度) プローブの名称 試験孔の直径 (mm) 載荷部分の初期直径 (mm) 載荷部分の長さ (mm) 単位: (kgf/cm ² /min) / (MPa/min) 孔壁圧力の載荷速度 (単位系ID)		90 (鉛直下方) ~0 (水平) の数値を記入 載荷時 (保持時は除く) の速度を分速で記入
試験結果に関する情報 (フレッシャーマー試験)	初期有効孔壁圧力 (単位系ID) 初期載荷部分のヤング率 (単位系ID) 降伏圧力 (単位系ID) 極限圧力 (単位系ID) 除荷・再載荷部分の割線ヤング率 (単位系ID)		P ₀ 複数の値がある場合には平均的な値または代表値を記入
参照情報 (画像データ)		ref1 ref2 ref3 ref4 ref5	原則的に以下の順序でファイル名をつける (ref1, 2, 3, ...) ・載荷パターン ・試験面写真 (試験前・後) ・試験面スケッチ (試験前・後) ・荷重-変位曲線 ・その他の図 ※ファイルが3個の場合にはref4, ref5を消去する ※複数面が一枚の図になっている場合には極力分割する ※分割できない場合には同じ図を重複して登録する

3.1.3 データ提供依頼先の抽出

データ提供の依頼先は、委員で手分けして調査した。調査に当っては、依頼先を国土交通省・自治体関係、北海道開発局関係、水資源機構関係、農林水産省関係、電力関係、として大別し、それぞれ問合せ先を調査した。選定したデータ提供の依頼先は124機関に上り、プロジェクト数は219に及んだ。

3.1.4 データ提供の依頼

問い合わせた219プロジェクトのうち、150件(69%)から回答が得られ、回答があったプロジェクトのうち92%の138件(提供依頼先の63%)からデータ提供の許諾を受けた。

その結果、108のプロジェクトから、報告書を貸与するとの回答を得ることができ、最終的に借用した報告書の総数は440冊に及んだ。

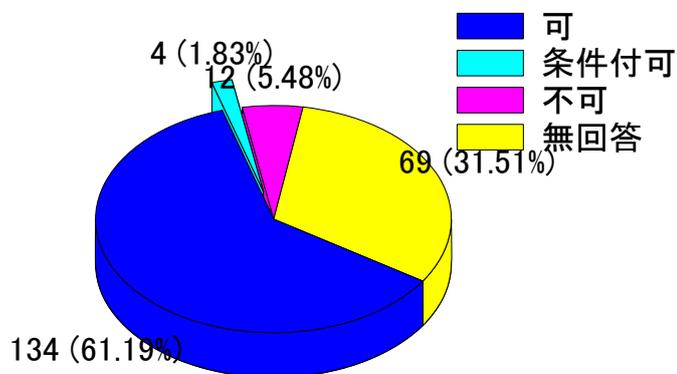


図 3.1-1 データ提供の可否の状況(数字はプロジェクト数)

3.2 データ入力

借用した報告書から必要なデータを拾い出して電子化する作業は、非常に膨大な作業量になることが予想された。当初は、委員全員で作業を分担することも考えたが、借用した貴重な報告書の管理上の問題やデータの取捨選択の判断基準の統一、必要データを探し出す際の効率などを考慮し、岩盤試験業務に精通している委員の所属会社2社に導入した外部資金を用いて再委託することとした。

データ入力に際しては、表 3.1-1 に示す入力シートを用い、付録1に示すデータ入力マニュアルに従って作業を行った。

最終的に入力したデータ数は以下の通りとなった。

試験の種類	試験面の点数
平板載荷試験	1250 点
プレッシャーメータ試験	1010 点
せん断試験	1340 点

3.3 データ・ベース

入力した電子データを一括登録し、様々な分析に供することを目的として、新たにデータ・ベースシステム RMDB を作成した。

データ・ベースシステムは以下のプログラムおよびデータで構成されている。その概要を図 3.3-1 に示す。

- (ア)機能選択プログラム
- (イ)条件検索プログラム
- (ウ)結果表示プログラム
- (エ)グラフ作成プログラム
- (オ)基本データ

このデータ・ベースは、土質関係の地盤図に相当するもので、利用者にデータを提供することを目的として岩盤試験の基本情報を登録したものである。

以下のような特徴を有している。

- (カ)JGS の岩盤分類の分類要素を組み合わせた様々な条件検索が可能である
- (キ)出力メニューは最小限とし、データの一覧表とヒストグラム(平板載荷試験およびプレッシャーメータ試験)または $\sigma - \tau$ 関係図(せん断試験)のみである
- (ク)登録したデータは、報告書から引用した一次データのみで、出力に際しても単位の変換以外の処理は行わない

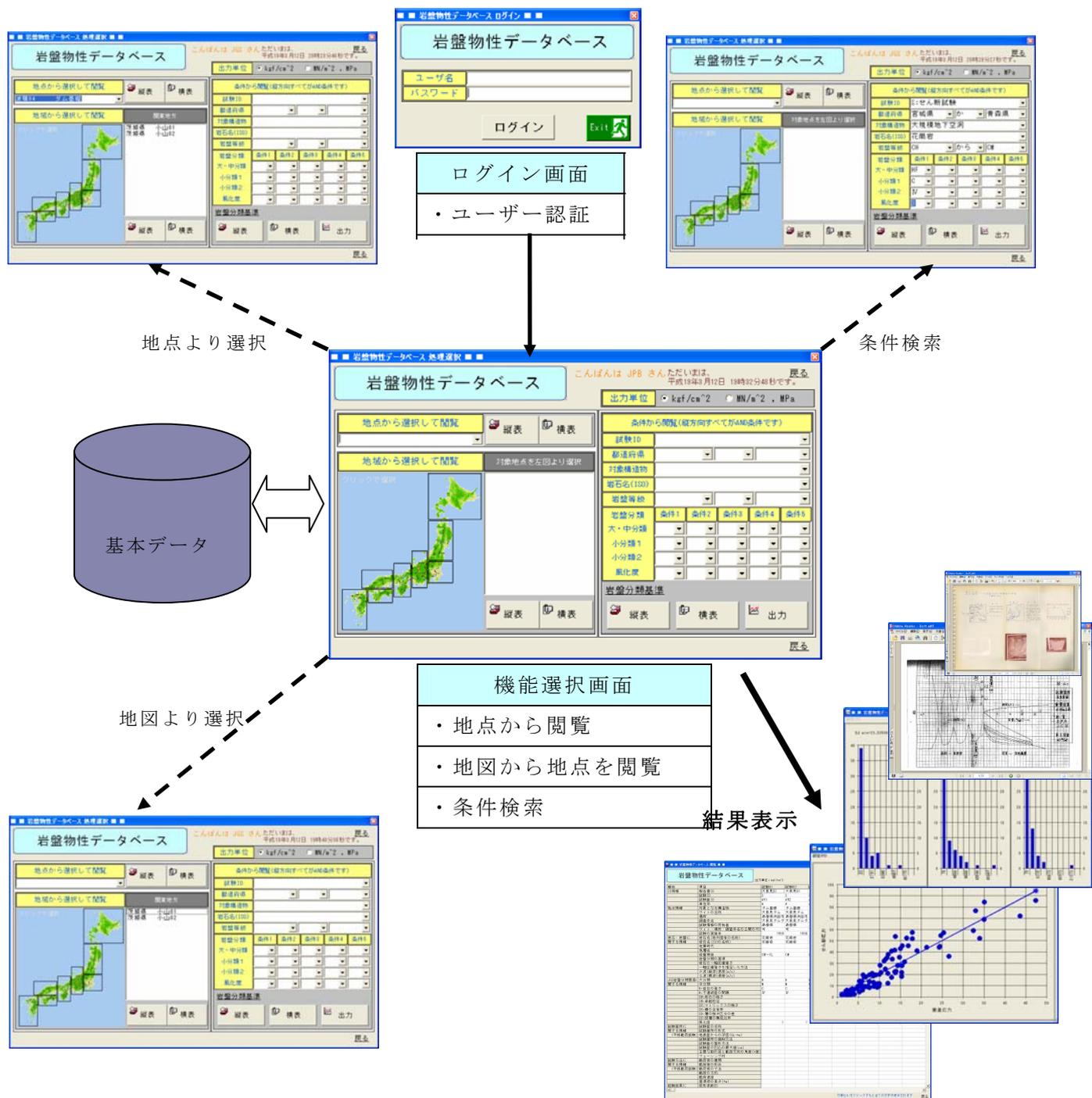


図 3.3-1 データ・ベースシステムの構成

4.1 平板載荷試験

4.1.1 扱うデータについて

平板載荷試験から得られた結果として、当データベースでは「変形係数 E_0 」、「割線弾性係数 E_3 」、「接線弾性係数 E_t 」の3種類の物性値が収録されている。ここでは「変形係数 E_0 」についての統計分析結果と、「変形係数 E_0 」、「割線弾性係数 E_3 」、「接線弾性係数 E_t 」の相関について述べる。

統計分析に用いたデータ数は、図 4.1.2-1 に示す一覧のとおりである。

【硬岩・塊状 HM】									
		不連続面の間隔(mm)					小計		
		2000	600	200	60	20			
岩石の強さ (MN/m ²)	100	A	0	12	59	177	27	2	277
	50	B	0	0	24	129	29	9	191
		C	0	4	15	88	65	2	174
	25	D	0	0	10	13	35	6	64
	10	E	0	0	3	5	17	3	28
	5	F	0	0	14	4	7	16	41
	小計		0	16	125	416	180	38	775

【軟岩・塊状 SM】							
		卓越粒径(mm)			小計		
		2	0.063	0.002			
岩石の強さ (MN/m ²)	10	D	0	0	0	0	0
		E	0	0	0	0	0
	5	F	0	19	4	0	23
	1	G	0	8	0	0	8
	小計		0	27	4	0	31

【硬岩・葉状 HF】									
		不連続面の間隔(mm)					小計		
		2000	600	200	60	20			
岩石の強さ (MN/m ²)	100	A	0	0	1	31	0	0	32
	50	B	0	0	5	29	6	12	52
		C	0	2	9	24	11	11	57
	25	D	0	0	0	4	4	1	9
	10	E	0	2	0	0	3	0	5
	5	F	0	1	0	0	1	3	5
	小計		0	5	15	88	25	27	160

【軟岩・礫質 SR】							
		礫の含有率(%)				小計	
		50	20	10			
マトリックスの強さ (MN/m ²)	10	D	0	24	0	6	30
		E	4	6	5	11	26
	5	F	0	3	0	0	3
	1	G	14	0	0	1	15
	小計		18	33	5	18	74

【軟岩・互層 SB】							
		弱層の構成率(%)				小計	
		10	30	50	80		
層の強さ区分の差	同等	0	0	0	0	0	0
	1段階	0	15	0	0	0	15
	2段階	0	0	0	0	0	0
	3段階	0	0	0	0	0	0
小計		0	15	0	0	0	15

【データ総数】			
大分類	中分類	データ数	計
硬岩 [H]	塊状 HM*	786	946
	葉状 HF	160	
軟岩 [S]	塊状 SM	31	121
	礫質 SR#	75	
	互層 SB	15	

*硬岩系岩盤の塊状HMは、小分類、岩石の強さが不明のデータを11個含む。
#軟岩系岩盤の礫質SRは、礫の含有率が不明のデータを1個含む。

図 4.1.2-1 岩盤分類区分別の変形係数のデータ数一覧

4.1.2 統計モデルの選択について

図 4.1.2-2.1 に変形係数のデータの全データ，硬岩系岩盤，軟岩系岩盤のデータをそのままヒストグラムで表示したものである．正規分布をしていないことは明確である．これらは負の値を取らないことから，常用対数で値を整理すると図 4.1.2.-2.2 に示すような正規分布に近いデータの分布を示す傾向となる．そこで，以下各データが対数分布するとして，整理を行う．軟岩系岩盤のように，2 種類のデータ群からなる傾向も見られるが，このまま整理することにする．

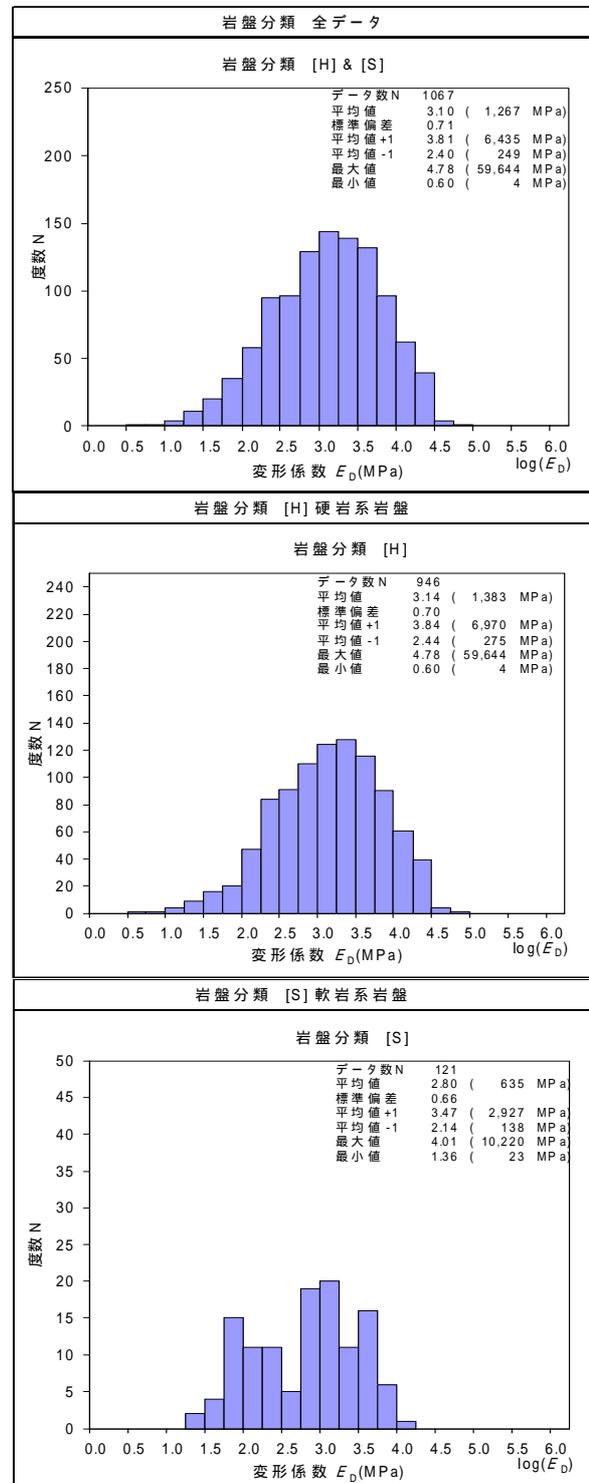
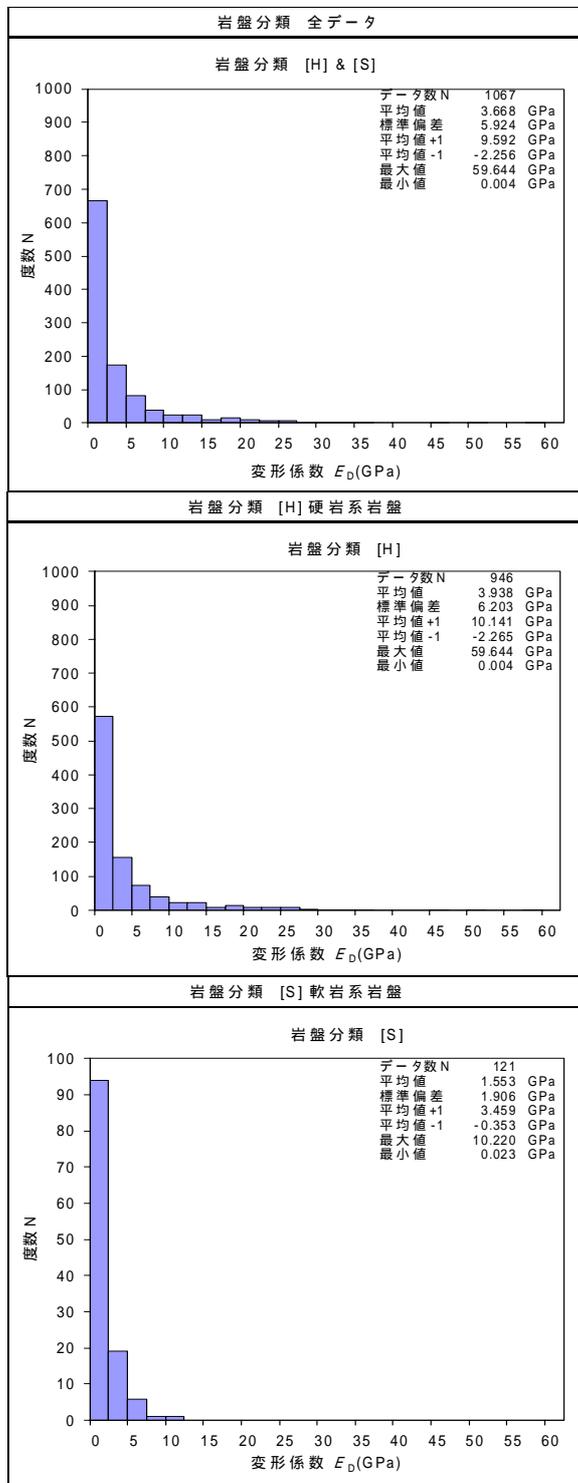


図 4.1.2-2.1 変形係数のヒストグラム

図 4.1.2-2.2 変形係数のヒストグラム

データの整理方法は、岩盤分類別に統計分析し、基本統計量としてのデータ数、平均値、最大値、最小値、平均値 + 標準偏差、平均値 - 標準偏差を図 4.1.2-2.3 に示すような統計量分布図(箱ひげ図)を作成して、岩盤分類区分と物性値の関係を検討した。なお、データ数が少ないものは、正規分布をしているとは言いがたいが、平均値を基本として、結果の評価を行うものとした。

(1) 硬岩系岩盤[H]，軟岩系岩盤[S]の大分類について

変形係数 E_0 は、硬岩系岩盤[H]，軟岩系岩盤[S]の順に低くなる傾向である(図 4.1.2-3)。数値のばらつきは、硬岩系岩盤の方が大きい。これは小分類(岩石の強さ)のランク{A}が 33%，{B}が 26%，{C}が 24%と比較的高い強度が大半を占めているが、比較的弱い岩質のランク{D}，{E}，{F}も数%ずつ含んでいることが原因である。図 4.1.2-3 の赤線、赤点を含むデータの表示は、硬岩系岩盤と軟岩系岩盤全てに関する変形係数のデータの分布の特徴を示している。これは硬岩系岩盤と軟岩系岩盤の分布を比較するための参照用である。以下、分布図は、各分類区分を比較する際、最も左側のデータの分布は、参照用である。

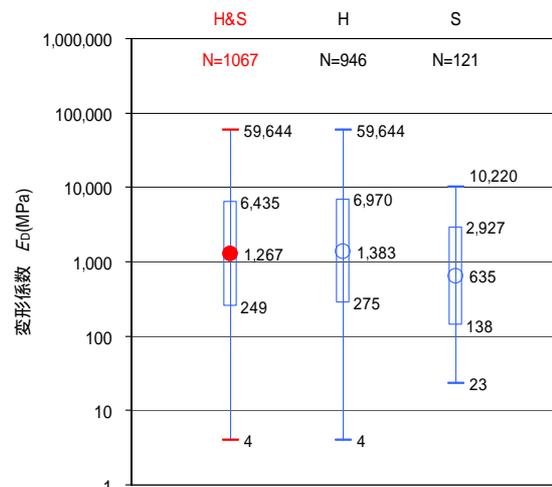
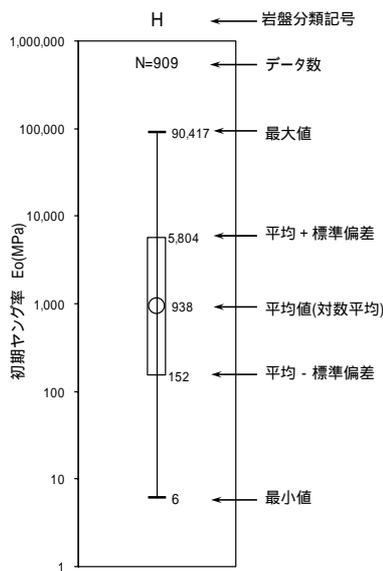


図 4.1.2-2.3 データ分布図の説明

図 4.1.2-3 硬岩系岩盤[H]，軟岩系岩盤[S]の変形係数データ分布

(2) 硬岩系岩盤[H]の中分類比較

硬岩系塊状岩盤 HM の平均値は、軟岩系葉状岩盤 HF よりも低い傾向にある(図 4.1.2-4)。一方で、最大値は、HF よりも HM のデータ群の方が大きく、HM の方が変形係数の数値が比較的ばらつく傾向にある。

(3) 軟岩系岩盤[S]の中分類比較

軟岩系岩盤の変形係数は、礫質岩 SR が他の 2 つ分類 SM，SB よりも比較的高い値をとる(図 4.1.2-9)。また、一方で塊状岩 SM が他の 2 つに比べて変形係数が小さい値をとる傾向にある。これは、このデータ群が小分類(岩石の強さ)について、ランク(F)，(G)のデータのみで構成されているためである。

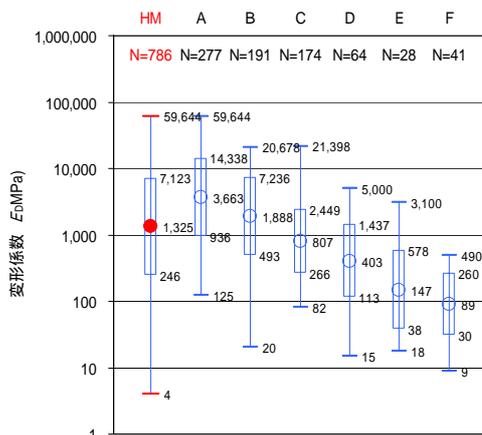


図 4.1.2-4 硬岩系岩盤[H]の変形係数中分類データ分布

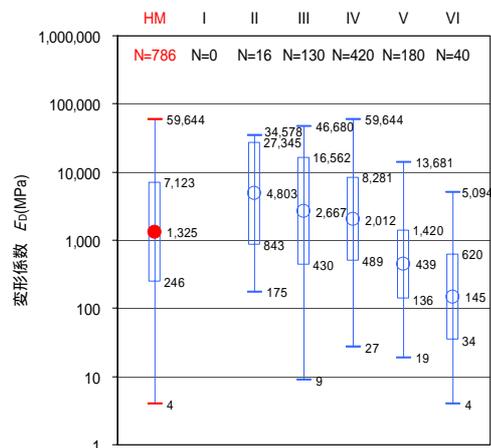


図 4.1.2-9 軟岩系岩盤[S]の変形係数中分類データ分布

(4) 硬岩系塊状岩盤 HM の小分類(岩石の強さ)の分布について

変形係数は、小分類(A)から(F)へと岩石の強さのランクが小さくなるに従って、値が小さくなる傾向にある(図 4.1.2-5)。

(5) 硬岩系塊状岩盤 HM の小分類(不連続面の間隔)の分布について

変形係数は、小分類(II)から(VI)へと不連続面の間隔が狭いランクになる程、低くなる傾向にある(図 4.1.2-6)。

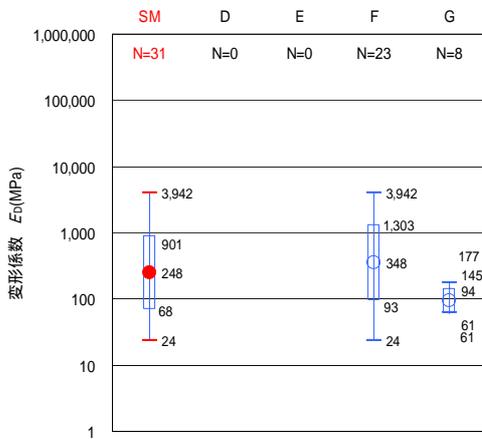


図 4.1.2-5 硬岩系塊状岩盤 HM の変形係数の小分類(岩石の強さ)データ分布

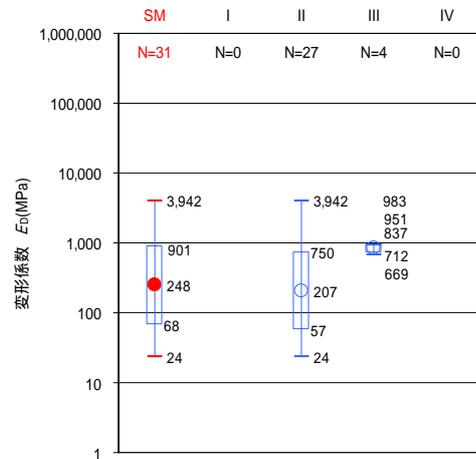


図 4.1.2-6 硬岩系塊状岩盤 HM の変形係数の小分類(不連続面の間隔)データ分布

(6) 硬岩系葉状岩盤 HF の小分類(岩石の強さ)の分布について

変形係数は、小分類(A)から(C)のランクが同様の値をとり、(D)から(F)へと岩石の強さが小さいランクになるに従って、値が小さくなる傾向にある(図 4.1.2-7)。

(7) 硬岩系葉状岩盤 HF の小分類(不連続面の間隔)について

変形係数は、小分類(II)のランクを除き、平均値は小分類(III)から(VI)へと不連続面の間隔が狭いランクになる程小さくなる傾向を示す(図 4.1.2-8)。小分類(II)の階級にあるデータ数は、他の階級にあるデータ数に比べて極端に少ないことで、このようになった可能性がある。

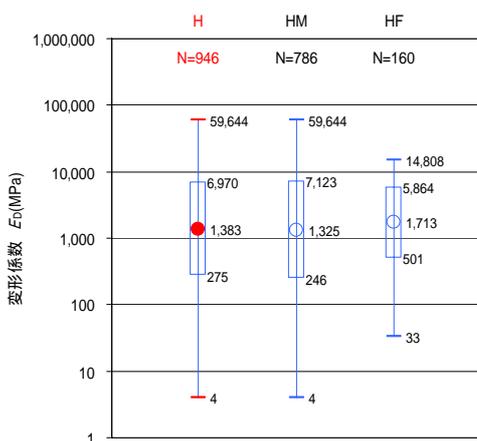


図 4.1.2-7 硬岩系葉状岩盤 HF の変形係数小分類(岩石の強さ)データ分布

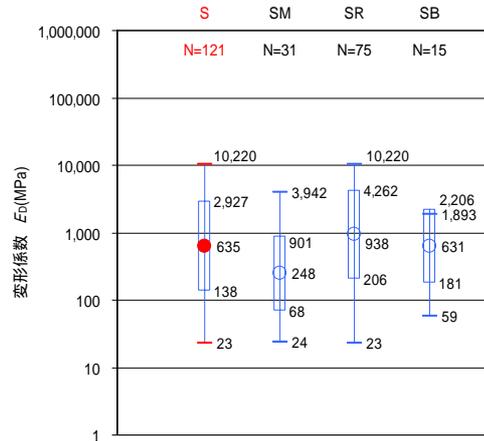


図 4.1.2-8 硬岩系葉状岩盤 HF の変形係数小分類(不連続面の間隔)データ分布

(8) 軟岩系塊状岩盤 SM の小分類(岩石の強さ)について

軟岩系塊状岩盤 SM のデータ群は、小分類(岩石の強さ)のランク(F), (G)のデータのみで構成されている。基岩の強さが(F), (G)ランクになるに従って、変形係数が小さくなる傾向を示す(図 4.1.2-10)。

(9) 軟岩系塊状岩盤 SM の小分類(卓越粒径)について

小分類(III)のランクのデータがランク(II)のデータに比べて極端に少ないため明確なことは言えないが、卓越粒径が小さい岩の変形係数が卓越粒径の大きい岩よりも高い値を示す傾向を示す(図 4.1.2-11)。

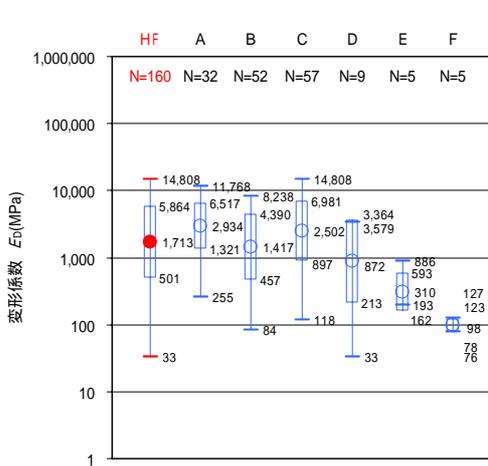


図 4.1.2-10 軟岩系塊状岩盤 SM の変形係数の小分類(岩石の強さ)データ分布

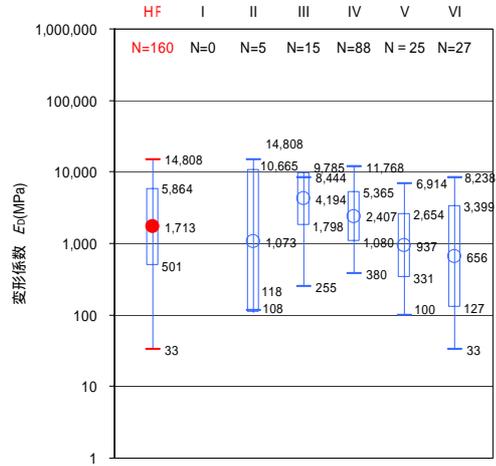


図 4.1.2-11 軟岩系塊状岩盤 SM の変形係数の小分類(卓越粒径)データ分布

(10) 軟岩系礫状岩盤 SR の小分類(マトリックスの強さ)について

小分類(F)と(G)のランクのデータ数が、小分類(D), (E)のランクのデータ数に比べて極端に少ないが、マトリックスの強さが小さくなる傾向に沿って、割線弾性係数も小さくなる傾向を示している(図 4.1.2-12)。

(11) 軟岩系礫質岩盤 SR の小分類(礫の含有率)について

小分類(III)のランクのデータ数が他のランク(I), (II), (IV)に比べて少ないので、データ分布の幅が他のランクに比べて狭いが、およそ小分類(II), (III), (IV)の平均値が同様の値を取り、礫の含有率が高いランク(I)を除き、各ランクの分布の幅の範囲で、礫の含有率が低下するランクになるに従って、変形係数の値も小さくなる傾向にある(図 4.1.2-13)。

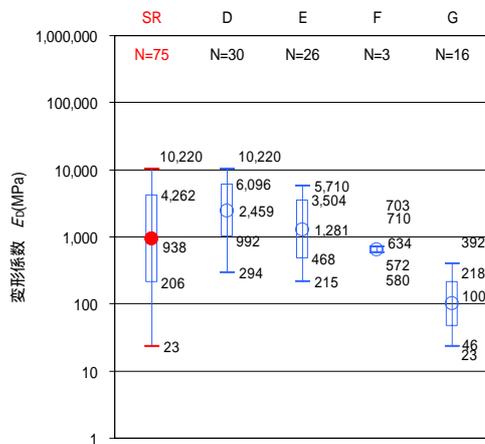


図 4.1.2-12 軟岩系礫質岩盤 SR の変形係数の小分類(岩石の強さ)データ分布

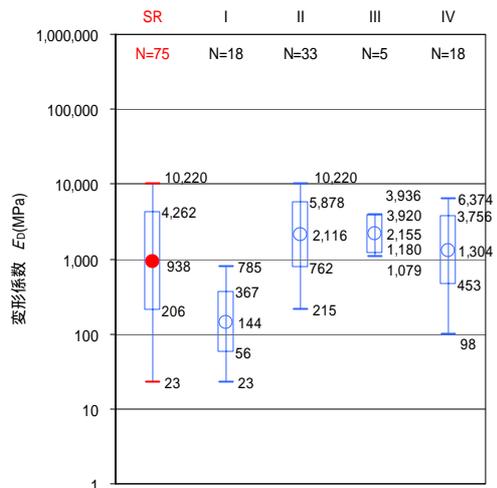


図 4.1.2-13 軟岩系礫質岩盤 SR の変形係数の小分類(礫の含有率)のデータ数

4.1.5 変形係数，割線弾性係数，接線弾性係数の相関

(1) 変形係数と接線弾性係数，割線弾性係数との相関について

変形係数と接線弾性係数との相関，変形係数と割線弾性係数の相関関係を考察するために，図 4.1.5-1，図 4.1.5-2 に全データ，このデータ群を一次関数に近似した線(赤線)，各係数の 1 : 1 の位置を示す線(青線)で示す．同一の平板載荷試験の測定結果から求められた接線弾性係数，割線弾性係数は，変形係数よりも 1.25 倍(図 4.1.5-1)，1.39 倍(図 4.1.5-1)ほど大きな値を取る．同一の平板載荷試験から求められた接線弾性係数，割線弾性係数が変形係数よりも大きな値をとる傾向は，硬岩系岩盤，軟岩系岩盤の場合も同様である(図 4.1.5-3 ~ 図 4.1.5-6)．

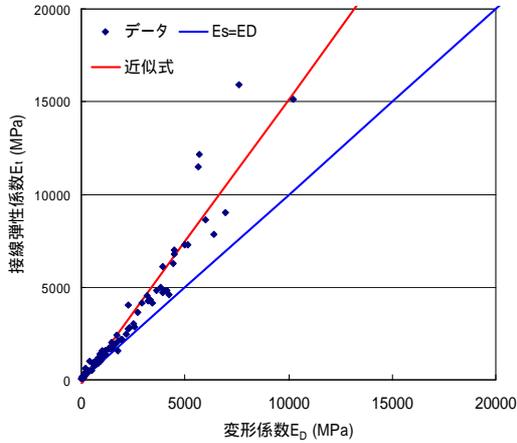


図 4.1.5-1 変形係数と接線弾性係数の相関(全データ)

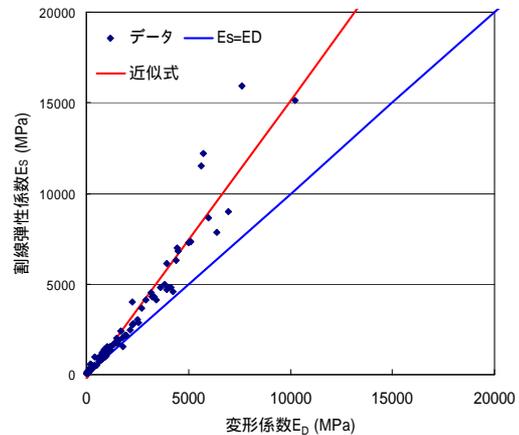


図 4.1.5-2 変形係数と割線弾性係数の相関(全データ)

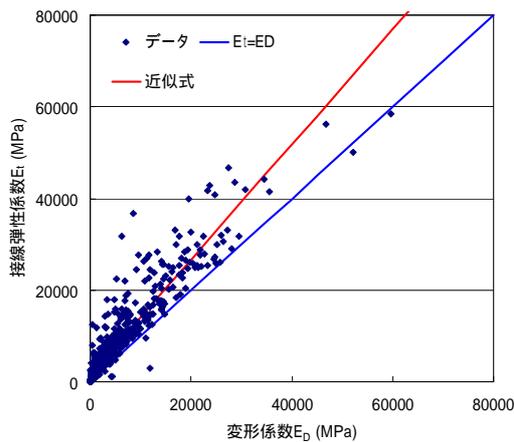


図 4.1.5-3 変形係数と接線弾性係数の相関
(硬岩系岩盤の全データ)

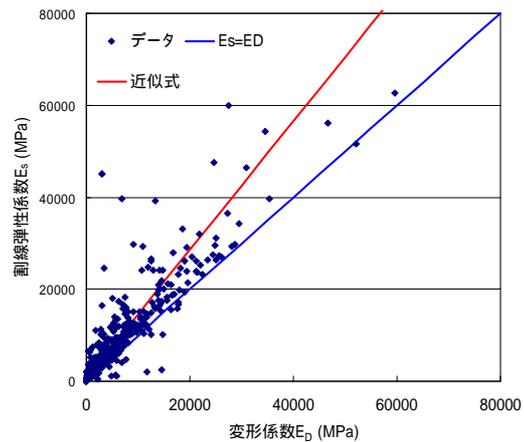


図 4.1.5-4 変形係数と割線弾性係数の相関
(硬岩系岩盤の全データ)

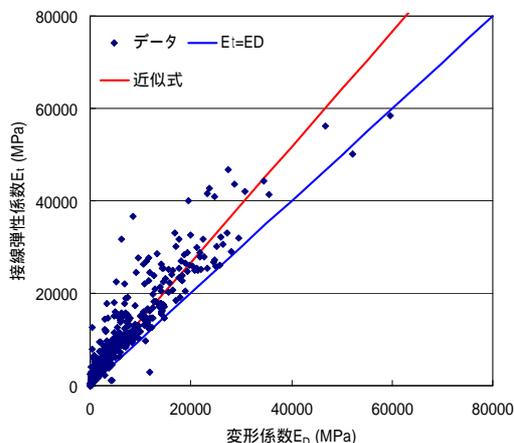


図 4.1.5-5 変形係数と割線弾性係数の相関
(軟岩系岩盤の全データ)

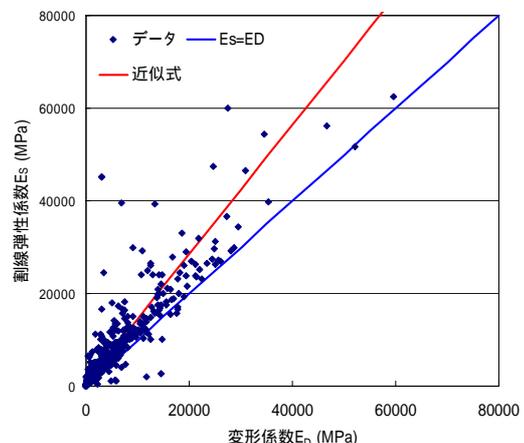


図 4.1.5-6 変形係数と接線弾性係数の相関
(軟岩系岩盤の全データ)

(2) 接線弾性係数と割線弾性係数の相関について

接線弾性係数と割線弾性係数の相関は、変形係数と接線弾性係数、割線弾性係数との相関に比べて、近い関係にある(図 4.1.5-7) . これは、硬岩系岩盤、軟岩系岩盤についても同様の傾向である(図 4.1.5-8 , 4.1.5-9) . とくに、軟岩系岩盤[S]は、接線弾性係数、割線弾性係数がほぼ一致する傾向にある(図 4.1.5-9) .

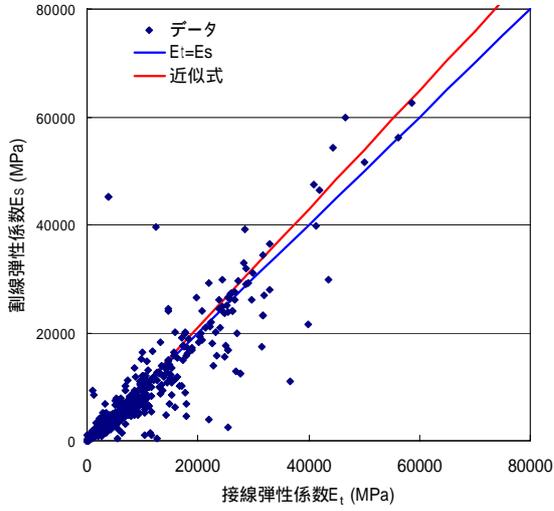


図 4.1.5-7 接線弾性係数と割線弾性係数の相関 (全データ)

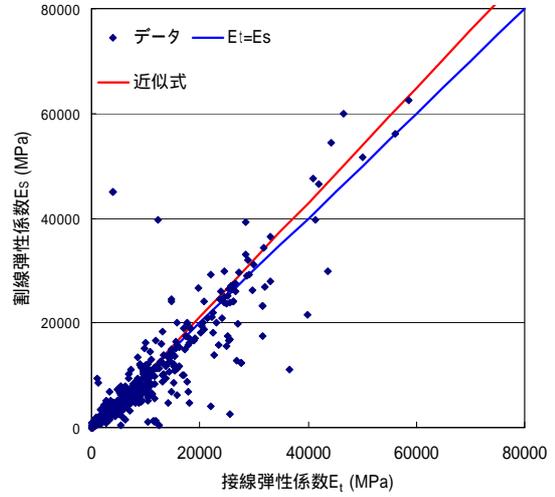


図 4.1.5-8 接線弾性係数と割線弾性係数との相関 (硬岩系岩盤の全データ)

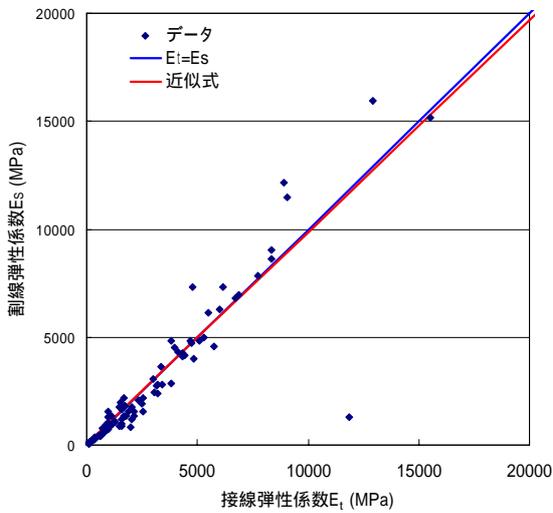


図 4.1.5-9 接線弾性係数と割線弾性係数との相関 (軟岩系岩盤の全データ)

4.2 プレッシャーメータ試験

4.2.1 データ概要

(1) 物性値

プレッシャーメータ試験により得られた物性値として、当データベースでは「初期荷部分のヤング率」、「徐荷・再荷部分の割線ヤング率」が収録されている。ここでは試験結果としてデータが豊富な「初期荷部分のヤング率」について、岩盤分類に従い整理した。なお、「初期荷部分のヤング率」は図 4.2.1-1 に示すように求められており、ここでは「初期ヤング率 E_0 」と表記した。

(2) データ数

プレッシャーメータ試験のデータ総数を表 4.2.1-1 に示す。データ総数は 978 個、硬岩[H]で 909 個、軟岩[S]で 69 個である。硬岩[H]の内訳は塊状{M}が 733 個、葉状{F}が 176 個である。また、軟岩[S]の内訳は塊状{M}が 65 個、礫質{R}が 4 個であるが、互層{B}に該当するデータは当データベースには収集されていない。

(3) 岩盤分類別のデータ内訳

岩盤分類別のデータ内訳を表 4.2.1-2 に示す。硬岩系[H]はデータが比較豊富のため、「岩石の強さ」と「不連続面の間隔」の各々のマトリクス区分においてデータが充実している。しかし、「不連続面の間隔」がランク (600mm) になるとデータ数が少なくなり、ランク (2,000mm) に該当するデータは得られていない。

一方、軟岩[S]についてはデータ数が少なく、岩盤分類別のデータ分布に偏りがある。すなわち、塊状{M}ではデータ数は 65 個であるが、小分類として「卓越粒径」の区分が不明であるものが 46 個ある。また、礫質{R}はデータ数 4 個であるが小分類として「礫の含有率」の区分が不明である。さらに、互層{B}は今回収集したデータには該当するものが無かった。

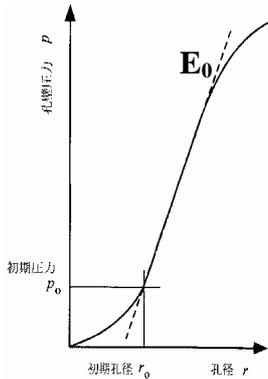


図 4.2.1-1 初期荷部分のヤング率(E_0)

表 4.2.1-1 データ総数(プレッシャーメータ試験)

大分類	中分類	データ数	計
硬岩 [H]	塊状 {M}	733	909
	葉状 {F}	176	
軟岩 [S]	塊状 {M}	65	69
	礫質 {R}	4	
	互層 {B}	0	

4.2.2 プレッシャーメータ試験結果の岩盤分類別の整理

(1) データの整理方法

岩盤分類別に物性値(初期ヤング率 E_0)のヒストグラム(図 4.2.2-1)を作成し基本統計量を求めた。なお、ヒストグラムの作成にあたっては、データ分布が対数軸目盛りとした対数正規分布を示す傾向が認められたため、ここではデータを対数変換して処理し、平均値は対数平均とした。そして、岩盤分類別に図 4.2.2-2 に示すような統計量分布図(箱ひげ図)を作成し、岩盤分類区分と物性値の関係を整理し分析を加えた。

この箱ひげ図には初期ヤング率 E_0 の基本統計量として、データ数、平均値、最大値、最小値、そして平均値 + 標準偏差、平均値 - 標準偏差を示してある。

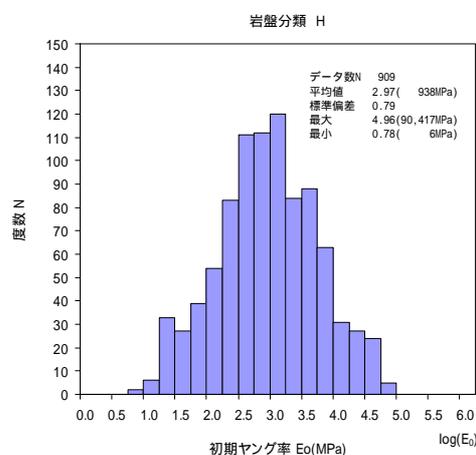


図 4.2.2-1 物性値のヒストグラム (初期ヤング率 E_0)

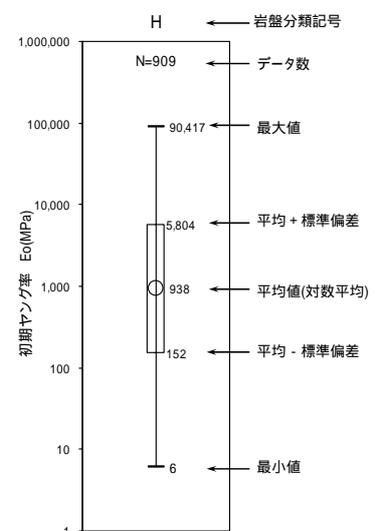


図 4.2.2-2 データ分布図(箱ひげ図)の説明 (初期ヤング率 E_0)

表 4.2.1-2 岩盤分類別のデータ数の内訳(プレッシャーメータ試験)

【 硬岩[H] 】

		不連続面の間隔(mm)					小計		
		2000	600	200	60	20			
岩石の強さ (MN/m ²)	100	A	0	13	67	63	37	0	180
		B	0	10	99	164	38	6	317
	50	C	0	2	29	121	87	38	277
		D	0	6	4	31	27	13	81
	25	E	0	3	8	8	0	20	39
		F	0	1	5	2	1	6	15
小計			0	35	212	389	190	83	909

【 軟岩[S]・塊状{M} 】

		卓越粒径(mm)			小計		
		2	0.063	0.002			
岩石の強さ (MN/m ²)	10	D	0	0	1	4	5
		E	0	1	1	6	8 +46 ^{注1}
	5	F	0	0	5	1	6
		G	0	0	0	0	0
	1						
小計			0	1	7	11	19 +46 ^{注1}

注1：小分類「卓越粒径」が不明なもの(46データ)

【 硬岩[H]・塊状{M} 】

		不連続面の間隔(mm)					小計		
		2000	600	200	60	20			
岩石の強さ (MN/m ²)	100	A	0	12	59	63	36	0	170
		B	0	10	96	94	34	6	240
	50	C	0	0	22	98	48	36	204
		D	0	6	4	30	26	13	79
	25	E	0	3	8	8	0	10	29
		F	0	1	5	2	1	2	11
小計			0	32	194	295	145	67	733

【 軟岩[S]・礫質{R} 】

		礫の含有率(%)			小計	
		50	20	10		
マトリックスの強さ (MN/m ²)	10	D	0	0	0	0
		E	0	0	0	0 +4 ^{注2}
	5	F	0	0	0	0
		G	0	0	0	0
	1					
小計			0	0	0	0 +4 ^{注2}

注2：小分類「礫の含有率」が不明なもの(4データ)

【 硬岩[H]・葉状{F} 】

		不連続面の間隔(mm)					小計		
		2000	600	200	60	20			
岩石の強さ (MN/m ²)	100	A	0	1	8	0	1	0	10
		B	0	0	3	70	4	0	77
	50	C	0	2	7	23	39	2	73
		D	0	0	0	1	1	0	2
	25	E	0	0	0	0	0	10	10
		F	0	0	0	0	0	4	4
小計			0	3	18	94	45	16	176

【 軟岩[S]・互層{B} 】

		弱層の構成比率(%)				小計
		10	30	50	80	
層の強さ区分の差	同等	0	0	0	0	0
	1段階	0	0	0	0	0
	2段階	0	0	0	0	0
	3段階	0	0	0	0	0
小計		0	0	0	0	0

(2) 硬岩・軟岩の大分類による整理

硬岩[H]と軟岩[S]の全データの初期ヤング率 E_0 の分布を図 4.2.2-3 に示す。また、初期ヤング率 E_0 のヒストグラムを図 4.2.3-4 に示す。硬岩と軟岩を合わせたデータ[H+S]の初期ヤング率 E_0 の平均値は 888MPa であり、硬岩[H]の平均値は 938MPa、軟岩[S]の平均値は 430MPa である。

硬岩と軟岩を比較すると、軟岩[S]の初期ヤング率 E_0 は硬岩[H]の約 1/2 程度となっている。また、硬岩[H]は軟岩[S]に比べてバラツキが大きい傾向を示しており、この要因として硬岩[H]では不連続面の影響等が考えられる。

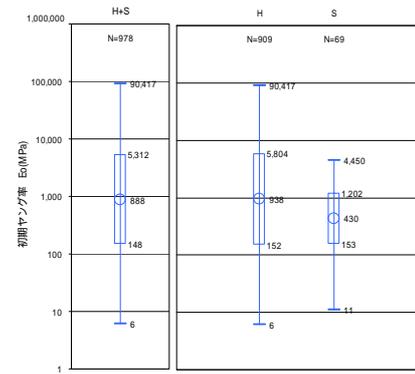


図 4.2.2-3 硬岩[H],軟岩[S]の初期ヤング率 E_0 の分布

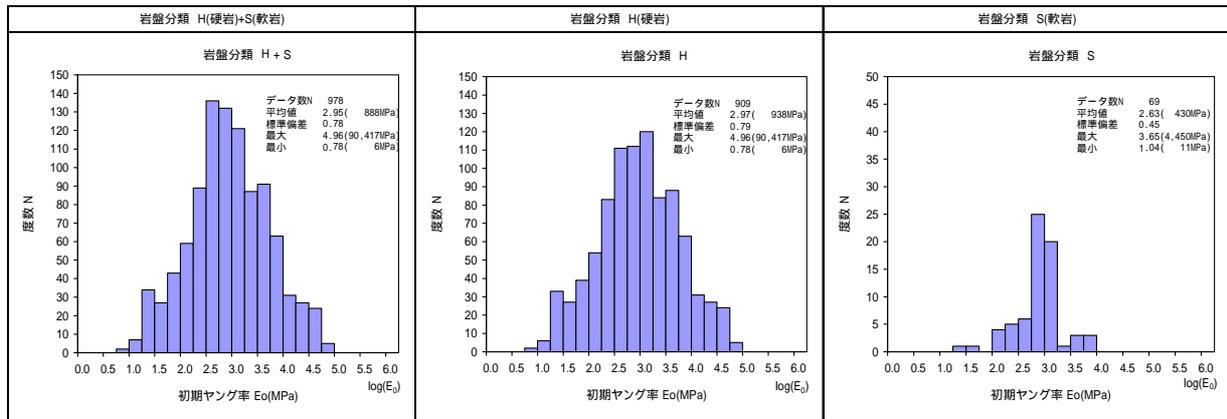


図 4.2.2-4 硬岩[H]・軟岩[S]の初期ヤング率 E_0 のヒストグラム

(3) 硬岩・軟岩の中分類による整理

硬岩・軟岩の中分類による初期ヤング率 E_0 の分布を図 4.2.2-5 に示す。また、初期ヤング率 E_0 のヒストグラムを図 4.2.3-6 に示す。

硬岩[H]では葉状 {F} は塊状 {M} に比べ初期ヤング率は 2 倍程度となっていることが特徴であり、葉状 {F} と塊状 {M} とでは初期ヤング率に大きな相違がみられる。また、葉状はデータのバラツキが大きく、載荷方向の影響がバラツキの要因として考えられる。

軟岩[S]では礫質 {R} は塊状 {M} に比べ平均値が大きく、バラツキが少ない結果となっている。ただし、礫質 {R} のデータ数は 4 個と少ないため適正な比較は困難である。

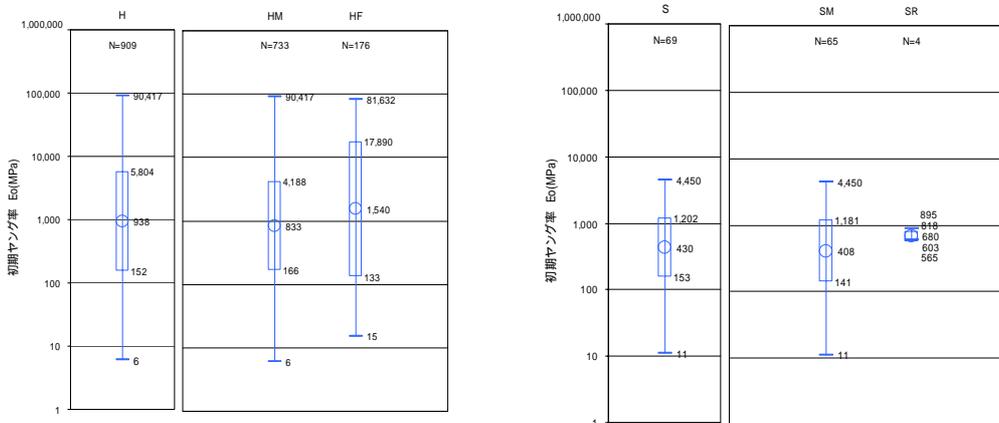


図 4.2.2-5 硬岩[H],軟岩[S]の中分類別の初期ヤング率 E_0 の分布

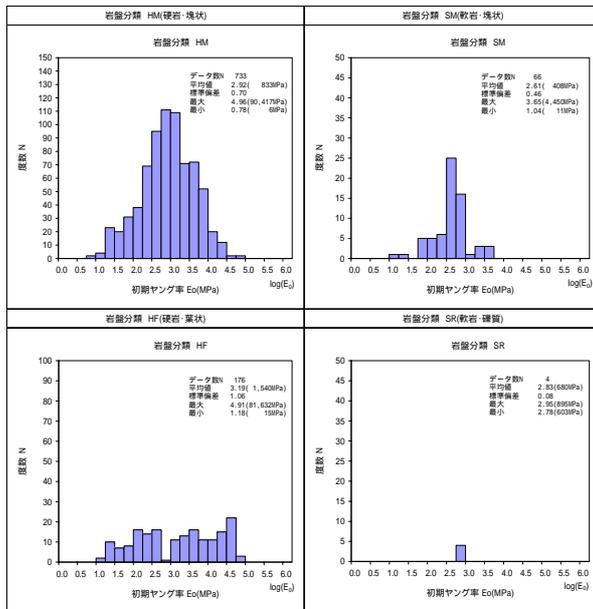


図 4.2.2-6 硬岩[H]と軟岩[S]の中分類別の初期ヤング率 E_0 のヒストグラム

(4) 硬岩[H]と軟岩[S]の全データの小分類「岩石の強さ」による整理

硬岩[H]と軟岩[S]を含めた全データの小分類「岩石の強さ」による初期ヤング率 E_0 の分布を図 4.2.2-7 に示す。硬岩[H]と軟岩[S]を含めた全データにおいても、「岩石の強さ」ランク別には、「岩石の強さ」が強いほど初期ヤング率 E_0 は高く、「岩石の強さ」が弱いほど初期ヤング率の値は小さい傾向を示している。しかし、個別には「岩石の強さ」ランク A と B の平均値が逆転、またランク D と E の平均値が逆転など部分的な不揃いな箇所もみられる。

「岩石の強さ」のランクについては、硬岩[H]と軟岩[S]ではランク D, E, F が重複するがデータ数は硬岩[H]が多いので初期ヤング率 E_0 の分布は硬岩[H]の傾向に吸収されている。

以上のように全体では初期ヤング率 E_0 の分布は「岩石の強さ」の順に並ぶが、個別の不揃い、バラツキは硬岩[H]の「不連続面間隔」, 「葉状」などの要因によるものと考えられる。

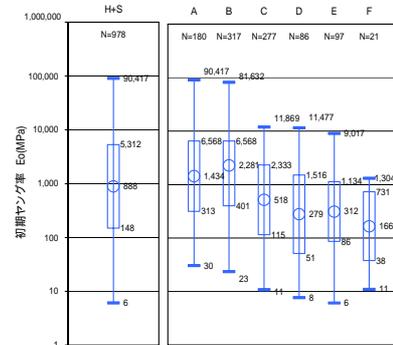


図 4.2.2-7 硬岩[H]と軟岩[S]全データの「岩石の強さ」別の初期ヤング率 E_0 の分布

(5) 硬岩[H]の小分類「岩石の強さ」による整理

硬岩[H]の小分類「岩石の強さ」による初期ヤング率 E_0 の分布を図 4.2.2-8 に示す。

塊状 {M}, 葉状 {F} ともに「岩石の強さ」のランクが下がるほど、初期ヤング率 E_0 は低下する傾向を示している。ただし、個別のランク別には不揃いが見られ、「不連続面の間隔」や葉状では「载荷方向」などの要因が影響しているものと考えられる。

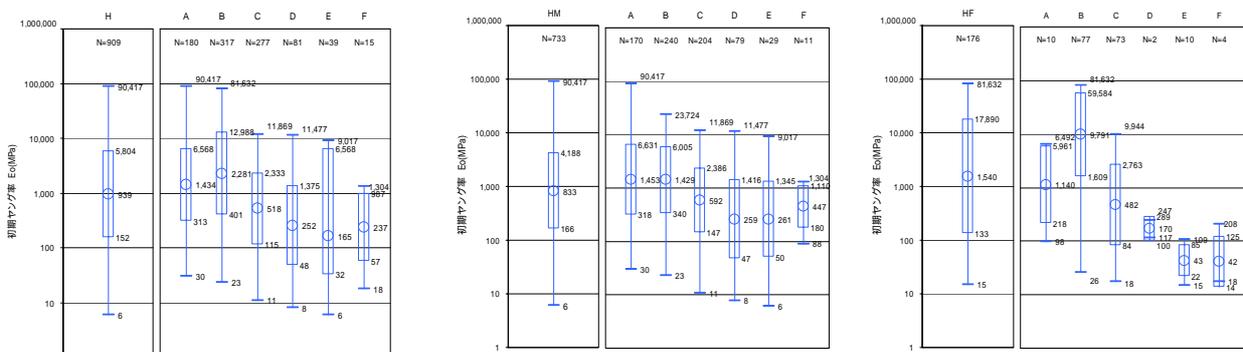


図 4.2.2-8 硬岩[H]の「岩石の強さ」別の初期ヤング率 E_0 の分布

(6) 硬岩[H]の中分類「岩石の強さ」、小分類「不連続面の間隔」による整理

硬岩[H]全データについて「岩石の強さ」、「不連続面間隔」ランク別の初期ヤング率 E_0 の分布を図 4.2.2-9 に示す。同図によると「岩石の強さ」のランクが A, B, C, D までは「不連続面間隔」のランクが低下するほど、すなわち不連続面の間隔が密になるほど初期ヤング率 E_0 は小さくなる傾向を示す。しかし、「岩石の強さ」のランクが E, F の強度が小さいクラスでは、「不連続面間隔」(~)によって初期ヤング率 E_0 の大小の傾向は不揃いとなっている。

すなわち、「岩石の強さ」が E, F といった強度が小さいクラスでは、風化などによる劣化が進んでいるため「不連続面間隔」の因子は初期ヤング率 E_0 に対して影響度は小さいものと考えられる。

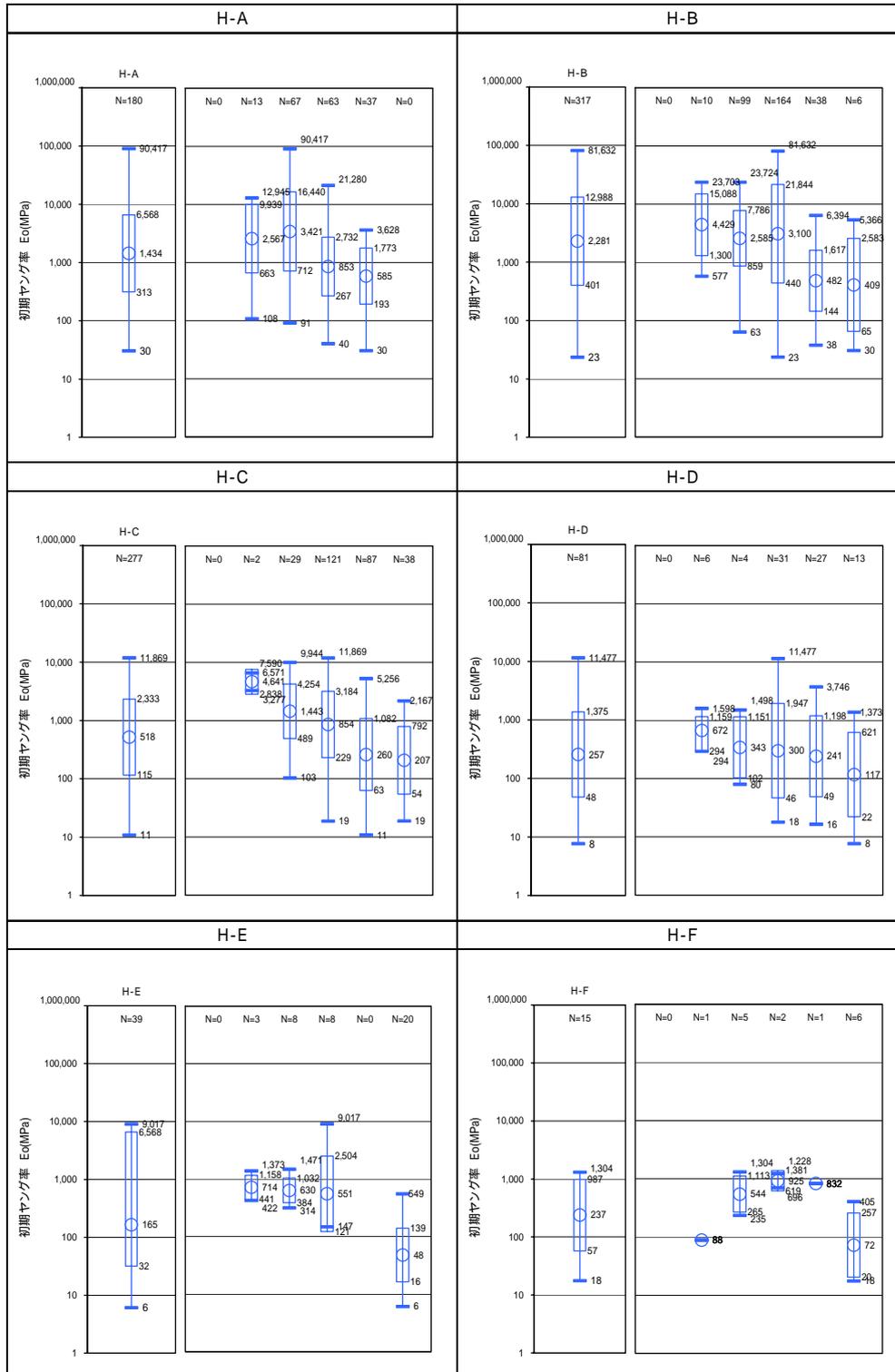


図 4.2.2-9 硬岩[H]の「岩石の強さ」、「不連続面間隔」別の初期ヤング率 E_0 の分布

(7) 軟岩[S]の小分類「岩石の強さ」による整理

軟岩[S]の小分類による初期ヤング率 E_0 の分布を図 4.2.3-10 に示す。軟岩[S]における小分類「岩石の強さ」はランク D, E, F であるが、今回の岩盤データベースではランク G に該当するデータは無く、ランク D, E, F に該当するデータである。

軟岩[S]全体では「岩石の強さ」(ランク D, E, F) 別にみると、「岩石の強さ」のランクが下がるほど、初期ヤング率 E_0 は低下する傾向にある。また、塊状 {M} についても同様な傾向がみられる。

このように、軟岩[S]においては「岩石の強さ」と初期ヤング率 E_0 の相関は比較的良好で安定していることが特徴である。すなわち、軟岩[S]では風化度や固結因子を背景として、「岩石の強さ」と初期ヤング率 E_0 は直接的な関係にありそうで、硬岩[H]の場合と異なり軟岩[S]では「不連続面」の影響は希薄のようである。

なお、礫質 {R} では小分類として「マトリクスの強さ」別に区分されるが、収集データでは「マトリクスの強さ」がランク E に相当する 4 個のデータに限られるため、ここでは省略する。

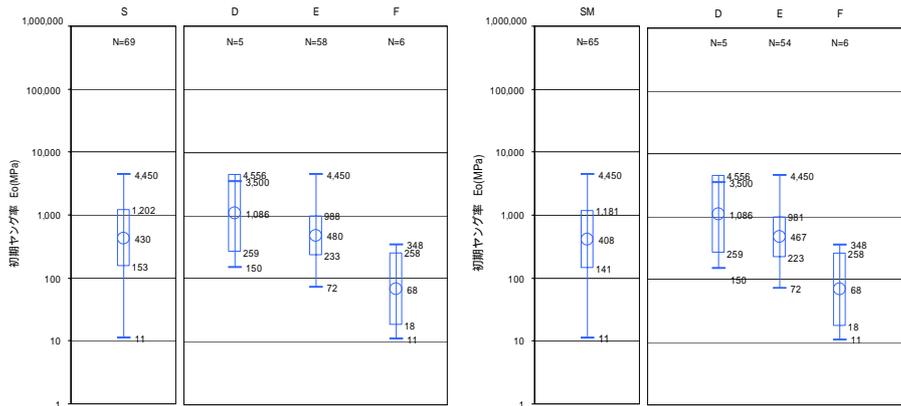


図 4.2.2-10 軟岩[S]の「岩石の強さ」別の初期ヤング率 E_0 の分布

(8) 軟岩[S]の小分類「卓越粒径」による整理

軟岩[S]の塊状 {M} について「岩石の強さ」と「卓越粒径」のランク別の初期ヤング率 E_0 の分布を図 4.2.2-11 に示す。

この結果、「卓越粒径」のランク(, ,)が下がるほど、すなわち卓越粒径が小さくなるほど、初期ヤング率は大きくなる傾向もみられるが、データ数が少ないことから、有意な傾向は認められない。

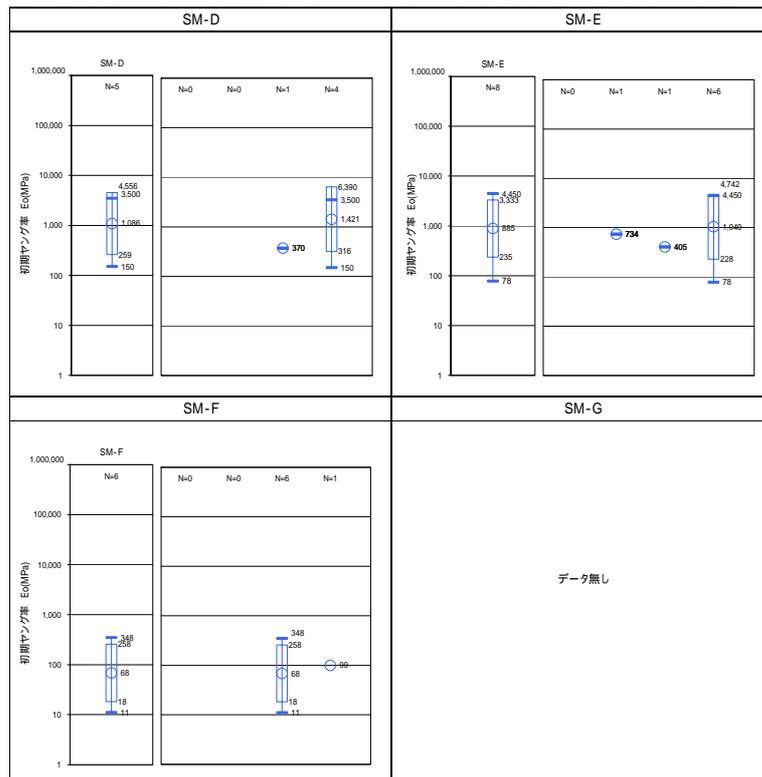


図 4.2.2-11 軟岩・塊状[S] {M} の「岩石の強さ」、「卓越粒径」別の初期ヤング率 E_0 の分布

4.2.3 平板載荷試験とプレッシャーメータ試験の比較

平板載荷試験とプレッシャーメータ試験により得られた変形特性について、岩盤分類別の比較を行った。対象としたデータは平板載荷試験では変形係数 E_D 、割線弾性係数 E_S 、接線弾性係数 E_t 、プレッシャーメータ試験では初期ヤング率 E_0 である。

「岩石の強さ」のランク別の変形特性の平均値を一覧にまとめ表 4.2.3-1 に示す。同表には平板載荷試験、プレッシャーメータ試験において、硬岩[H]では「岩石の強さ」のランク A, B, C, D, E, F, 軟岩[S]では「岩石の強さ」のランク D, E, F について両試験法により得られた試験結果の平均値を示してある。また、同表には平板載荷試験による変形係数 E_D 、割線弾性係数 E_S 、接線弾性係数 E_t をプレッシャーメータ試験による初期ヤング率 E_0 で除して変形特性比を示した。同表における変形特性比をプロットして図 4.2.3-1 に示す。同図の横軸はプレッシャーメータ試験による初期ヤング率 E_0 とした。なお、ここで注意すべきは、変形特性の比として対比した両者の物性値は、同一箇所での試験値の比ではなく岩盤分類別の平均値である。

この結果、平板載荷試験により得られる変形特性 (E_D, E_S, E_t) はプレッシャーメータ試験結果(E_0)に比べ大きな値となっている。両者の倍率は一樣ではなく、変形特性の大きさにより変化する傾向にあり、変形特性が小さいほど両試験法による試験値の相違は大きく、変形特性が大きいほど両試験法による試験値の相違は小さくなる。

同図によれば、変形特性が 100MPa 以下の範囲では 5 倍程度、変形特性が 100~1,000MPa の範囲では 2~5 倍程度、変形特性が 1,000MPa 以上の範囲では 2 倍程となっている。

以上のように平板載荷試験により得られる変形特性 (E_D, E_S, E_t) はプレッシャーメータ試験結果(E_0)に比べ大きな値となっているが、両者の相違については、試験方法の原理、載荷応力と不連続面、載荷面積などの要因が挙げられる。

表 4.2.3-1 試験方法別の変形特性の比較データ(平均値)

岩盤分類		プレッシャーメータ試験	平板載荷試験			変形特性比		
大分類	「岩石の強さ」	初期ヤング率 E_0 (MPa)	変形係数 E_D (MPa)	割線弾性係数 E_S (MPa)	接線弾性係数 E_t (MPa)	E_D/E_0	E_S/E_0	E_t/E_0
硬岩 [H]	A	1,434	3,580	5,280	6,818	2.50	3.68	4.75
	B	2,281	1,776	2,932	3,384	0.78	1.29	1.48
	C	518	1,067	2,270	2,554	2.06	4.38	4.93
	D	252	443	1,337	1,146	1.76	5.31	4.55
	E	165	165	601	443	1.00	3.64	2.68
	F	237	90	211	310	0.38	0.89	1.31
軟岩 [S]	D	1,086	2,459	3,189	3,509	2.26	2.94	3.23
	E	480	1,281	1,828	2,197	2.67	3.81	4.58
	F	68	373	568	307	5.49	8.35	4.51
	G	-	98	265	435	-	-	-

注) 表内の数値は各岩盤分類における平均値

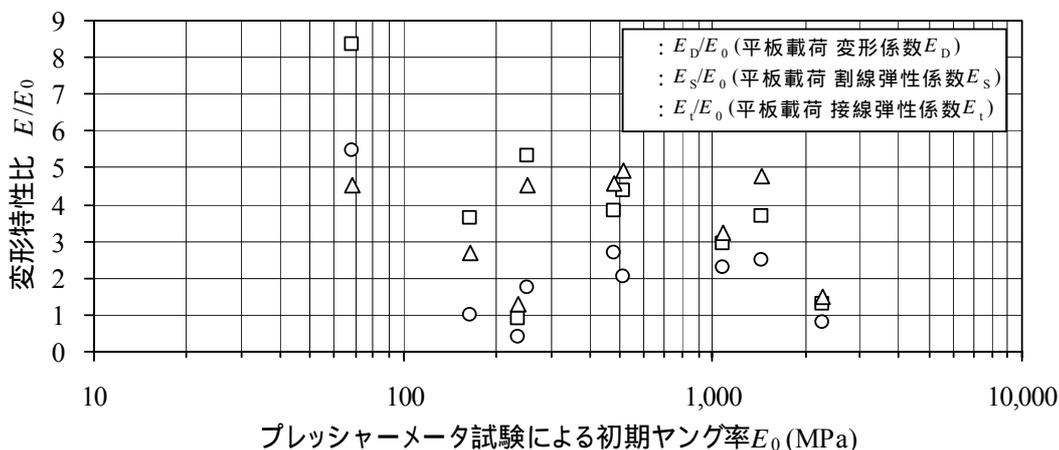


図 4.2.3-1 平板載荷試験とプレッシャーメータ試験による変形特性の比較

4.3 岩盤のせん断試験

せん断試験から得られた結果に対する分析の結果を示す。整理においては注目すべき各々の分類に属する試験結果を一括して扱い、垂直応力—せん断強さ関係の直線近似を基本とした。得られた各々のせん断強さについて、粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ 、せん断強さの標準偏差 $s_{\tau_f|\sigma}$ 、および標本数 n の値を示した。ただし、 τ_f はせん断強さ、 σ は垂直応力を各々表し、標準偏差は回帰直線からの τ_f の偏差について示した。表 4.3-1 に、本節で取り上げた標本数を示す。

表 4.3-1 岩盤のせん断試験 標本数

【硬岩系岩盤・塊状(HM)】

		不連続面の間隔(mm)						小計	
		2000	600	200	60	20			
岩石の強さ (MN/m ²)	100	A	0	8	52	123	10	1	194
		B	0	8	36	184	29	2	259
	50	C	0	5	21	120	51	0	197
	25	D	0	5	28	10	53	6	102
	10	E	0	0	15	3	14	5	37
	5	F	0	0	27	6	14	37	84
			0	26	179	446	171	51	873

【軟岩系岩盤・塊状(SM)】

		卓越粒径(mm)				小計	
		2	0.063	0.002			
岩石の強さ (MN/m ²)	10	D	0	8	0	0	8
		E	0	0	0	0	0
	5	F	0	26	8	0	34
	1	G	0	4	0	0	4
		小計	0	38	8	0	46

【硬岩系岩盤・葉状(HF)】

		不連続面の間隔(mm)						小計	
		2000	600	200	60	20			
岩石の強さ (MN/m ²)	100	A	0	0	0	28	2	0	30
		B	0	0	6	28	19	4	57
	50	C	0	4	10	36	17	4	71
	25	D	0	0	0	4	10	1	15
	10	E	0	0	0	0	0	0	0
	5	F	0	0	0	0	8	5	13
			0	4	16	96	56	14	186

【軟岩系岩盤・礫質(SR)】

		礫の含有率(%)				小計	
		50	20	10			
マトリックスの強さ (MN/m ²)	10	D	0	28	1	3	32
		E	0	12	7	15	34
	5	F	0	6	0	9	15
	1	G	0	0	0	0	0
		小計	0	46	8	27	81

【データ総数】

大分類	中分類	データ数	計
硬岩系岩盤(H)	塊状(HM)	873	1059
	葉状(HF)	186	
軟岩系岩盤(S)	塊状(SM)	46	127
	礫質(SR)	81	
	互層(SB)	0	

【軟岩系岩盤・互層(SB)】

		弱層の構成率(%)				小計
		10	30	50	80	
層の強さ区分の差	同等	0	0	0	0	0
	1段階	0	0	0	0	0
	2段階	0	0	0	0	0
	3段階	0	0	0	0	0
	小計	0	0	0	0	0

4.3.1 大分類および中分類の比較

大分類，すなわち硬岩系岩盤[H]と軟岩系岩盤[S]について，各々に属する標本点のせん断強さを図 4.3.1-1 に示す．試験個数 n は硬岩系岩盤[H]の方がより多く，また標本点の分布範囲も垂直応力 σ ，せん断応力 τ のいずれについても硬岩系岩盤の方がより広い．これらのうち垂直応力 σ の範囲については，試験が実施された範囲，すなわち人為的な要因が強く反映されており，材料の特性だけを反映したものではない．せん断応力 τ の範囲は，垂直応力の範囲との関連もあるものの，硬岩系岩盤の方がより強い岩盤を含むことを反映している．

次いで，中分類ごと，すなわち硬岩系岩盤[H]については塊状{M}および葉状{F}，軟岩系岩盤[S]については塊状{M}および礫質{R}に分けて，これらに属する標本点のせん断強さを図 4.3.1-2～4 に示す．なお，軟岩系岩盤・互層[S]{B}については標本点が得られていない．図 4.3.1-2～4 では小分類に対応する色分けも合わせて表示しているが，いずれの中分類についても概ね，より堅硬な小分類に対してより強いせん断強さが現れている．

硬岩系岩盤[H]に属する中分類である塊状{M}（図 4.3.1-2）と葉状{F}（図 4.3.1-3）を比較すると，標本数は塊状の方がより大きく，また標本点の分布範囲も垂直応力 σ ，せん断応力 τ のいずれについても塊状の方がより広い．したがって，これら 2 者の比較からは，上記の大分類間の比較と類似の結論，すなわち塊状{M}の方がより強い岩盤を含むことが見出される．

軟岩系岩盤[S]に属する中分類である塊状{M}（図 4.3.1-4 (a)）と礫質{R}（図 4.3.1-4 (b)）を比較すると，標本数は礫質{R}の方がより大きい．標本点の分布範囲は，垂直応力 σ については塊状{M}の方が，せん断応力 τ については礫質{R}の方がより広い．したがって，これら 2 者の比較からは，礫質{R}の方がより強い岩盤を含むことが見出される．

なお，岩盤のせん断試験においては，想定せん断面と傾斜荷重のなす角を θ として，直線 $\tau = \sigma \tan(90^\circ - \theta)$ より左側には試験結果を得ることが出来ない．したがって，特にせん断抵抗角 ϕ が大きい場合には，その値に載荷方法自体の特性も大いに反映されてしまい，一概に材料の特性だけが反映された値と言えないことに注意すべきである．図 4.3.1-1～4 および以下で参照する同種の図には，一般的な $\theta = 15^\circ$ の場合を想定し，直線 $\tau = \sigma \tan 75^\circ$ を測定の限界として示した．ただし， $\theta < 15^\circ$ の場合もあるので，この直線の左側に点が位置することもあり得る．

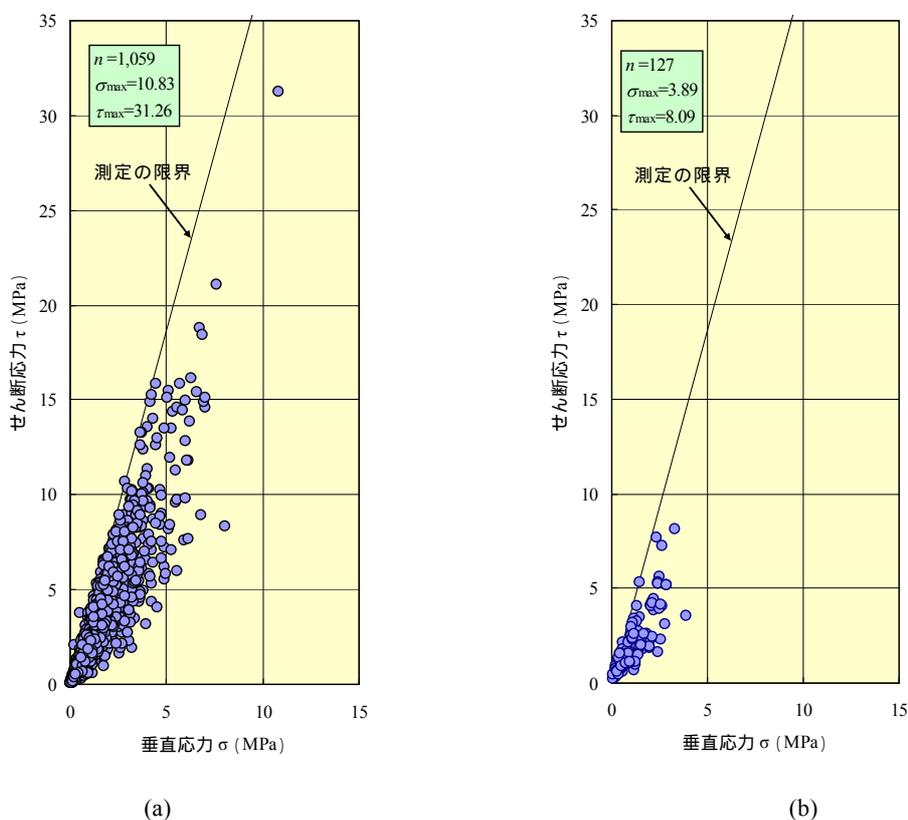


図 4.3.1-1 各大分類を一括して扱った場合のせん断抵抗：(a) 硬岩系岩盤[H]；(b) 軟岩系岩盤[S]

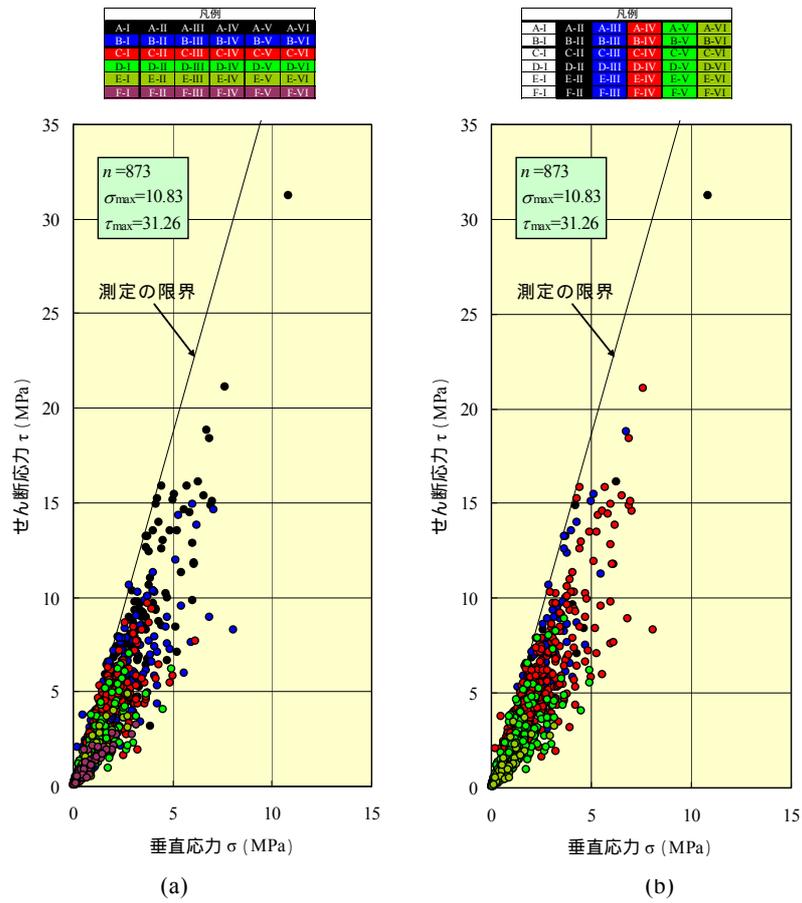


図 4.3.1-2 中分類 硬岩系岩盤・塊状[H]{M}のせん断強さ：(a) A ~ F 6 段階分類表示；(b) I ~ VI 6 段階分類表示

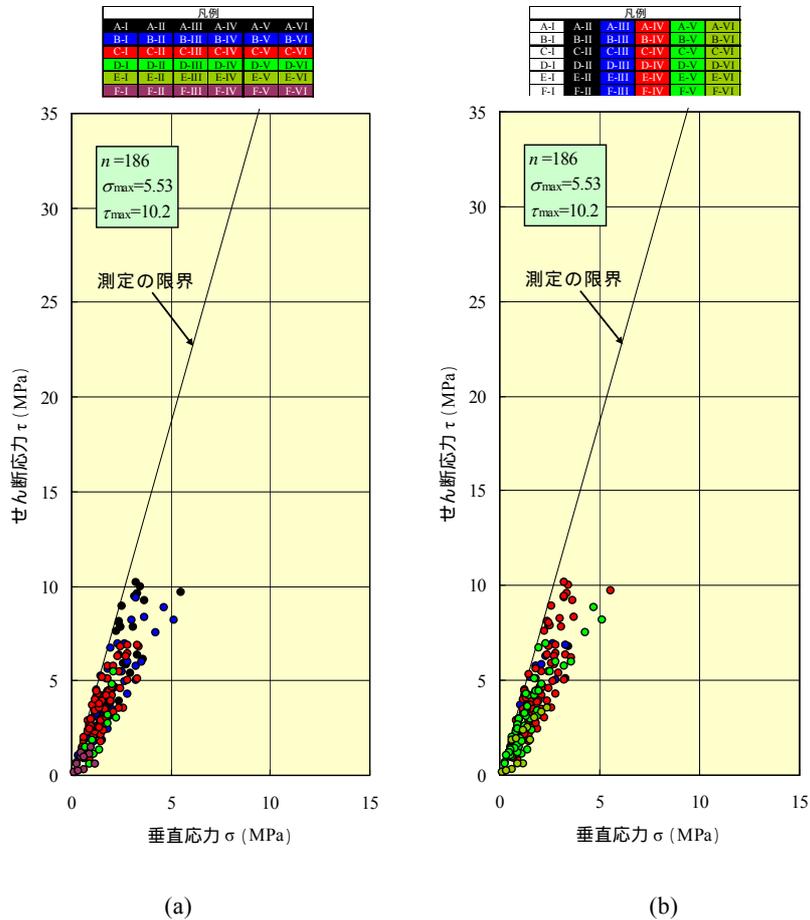
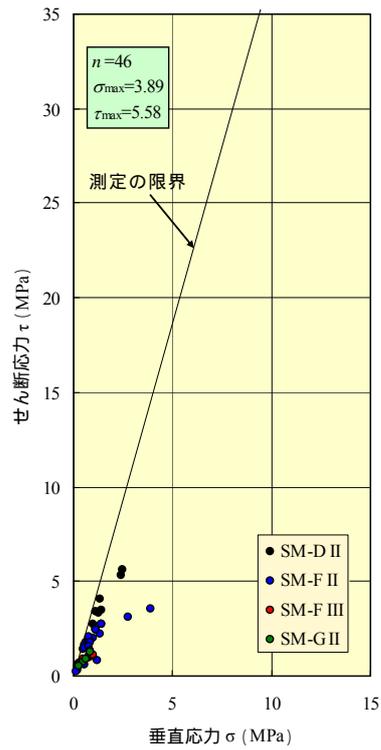
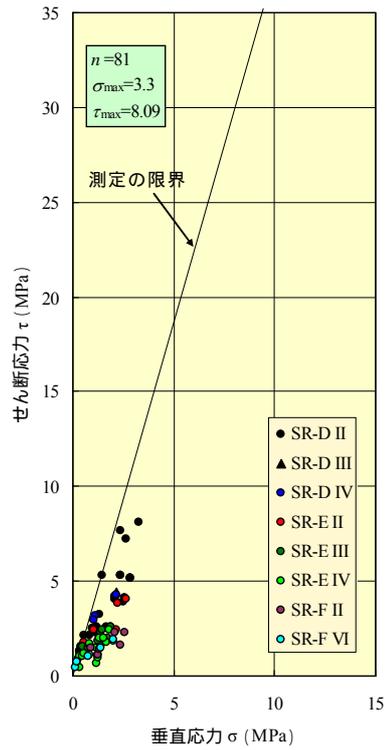


図 4.3.1-3 中分類 硬岩系岩盤・葉状[H]{F}のせん断強さ：(a) A ~ F 6 段階分類表示；(b) I ~ VI 6 段階分類表示



(a)



(b)

図 4.3.1-4 中分類ごとの軟岩系岩盤[S]のせん断強さ：(a) 塊状{M}；(b) 礫質{R}

4.3.2 硬岩系岩盤・塊状[H]{M}

中分類 硬岩系岩盤・塊状[H]{M}に属する試験結果について、せん断強さの一覧表を表 4.3.2-1 に示す。同表の各小分類の欄には4種の数値を示している。上から順に、粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ 、せん断強さの標準偏差 $s_{\tau|\sigma}$ 、および標本数 n の値を各々表す。

表 4.3.2-1 に示した粘着力 c およびせん断抵抗角 ϕ の値を各小分類について図示すると図4.3.2-1のようになる。同図に示された点は互いに入り乱れており、小分類に対応する単純な規則性は見出し難い。

図 4.3.2-2 は、すべての小分類について、垂直応力 せん断強さ関係の近似直線を示したものである。同図における色分けは、左の図から順に、岩石の強さによる分類、不連続面の間隔による分類、および最も堅硬な小分類 A I から最も脆弱な小分類 F VI へ向かう、分類表における対角線方向の分類を各々示すが、いずれの図においても分類は入り乱れており、単純な規則性は見出し難い。しかし、図 4.3.2-3 のように、直線の表示範囲を標本点の存在範囲に限定すると、いずれの図においても、分類が堅硬側であるほどせん断強さ τ_f の値が大きいという傾向が見て取れる。

表 4.3.2-1 硬岩系岩盤・塊状 [H]{M} せん断強さ一覧

c (MPa) (度)	不連続面の間隔							
	I	II	III	IV	V	VI	I~VI すべて	
	s _{τ σ} (MPa)							
n								
岩石の強さ	A	0.78 70.0 1.56 8	0.43 69.1 1.54 52	-0.07 66.2 1.82 123	-1.02 70.5 0.98 10		1	194
	B	3.91 39.8 1.23 8	2.62 52.9 1.46 36	0.76 59.9 1.47 184	0.13 67.5 1.25 29	1.03 58.0 0.00 2		259
	C	-0.93 72.7 0.88 5	0.42 67.2 0.97 21	1.37 54.0 1.32 120	0.74 50.0 0.83 51		0	197
	D	1.63 60.3 0.29 5	0.69 61.5 0.85 28	0.18 59.6 0.72 10	0.71 42.4 0.74 53	0.13 41.6 0.11 6		102
	E		0.63 52.1 0.70 15	-0.10 64.1 0.04 3	-0.04 53.7 0.32 14	0.47 45.7 0.62 5		37
	F		-0.12 62.2 0.32 27	0.14 36.5 0.05 6	0.31 44.1 0.21 14	0.17 46.2 0.26 37		84
	A~F すべて	0	26	179	446	171	51	873

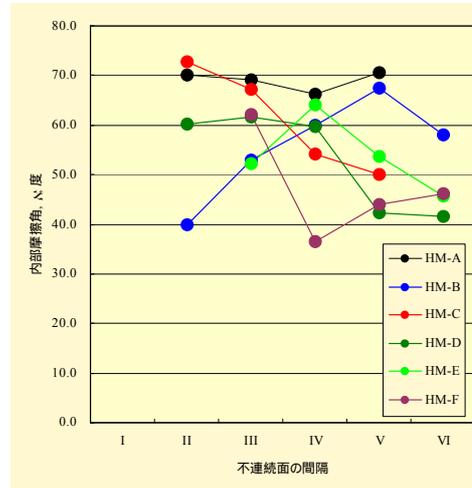
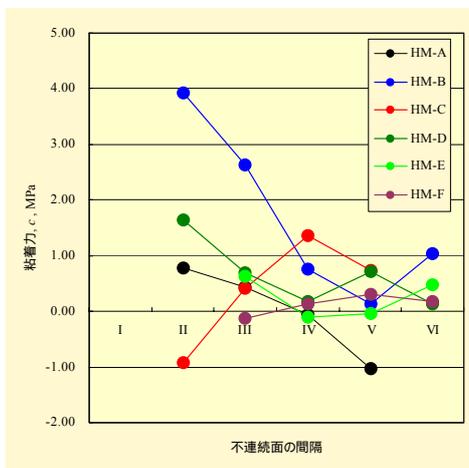


図 4.3.2-1 小分類と強度定数の関係 (HM)

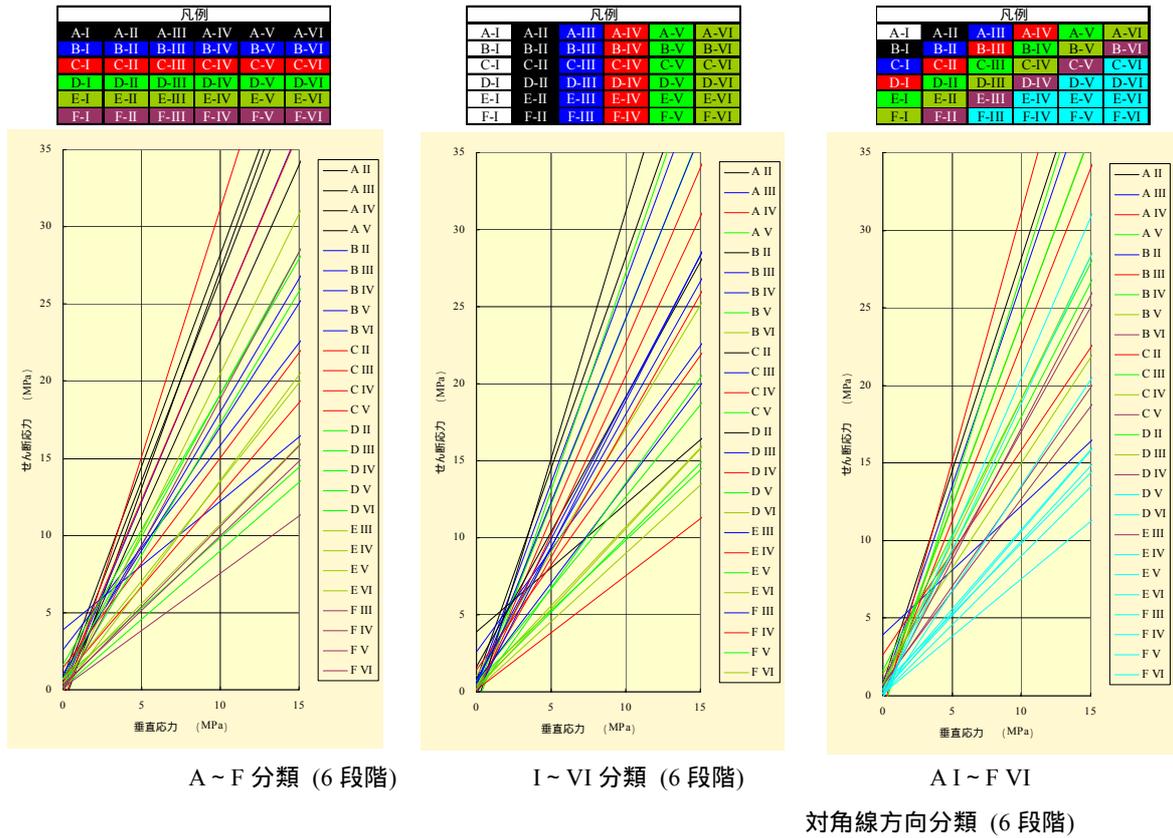


図 4.3.2-2 せん断強さの比較 ([H]{M})

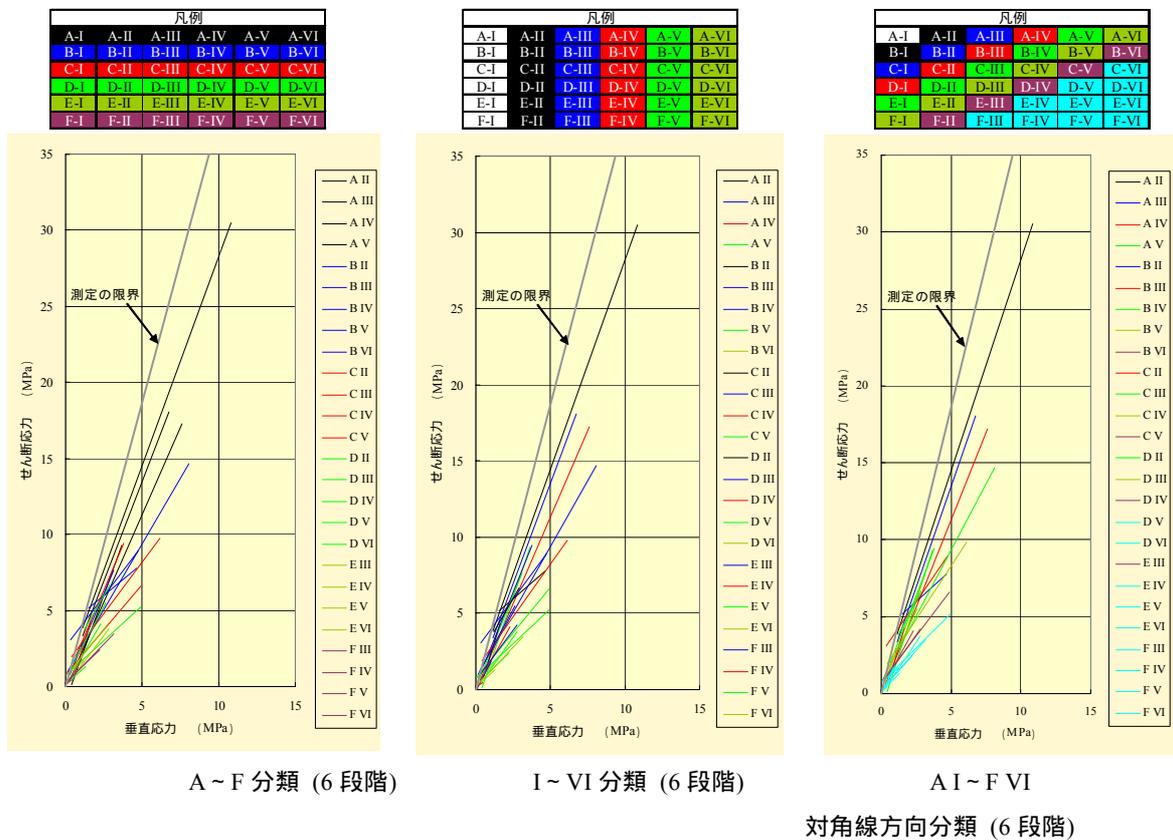


図 4.3.2-3 せん断強さの比較 ([H]{M}) : 表示範囲を限定

4.3.3 硬岩系岩盤・葉状[H]{F}

中分類 HF すなわち硬岩系岩盤・葉状に属する試験結果について、一覧表を表 4.3.3-1 に示す。

図 4.3.3-1 は、表 4.3.3-1 に示した粘着力 c およびせん断抵抗角 ϕ の値を各小分類について図示したものである。粘着力 c の値は、岩石の強さ A, B および C については、不連続面の間隔 IV から VI へ向けて明らかに増加している。また、D および F については逆に減少している。せん断抵抗角 ϕ の値は、不連続面の間隔 I ~ V については比較的大きい値を示し、VI についてのみ大きく低下している。

すべての小分類について、垂直応力 せん断強さ関係の近似直線を図 4.3.3-2 に示す。図 4.3.3-2 のうち、左側と中央、すなわち岩石の強さおよび不連続面の間隔に対する表示では、直線が互に入り乱れて明らかな傾向を見出し難い。しかし、右側すなわち分類表における対角線方向の小分類に対しては、堅硬側から脆弱側へ向けてせん断抵抗角 ϕ が次第に減少するという規則性が現れている。葉状{F}の場合には、表示領域を限定した図 4.3.3-3 よりも図 4.3.3-2 の方が傾向を読み取りやすく、したがってせん断強さ τ_f の値そのものよりも、せん断抵抗角 ϕ に特性の変化が現れていると言える。

表 4.3.3-1 硬岩系岩盤・葉状[H]{F} せん断強さ一覧

c (MPa)	不連続面の間隔								
	(度)	I	II	III	IV	V	VI	I~VI すべて	
$\sigma_{r,cr}$ (MPa)									
n									
岩石の強さ	A	0	0	0	1.24 63.8 1.60 28	1.32 59.0 0.00 2	0	30	
	B	0	0	0.63 64.7 0.62 6	0.55 63.1 1.10 28	1.14 57.2 0.97 19	1.87 5.9 0.24 4	57	
	C	0	1.74 51.2 0.83 4	1.81 57.5 0.87 10	-0.04 65.3 0.84 36	0.48 63.5 0.71 17	1.19 45.3 0.07 4	71	
	D	0	0	0	0.28 59.1 1.17 4	-0.13 61.7 0.64 10		1	15
	E	0	0	0	0	0	0	0	0
	F	0	0	0	0	0.48 42.0 0.14 8	0.07 23.8 0.01 5		13
	A~F すべて	0	4	16	96	56	14	186	

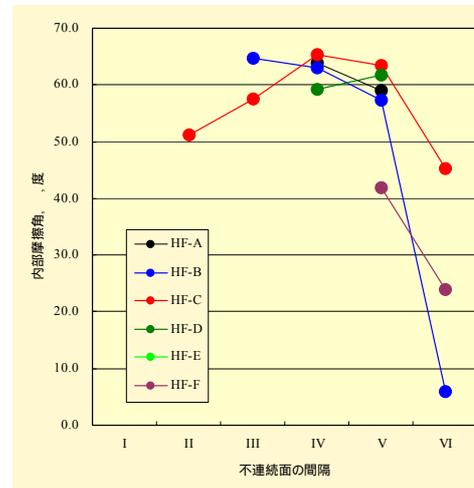
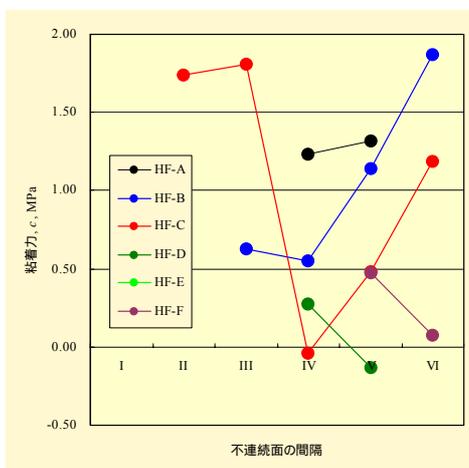


図 4.3.3-1 小分類と強度定数の関係 ([H]{F})

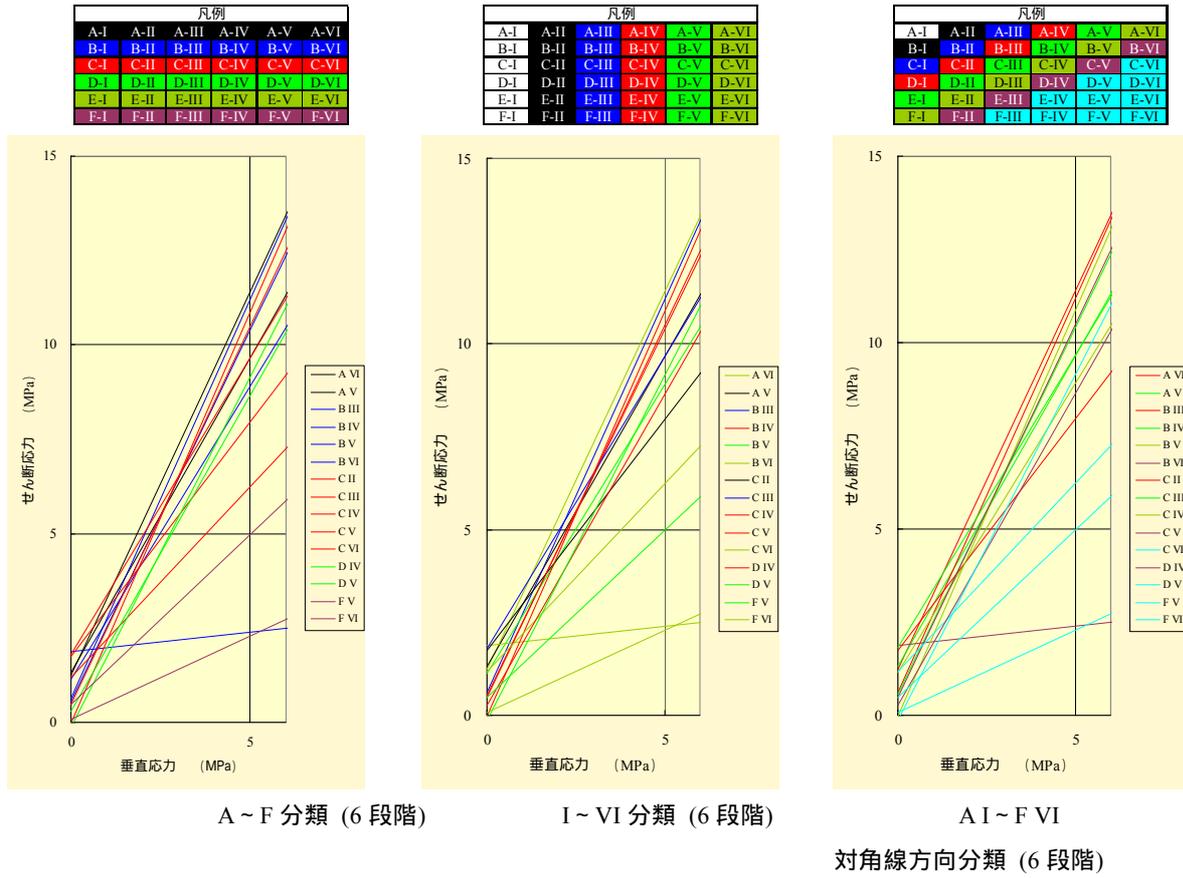


図 4.3.3-2 せん断強さの比較 ([H]{F})

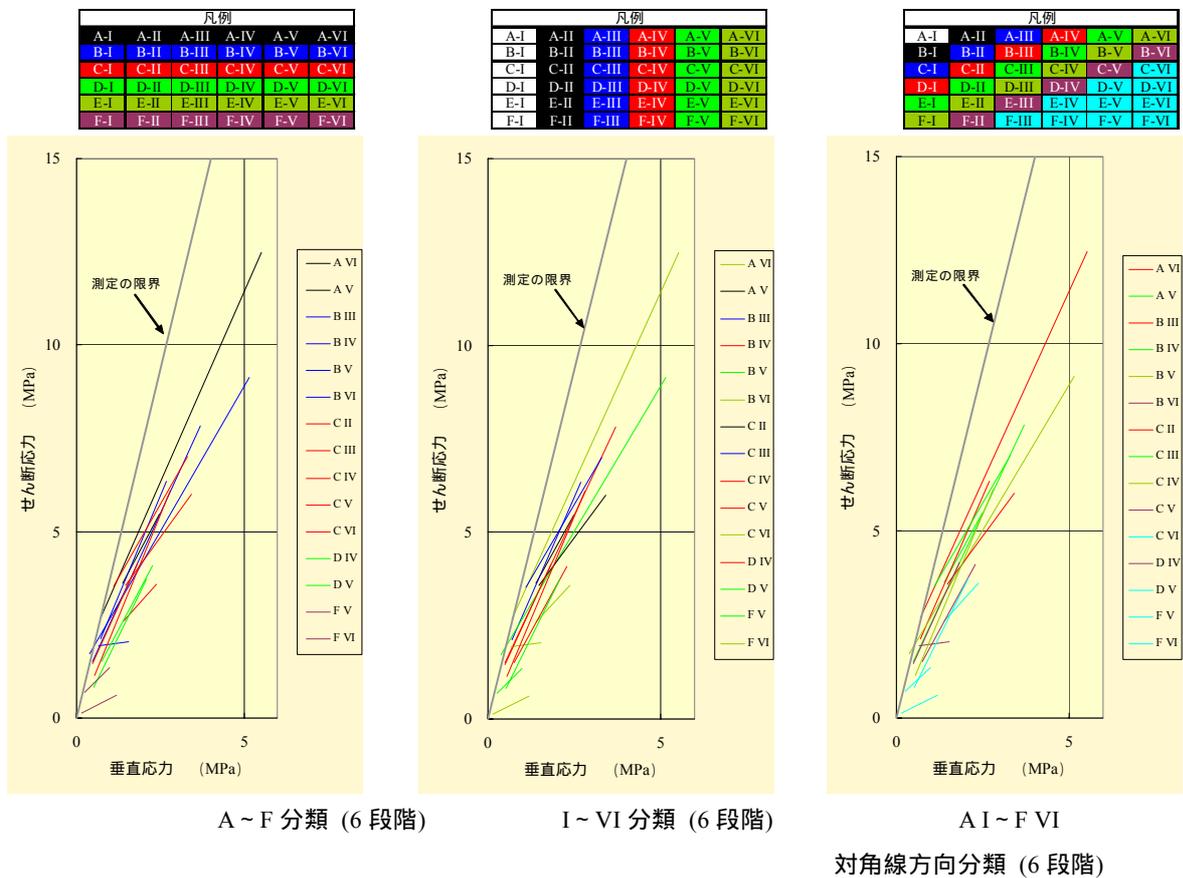


図 4.3.3-3 せん断強さの比較 ([H]{F}) : 表示範囲を限定

4.3.4 軟岩系岩盤 [S]

前項までの硬岩系岩盤と同様に、軟岩系岩盤・塊状[S]{M}および軟岩系岩盤・礫質[S]{R}について、表 4.3.4-1, 2 および図 4.3.4-1~9 に整理の結果を示す。

硬岩系岩盤の場合と比較して標本数が小さいが、粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ とも、全体的に概ね、堅硬であるほど大きいという傾向が現れている。

表 4.3.4-1 軟岩系岩盤・塊状 [S]{M} せん断強さ一覧

c (MPa)		卓越粒径				
		(度)				
S _{r/σ} (MPa)	n	I	II	III	IV	I~IV すべて
		セ シ の 巨 粒	D	0	1.03 60.8 0.42 8	0
E	0		0	0	0	0
F	0		0.76 41.6 0.52 26	0.48 32.4 0.05 8	0	34
G	0		0.15 49.9 0.04 4	0	0	4
D~G すべて	0		38	8	0	46

表 4.3.4-2 軟岩系岩盤・礫質 [S]{R} せん断強さ一覧

c (MPa)		礫の含有率				
		(度)				
S _{r/σ} (MPa)	n	I	II	III	IV	I~IV すべて
		マ ト リ ッ ク ス の 強 さ	D	0	0.65 61.5 0.92 28	1
E	0		0.81 47.6 0.44 12	1.04 37.1 0.23 7	0.59 37.4 0.40 15	34
F	0		0.78 27.5 0.33 6	0	0.52 34.7 0.08 9	15
G	0		0	0	0	0
D~G すべて	0		46	8	27	81

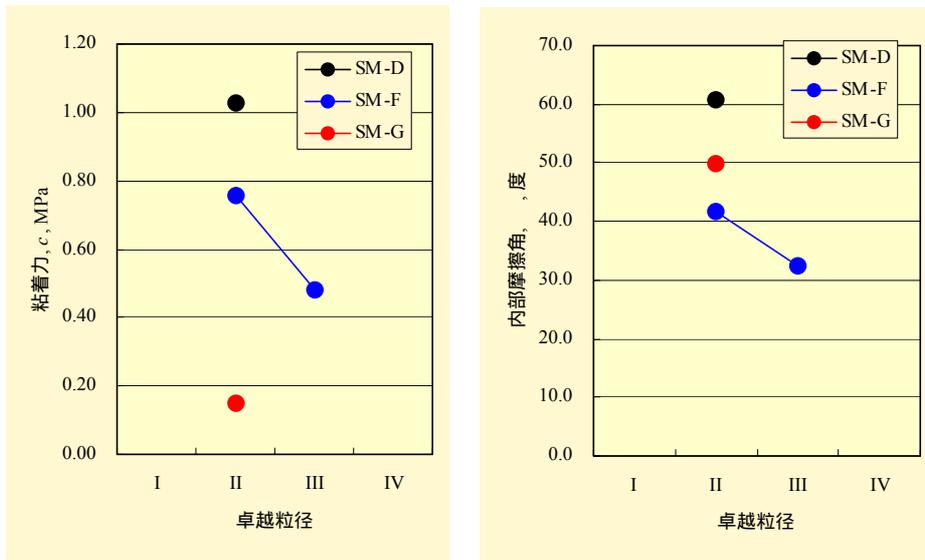
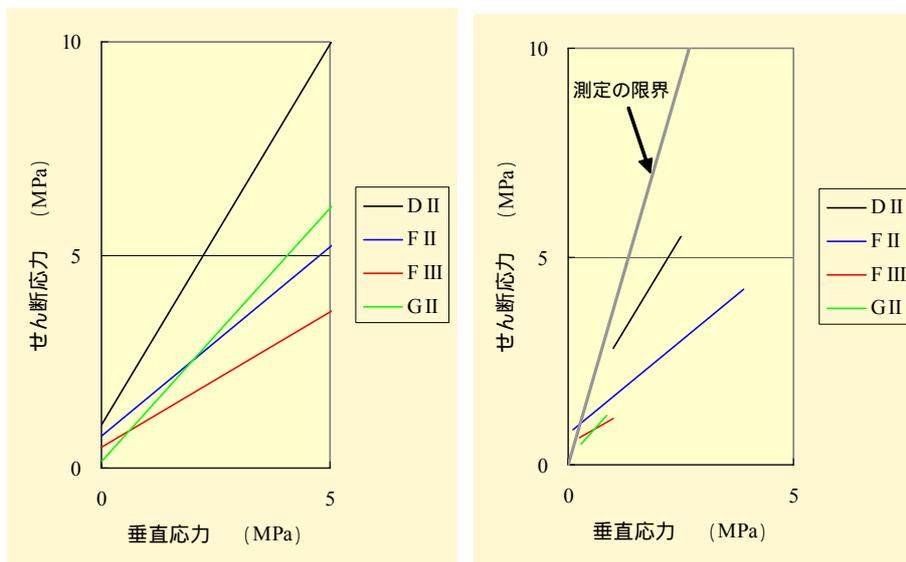


図 4.3.4-1 小分類と強度定数の関係 ([S]{M})



表示範囲を限定

図 4.3.4-2 せん断強さの比較 ([S]{M})

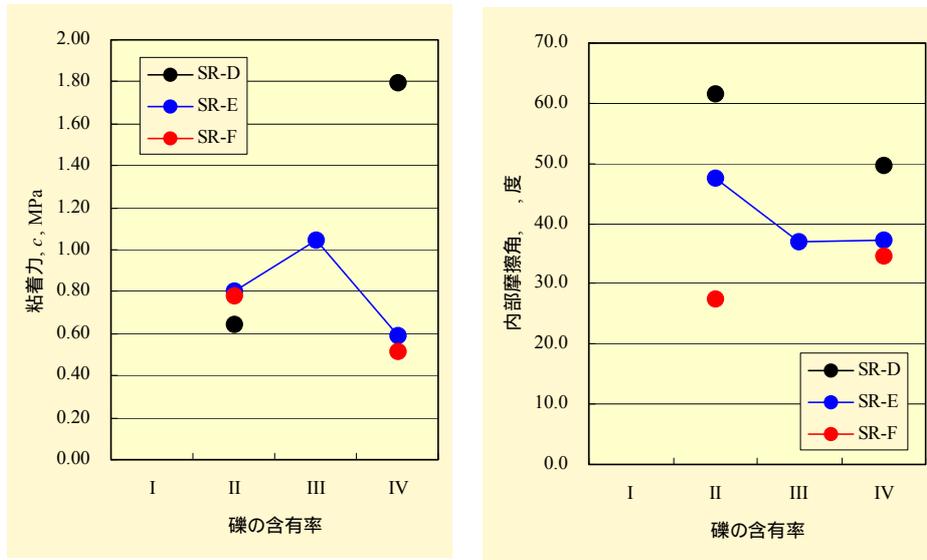
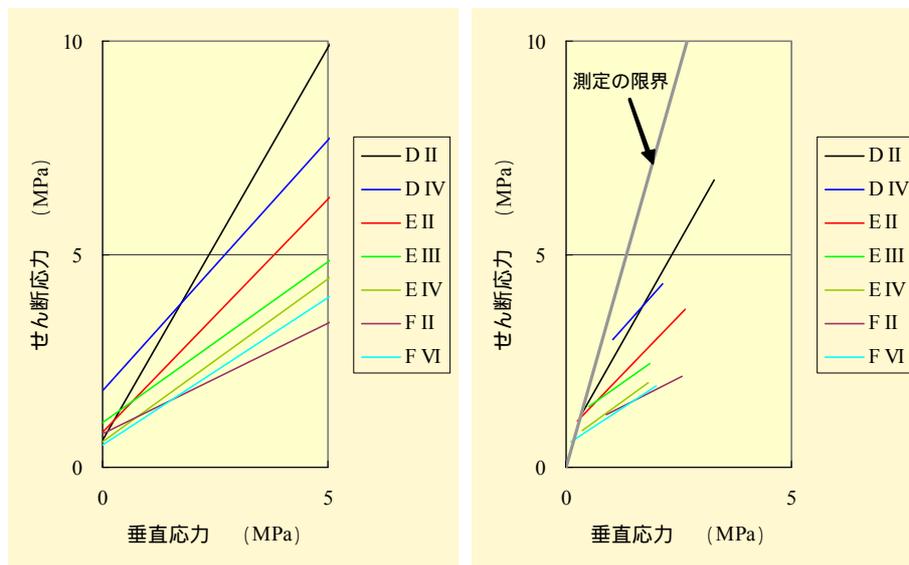


図 4.3.4-4 小分類と強度定数の関係 ([S]{R})



表示範囲を限定

図 4.3.4-5 せん断強さの比較 ([S]{R})

原位置岩盤試験結果の解釈に関する一考察と解析的検討

原位置岩盤試験, 不連続面, 有限要素法

中電技術コンサルタント(株) 正会員 ○岩田直樹
 サンコーコンサルタント(株) 正会員 佐々木猛
 サンコーコンサルタント(株) 正会員 佐々木勝司

1. はじめに

岩盤上の大型構造物の建設にあたっては、岩盤の変形・強度特性を把握するために原位置岩盤試験が実施され、試験結果より求まる物性値を設計に用いている。一般的に岩盤の変形・強度特性は、岩盤内に存在する節理群の影響が大きいことが知られていることから、ここでは岩盤の不連続面に着目した解析的な検討を行った。

岩盤不連続面の力学特性は、鉛直変形特性に関しては Goodman et al(1968)¹⁾、せん断変形特性に関しては kulhawy(1975)²⁾、その寸法効果に関しては Bandis et al(1983)³⁾の研究が広く知られている。これら岩盤不連続面の鉛直変形特性については、載荷応力、拘束応力、開口、閉合量に関して強い非線形性を示す。また、せん断変形に関しても、せん断応力、せん断変位、拘束応力に関しても同様の特性を示すことが知られている。

ただし、これらの研究は載荷過程のみを考慮しており、実際の岩盤のトンネル、斜面や基礎などの掘削工事では、載荷と除荷過程が場所により複雑に現れる。岩盤不連続面の載荷と除荷を考慮した変形特性の研究は、吉中,吉田ら(1993)⁴⁾により行われたものが代表的である。佐々木ら(2004)⁵⁾は岩盤不連続面の載荷、除荷変形特性を考慮した構成則を提案し、これらを複数の節理群に考慮した複合降伏モデルに導入した¹⁾。このモデルを平板載荷試験に適用し、節理群の組合せ、方向によりこれまでの実験結果を良く説明できることを示した^{6),8)}。また、同様のモデルを岩盤掘削問題に適用し、掘削壁面の変形挙動が計測結果を良く説明できることを示している^{7),9)}。

一方、岩盤不連続面は、その面積により剛性が変化する、いわゆる寸法効果が知られている。岩田ら¹⁰⁾は上記のモデルにより、載荷板の寸法により岩盤の見掛けの変形特性が異なることを示した。また、吉中ら¹¹⁾は、これまでの寸法効果に関する実験結果を纏めている。

本報告では、著者らがこれまでに実施した解析例を中心に原位置岩盤試験で得られたデータの解釈と設計への適用性について解析的な側面から考察する。

2. 理論の概要

複合降伏モデル(以降、MYMと呼ぶ)は、佐々木らによって提案された有限要素法による等価連続体解析の一種であり、有限要素法の構成則に弾性コンプライアンス理論を適用したものである。これは、式(1)に示すように岩盤の総ひずみ $\{\epsilon_T\}$ を母岩のひずみ $\{\epsilon_R\}$ と複数の節理群のひずみ $\{\epsilon_I\}$ の和として表現できると仮定している。

$$\{\epsilon_T\} = \sum \{\epsilon_I\} + \{\epsilon_R\} \quad (1)$$

ここで、各節理群は周期的に存在し、それらの体積が母岩に比較して無視できるものと仮定し、母岩の応力と節理群の応力は等しいものとしており、母岩と不連続面の特性を個別に考慮することができる。この不連続面の特性に、載荷・除荷過程における不連続面の弾塑性変形特性を導入した⁵⁾。

載荷過程における不連続面の垂直剛性 K_n は式(2)に示す Bandis らの提案式、せん断剛性 K_s は式(3)に示す Kulhawy の提案式を用いる。

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (2) \quad K_s = K_{si} (\sigma_n)^{nj} \left(1 - \frac{\tau \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (3)$$

ここに、 K_{ni} : 初期垂直剛性、 V_m : 不連続面の最大閉合量、 σ_n : 不連続面の垂直応力、 K_{si} : 初期せん断剛性、 τ_p : せん断強度、 τ : せん断応力、 nj : 係数、 R_f : 0.7 から 0.9 の係数である。

不連続面の垂直方向の繰返し載荷試験では、図-1 に示すように除荷過程においても非線形性を示し、残留変形を生じる。任意の拘束圧 σ_{ni} における不連続面の閉合量を V_i とし、これを弾性変形 V_{ei} と塑性変形 V_{pi} の和として式(4)のように表し、弾性変形 V_{ei} は式(5)に示す最大併合量 V_m の二次関数で定義する。除荷時の変形特性は、この弾性変形 V_{ei} を Bandis の提案式の除荷特

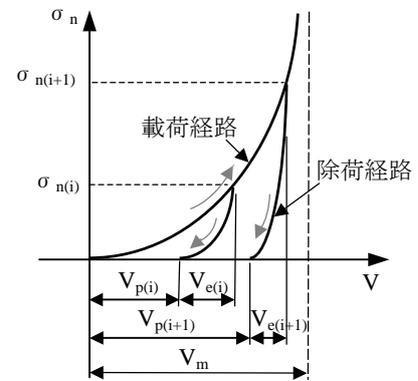


図-1 不連続面の垂直方向の変形特性

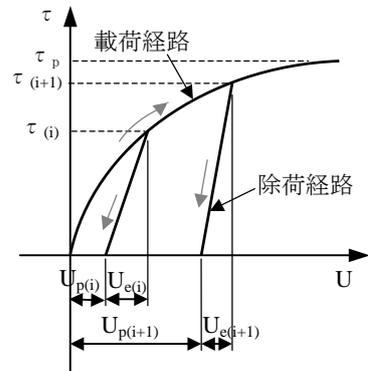


図-2 不連続面のせん断方向の変形特性

性に付加した。

$$V_i = V_{ei} + V_{pi} \quad (4) \quad V_{ei} = \left(1 - \frac{V_i}{V_m}\right)^2 V_i \quad (5)$$

不連続面のせん断方向の繰返し載荷試験においても、図-2に示すように除荷過程で残留変形が生じる。垂直方向と同様に、任意の拘束圧 τ_i における不連続面のせん断変位 U_i を、弾性変形 U_{ei} と塑性変形 U_{pi} の和として式(6)のように表し、弾性変形 U_{ei} は式(7)に示す破壊接近度 τ_i/τ_p の二次関数で定義する。除荷経路の変形特性は、単純化のために線形とした。

$$U_i = U_{ei} + U_{pi} \quad (6) \quad U_{ei} = U_i \left(1 - \frac{\tau_i \cdot R_f}{\tau_p}\right)^2 \quad (7)$$

3. 平板載荷試験の寸法効果

一般的に岩盤の変形特性の寸法効果は、図-3に示すように載荷面積が大きくなると応力の及ぶ範囲も広くなり、この範囲に含まれる不連続面の数が増加するため見掛けのヤング率が低下するものと考えられている。ここで、見掛けのヤング率とは、載荷板の沈下量より式(8)に示す半無限弾性体上で円形剛体載荷を行った場合の理論式を用いて算定する。

$$E = \frac{\pi a(1-\nu^2)}{2} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (8)$$

ここに、 a : 載荷板の半径、 ν : 岩盤のポアソン比、 Δp : 荷重増分、 $\Delta \delta$: 変位増分である。

これに対して著者らは、図-4及び図-5に示すように、載荷幅の増加に伴って見掛けのヤング率が対数関数的に増加するという一般的な寸法効果に相反する結果をMYMによる解析により示した⁹⁾。このとき見掛けのヤング率は、不連続面の間隔が小さいほど小さく、間隔が大きくなると弾性解析の値に近づく。また、上載荷重の増加に伴っても増加する傾向となる。これは、不連続面の変形特性に応力依存性を考慮したことにより、載荷による載荷板直下の拘束応力増加と自重による深さ方向の拘束応力が大きくなり、応力が及ぶ範囲内の岩盤の変形特性が大きくなるためであった。ただし、図-5に示す解析結果は、載荷幅が小さくなればなるほど見掛けのヤング率は小さくなるが、一般的には、ある載荷幅で最小となり、それよりも小さい載荷幅では弾性解析の結果に近づくと考えられることから、載荷幅の小さい領域の適用には課題が残されていた。

これまでの解析では、不連続面の変形特性を載荷幅によらず一定とした解析を行ってきたが、一般的に不連続面の変形特性には寸法効果があり、応力が作用する不連続面の面積に応じて変形特性を設定する必要があると考えられる。そこで、載荷幅の違いによって載荷時に等応力となる面積（応力球根の大きさ）が異なることに着目し、載荷幅に応じた物性値の設定を行い、これを用いた解析により平板載荷試験の寸法効果について再検討を行った。

(1) 解析内容

図-6に示す既往検討と同様の解析モデルを用いて平板載荷試験のシミュレーションを行った。

載荷幅の違いによる影響を検討するために、載荷板寸法を0.6, 1.2, 2.4, 6.0, 12.0, 30.0mとした6ケースについて検討を行った。

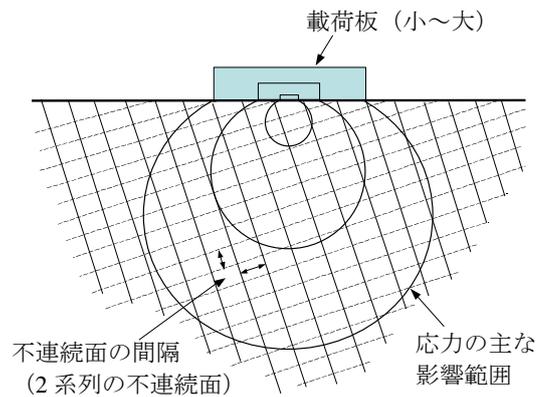


図-3 岩盤の寸法効果の概念図¹⁰⁾

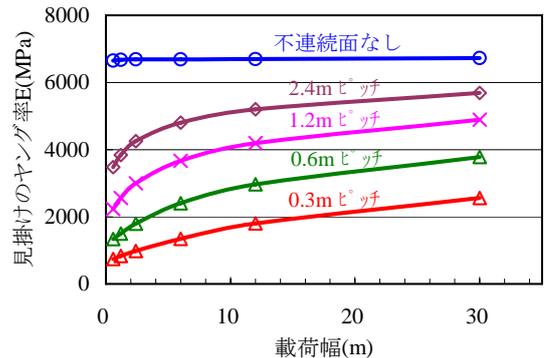


図-4 載荷幅と見掛けのヤング率の関係 (MYM 0+90°, 荷重 2MPa)¹⁰⁾

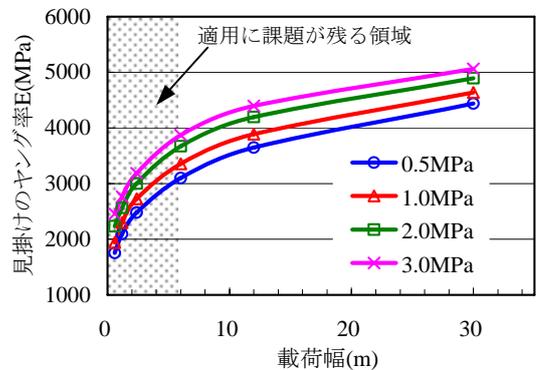


図-5 載荷幅と見掛けのヤング率の関係 (MYM 0+90°, 間隔 1.2m)¹⁰⁾

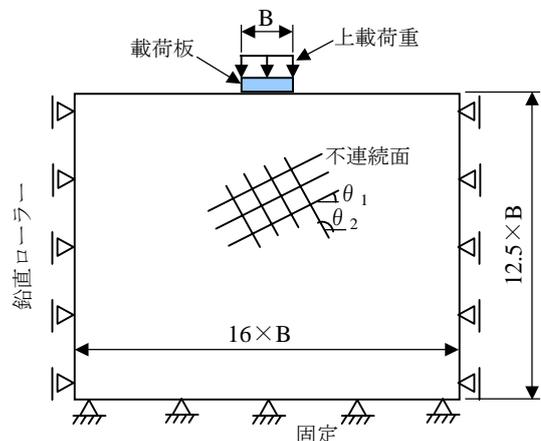


図-6 平板載荷試験の解析モデル

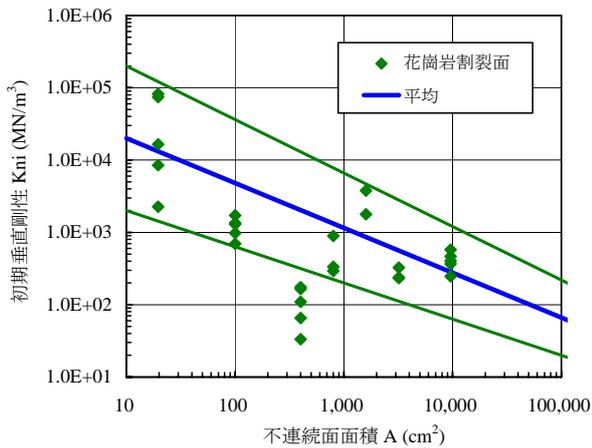


図-7 不連続面の初期垂直剛性の寸法効果

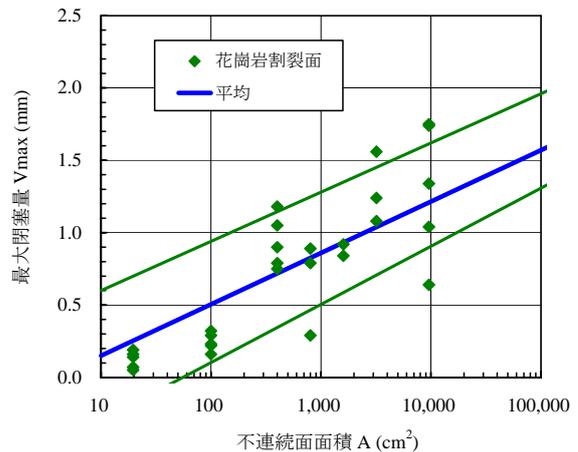


図-8 不連続面の最大閉合量の寸法効果

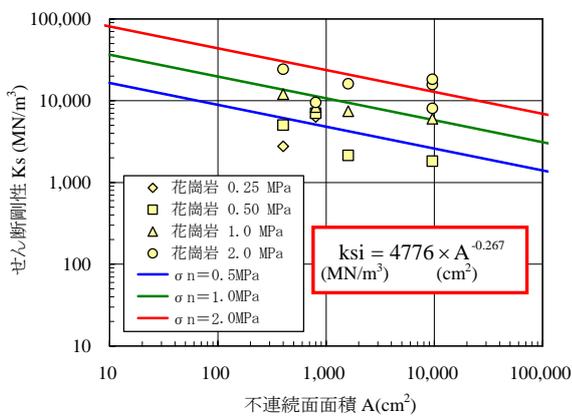


図-9 不連続面のせん断剛性の寸法効果

表-1 载荷幅毎の不連続面の物性値

载荷板幅 B(m)	0.6	1.2	2.4	6.0	12.0	30.0
不連続面面積 A(cm²)	20	80	320	2,000	8,000	50,000
初期垂直剛性 k _{ni} (MN/m³)	13,014	5,510	2,333	749	317	101
クラック閉合幅 V _m (mm)	0.257	0.471	0.684	0.967	1.181	1.463
初期せん断剛性 k _{si} (MN/m³)	2,146	1,482	1,024	628	433	266

その他の载荷板の形状や要素分割は、既往検討と同様のものを用いる。

不連続面は、変形及び強度特性が同じ直交する2組の不連続面が等間隔で分布するものとした。不連続面の垂直剛性は Bandis の提案式とし、初期垂直剛性 k_{ni} 、及びクラック閉合幅 V_m は図-7 及び図-8 に示す花崗岩割裂面の試験結果より求まる平均式を設定した。せん断剛性は Kulhawy の提案式とし、初期せん断剛性 k_{si} は図-9 に示す花崗岩割裂面の試験結果より不連続面の面積に応じて設定した。

これまでに実施した平板载荷試験のシミュレーションにおいて、载荷幅0.6mに対して20cm²程度の節理面積を考慮する実挙動を模擬できたことから、この载荷板と不連続面の面積比をもとに、载荷幅が大きくなった場合の不連続面の面積を設定した。表-1 に载荷幅毎に設定した不連続面の面積を示す。なお、不連続面間隔は、最小の载荷幅0.6mに対しても等価連続体と見なせるように0.1mとした。

解析は、自重計算を行い岩盤の初期応力状態を設定した後、上载荷重を3MPaまで0.02MPa刻みで作用させた。

(2) 解析結果

図-10 及び図-11 は不連続面の傾斜角 0+90° 及び 30+120° とした場合の载荷幅と鉛直変位の関係を示す。鉛直変位は、いずれも载荷幅の増加に伴って対数関数的に増加する傾向にあるが、傾斜

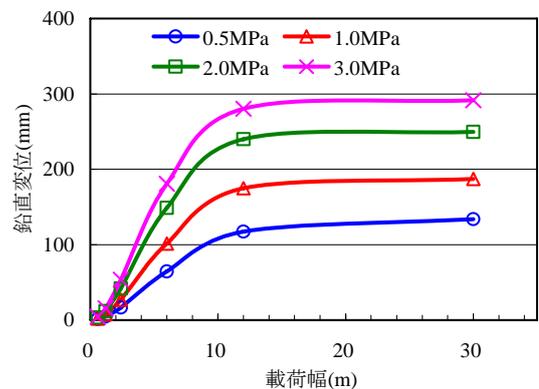


図-10 载荷幅と鉛直変位の関係 (傾斜角 0+90° 不連続面の寸法効果を考慮)

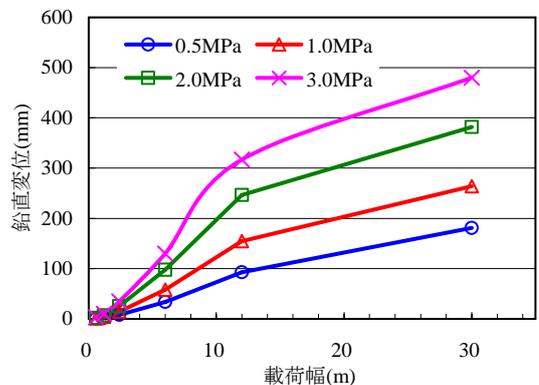


図-11 载荷幅と鉛直変位の関係 (傾斜角 30+120° 不連続面の寸法効果を考慮)

角 $0+90^\circ$ のケースでは、荷重幅が 12m を超えると鉛直変位はほぼ一定値に漸近する傾向となる。荷重幅が増加すると応力の影響範囲が深部まで広がるが、傾斜角 $0+90^\circ$ のケースでは、鉛直変位は 0° 不連続面の垂直剛性の影響が支配的であり、垂直剛性に Bandis らの提案式を導入したことによる深さ方向の剛性の増加が大きいいため、ある荷重幅を超えると鉛直変位はあまり増加しなくなる。一方、傾斜角 $30+120^\circ$ のケースでは、不連続面のせん断剛性の影響が現れ、せん断剛性は深さ方向の増加が垂直剛性ほど大きくないため、傾斜角 $0+90^\circ$ のケースと異なり 12m を超える荷重幅に対しても鉛直変位は増加する傾向となる。

この鉛直変位をもとに、式(8)により岩盤の見掛けのヤング率を算定した。図-12 及び図-13 は傾斜角 $0+90^\circ$ 及び $30+120^\circ$ とした場合の荷重幅と見掛けのヤング率の関係を示す。いずれの見掛けのヤング率も荷重幅が小さいほど大きく、荷重幅の増加とともに対数関数的に減少し、荷重幅 6~10m 程度で最小となったのちに荷重幅の増加とともに増加する。荷重幅が 10m 程度以下における荷重幅と見掛けのヤング率の関係は、荷重面積が大きくなると応力の及ぶ範囲が大きくなり、この範囲に含まれる不連続面の数が増加するため見掛けのヤング率が低下するという一般的な岩盤の変形特性の寸法効果と一致する。また、荷重幅が 10m 程度を超える場合の荷重幅と見掛けのヤング率の関係は、既往の解析結果とも一致する。これは不連続面の変形特性の寸法効果を対数関数でモデル化しているため、比較的小さい荷重幅においては、荷重幅の増加に伴って不連続面の剛性が急激に低下するため見掛けのヤング率も小さくなるが、荷重幅がある程度大きくなると不連続面の剛性の低下が緩やかになり、逆に荷重による荷重板直下の拘束応力増加と自重による深さ方向の拘束応力が大きくなる影響により、見掛けのヤング率は増加する傾向となる。

4. ブロックせん断試験のシミュレーション

ブロックせん断試験については、仲村ら¹²⁾は比較的の不連続面が少なく、岩相が低角度で分布している堆積軟岩を対象として、ブロックせん断試験の破壊は、ブロック直下近傍の引張破壊によることを試験面の観察と数値解析により示した。また、溝上ら¹³⁾は個別要素法を用いて岩盤せん断試験の数値シミュレーションを行い、不連続面の傾斜角が岩盤のせん断挙動に及ぼす影響について示した。

そこで本検討では、複合降伏モデルによりブロックせん断試験のシミュレーションを行い、不連続面の傾斜角の違いによる破壊時の挙動について検討を行った。

(1) 解析内容

図-14 に示す解析モデルを用いてブロックせん断試験の検討を行った。コンクリートブロック（以降、ブロックと呼ぶ）前面の傾斜荷重作用面の傾斜角は 15° とし、荷重はブロック上面に鉛直荷重、前面に傾斜荷重を作用させる。また、モデルの境界条件は、側方を鉛直ローラー、底面を固定とした。破壊挙動や強度の異方性の検討はブロック幅を 60cm としたモデルを用いて解析を行った。

表-2 は解析用物性値を示す。不連続面は、変形及び強度特性が同じ直交する 2 組の不連続面が分布するものとし、不連続面の傾

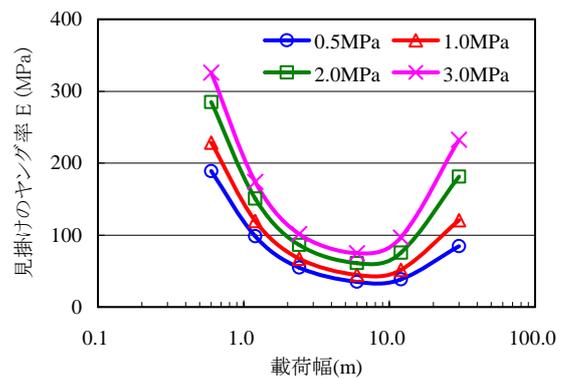


図-12 荷重幅と見掛けのヤング率の関係 (MYM $0+90^\circ$ 不連続面の寸法効果を考慮)

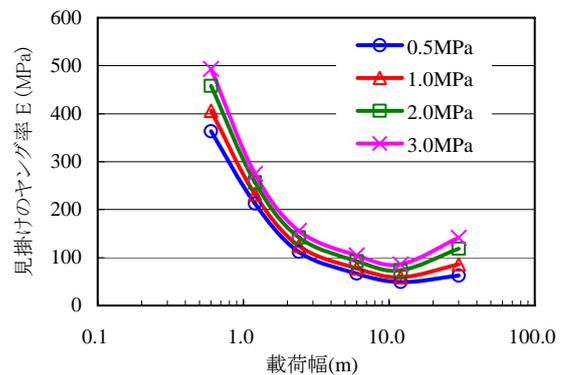


図-13 荷重幅と見掛けのヤング率の関係 (MYM $30+120^\circ$ 不連続面の寸法効果を考慮)

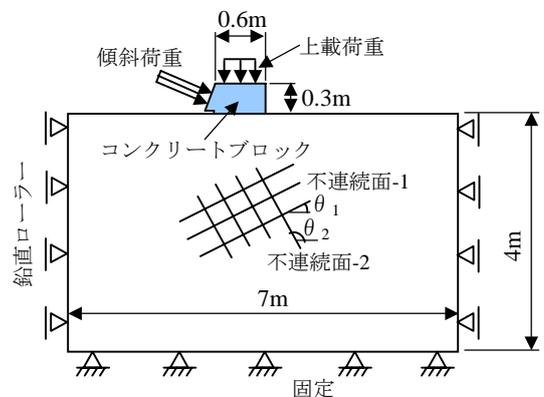


図-14 ブロックせん断試験の解析モデル

表-2 解析用物性値

母岩	単位体積重量 γ	25kN/m ³
	弾性係数 E	20GPa
	ポアソン比 ν	0.2
不連続面	初期垂直剛性 K_{ni}	10GN/m ³
	初期せん断剛性 K_{si}	1GN/m ³
	強度 ϕ, τ_o	$30^\circ, 0.1\text{MPa}$
	間隔 S	0.05m, 0.3m
	最大閉合量 V_m	0.1 mm
ブロック	単位体積重量 γ	25kN/m ³
	弾性係数 E	30GPa
	ポアソン比 ν	0.2

斜角を 15° 刻みに変えたケースを設定した。なお、不連続面の間隔は、ブロック寸法に比べて十分小さく、等価連続体と見なせるように 0.05m としたケースと、ブロック寸法よりやや小さい 0.3m としたケースについて検討を行った。

解析は、自重計算を行い岩盤の初期応力状態を設定し、初期垂直荷重を作用させた後に、傾斜荷重を作用させる。このとき初期垂直荷重は 0.1, 0.5, 1.0MPa の 3 ケースとした。

(2) 解析結果

a. ブロックせん断試験の破壊形態¹⁴⁾

図-15 は不連続面間隔を 0.05m とし、初期鉛直荷重 0.1MPa を作用させた場合の供試体に作用するせん断応力と供試体のせん断変位の関係を示す。また、図-16 はこのときのせん断変位と鉛直変位の関係を示す。ここに、供試体に作用するせん断応力は、傾斜荷重の水平分力を供試体と岩盤の接触部分の面積で割ったものとし、ブロックのせん断変位は、ブロック背面中央位置の水平変位、鉛直変位はブロック上面中央位置の鉛直変位とした。不連続面-1 が低角度の場合、せん断変位-せん断応力曲線において明確な変曲点が生じ、鉛直変位が沈下から浮上りに転ずる浮上り点は、変曲点とほぼ一致する。不連続面-1 の角度が高角度になるに従って変曲点は不明瞭となり、75+165° の組み合わせでは、浮上り点は存在するが、変曲点は見られなくなる。

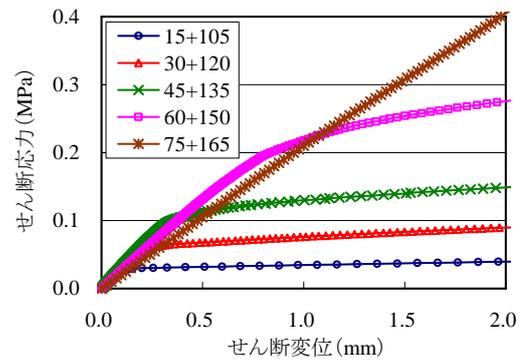


図-15 せん断変位とせん断応力の関係
(不連続面間隔 0.05m, 初期鉛直荷重 0.1MPa)

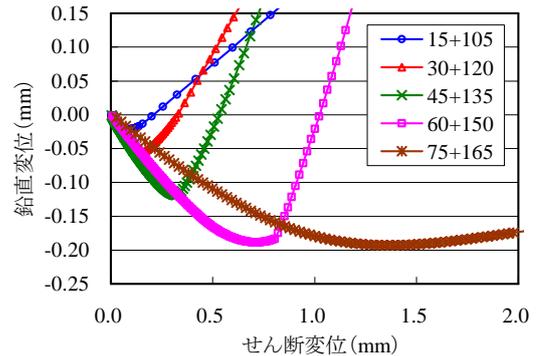
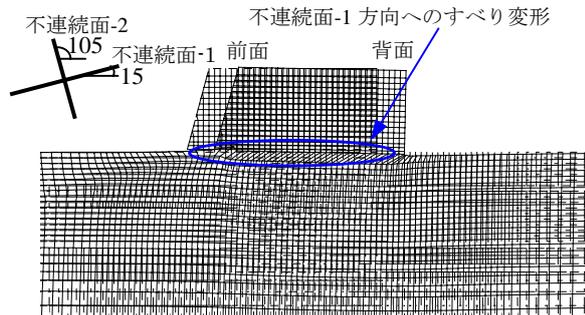
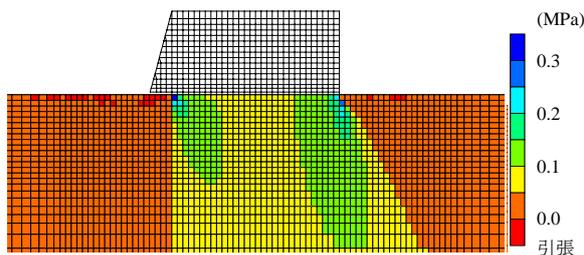


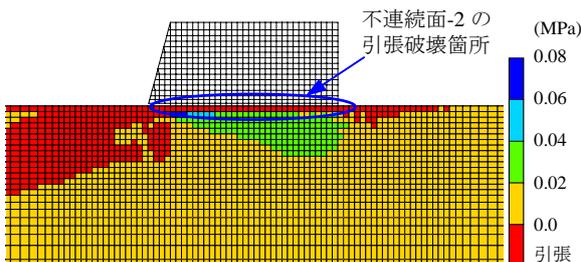
図-16 せん断変位と鉛直変位の関係
(不連続面間隔 0.05m, 初期鉛直荷重 0.1MPa)



(a) 変形図

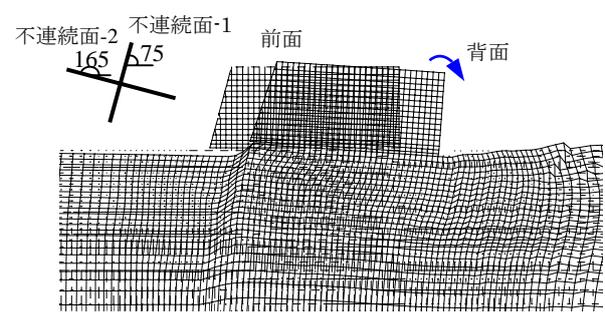


(b) 最大主応力分布図

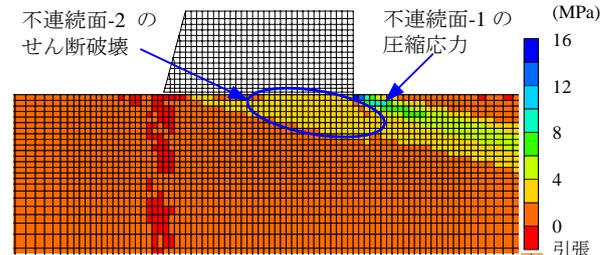


(c) 最小主応力分布図

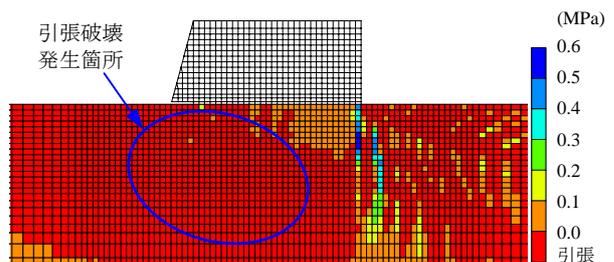
図-17 傾斜角 15+105° の破壊時挙動



(a) 変形図



(b) 最大主応力分布図



(c) 最小主応力分布図

図-18 傾斜角 75+165° の破壊時挙動

図-17 は不連続面の間隔 0.05m, 傾斜角 $15+105^\circ$, 初期垂直荷重 0.1MPa としたケースにおいて, 浮上がり後に鉛直変位がゼロとなる時 (以降, 破壊時と呼ぶ) の変形図, 最大主応力分布, 及び最小主応力 (引張応力) 分布を示す. ブロックは, 浮上がり点付近までは背面側へ倒れ込むように沈下するが, 浮上がり点を越えると, 不連続面-1 の方向に滑りあがるような変形が生じる. この変形は, 図-16に見られるように, ブロックと岩盤の接触部の不連続面-2 が引張破壊し, 不連続面-1 のせん断変形により生じる. なお, 浮上がり点は, ブロックと岩盤の接触部の不連続面-2 が全て引張破壊に達したときとほぼ一致する.

図-18 は不連続面の間隔 0.05m, 傾斜角 $75+165^\circ$, 初期垂直荷重 0.1MPa としたケースにおける破壊時の変形図, 最大主応力分布, 及び最小主応力 (引張応力) 分布を示す. 傾斜角 $15+105^\circ$ のケースと異なり, ブロックは浮上がり点を越えた後もブロック背面へ回転するような変形が生じ, この回転によってブロック天端中央の鉛直変位が見掛け上, 沈下から浮上りに転じる. 応力分布は, ブロック底面から不連続面-2 の方向への圧縮応力が卓越し, この圧縮領域内の不連続面-1 には圧縮応力が生じ, 不連続面-2 にはせん断破壊が生じる. なお, 本ケースでは, 母岩が破壊するほどの圧縮力がブロック端部に発生していないが, 母岩がせん断破壊した場合には, 急激に大きな変形を生じるものと考えられる.

図-19 及び図-20 は, 不連続面の間隔 0.3m, 初期鉛直荷重 0.1MPa とした場合のせん断応力とせん断変位の関係と, せん断変位と鉛直変位の関係を示す. 不連続面の間隔の違いによりせん断及び鉛直変位は不連続面間隔 0.05m のものより小さくなるが, その他は同様の挙動を示す.

以上のことから, 不連続面の傾斜角の違いにより破壊形態や浮上りが発生するメカニズムも異なるものと考えられる.

5. おわりに

不連続性岩盤の設計用変形・強度物性値は, 一般に基準化された方法で実施し, 設計用物性値は試験結果の平均値ないしバラツキを考慮して決められる. 例えば, 変形試験は直径 30 ないし 60cm の剛体円形載荷盤で岩盤の変形特性を求め, また, せん断試験は想定せん断面が 60×60 cm となるコンクリートブロックないし同寸法の岩盤を岩盤の一部から切り出してカバー・コンクリートで補強してせん断し, 想定せん断面で岩盤のせん断特性を求めている.

しかし, 岩盤 (不連続性) の物性は, 内在する節理などの不連続面の力学特性 (強度・剛性など) と幾何学的性質 (面の間隔・方向性・系列の数など) に大きな影響を受けることが知られている.

本文は不連続面に焦点を絞り, 面の傾きと間隔の影響, 及び平板載荷における面の大きさ・せん断面の大きさの影響“寸法効果”を解析的に検討し, 基準化された試験方法で求める岩盤物性の特性を検討した. 検討ケースは十分でないが結果の概要は下記のとおりである.

- (1) 変形特性は岩盤条件が同じでも, 載荷面の大きさ, すなわち載荷面下の応力場の大きさと, その内部に含まれる不連続面の数で変化する.
- (2) せん断特性は岩盤に作用する合力方向と不連続面の幾何学的性質, 特に角度関係で破壊メカニズムが大きく変化し, 岩盤の強度及びせん断剛性も変化する.
- (3) 以上のことから, 原位置岩盤試験結果を実構造物の設計へ適用するにあたっては, 変形・強度等のそれぞれの試験値の特性を十分考慮のうえ決定する必要がある.

なお, 岩盤不連続面のモデル化の適正化, 試験結果の分析と解析との対比, 三次元的な影響検討など今後検討すべき多くの課題がある. 特にブロックせん断試験のシミュレーションにおいては, 破壊点をどのように判断し強度設定を行うかという点が大きな課題である.

謝辞: 本稿のまとめに際し, 吉中龍之進埼玉大学名誉教授に種々のご指導を頂きました. ここに, 深堪なる謝意を表します.

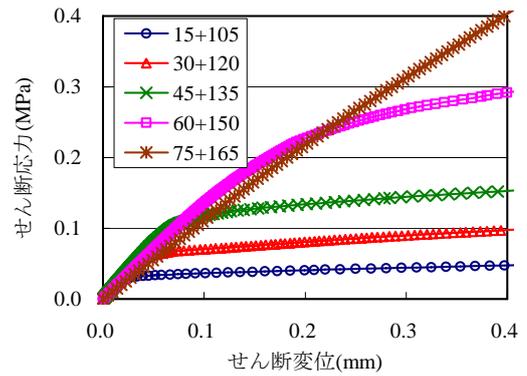


図-19 せん断変位とせん断応力の関係 (不連続面間隔 0.3m, 初期鉛直荷重 0.1MPa)

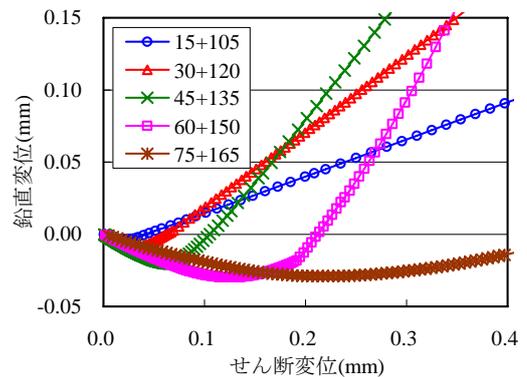


図-20 せん断変位と鉛直変位の関係 (不連続面間隔 0.3m, 初期鉛直荷重 0.1MPa)

参考文献

- 1) Goodman, R.E., Taylor, R.I. and Brekke, T. : A model for the mechanics of jointed rock, *Proc. ASCE*, Vol.94, No.SM3, pp.637-659, 1968.
- 2) Kulhawy, F.H. : Stress deformation properties of rock and discontinuities, *Engineering Geology*, Vol.9, pp.327-350,1975.
- 3) Bandis, S., Lumsden, A.C. and Barton, N.R.: Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Mech. Min. Sci.*, Vol.20, No.6, pp. 249-268, 1983.
- 4) Yoshinaka, R., Yoshida, J., Arai, H. and Arisaka, S. : Scale effect on the shear strength and deformabilities of rock joints, *Scale Effect in Rock Masses 93*, (ed) Cunha, P.D., Balkema, pp.143-149, 1993.
- 5) Takeshi Sasaki, et al. : Parameter studies of a plate-loading test of jointed rock mass by Multiple Yield Model, *ISRM Symposium & 3rd Asia Rock Mechanics Symposium*, Millpress, pp.1153-1158,2004.
- 6) 佐々木猛, 吉田淳, 佐々木勝司, 吉中龍之進, 岩田直樹 : 複合降伏モデルによる不連続性岩盤における平板荷重試験の解析的検討, 土木学会第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.189-194, 2005.
- 7) 佐々木猛, 吉田淳, 佐々木勝司, 吉中龍之進, 岩田直樹 : 節理の荷重-除荷変形特性と複合降伏モデルによる掘削問題の検討, 第 40 回地盤工学研究発表会講演論文集, pp. 1229-1230, 2005.7
- 8) 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進 : 複合降伏モデルによる多重繰返し荷重における平板荷重試験の解析的検討, 第 40 回地盤工学研究発表会講演論文集, pp. 1221-1222, 2005.
- 9) 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進 : 複合降伏モデルによる節理性岩盤の基礎掘削における解析的検討, 第 60 回土木学会年次講演会講演概要集, 2005.
- 10) 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進 : 複合降伏モデルによる平板荷重試験における変形特性の寸法効果に関する解析的検討, 土木学会第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.149 -154, 2006.
- 11) 吉中龍之進, 吉田淳, 佐々木猛, 佐々木勝司 : 寸法効果を考慮した岩盤不連続面の設計用物性値の設定, 土木学会論文集 C, Vol. 62 No.2, pp.457~470, 2006.4
- 12) 仲村治朗, 河村精一, 村中健二 : 大型構造物基礎岩盤としての互層堆積軟岩の変形・強度特性に関する考察, 土木学会論文集 C, Vol. 62 No.2, pp.414~428, 2006.4
- 13) 溝上建, 香月理, 三谷泰浩 : 個別要素法を用いた岩盤せん断試験における不連続性岩盤のせん断挙動の異方性, 電力土木, No.307, pp.9~18, 2003.9
- 14) 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進 : 複合降伏モデルによるブロックせん断試験の解析的検討, 第 63 回土木学会年次講演会講演概要集, 2008. (投稿中)