

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

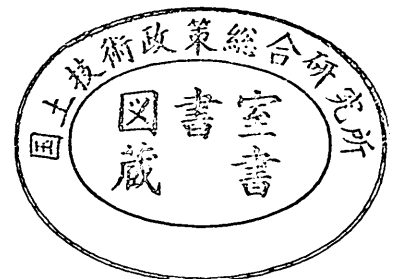
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 22

NO. 4

DEC. 1983

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I)

第22巻第4号 (Vol. 22, No. 4), 1983年12月 (Dec. 1983)

目 次 (CONTENTS)

1. 直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察
.....高橋重雄・谷本勝利・鈴木諭司..... 3
(Generation Mechanism of Impulsive Pressure by Breaking Wave on a
Vertical Wall
.....Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi TANIMOTO and Satoshi SUZUMURA)
2. 矢板壁の控え直杭に関する実験的研究
.....高橋邦夫・荘司喜博.....33
(Experimental Study on Vertical Anchor Piles of Sheet Pile Wall
.....Kunio TAKAHASHI and Yoshihiro SHOJI)
3. 大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察
.....荘司喜博.....59
(Study on Shearing Properties of Rubbles with Large Scale Triaxial
Compression Test
.....Yoshihiro SHOJI)
4. コンクリート舗装上のアスファルトかさ上げの荷重分散効果とかさ上げ厚算定法
.....八谷好高・福手 勤・佐藤勝久・林 洋介..... 121
(Structural Evaluation of Asphalt Concrete Overlays on Concrete
Pavements and Calculation Methods of Overlay Thicknesses
.....Yoshitaka HACHIYA, Tsutomu FUKUTE, Katsuhisa SATO and Yosuke HAYASHI)
5. 深層混合処理工法による格子式改良地盤の地震時挙動
.....風間基樹・稲富隆昌・今村俊博..... 141
(Observation and Analysis of Seismic Response of Grid Type Improved
Ground by Deep Mixing Method
.....Motoki KAZAMA, Takamasa INATOMI and Toshihiro IMAMURA)
6. 係留船舶の動揺計算法とその評価
.....上田 茂・白石 悟..... 181
(Method and its Evaluation for Computation of Moored Ship's Motions
.....Shigeru UEDA and Satoru SHIRAISHI)

3. 大型三軸圧縮試験による捨石材の せん断特性に関する考察

荘 司 喜 博*

要 旨

港湾構造物に特有の、捨石で構築された基礎マウンドの支持力解明に必要な捨石材の力学特性に関する基礎的知見を得ることを目的として、現地調査と室内試験を行った。現地調査では、代表的な産地4箇所の捨石材の粒度と形状を把握した。室内試験は、捨石材の粒度を反映させた、最大粒径が200mm～25.4mmの範囲にある7種類の碎石についての、大型供試体(120cm²×240cm²と30cm²×60cm²の2種)による三軸圧縮試験および篩固め試験である。得られた主な知見は以下のとおり。①捨石材は均等係数が1.3～2.5の非常に粒度の悪い材料である。②捨石材と相似粒度をもつ碎石の試験結果からせん断中の挙動とせん断強さに関する特徴を把握した。③②の特徴は、粒度の悪さに帰因するせん断中の粒子破碎に深く関係する。④sin φ₀を指標とする実用的な破壊規準および応力とひずみの関係の近似法について考察を加えた。

* 前土質部 基礎工研究室長(第五港湾建設局四日市港工事事務所長)

3. Study on Shearing Properties of Rubbles with Large Scale Triaxial Compression Test.

Yoshihiro SHON*

Synopsis

To study shearing properties of rubbles used for rubble-mound foundations peculiar to port and harbour facilities, field survey and laboratory tests were carried out. As field survey, grading and shape properties of rubbles produced in representative four quarries were investigated. Laboratory tests are triaxial compression tests with large scale specimen (30cm^D×60cm^H or 120cm^D×240cm^H) and compaction tests. Test materials are seven kinds of crushed stone which have the grading similar to rubbles and maximum grain size of 2.54cm to 20cm. Main results are as follows;

- 1 Rubbles have poor grading and uniformity coefficient is 1.3 to 2.5.
- 2 By the test results of crushed stones, the characteristics of rubbles under shearing can be estimated.
- 3 These characteristics are due to particle breakage caused by poor grading.

*ExChief of Foundations Laboratory, Soils Division (Head of Yokkaichi Port Construction Office, the Fifth District Port Construction Bureau)

目 次

要 旨	59
1. ま え が き	63
2. 捨石材の粒度と形状の現地調査	63
2.1 捨石の規格の現状	63
2.2 調査内容	64
2.3 調査結果	65
2.4 現地調査結果の考察	70
3. 砕石の力学試験	74
3.1 力学試験の概要	74
3.2 試験材料	74
3.3 三軸圧縮試験装置	77
3.4 締固め試験	80
3.5 三軸圧縮試験	86
3.6 力学試験結果の考察	95
4. ま と め	117
5. 結 論	118
6. あ と が き	119
参 考 文 献	119

1. まえがき

港湾構造物には、石材で人工的に構築したマウンド状の基礎の上に、ケーソンやコンクリートブロックを据付けて本体とした、重力式構造物が多く用いられる。このような基礎を構築する石材は捨て込んで施工されるので、捨石と呼ばれる。そして、捨石によって構築された基礎は一般に捨石基礎と称せられる。

このような捨石基礎は、通常、偏心かつ傾斜した荷重を受けるため、偏心傾斜荷重に対する支持力の検討がなされる。そして、現状におけるその支持力検討方法には一般的方法として確立されたものがなく、慣用的に行われてきた方法¹⁾にも適用限界があると考えられている。

一方、港湾構造物は次第に大水深や厳しい波浪条件などの地点に建設される動向にある。そのような地点に建設される重力式構造物においては、支持力の検討によって構造断面が決定されることが多く、支持力算定法の適否が経済的な施設建設に影響を与える大きな要因となる。そのため、従来の支持力算定法の問題点の解決が緊急かつ重要な課題として取りあげられるに至った。

このような背景により現在、港湾技術研究所土質部において捨石マウンドの端趾圧に関する研究として、大型模型実験、遠心力載荷模型実験および有限要素法による数値解析の3方向からのアプローチが行われている。また、第二港湾建設局によって、小名浜港における実大ケーソンを用いた載荷試験であるマウンドの許容支持力実験が実施されている。本研究は、このような一連の研究の一環として実施されたものである。

従来、捨石材については、岩質の面から調査がされたことはあるものの、粒状材料として取上げ、せん断特性について研究された実績はきかない。一方、他分野における粗粒材料のせん断特性に関する研究としては、ダム材料のロックフィル材に関して、豊富な実績がある。したがって、捨石材のせん断特性を考えると、ロックフィル材に関するデータを参考とすることができれば好ましい。しかし、ロックフィル材と比較した捨石材の違い、たとえば、力学特性に大きく関係する粒度や間げき比などの基本的な事項については十分な把握がなされていない。さらに、それらの違いがどの程度せん断特性に影響するのかなどという点についても、捨石材のせん断特性が把握されていないためわからない。したがって、ロックフィル材データの有効な活用の可否が判断できないというのが現状である。

本研究はこのような背景のもとで前述の各研究において実施される実験結果の解析と数値計算に必要となる、

捨石材の主としてせん断特性の把握ということを目として、当面の目標として、捨石材のせん断特性に関する基礎的知見の取得をねらったものである。そして、本研究の内容は次のようなものである。現地調査と室内試験を行った。現地調査では代表的な産地4箇所の捨石材の粒度と形状を把握した。室内試験は、現地調査によって把握した捨石材の粒度を反映させた、最大粒径が200~25.4mmの範囲における7種類の碎石を用いた三軸圧縮試験と締固め試験である。三軸圧縮試験装置は、直径30cmで高さ60cmまたは直径120cmで高さ240cmという大型供試体の試験可能なものである。以上の調査試験結果をもとに捨石材のせん断特性について考察を加えた。

2. 捨石材の粒度と形状の現地調査

2.1 捨石の規格の現状

本研究において、せん断特性把握の対象としている捨石は重力式構造物の場合のように、上部から伝達される荷重をささえる基礎として主要な部分を占める捨石であり、いわゆる基礎捨石と称するものである。したがって基礎捨石を、波浪から防御するために用いられる、一般に捨石より大きい被覆石はもちろん、本体工のケーソンなどを据付けるための均しを施工するために捨石上面に薄く敷きならして用いる目つぶしあるいは間づめ石などはここで云う捨石にふくまない。

基礎捨石については、港湾工事共通仕様書²⁾において、“使用する石は偏平細長でなく、風化凍壊のおそれがないものでなければならない”、“石の種類、比重及び重量は特記仕様書の定めるものとする”とされている(ここでいう重量はSIで考えると質量であるので以下質量と称する)。

石の種類は、比重が大きく、堅硬で耐久性に富むものが好ましいということから、花こう岩、安山岩、が指定されることが多いが、各港の事情により他の種類も使用されている。また、特に仕様書に明記されない場合も多い。

比重については、仕様書に特記されている場合は2.6以上または2.5以上としているものが多いが、特記されない場合も多い。ここでいう比重とはJIS A 5006(割くり石)による見掛比重によることとされている³⁾。この見掛比重は試験方法からみて絶対乾燥状態における比重(通称、絶対比重)であるとみることができる。

質量は、ある範囲で示した1個当りの質量で規定されている。質量範囲の規定の根拠となるような考え方については、明確に把握できなかったが、各港における、石材産地や石材需要の実情、工事サイトの自然条件などを

表-1 直轄港湾工事に用いられる基礎捨石の質量の規格

機 関	規 格
第一港湾建設局	200～500kg/個（ただし1港のみ30～200kg/個）
第二港湾建設局	最小30kg/個と最大800kg/個の範囲で各種の規格あり。 最も広い範囲の規格 50～800kg/個（その他の規格には30～200kg/個, 30～300kg/個） 最も狭い範囲の規格 100～300kg/個（100～300kg/個, 100～500kg/個などがある） 多く用いられているのは 50～200kg/個と50～800kg/個
第三港湾建設局	10～200kg/個
第四港湾建設局	5～100kg/個（ただし1港のみ50～200kg/個）
第五港湾建設局	最小5kg/個と最大500kg/個の範囲で各種の規格あり。 最も広い範囲の規格 5～200kg/個 最も狭い範囲の規格 30～60kg/個
北海道開発局	30～300kg/個
沖縄総合事務局	5～200kg/個

背景として、経験的、因襲的に定められているように思われる。質量が規定の範囲にあるかどうかの確認方法について統一的方法はないようである。また、質量規定の範囲をこえるものの許容については規定をもうけていず、現地でも適宜判断している場合が多いが、現場における個々の判断の実態はまちまちのようである。

直轄港湾工事に用いられる基礎捨石の質量についての規格を表-1に示した。これによると各局によってさまざまであることがわかる。そして、最も広い範囲の規格は5～200kg/個（質量比で40倍の範囲）、最も狭い範囲の規格は、30～60kg/個（質量比で2倍の範囲）である。また、用いられている範囲のなかの最小の質量は5kg/個、最大の質量は800kg/個である。

このように現状における捨石の規格の実態は、1個の石の質量をある範囲をもって示すという点だけが共通のはっきりした点であり、石の種類、比重については、統一した規格はないし、規格として示されていないものが多い。これは、各港において、搬入される捨石材の生産地が実際には極く限定されており、その石材の捨石材としての適否は事前に評価されているという実態に起因しているものと思われ、捨石材の材質管理に問題があるということと直結するものではないと思われる。しかしそのため、規格からは、捨石材として適当である石の種類、比重についての判断規準を明確に読みとることはできない。また、質量に関しては、規格の内容が様々であり、かつ規格と実際に用いられる石との関係について十分な把握ができていない場合が多いと思われる。

2.2 調査内容

(1) 調査地点

調査地点は表-2に示す4箇所である。これらの地点は、その所在する港湾建設局における代表的な捨石材の産地である。そして、それらの産地における代表的とみられる採石場を選定し、そこから産する捨石材の貯石場を調査場所とした。

調査対象材料はすべて碎石であり、各産地ごとに表-2中に示したとおりである。なお、調査対象材料の生産状況は2.3(2)に述べてあるので、調査対象材料を理解するうえで参照されたい。

(2) 調査項目と方法

調査項目は次のとおり。

- ①捨石材の物理・力学特性に関する既応資料の収集
- ②捨石材の製造方法・搬出方法の確認
- ③捨石材の質量分布の測定
- ④捨石材の粒子形状の測定

調査方法の詳細は次のとおりである。

- ①捨石材の物理・力学特性に関する既応資料の収集
各採石場が実施している捨石材の試験成績表の提出を求め、これにもとづき、岩石種類、比重、吸水量、圧縮強度を調べる。
- ②捨石材の製造方法・搬出方法の確認
採石場所属技術者に碎石製造法・搬出方法の説明を求め、現地でもその状況を確認する。
- ③捨石材の質量分布の測定
①風ヶ関約20m³、いわき約25m³その他約10m³の

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

表-2 調査場所および対象捨石材

捨 石 材 産 地		調 査 場 所	調 査 対 象 捨 石 材
略 称	地 名		
風ケ関	山形県東田川郡温海町大字小国字峠の山 (第一港湾建設局管内)	風ケ関港平佐浜野積場にある貯石場	捨石200~500kg/個の規格用
いわき	福島県いわき市小川町西小川堂平 (第二港湾建設局管内)	同左の採石場内の貯石場	捨石50~800kg/個の規格用捨石を選別するまえの砕石群から50kg以下と800kg以上の少ないものを選定
家島	兵庫県飾磨郡家島町男賀 (第三港湾建設局管内)	同左の採石場内の貯石場	捨石10~200kg/個の規格用。ただし、調査対象のものを水中に投入後、ガット船でつかみあげて搬出している。
門司	福岡県北九州市門司区野浦大刀浦 (第四港湾建設局管内)	同左の採石場内の貯石場	捨石5~100kgの規格用

表-3 分類に用いた捨石材産地別の質量段階

調 査 場 所	採 用 し た 質 量 段 階 (単 位 kg)										質 量 段 階 数	
	5未満	5~10	10~30	30~50	50~80	80~100	100~200	200~300	300~500	500~800		800以上
風ケ関					(100kg未満) ○	○	○	○	○	○(500kg以上)		5
いわき		(50kg未満) ○			○	○	○	○	○	○	○	8
家島	○	○	○	○	○	○	○		○(200kg以上)			8
門司	○	○	○	○	○	○	○		○(200kg以上)			8

捨石材を貯石山から3m³級のショベルローダーなどで採取し平坦地に散布する。

②散布した捨石材を産地によって表-3に示す質量段階で分類を行う。分類には、人力およびショベルローダーを併用する。

③分類した捨石材の質量を各質量段階ごとに1括して測定する。

質量の測定は、モッコに捨石材を載せ、レッカークレーンなどに懸吊したロードセル下端にモッコをかけ、捨石材およびモッコを吊り上げ、ロードセルに質量を感知させて行う。なお、質量測定に際し、その質量段階に分類された捨石材の個数も参考のため計数する。

④捨石材の粒子形状の測定

質量段階ごとに質量を計量した捨石材のうち、各質量段階の代表的捨石5個づつを選択する。それぞれの質量段階に含まれる5個づつの捨石の個別質量および個別粒子形状を計測する。粒子形状は、個別の粒子を長方体の箱に詰めたととき、もっとも箱の体積が小さくなると予想される箱の辺長で代表させ、辺の長さ順に、長辺長 a

(cm)、中間長 b (cm)、短辺長 c (cm)として表現する。なお、個別質量と個別粒子形状とは対応させて記録し、粒径加積曲線の推定に備える。

2.3 調査結果

(1) 捨石材の物理・力学特性と製造方法

既応資料による各採石場岩石の物理・力学特性を表-4に示す。同表中の表乾比重 D_s と絶乾比重 D_b はJIS A 1110によるものである。また、見掛比重はJIS A 5006によるものであり、絶乾比重≡見掛比重と考えてよい。表中に()内に示した数値は計算で求めた値を示す。

次に捨石材の製造方法の概略を各採石場ごとに示す。

①風ケ関

母岩は輝緑岩(英語圏での分類では、粗粒玄武岩)であり、選択的な風化を受け、母岩が風化してできた土砂中に数10cm~10数mの大玉として産している。

採掘は、変形ベンチカット法によって行っている。すなわち、採石場所まで運搬用道路を設け、採石場に到ると、その標高水準を維持しながら基本的には大玉の小割を兼ねた穿孔および、すかし用の穿孔を行い、奥へ追い込

見掛比重=絶乾比重

$$\left\{ \begin{aligned} D_s/D_D &= 1+Q \\ D_e &= D_D(1-Q \cdot D_D) \end{aligned} \right\}$$

表-4 既述データによる採石場岩石の物理・力学特性

略称岩種	比 重				吸水率 Q (%) (JIS A 1110) or (JIS A 5006)	一軸圧縮 強度(kgf/cm ²) (JIS A 5006) or (JIS M 0302)	試験機関	備考
	表乾比重 D _s (JIS A 1110)	絶乾比重 D _D (JIS A 1110)	見掛比重 (JIS A 5006)	計算真比重 D _e (JIS A 1110)				
風 輝 緑 岩 関	2.547	2.474	—	(2.670)	2.97	—	銚子測量事務所 試験室	比重・吸水率の試験法は JIS A 1110 による。道路用 40mm 以下砕石の内 38.1~19.1mm の粗骨材の数値。測定量約 3.5kg。2 回の試験結果の平均値。
い わ き	(2.609)	—	2.605	(2.615)	0.141	1.458	日本大学工学部 土木科実験室	比重・吸水率・一軸圧縮強度の試験法は JIS A 5006。
家 花 崗 岩	2.505	(2.490)	—	(2.528)	0.595	1.521	(財)大阪土質試験所	比重・吸水率の試験法は JIS A 1110。一軸圧縮強度は JIS M 0302。
島	(2.589)	—	2.565	(2.628)	0.940	1.326	神戸大学教育学部	「家島と小豆島の石材」より。試験法は JIS A 5006。
門 硬 質 砂 岩 司	2.745	2.735	—	(2.763)	0.366	—	(財)建材試験センター 中国試験所	比重・吸水率の試験法は JIS A 1110。試料の量は不明。
	(2.776)	—	2.755	(2.815)	0.769	1.339	山口大学工学部 資源工学科	一軸圧縮強度は JIS M 0302。比重・吸水率は JIS A 5006 に準ずる。

む形で発破している。発破後、碎石の選別場所としている下段ベンチへ、碎石をブルドーザで押し落とす。なお、碎石の内に、規格を越えるもの（500kgを越える玉）がある場合はジャイアントブレイカで小割を行う。

ブルドーザで押し落した碎石は、0.3m³級バックホーで1個づつ選別を行い、横待ちさせた6m³積ダンプトラックに積み込み、鼠ヶ関港平佐浜野積場まで運搬され仮置される。バックホーのオペレータは、200kg/個および500kg/個の基準玉を参照しながら積み込むものの多少の目外れが生ずる。この規格外の捨石材は、鼠ヶ関港から捨石運搬船に積み込む時点でチェックして残すと言う。今回の調査対象捨石材は鼠ヶ関港に仮置されたなかから選定した。捨石規格外材料の一部は、道路用碎石として一段のグリズリーを通して荒選別した後、機械ふるいで分級調整し、40mmアンダー切込碎石として道路工事に供給されている。粒径40mmを越え、20kg/個以下の材料は、割ぐり石あるいは捨石マウンド工の均し材として販売しているが、過剰気味と言っている。

②いわき

母岩の花こう岩は、約200mある切羽のなかの位置によって風化度が異なっている。節理がほとんど無い部分、数m間隔で節理のある部分、10数cmの狭い間隔で節理のある部分等風化の程度が相当に異なる。

採掘は、切羽高30～40mにおけるすかし発破で行っている。

捨石材の選別は、タイヤ型ショベルローダーでオペレータが目視によって行う。通常は、50～100kg、100～300kg、300～800kgに選別して貯石しておき、これらを粒度調整して捨石に用いている。ただし、粒度調整は捨石運搬船で行うことにし、船までの運搬は各個に選別した粒度のままダンプトラックによって行っている。

採石場の話では、かつての捨石規格は500～800kg/個であり、細粒なものが、過剰に蓄積されたことから、100～300kg/個が4～5年前まで規格として採用されていた。4年前から、50～800kg/個へ規格が変更された。

50kg/個以下の碎石は、グリズリーおよび機械ふるいで、粒径20～25cm、同10～15cm、同8～2cmに分級し、それぞれ割ぐり石として陸上建設工事用材として販売している。粒径20mm以下の土砂は、宅地造成用埋立柱材として自家消費あるいは販売している。

今回の調査対象捨石材は、実際に搬出される粒度調整されたものではなく、選別まえの状態の、各階級の混在しているなかから、目視で50kg以下と800kg以上の含有率が小さいところを選定した。

③家島

…男鹿島全体が花こう岩から成り、島内に数箇所ある採石場によって風化度が異なっている。調査対象とした採石場の母岩の風化はやや少なく、節理は鉛直および水平にはほぼ直行し、切羽は鉛直に近い。

採掘は、切羽高約30mで、すかし発破によって行うが、節理が鉛直であるため、オーバーハングは生じず、比較的大塊が生ずる。生じた大塊は、小割発破で捨石規格内に納められる。

捨石材の選別は、グリズリーを用い3段階に行う。グリズリー上産物が10kg以上となるように錮棧が調整しており、この中に混入する200kg以上の岩塊は目視によって、ショベルで取除く。グリズリー上産物はタイヤ式ショベルローダーで貯石場まで運び、貯えておき、必要に応じて貯石場からショベルローダーで運搬し、海中に投入する。これをガット船が、オレンジピール型グラブで拾い上げて積荷し、捨石材として運搬していく。

ガット船へ積載する際のグラブのオペレータの技量により、荷積された捨石の粒度組成に相当の変動があると言う。この採石場は、四方海にかこまれた島にあるため需要地までの石材の運搬は船に限られる。したがって、捨石材規格外品を一般の陸上建設資材として販売することが採算上難点となるため、島周辺に埋立処分される。このことから、水際線が順次拡大するため、荷役用栈橋を作ることが、採算上問題となると言う。この結果、捨石材を海中に投入して拾う作業を継続しているが、これにより水洗いされた捨石材として全国的に著名となり家島材の特徴となっている。

④門司

母岩の硬質砂岩は、切羽によって産状も風化度も異なっている。調査対象地は、かなり塊状である。

採掘は、大発破によっている。塊状岩体である上に大発破を行うため、最大20m³程度の岩塊も生ずる。これらは、小割発破、重錘落下等によって小割している。

選別は、グリズリーで2段に分けている。搬出はショベルローダーを用いて、貯石場から積出用栈橋まで運搬後、捨石運搬船に直接投入する方法をとる。

調査地点の岩石は、かなり堅硬であり、砕岩しても土砂は生じず、小粒径のものは雑石として消費され、ほとんど無駄の出ないということであった。また、かつては、現在の5～100kg/個という規格よりも広い範囲の規格であり、その方が製造が容易であるという話があった。

(2) 捨石材の質量分布

捨石材の質量分布の調査結果をもとにして、質量段階と質量加積百分率との関係をもとめ図示すると図-1のよ

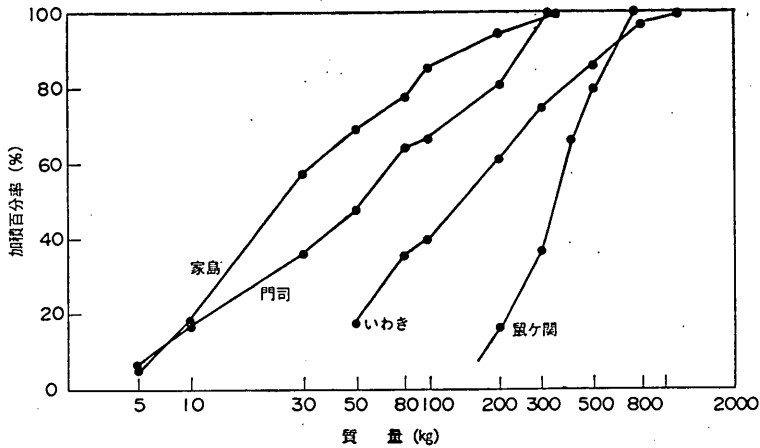


図-1 捨石材の質量加積百分率

うになった。これを見ると、いづれの捨石材も、細粒部分を除くと、図中でほぼ直線に近い関係を示している。

また、調査対象とした各捨石材の気中密度を調べた結果を表-5に示しておく。この調査では体積測定精度が

表-5 捨石材の気中密度

調査場所	密度(t/m ³)	測定体積
鼠ヶ関	1.47	ダンプ積載容量測定
いわき	1.42	積置体積測定
門司	1.51	ショベル積込量測定

悪い場合、調査結果の判断にあたって、この点に留意されたい。

(3) 捨石材の粒子形状

各産地の捨石材の粒子形状測定結果を寸法比率座標(p~q)に図化し、Zinggの分類³⁾にあてはめたものが、図-2~図-5である。ここに、粒子形状のうち、長辺長をa(cm)、中間長をb(cm)、短辺長をc(cm)で示すとすると、寸法比qはb/aであり、寸法比pはc/bである。図-2~図-5の各図には、測定したすべての捨石材粒子についてプロットし、さらに階級ごとの平均値と全平均値についてもあわせてプロットした。

なお、図-2に示す鼠ヶ関の捨石材を例にとってみると、粒子群の平均寸法がp=c/b=0.79、q=b/a=0.74であるからa=1とした場合b=0.74、c=0.59の関係にある。このようにして他の産地について、a=1としたときのb、cをもとめて表-6に示した。以上の結果から、いづれの産地の捨石材も各個の粒子については多少のば

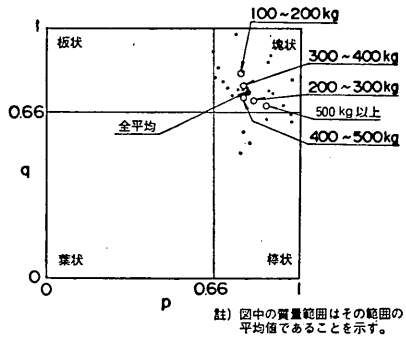


図-2 捨石材の粒子形状 (鼠ヶ関産)

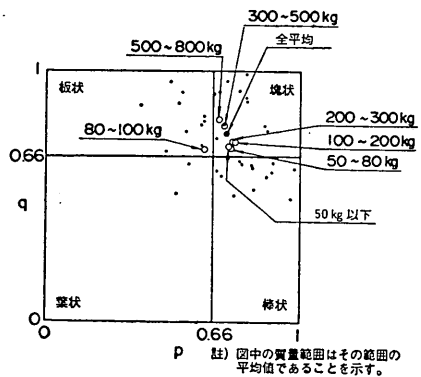


図-3 捨石材の粒子形状 (いわき産)

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

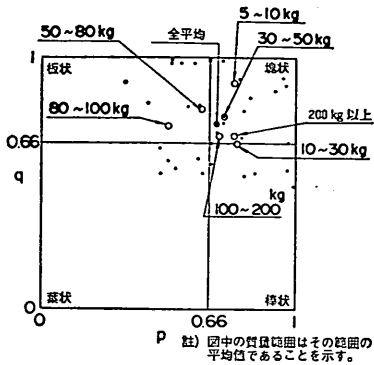


図-4 捨石材の粒子形状 (家島産)

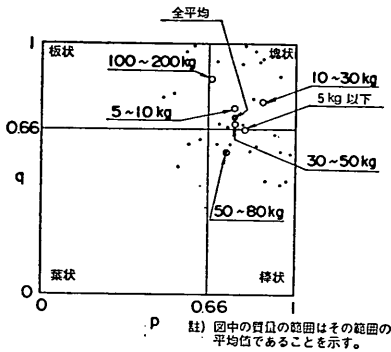


図-5 捨石材の粒子形状 (門司産)

表-6 捨石材の平均的粒子形状

調査場所	寸法比		寸法		
	p	q	a	b	c
鼠ヶ関	0.79	0.74	1	0.74	0.59
いわき	0.71	0.75	1	0.75	0.53
家島	0.69	0.75	1	0.75	0.52
門司	0.77	0.71	1	0.71	0.55

らつきがあるが、平均的にみれば、ほぼ塊状であるといえよう。

(4) 粒径加積曲線の推定

各産地の捨石材の質量段階と加積百分率の関係は、図-1に示すとおりであった。捨石材を質量段階ごとに区分し、各区分ごとに計量するのは、捨石材のように巨大な

粒径の場合には各個の粒子の寸法を測定して分類するより、はるかに能率的で誤差も少ない。したがって、このたびの調査では、質量区分ごとに質量加積百分率を求める方式を採用したのである。そして、このようにして求めた質量加積曲線は、捨石規格を質量範囲で規定する現行方式と対応した理解しやすいものといえよう。

しかしながら、土質工学では、粒子の比重の大小に関係しない形式の粒径加積曲線を基本にした、粒度組成の表現形式がとられており、土質工学に関する資料のほとんどは、粒径に基づいて整理されている。そこで、今回調査した捨石材も粒径加積曲線として表現してみることにする。

質量加積曲線を粒径加積曲線に転換するのに、次のような手法を採用した。粒子形状の測定調査によって得られた粒子ごとの粒子形状と質量の測定結果をもとに粒子の中間長と質量との相関図を、図-6～図-9のように両対数座標に描く。これらの図を見ると粒子の中間長の対数とその粒子の質量の対数は、かなり良い相関をもつことが分る。これにより最小二乗法を用いて回帰曲線式を求

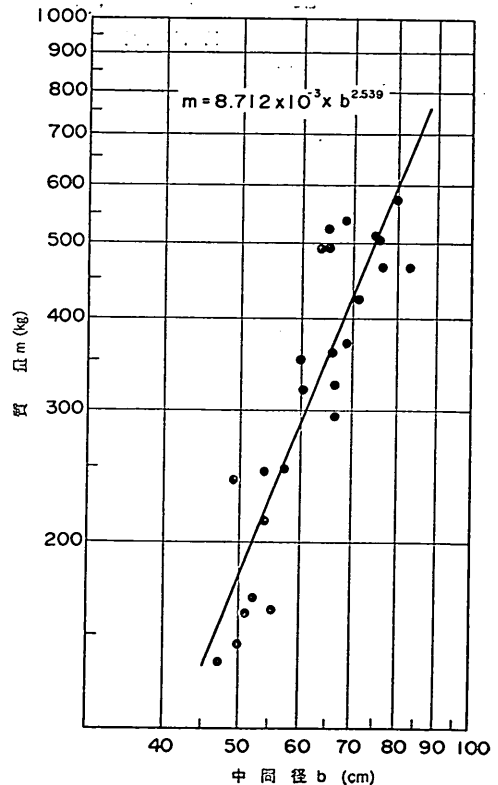


図-6 粒子の中間径と質量の関係 (鼠ヶ関産)

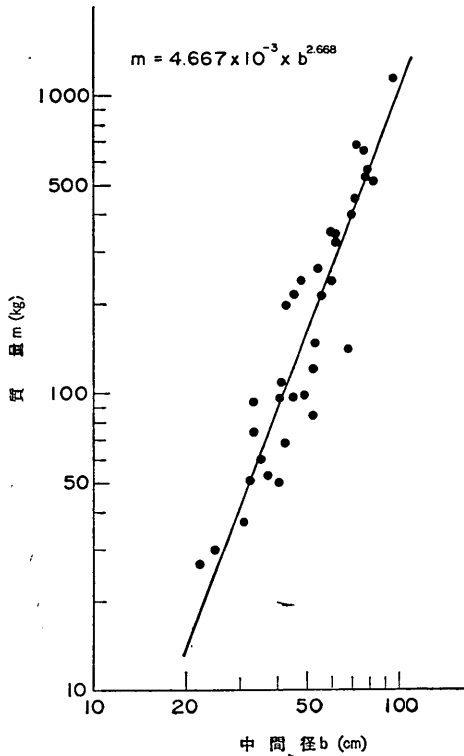


図-7 粒子の中間径と質量の関係（いわき産）

めると、中間長 b と質量 m (kg) の間には、係数を A, B とし、次式を得る。

$$m = A \times b^B \quad (1)$$

ここで、中間長を選んで質量との関係を求めたのは、粒度試験でふるいを通る粒径が中間長で規制される粒子径であると考えられることに基づいている。なお、図-6～図-9および表-7には、中間長を中間径として表している。中間長と中間径は、ふるいを用いて現実には異なるが、ここでは近似すると考え、中間長と中間径を等しいと置いた。

(1)式を用い、質量区分における粒径を求めると、表-7に示すようになる。区分した質量に対応する粒径がこのようにして求められたわけであるから、質量区分で決まっている加積百分率がそのまま、粒径区分に対応する加積通過率と等しいと考えてよい。

各産地の捨石材の推定に基づく粒径加積曲線を図示すると、図-10のようになる。粒径の軸をかなり拡大して描いているので、直観的には粒度配合がよさそうに見えるが、各産地の捨石材の均等係数をそれぞれ求めると表-8のようになり、均等係数 U_G は、1.3～2.5とかなり小さいものである。

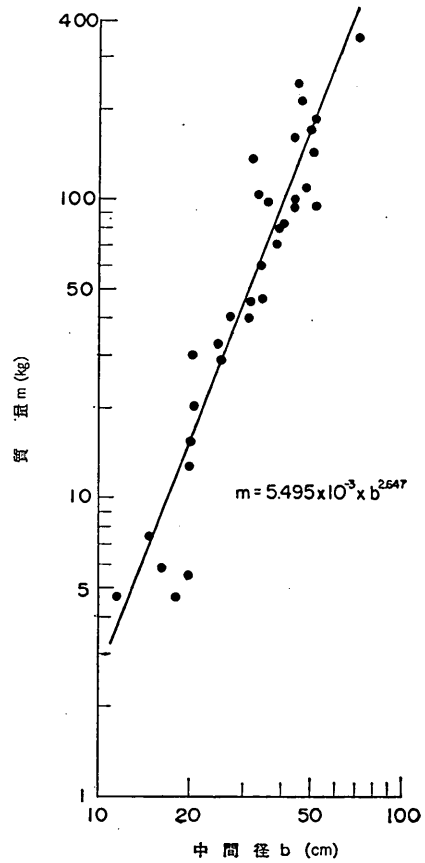


図-8 粒子の中間径と質量の関係（家島産）

このように推定した粒径加積曲線に基づいて、最大粒径を 200mm とした各産地の捨石材の相似粒度を求めると、図-11に示すようになる。同図によると、鼠ヶ関産捨石材を除き、かなりよく似た粒度組成である。

2.4 現地調査結果の考察

(1) 捨石材の物理・力学特性の評価

今回調査した各産地の捨石材は少なくとも JIS A 5006「割ぐり石」に規定される「硬石（圧縮強さ 500 kgf/cm² 以上、吸水率 5%未満、見掛比重約 2.7～2.5）」に相当するものである。鼠ヶ関産が若干比重が小さく、吸水率が高いものの、総じて良い石材とみなすことができよう。

ただ今回の調査にあたって、現地採石場における石の材質評価の試験方法がまちまちであった点が気がかった。

まず、岩質を評価するうえで相当の位置を占める比重について、港湾用捨石材の場合 JIS A 5006 による見掛

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

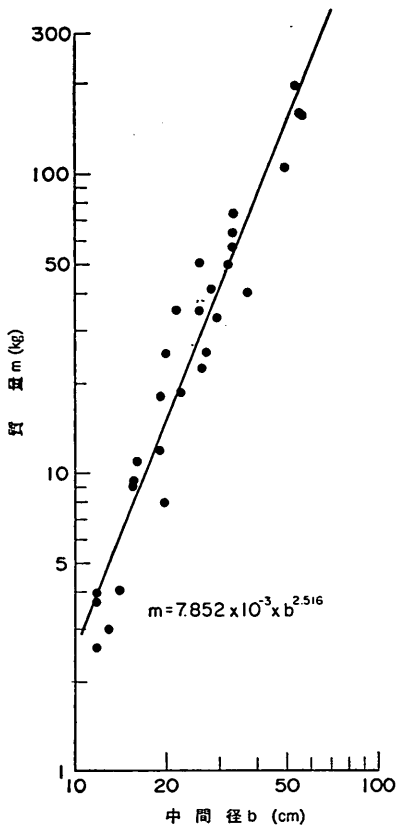


図-9 粒子の中間径と質量の関係(門司産)

比重を試験することになっている⁶⁾という認識が現地において欠けていたようである。具体的に表-4をみるとJIS A 1110「粗骨材の比重及び吸水率試験」による表乾比重 D_s と絶乾比重 D_D をもとめている例とJIS A 5006による見掛比重をもとめている例が混在している。JIS A 5006 と JIS A 1110 の試料の処理方法(試料を乾燥させる方法と湿潤状態にする方法)は同等とみなしうる。異なっているのは JIS A 5006 の試料は 10cm×10cm×20cm の直方体を 3 本作成し、その平均値で評価するのに対し、JIS A 1110 では粗骨材を対象としているため粒状体の集合について計量するという規定(最大寸法 25mm 以上の骨材については約 5 kg の粗骨材の集合)になっている点である。捨石材を試験する場合、実際の捨石より小さな石材で約 5 kg で計量する方法、実際の捨石材で、適切な量について計量する方法、圧縮試験などの力学試験用供試体を利用して計量する方法などが考えられる。

いづれにせよ、現状の規定を前提とするならば JIS A 5006 による試験の実施を徹底することが必要であり、その場合、試験方法と対で見掛比重と称する習慣をつける必要がある。なお、真比重に対比すれば、絶乾比重も表乾比重も広い意味で見掛比重であることから、JIS A 5006 の見掛比重を用いることに不要な誤解をまねくケースがあると思われる。そのため、試料の規準を捨石材独自に定めて JIS A 1110 によって試験し、岩質と深い関係をもつと考えられる絶乾比重という、状態のはつき

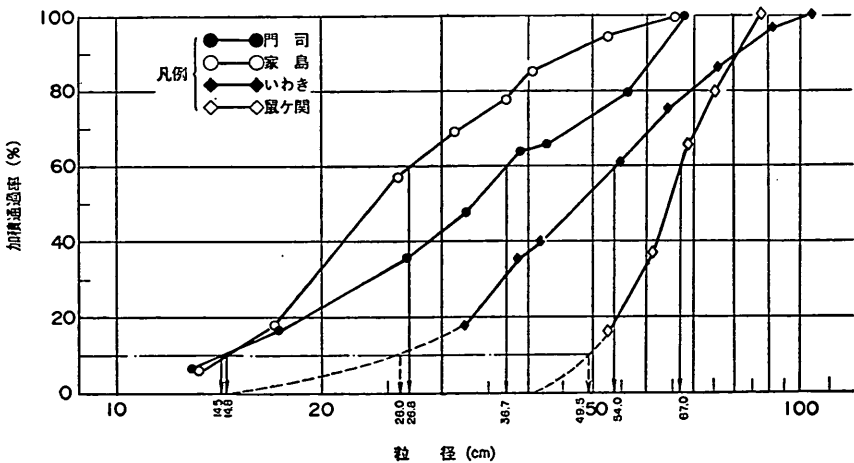


図-10 捨石材の推定粒径加積曲線

表-7 質量 m と中間径 b

質 量 $m(\text{kg})$	門 司 産		家 島 産		い わ き 産		鼠 ケ 関 産	
	中間径 $b(\text{cm})$	加積通過率 (%)	中間径 $b(\text{cm})$	加積通過率 (%)	中間径 $b(\text{cm})$	加積通過率 (%)	中間径 $b(\text{cm})$	加積通過率 (%)
5	13.0	5.9	13.1	5.4				
10	17.1	16.8	17.0	18.1				
30	26.5	35.9	25.8	57.6				
50	32.5	47.6	31.3	69.3	32.4	17.6		
80	39.2	64.4	37.4	77.8	38.6	35.3		
100	42.8	66.3	40.6	85.7	42.0	39.8		
200	56.4	80.9	52.9	94.7	57.4	60.9	52.2	15.9
300					63.4	74.8	61.3	36.9
400							68.6	65.9
500					76.8	85.9	74.9	80.1
800					91.6	96.9		
320*	68.0	100						
360*			66.0	100				
760*							88.4	100
1,150*					104.9	100		

註) *印は各産地の捨石材の最大質量

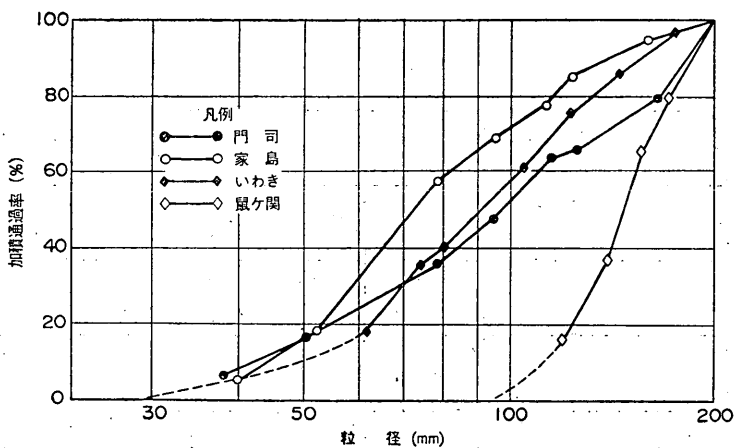


図-11 粒径200mmを最大粒径とした各産地捨石材の相似粒度

りした比重名を用いることも検討に値するものと考え
る。

次に吸水率についても、JIS A 5006 と JIS A 1110
の方法によっている2種類の系列がある。また、一軸圧

縮強度についても JIS A 5006 によっているものと JIS
M 0302「岩石の圧縮強さ試験方法」によっているもの
がある。これらについても、方法を統一し、周知をはか
ることがのぞまれる。

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

表-8 捨石材の均等係数 U_c

調査場所	60%粒径 D_{60} (cm)	10%粒径 D_{10} (cm)	均等係数 U_c
鼠ヶ関	67.0	49.5	1.35
いわき	54.0	26.0	2.08
家島	26.8	14.8	1.81
門司	36.7	14.5	2.53

参考のために言及するが、3.で記述されるとおり、本研究のため砕石母岩の物理力学的特性を把握するための比重と吸水率の試験を行った。その際は、JIS M 0302 および JIS M 0303「岩石の引張強さ試験方法」にしたがって行う圧縮試験と圧裂試験の供試体を試料として、JIS A 1110 によって絶乾比重、表乾比重、吸水率をもとめた。

(2) 捨石材の粒度組成

最大粒径が70~100cmの範囲で異なるものの、どの産地の捨石材も粒径分布が悪く、均等係数 U_c は1.3~2.5程度である。特に鼠ヶ関産の均等係数は約1.3であり、他の産地のものより一段と粒度が悪い。

直轄港湾工事に用いる基礎捨石の質量規格は表-1に示すように多様であることはすでに言及した。それらを大胆にグルーピングすると次のようになるものと思われる。すなわち、第三・四港湾建設局、北海道開発局および沖縄総合事務局にみられるように比較的小さな質量のものを許容した広い範囲の規格のグループ、第二港湾建設局で多用されている、小さな質量のものを除外した、最大質量の非常に大きい、広い範囲の規格(50~800

kg/個)、および第一港湾建設局にみられる比較的大きい質量で極端に狭い範囲の規格——という3つの大きな典型に分けることができる。このうち、前2者は、最大質量はちがうが、質量分布(粒径分布)は比較的近いものと現地調査の結果から推測できる。したがって、均等係数でみると約1.3のグループと約2前後のグループに大別できることになる。

ここで捨石材の粒度と他の粗粒材料のそれとを比較してみる。ロックフィルダム等の粗粒材料の場合⁷⁾、最大粒径は30~100cm程度と捨石材と同程度であるが、均等係数は5~50のものも多く、なかでも均等係数が10前後の材料が多用されている。したがって、捨石材に比較すればずっと粒度配合がよいといえる。また、道路の路盤材として用いられる砕石である、粒度調整砕石やクラッシュランの場合は、最大粒径約4cmであり、捨石材よりはるかに小さい。粒度分布は、代表として図-12に粒径の最も大きい粒度調整砕石 M-40 とクラッシュラン C-40 を示したが、ロックフィル材料ほどではないが、捨石材に比較すれば、ずっと粒度配合がよいことがわかる。

このように他の粗粒材料と比較して、粒度が非常に悪いこと、および最大粒径が大きいことが捨石材の粒状材料としての特徴であることが確認された。

(3) 捨石の質量規格と実生産材

図-10の粒径加積曲線、ひいては図-1に示す質量加積曲線は、各捨石材産地における代表的な砕石場の貯石場に蓄えられていた捨石材のうちから、さらに代表的・平均的組成をもつものと目視によって判断して選定した捨石材のものである。そして、現地の貯石場には、選定した捨石材より粒径の大きなものをふくむ貯石部分、ある

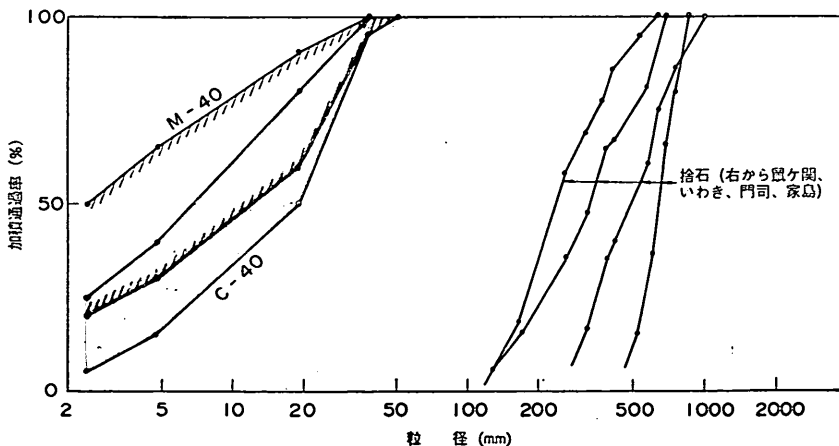


図-12 捨石材と他の粒状材料との粒度比較

いはより細粒の捨石材を多く含む貯石部分が混在しているのが肉眼で判別できた。このように1箇所の採石山でも粒度組成に差が生ずるのであるから隣接した採石山で岩盤の節理、亀裂の入り方、風化の度が異なる場合は、今回の粒度組成と異なったものが生産されうることは当然考えられる。したがって、今回の試験対象捨石材が代表的な、捨石材であることはまちがいないが、実生産材はより広い範囲にばらつきをもっているものと考えなければならない。

次に今回の調査で得られた質量加積曲線(図-1)と捨石の質量規格とを比較してみる。

鼠ヶ関産は200~500kg/個の規格用であるが、500kgをこえるもの約20%、200kg未満のものが約16%存在した。

いわき産はいづれ選別をうけて50~800kg/個の規格用となるものであるが、この状態では、800kgをこえるものが約3%、50kg未満が約18%となっている。

家島産は10~200kg/個の規格用であるが、200kgをこえるもの約5%、10kg未満のものが約18%となっている。

門司産は規格5~100kg/個の規格用であるが、100kgをこえるもの約35%、5kg未満は約5%となっている。

なお、いわき産は、試験対象捨石材をさらに選別して搬出し、500~800kg/個の規格用とすること、家島産は、1度海中に投入したのち、これをグラフでつかんで船積みし搬出するというので、規格外の含有率が低下する傾向にある。また、一般的に、規格外のものについての許容範囲の規定がない場合でも適宜、規格外捨石の混入を規制しているということから現地捨石が今回の調査結果程には規格外の混入率が高くないことが考えられる。しかし、今回調査の規格外の混入率の高さと、現地の規格外捨石の規制の実態を考慮すると、なお相当の規格外捨石の混入があると考えてよいと思われる。

このように質量規格外のものを多く含むこと、すなわち、広い範囲の粒径分布となっていることは、規格を満たすか否かの観点からみれば好ましいものとはいえない。しかし、これは捨石材に本来求められる機能からみて良いかどうかという別の観点からも考えるべきものであり、それについては、4.において若干言及される。

3. 砕石の力学試験

3.1 力学試験の概要

今回実施した力学試験は締固め試験と三軸圧縮試験である。試験用砕石は、岩種が硬質砂岩と花こう岩の2群

に大別され、最大粒径が200mmから25.4mmの範囲にある7種類の砕石である。三軸圧縮試験に先立ち、各砕石の締固め特性の把握、三軸圧縮試験の供試体の初期間げきの設定、および締固めによる粒子破碎の把握などのために締固め試験を行った。

三軸圧縮試験は、直径120cm、高さ240cmおよび直径30cm、高さ60cmの2種類の大型円柱供試体について、圧密排水試験を行った。供試体は初期間げき比(0.54~0.85の範囲)と拘束圧(0.5kgf/cm²~14kgf/cm²の範囲で設定)を変えた36本である。試料は3供試体を除いて飽和状態のものである。圧縮試験後1部の供試体については、粒子破碎状況を調べるためフルイ試験を行った。

なお、力学試験のまえに、試験用砕石の形状、比重、吸水率、安息角などの測定、および砕石母岩の比重、吸水率、一軸圧縮強度、圧裂強度、弾性波速度測定などの試験を行って材料の特性を把握した。

3.2 試験材料

(1) 砕石の種類

試験に用いた砕石の種類は表-9に示す7種類である。各砕石の粒度組成を表-10に、粒径加積曲線を図-13に示す。

母岩の種類から試験用砕石は、栃木県塩谷郡塩谷町佐貫前河原産の硬質砂岩と福島県いわき市小川町西小川堂平産の花こう岩の2つのグループに分かれる。各グループは同一採石場において入手したものである。

粒度組成の特徴からみると、砕石Ⅰと砕石Ⅱは均等係数が1をすこし越える程度のほぼ相似な粒度組成をもったグループで、現地捨石材の粒度と比較すると鼠ヶ関の相似粒度に近いことが、図-14によってわかる(図-14は砕石Ⅰ-Iまたは砕石Ⅲ-IIの粒径加積曲線に、他の試験用砕石と現地捨石材の粒径加積曲線を50%粒径付近で一致するように重ねたものである)。

砕石Ⅲ-Iと砕石Ⅲ-IIは相似粒度をもっており、均等係数2.8で試験用砕石のなかではよい粒度である。そして現地調査した、いわき、家島、および門司産の捨石材の相似粒度に近い粒度をもつものと考えよいことがわかる。

砕石Ⅳは、粒度の悪い砕石Ⅰおよび砕石Ⅱと比較的粒度の良い砕石Ⅲの中間的な粒度にある。

(2) 砕石母岩の物理力学特性

砕石母岩の物理力学特性についての試験結果は表-11に示すとおりであった。試験内容は表-12にまとめて示してある。砕石Ⅱ母岩と砕石Ⅲ・Ⅳ母岩は同一採石場のものであるが、砕石Ⅱの約1年後に砕石Ⅲと砕石Ⅳを入手したため、それと対応して入手し、試験を行ったもの

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

表-9 試験碎石の一覧

呼 称	母 岩	粒径の範囲 (mm)	均等係数	摘 要
碎石 I	碎石 I-I	硬質砂岩	4.76-25.4	道路舗装用 5号碎石 碎石 I-I には ほぼ相似粒度 現地調査した鼠ヶ関にはほぼ相似な 粒度
	碎石 I-II	〃	31.7-63.5	
	碎石 I-III	〃	101.6-150	
碎 石 II	花こう岩	101.6-150	1.2	
碎石 III	碎石 III-I	花こう岩	4.76-63.5	現地調査した、いわき、家島、門司にはほぼ相似な粒度
	碎石 III-II	〃	25.4-200	
碎 石 IV	〃	63.5-200	2.0	碎石 I または II と碎石 III の中間になる粒度組成

註) 硬質砂岩は栃木県塩谷郡塩谷町佐貫前河原産。花こう岩は福島県いわき市小川町西小川堂平産。

表-10 試験碎石の粒度

ふるい目 (mm)	加 積 通 過 率 (%)						
	碎石 I-I	碎石 I-II	碎石 I-III	碎 石 II	碎石 III-I	碎石 III-II	碎 石 IV
200						100.0	100.0
150			100.0	100.0		75.0	50.0
101.6			0.0	0.0		50.5	20.0
63.5		100.0			100.0	26.5	0.0
50.8		—			81.0	18.0	
38.1		50.0			61.0	6.5	
31.7		0.0				—	
25.4	100.0				39.5	0.0	
19.1	95.0				24.5		
12.7	10.0						
9.52	—				1.5		
4.76	0.0				0.0		

である。試験結果からみると碎石 II 母岩と碎石 III・IV 母岩は、同一な特性をもつものと評価できる。

硬質砂岩と花こう岩とを比較すると、前者が比重が大きく、吸水率が小さいことがわかる。また、引張強度が前者が大きなど相対的にみて、硬質砂岩の方が良い材質をもつことがわかる。

(3) 碎石の物理特性

試験用碎石の比重、吸水率および粒子形状について試験を行った。試験方法について表-13 にまとめて示す。

比重および吸水率の試験結果を表-14 にまとめた。同

表中の碎石 III-I、碎石 III-II および碎石 IV については、粒径範囲ごとに得られた結果と表-10 に示す粒度をもとに計算で求めたものである。これによれば、吸水率、比重とも、粒径の大きなものは母岩の値に近く、細粒になるにつれて、吸水率は大きく、絶乾比重は小さくなる傾向がみられる。しかし、その変化は大きくない。

粒子形状試験結果を寸法比 $p \sim q$ の座標で示して、Zingg の分類にあてはめたものが、図-15、図-16 である。また、 $a=1$ としたときの b, c の値をもとめて表-15 に示した。試験用碎石は、碎石 I-II が板状の範囲に入

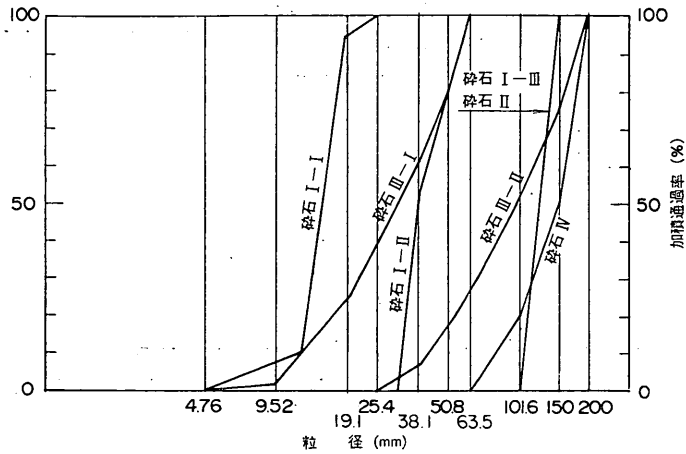


図-13 試験砕石の粒径加積曲線

るが、その他は塊状の範囲に入り、捨石石材の場合と同程度の寸法比であることがわかる(図-2~図-5, 表-6参照)。

(4) 安息角

砕石 III-I および 砕石 IV を除く 他の試験用砕石の気中安息角と水中安息角を測定した。

a) 気中安息角の測定

平坦な地面上に砕石が円錐形となるように円錐頂部から砕石を転げ落して積上げ、円錐高および円錐底直径を測定することにより、安息角を算出し、勾配定規で円錐の角度を測定し計算値の検査を行った。砕石の円錐は、その最大粒径の大きさに応じて最終の円錐高30~200cmの間に積み上げる過程で4回以上安息角を測定した。なお、円錐高を1m以上にしたときは、落下高を約1mに

保ちながらベルトコンベアで砕石を積み上げた。

b) 水中安息角の測定

砕石 I-I, I-II, I-III および 砕石 II の水中安息角の測定は、容積 1.5m³ の鋼製水槽に水張りし、砕石 III-II の場合は、直径 5m 深さ 2.5m のコンクリート製水槽に水張りして、砕石を水中自由落下によって積み上げ、円錐形を形成させて行った。測定頻度、方法は、気中安息角測定に準じた。

図-17 に円錐高さ と安息角の関係を示す。どの砕石においても、粒子に働く浮力の影響で落下速度に差が生じるためか、水中安息角が気中安息角に比べて約2°大きな値を示している。図-18 に、各砕石の50%粒径を代表粒径として、代表粒径と安息角の関係を示した。相似粒度の場合に、最大粒径の大となるほど安息角も大きくなっ

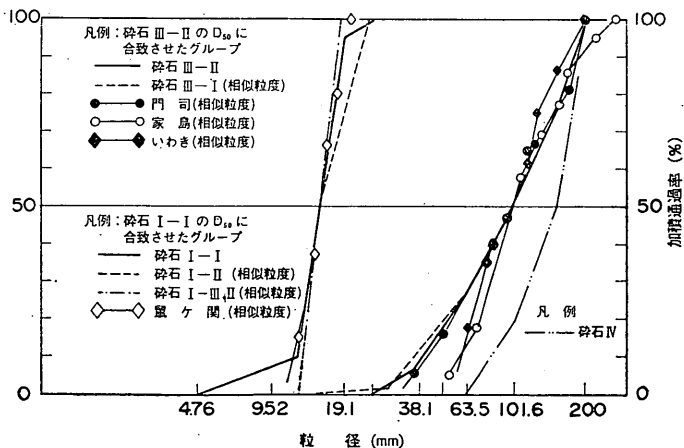


図-14 試験砕石の粒度と各産地捨石材粒度の関係

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

表-11 砕石母岩の物理・力学特性

岩種	材 料	含水状態	表乾比重 D_s	絶乾比重 D_p	吸水率(%)	計算真比重 D_o	一軸圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	引張強度 σ_t (kgf/cm ²)	動的弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
硬質砂岩	砕石Ⅰ母岩	表 乾	2.637	—	—	—	1,595.5	147.5	7.86×10^5	0.216
		絶 乾		2.631	0.23	2.647	1,410.9	124.7	5.11×10^5	0.224
花こう岩	砕石Ⅱ母岩	表 乾	2.614	—	—	—	1,188.0	61.5	6.90×10^5	0.251
		絶 乾		2,602	0.44	2.633	1,631.9	59.5	4.40×10^5	0.238
う岩	砕石Ⅲ,Ⅳ母岩	表 乾	2.609	—	—	—	1,337.6	51.0	6.73×10^5	0.279
		絶 乾		2.597	0.49	2.631	1,668.7	56.1	4.44×10^5	0.236

表-12 砕石母岩の物理力学特性把握のための試験等一覧

項 目	方 法	砕石Ⅰ母岩		砕石Ⅱ母岩		砕石Ⅲ・Ⅳ母岩	
		絶乾	表乾	絶乾	表乾	絶乾	表乾
供試体の作製	最小径30cm以上の岩塊からJIS M 0301により供試体(D5cm×H10cm, D5cm×H5cm)を作製する。	8 (7)	8 (7)	7 (7)	8 (8)	5 (5)	5 (5)
比試重験・吸水率	表乾比重	全供試体に対して水中質量および表乾質量を測定して、表乾比重を算出する。JIS A 1110に準ずる。					
	絶乾比重 吸水率	他の試験で絶乾状態で試験を実施する供試体は、110°Cで炉乾燥する。絶乾質量を測定して、絶乾比重と吸水率を算出する。JIS A 1110に準ずる。					
一軸圧縮試験	JIS M 0302によりD5cm×H10cmの供試体を試験する。	8	8	7	8	5	5
圧裂試験	JIS M 0303によりD5cm×H5cmの供試体を試験する。	(7)	(7)	(7)	(8)	(5)	(5)
動弾性係数測定試験	一軸圧縮試験に先立ち、超音波法により、D5cm×H10cmの供試体を試験する。	8	8	7	8	5	5

註 数量単位は本数である。()内数字は供試体D5cm×H5cm, その他の数量は供試体D5cm×H10cmを表している。

ている。

3.3 三軸圧縮試験装置

砕石の三軸圧縮試験は、2種の三軸圧縮試験機を使用して実施した。すなわち、最大粒径63.5mm以下の砕石は、直径30cm高さ60cmの供試体を試験しうる試験機(以下、中型三軸圧縮試験機と称する)で試験を行い、最大粒径が63.5mmをこえる砕石は、直径120cm高さ240cmの供試体を試験しうる試験機(以下、大型三軸圧縮試験機と称する)で試験した。

2つの試験装置のおもな諸元を表-16に示す。大型三軸圧縮試験機の構造の概要は、以下のとおりである。なお、詳しくは文献⁸⁻⁹⁾を参照されたい。大型三軸圧縮試験機の試験機本体の構造は、図-19に示すとおりである。

供試体への軸力の载荷は、油圧ポンプでオイルをラムシリンダーに送り、ラムを押し上げる方式を採用している。その反力は6本の支柱と特製の反力受け梁でとっている。軸力の値は三軸室の上蓋に取付けた耐水型ロードセルで検出する。

軸変位の制御はマイクロコンピュータに軸変位計を接続し、逐一、ひずみ速度を計算し、軸力発生系統中にあるオイルの流量制御バルブを自動的に調節することにより行っている。また、マイクロコンピュータは、ロードセルにも接続しており、応力制御も可能であり、任意の応力径路を供試体に与えることができる。

側圧は、ノルウェー型恒圧装置でオイルを昇圧した後、体積変化測定装置を通じて水圧に変換し、供試体に

表-13 碎石の物理特性把握のための試験一覧

項 目	方 法	試 料		
		碎 石 I	碎 石 II	碎 石 III, IV
比重・吸水率試験	JIS A 1110 (粗骨材の比重・吸水率試験方法) により試験する。	碎石 I-I 20kg 碎石 I-II 30kg 碎石 I-III 40kg	40kg	粒径 200~ 150mm—25kg 150 ~101.6—15〃 101.6~ 63.5—40〃 63.5~ 50.8—15〃 50.8~ 38.1—15〃 38.1~ 25.4—15〃 25.4~ 19.1— 2〃 19.1~ 9.52— 2〃 9.52~4.76—1.5〃
粒子形状試験	個別碎石粒子を仮定の長方形の箱に収納するとき、箱の体積が最も小さくなると考えられるときの箱の三辺の長さ(a, b, c) を測定し、Zinggの方法で分類する。	碎石 I-I : 粒径 4.76~12.7mm10個 12.7~19.1 // 50〃 19.1~25.4 // 10〃 碎石 I-II : 粒径 31.7~38.1mm10個 38.1~63.5 // 50〃 63.5~76.2 // 10〃 碎石 I-III : 粒径 101.6~150mm50個	粒径 101.6~150mm 50個	粒径 ~150mm—20個 150 ~101.6—20〃 101.6~ 63.5—20〃 63.5~ 50.8—20〃 50.8~ 38.1—20〃 38.1~ 25.4—20〃

註) 碎石IIIの 25.4mm 未満の粒子形状試験は実施しなかった。

表-14 試験碎石の比重及び吸水率一覧

試験材料	表乾比重 D_s	絶乾比重 D_D	計算真比重 D_a	吸水率 $Q(\%)$
碎石 I-I	2.639	2.613	2.685	1.03
碎石 I-II	2.668	2.649	2.699	0.70
碎石 I-III	2.640	2.634	2.650	0.23
碎石 II	2.613	2.598	2.638	0.58
碎石 III-I*	2.592	2.570	2.628	0.85
碎石 III-II*	2.603	2.587	2.628	0.59
碎石 IV*	2.607	2.595	2.625	0.43

註) * 印の覧は粒径範囲毎に行った試験結果と粒径分布をもとに計算で求めたもの。

加える。側圧は 2 kgf/cm² から 30kgf/cm² まで 0.5kgf/cm² ごとに非連続に恒圧を得ることができる。2 kgf/cm² 以下については別系統を用い、空気圧で加えることができる。

三軸圧縮試験の進行に伴い、ラムが三軸室内に貫入する構造になっているため、貫入したラムの体積相当分の

表-15 試験碎石の平均的粒子形状

種 類	寸 法 比		寸 法		
	p	q	a	b	c
碎石 I-I	0.72	0.72	1	0.72	0.52
碎石 I-II	0.60	0.76	1	0.76	0.45
碎石 I-III	0.68	0.74	1	0.74	0.50
碎石 II	0.72	0.74	1	0.74	0.53
碎石 III, IV	0.73	0.75	1	0.75	0.55

註) 碎石 III, IV は粒度分布を加味しない、粒径 200~25.4mm の各階級の数値の単純平均。

水を三軸室から排除する必要がある。このため、ラム断面面積の 2分の1 の断面積を持つ体積補正シリンダーを 2 基設備し、ラム軸に補正シリンダーピストンを連結作動させ、三軸室内の水を補正シリンダーに移動させることにより、三軸室にラムが貫入することによって生ずるみかけの体積変化を補正している。また、供試体の体積変化量は三軸室内の水の出入量を測定して行っている。

軸変位の検出は、ラム軸の動きをリニアエンコーダが

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

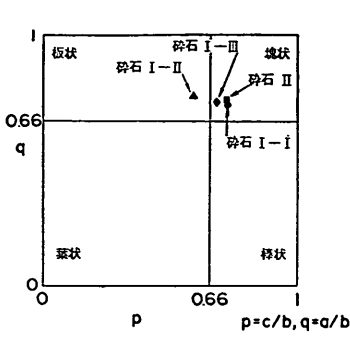


図-15 試験砕石の平均的粒子形状 (砕石 I, II)

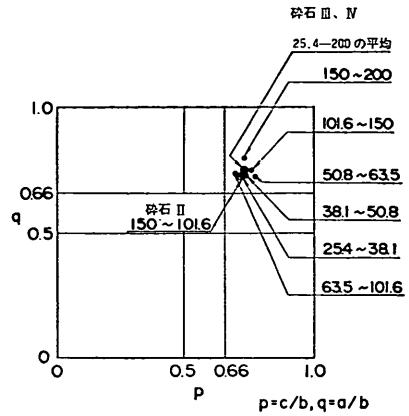
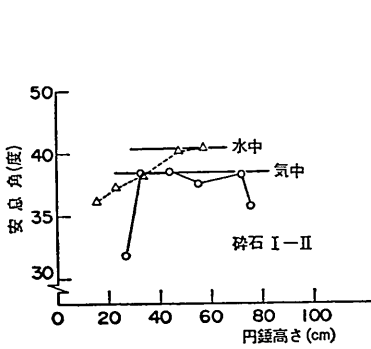
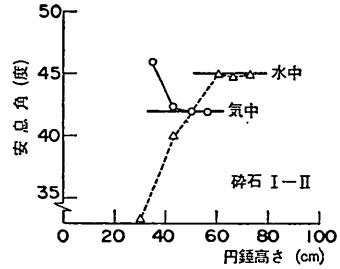


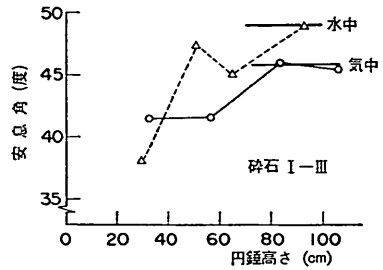
図-16 試験砕石の平均的粒子形状 (砕石 II, III, IV)



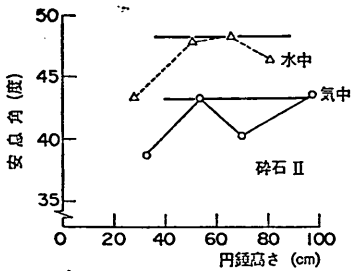
(a) 砕石 I-I



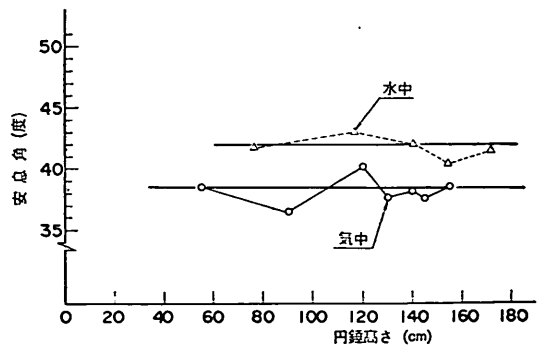
(b) 砕石 I-II



(c) 砕石 I-III



(d) 砕石 II



(e) 砕石 III-I

図-17 試験用砕石の安息角と円錐高の関係

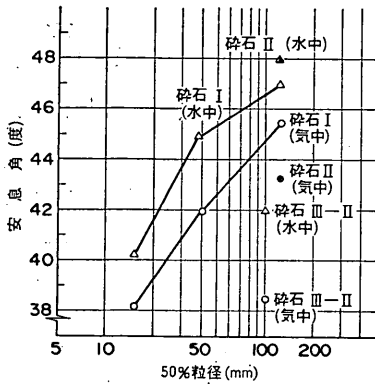


図-18 50%粒径と安息角の関係

ジョンスケールで測定することで行っている。このスケールは、補正シリンダー連結竿にその一端を取付けている。

試験機のうち、三軸室、ラムシリンダー、体積補正シリンダーは、地下に建設されたケーソン中のコンクリート基礎上に設置されている。また、その他の機器、すなわち、体積変化測定装置、側圧発生装置、軸力制御装置、試験操作盤、マイクロ・コンピュータ等は地上に設置してある。

大型三軸圧縮試験供試体には、厚さ 10mm のゴムスリーブを使用している。

中型三軸圧縮試験機の、大型三軸圧縮試験機と構造面で異なる主な点は、軸力の載荷方向が下向きであること、体積補正シリンダーを有していないこと、側圧の制御をサーボ弁を使用して行うこと、等である。中型三軸圧縮試験機供試体には厚さ 2 mm のゴムスリーブを使用している。

3.4 締固め試験

(1) 締固め試験の概要

3.5 で述べる三軸圧縮試験に先だち、締固め試験を行った。この結果により碎石の締固めに関する特性を把握するとともに、三軸圧縮試験の供試体の初期間げき比の設定と圧縮試験まえの初期状態における粒子破碎状況の把握を行うものである。

締固め試験は以下の 3 種の試験からなる。

① 締固め効果把握試験：気中で締固め回数（ランマーによる締固めの場合）または締固め時間（振動締固めの場合）と密度の関係をもとめる試験

② 密度確認試験：①の結果により三軸圧縮試験の供試体密度を設定し、これを目標締固め密度として、水中でその密度に締固めるために要する締固め回数または締固

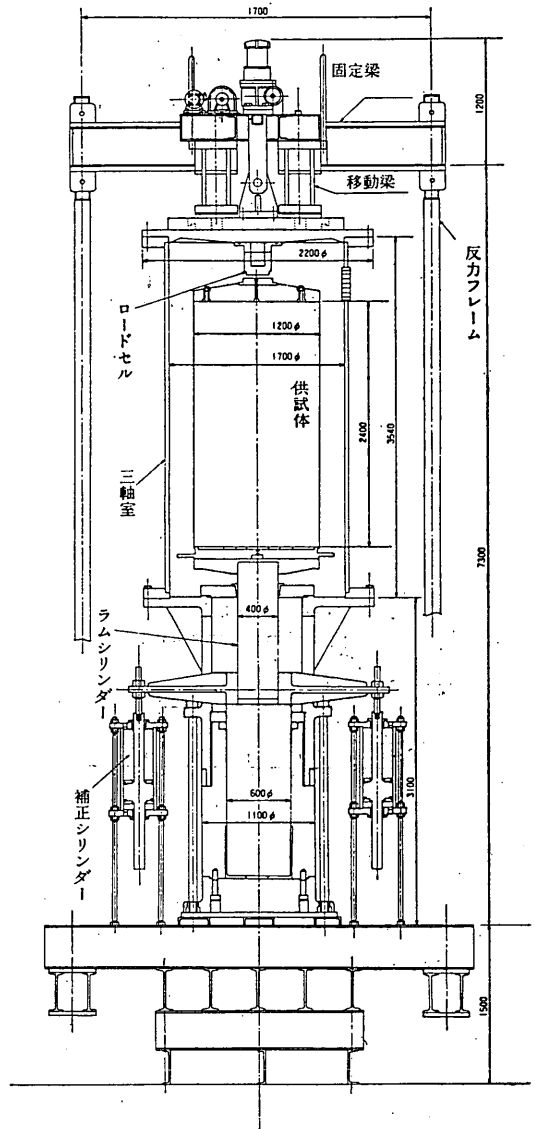


図-19 大型三軸圧縮試験機本体構造図（単位：mm）

め時間を確認する。

③ ふるい分け試験：粒子破碎の度合いを把握するため①、②の試験後、供試体の全量をふるい分ける試験。

締固めには、三軸圧縮試験供試体作製用モールドおよび締固め機を用いて試験を行った。最大粒径が 63.5mm 以下の碎石の締固めには、モールドに中型三軸圧縮試験供試体作製用モールドを用い、締固めエネルギー源としてランマー（直径 10cm、質量 10kg、落下高 45cm）あるいは中型振動締固め機を用いた。また、最大粒径が 63.5mm を越える碎石の締固めには、モールドに大型三

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

表-16 三軸圧縮試験機の諸元

項目	大型三軸圧縮試験機		中型三軸圧縮試験機		
	諸元	測定方式	諸元	測定方式	
供試体寸法	D120cm×H240cm		D30cm×H60cm		
最大軸力	680tf(軸方向応力 60kgf/cm ² 相当)		100tf(軸方向応力 140kgf/cm ² 相当)		
最大側圧	30kgf/cm ²		30kgf/cm ²		
測定機器 容量	軸力	700tf	ヒズミゲージ・ホイストンブリッジ	100tf	ヒズミゲージ・ホイストンブリッジ
	側圧	30kgf/cm ²	〃	20kgf/cm ²	〃
	間隙水圧	30kgf/cm ²	〃	20kgf/cm ²	〃
	体積変化計	無制限(切替)	マイコンの下降・上昇自動切替付追従装置(赤外線による光電管方式)およびリニアエンコーダ	8 l	静電容量変換の差圧計
	軸変位	60cm	光電式インクリメンタル方式のリニアエンコーダ	20cm	光電式インクリメンタル方式のリニアエンコーダ

軸圧縮試験供試体作製用モールドを用い、締固め機として大型振動締固め機を用いた。2種の振動締固め機の規格は表-17に示すとおりである。

表-17 振動締固め機規格

	大型振動締固め機	中型振動締固め機
質量	533kg	20.4kg
振動板直径	1,140mm	290mm
振動モータ型式	KM40-40P 2個	KM10-2P 1個
遠心力	800kgf	100kgf
振動数	1,450r・p・m	2,580r・p・m
振動振幅	平均 3.2mm	平均 1.5mm

(2) 締固め試験方法

a) 締固め効果把握試験

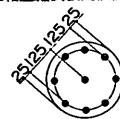
中型三軸圧縮試験用供試体作製システムを用いた締固め効果把握試験の手順、内容は次のとおりである(砕石 I-I, I-II および砕石 III-I)。

①密詰めとなった時の密度を想定し、締固め層一層当りに必要な砕石を含水比を考慮して計算する。締固め層は砕石の最大粒径を配慮して、砕石 I-I は仕上げ目標層厚を10cm、砕石 I-II および砕石 III-I は同 20cm とする。

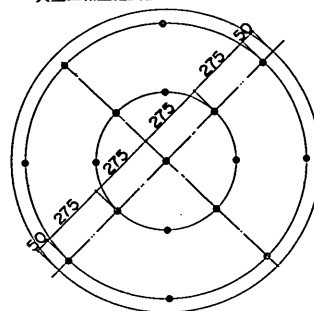
②できるだけ緩く詰まるように砕石をモールドに入れて、砕石天端を均し、層厚を測定する。

③モールドに詰めた砕石の層厚は、図-20 に示した位

中型三軸圧縮試験用供試体 (300 φ)



大型三軸圧縮試験用供試体 (1,200 φ)



単位は mm

図-20 層厚測定位置図

置で、モールド天端と砕石天端面の鉛直距離を9箇所測定して平均することで求める。

④砕石 I-I および砕石 I-II はランマーを用いて締固めを行い、ランマーの落下回数が10, 20, 40, 80, 160, 240回、……ごとに③の方法で層厚を測定して密度を算出する。砕石 III-II は振動締固め機を用いて締固めを行い、締固め時間10, 20秒, 1, 2, 4, 8, 16, 32分……ごとに③の方法で層厚を測定して密度を求める。

⑤ ①~④を、砕石 I-I および砕石 III-I については、さらに2層、砕石 I-II についてはさらに1層繰り返す。

大型三軸圧縮試験用供試体作製システムを用いた締固め効果把握試験の手順・内容は次のとおりである(砕石

I-III, 碎石II, 碎石III-IIおよび碎石IV)。

①密詰めとなったときの密度を想定し、締固め層一層当りに必要な、碎石を含水比を考慮して計量する。締固め層厚は仕上げ目標層厚で40cmとする。

②できるだけ緩く詰まるように碎石をモールドに入れて碎石天端を均し、層厚を測定する。

③モールドに詰めた碎石の層厚は、図-20に示した位置でモールド天端と碎石天端面の鉛直距離を17箇所て測定し平均することで求める。

④振動締固め機を用い、締固め時間10, 20, 30秒, 1, 2, 4, 8, 16, 32分……ごとに層厚を測定し密度を算出する。

⑤ ①~④を碎石I-III, および碎石IVについてはさらに1層, 碎石IIおよび碎石III-IIについてはさらに2層繰り返す。

なお、碎石III-IIを使って、水中締固めと気中締固めの特性を比較するために、上記①に基づいて碎石を計量した後に、碎石を24時間水浸放置し、②~④の手順で碎石が水に浸った状態で締固める試験も実施した。この碎石III-IIの水中締固め効果把握試験の層数は2層とした。

b) 密度確認試験

設定した締固め密度を碎石の水浸状態で達成するための試験であるから、碎石の計量法、層厚計測法を締固め

効果把握試験と同一とし、ランマーの落下回数あるいは振動締固め時間をわずかつつ増加させて設定密度に達したときのランマーの落下回数あるいは振動締固め時間の累計を求める。なお、締固め効果把握試験の場合の目標仕上げ層厚と密度確認試験の場合の仕上げ層厚は同一であるが、一層当りの材料は密度確認試験の方が少ない量となる。

c) ふるい分け試験

締固めによる粒子破碎によって生ずる粒度変化を把握するため、締固め効果試験と密度確認試験後の供試体試料について、表-10と同一のふるい目のふるいでふるい分け試験を行う。そして、ふるい分け試験の結果をもとに次式で計算される Marsal の破砕率 $B_M(\%)$ を算出した。

$$B_M = \sum \Delta W_k \quad (\text{ただし, } \Delta W_k \geq 0 \text{ を満足する } k) \quad (2)$$

ここに ΔW_k ; ふるい k の当初の残留率(%)と試験後の残留率(%)の差。

なお、以降本報告で用いる破砕率は、式(2)によって算出した Marsal の破砕率である。

(3) 締固め試験結果

図-21~図-27に碎石の締固め曲線を示した。同図中には密度確認試験の結果も●印でプロットしてある。そし

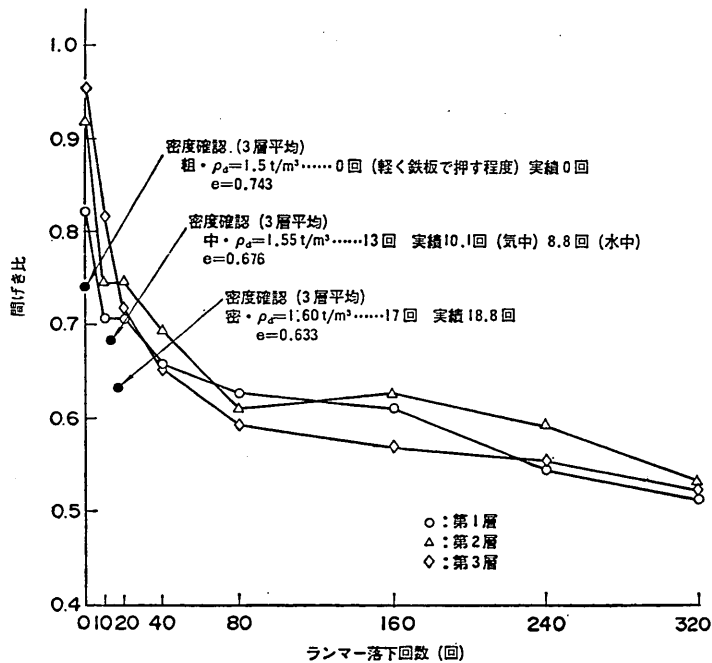


図-21 碎石I-I締固め曲線

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

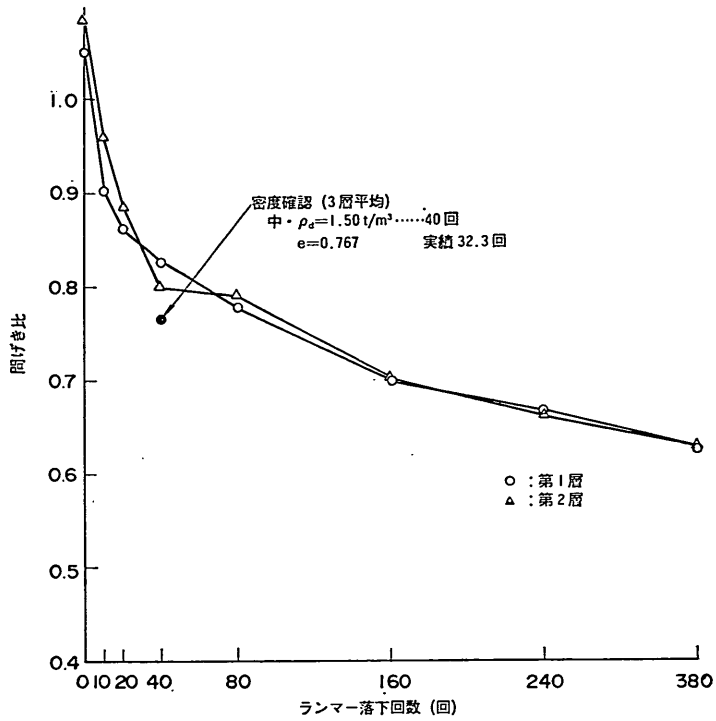


図-22 碎石 I-II 締め固め曲線

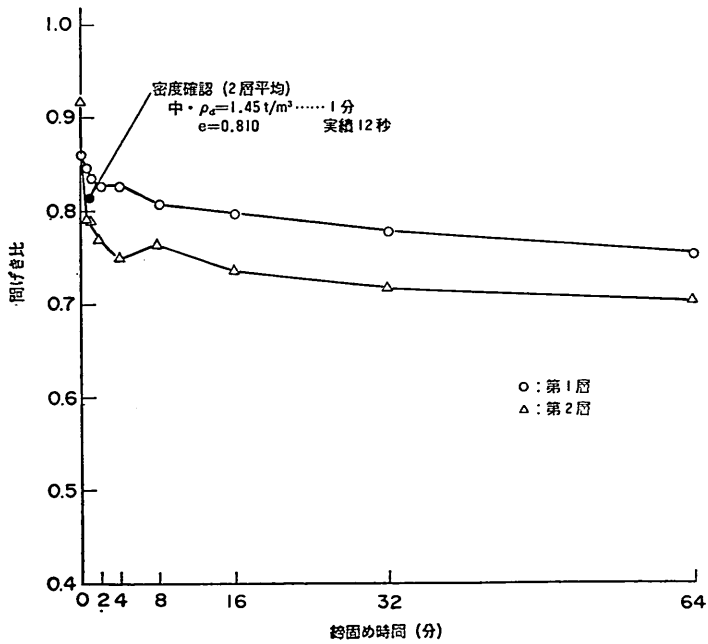


図-23 碎石 I-III 締め固め曲線

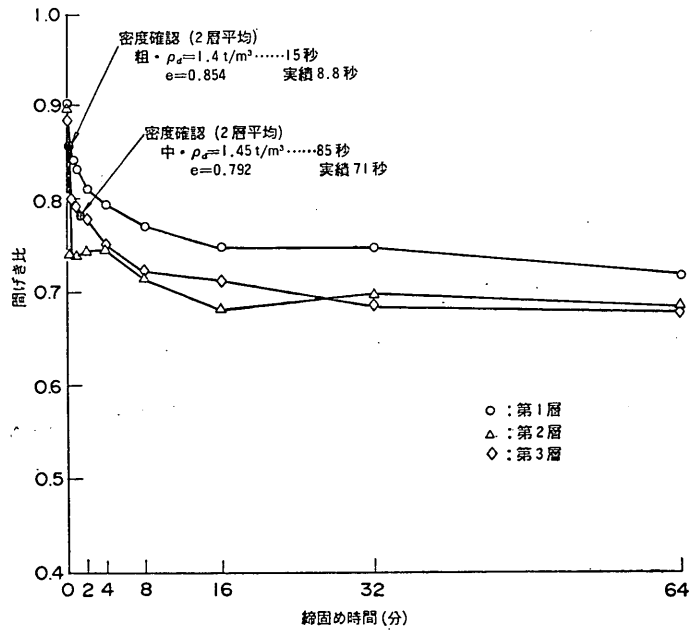


図-24 碎石II締めめ曲線

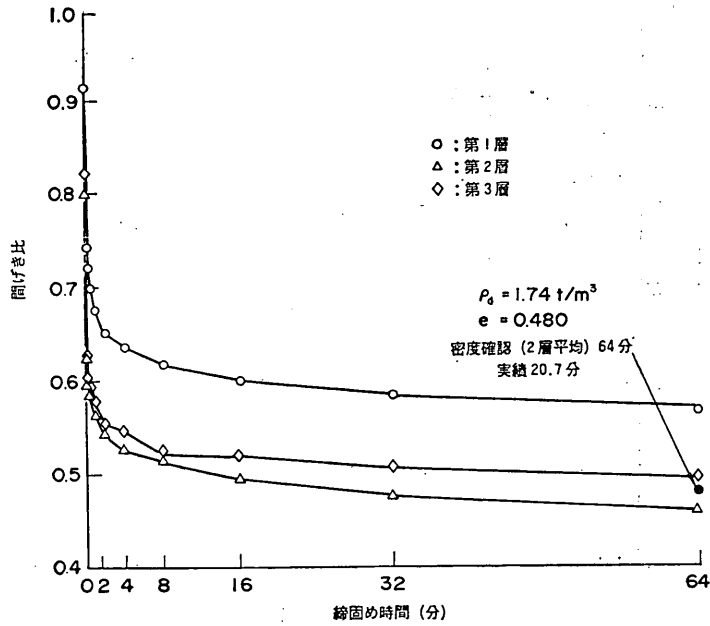


図-25 碎石III-I締めめ曲線

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

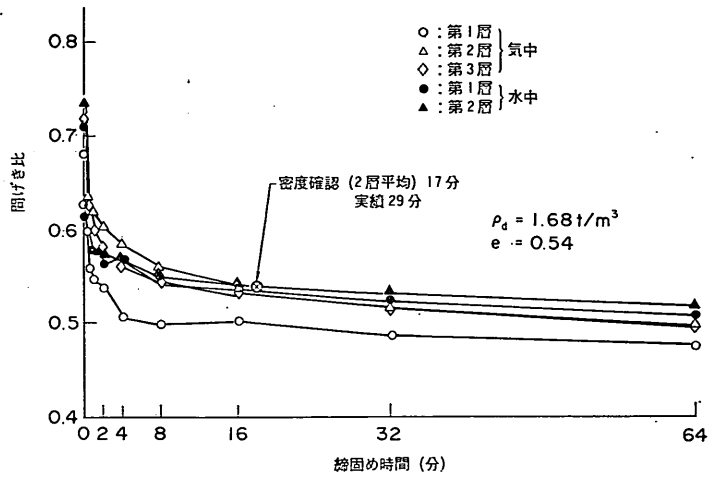


図-26 砕石Ⅲ-Ⅱ締固め曲線

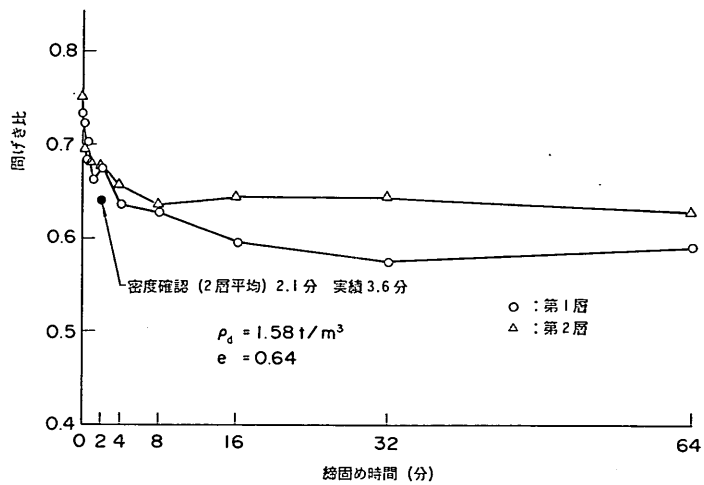


図-27 砕石Ⅳ締固め曲線

て、目標とする密度 ρ_d (乾燥密度) と締固めに要した締固め回数 (または締固め時間) を記入してある。さらに実際に三軸圧縮試験供試体作製時の締固め回数 (または締固め時間) を実績として併記してある。また、表-18 に締固め効果把握で得られた初期間げき比と最終間げき比を示す。また、締固め試験後のふるい分け試験結果から算出した破砕率 B_H をも合わせて示した。

表-18 に示した最終間げき比のうち砕石 I-I, I-II 以外は間げき比がほぼ一定状態に達しており、今回の試験方法による最小間げき比とみなしてもよいものと思われる。表-18 の初期間げき比を、最大間げき比とあえて

呼ばなかったのは、各試料の作製方法が必ずしも等価であるとはいえないので比較すべき指標とはならないと考えたからである。このことは直径 120cm の供試体の作製は試料を 1 ケずつならべるという方法であるため、相似粒度で結果的にみて直径 30cm の供試体の場合と比較して初期間げき比が小さい値になっていることからもうなづけよう。

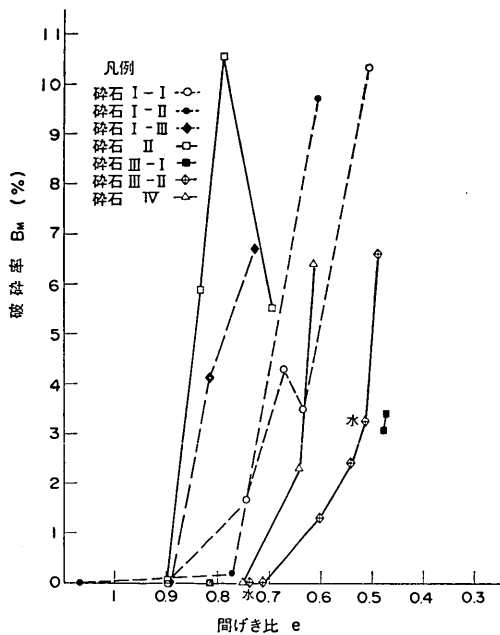
締固め効果試験および密度確認試験から得られた各砕石の間げき比と破砕率 B_H の関係を 図-28 にまとめた。

図-29 に砕石の 50% 粒度と最終間げき比の関係をまとめた。

表-18 締固め効果試験の初期間隙比，最終間隙比

材 料	供試体径 (cm)	初期間隙比	締固めエネルギー	最終間隙比	破碎率 (%)
碎石 I-I	30	0.897	5E _c /層	0.509	10.3
I-II	"	1.068	8E _c /層	0.606	9.7
I-III	120	0.888	64分 /層	0.728*	6.7
II	"	0.895		0.694*	5.5
III-I	30	0.811		0.476*	3.4
III-II	120	0.711		0.490*	6.6
“(水中)”	"	0.737		0.514*	3.5
IV	"	0.742		0.612*	6.4

註1) *印は，締固め曲線で間隙比がほぼ一定値に近づいており， e_{min} に近いものと判断される。
 註2) E_cはプロクターによって定義された締固め仕事量で $E_c = 5.6 \times 10^4 m \cdot kgf/m^3$ である。



註) III-IIには水中の締固め効果試験の結果を含む。ただし図中に水の添字をつけた。

図-28 締固めによる破碎率と間隙比

3.5 三軸圧縮試験

(1) 三軸圧縮試験の概要

表-19に示すようなケースについて三軸圧縮試験を行った。同表中の○印をしてあるのが実施したケースであ

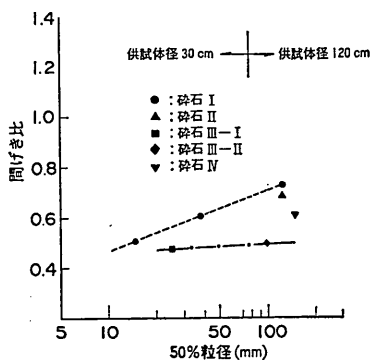


図-29 締固め効果試験における最終間隙比と50%粒径の関係

る。また，*印を付したケースについては，三軸圧縮試験後に粒子の破碎率を測定した。なお，○の中に×および△を加えたケースは(4)試験結果のところ而言及してあるとおり，試験方法に問題があり，良好なデータが得られなかったケースを示している。

(2) 三軸圧縮試験方法

三軸圧縮試験方法のおもな項目については以下のとおりである。

① 排水条件

飽和供試体は，圧密排水(CD)条件で，気乾状態の供試体は圧密排気(CD)条件で試験を行った。

② 等方圧縮の方法

碎石 I-I および碎石 I-II の試験では，規定の等方圧縮圧力(側圧)まで増圧勾配 $0.2 kgf/cm^2 \cdot min$ で増圧させた後，供試体内の水の排除を開始し，体積ひずみの増分が $0.02\%/h$ 以下となるか，規定側圧のままですべて8時間経過するかのいずれかの時点で，等方圧縮が終了したもののみとした。

碎石 I-I と碎石 I-II 以外の試験では，試験側圧まで段階的に等方圧縮した。等方圧縮した圧力は $1.0, 2.0, 4.0, 8.0 kgf/cm^2$ の間隔であり，試験側圧までの圧力を供試体に与えた後，供試体のせん断を行った。各等方圧縮のステップにおける体積ひずみ増分が $0.02\%/h$ 以下となるか，各ステップの圧力のままですべて8時間経過した時点で次のステップへの等方圧縮のための加圧を行った。

③ 軸方向変位速度

中型三軸圧縮試験では，碎石 I-I および碎石 I-II は $6 mm/min$ (約 $1\%/分$)，碎石 III-I は $3 mm/min$ (約 $0.5\%/分$) 一定とした。

大型三軸圧縮試験では， $3.3 mm/min$ (約 $0.14\%/分$)

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

表-19 三軸圧縮試験の実施ケース一覧

試験機	碎石種類	含水状態	初期状態 (目標)			側圧 (kgf/cm ²)					
			締固め状態 (仮称)	乾燥密度	間隙比	0.5	1	2	4	8	14
中 型	碎石 I-I	飽 和	密	1.60t/m ³	0.633			○	○	○*	
			中	1.55	0.676	○	○	○*	○*	○*	○*
			粗	1.50	0.743			○	○	○*	
	碎石 I-II	気 乾	中	1.55	0.685			○	○	○*	
大 型	碎石 I-III	飽 和	中	1.50	0.767			○	△	⊗*	
			中	1.45	0.810			○*	○*	○*	
	碎石 II		中	1.45	0.792		△*	○*	○*	○*	
粗			1.40	0.854			○*	⊗*	⊗*		
中 型	碎石 III-I		密	1.74	0.480		○*	○*	○*		
大 型	碎石 III-II		中	1.61	0.600				○*		
		密	1.68	0.540		○*	○*	○*			
	碎石 IV	中	1.58	0.640				○*			

註) * は、試験後の粒子破砕量を測定した供試体。粒子破砕の測定に使用したふるい目は、次のとおり。
 碎石 I-I では、12.7mm、碎石 I-II では、38.1mm、碎石 I-III、II では、101.6mm、碎石 III-I では、
 50.8, 38.1, 25.4, 19.1, 9.52, 4.76mm、碎石 III-II では、150, 101.6, 63.5, 50.8, 38.1, 25.4mm、
 碎石 IV では、150, 101.6, 63.5mm

min) 一定とした。

④ 計測項目

軸荷重、軸変位、体積変化量・側圧を計測・記録した。

⑤ 供試体の大きさ

中型三軸圧縮試験用供試体は、直径30cm 高さ60cm、
 大型三軸圧縮試験用供試体は、直径120cm 高さ240cmの
 円柱体である。

⑥ 供試体の締固め層数および一層あたりの層厚

碎石 I-I は、仕上げ層厚 10cm で 6 層、碎石 I-II お
 よび碎石 III-I は、仕上げ層厚 20cm で 3 層、碎石 I-
 III、碎石 II、碎石 III-II および碎石 IV は、仕上げ層厚 40
 cm で 6 層締固めることにより、供試体を作製した。

(3) 供試体作製方法

中型三軸圧縮試験用供試体の作製方法は、以下のとおり
 である。

① 底盤、ゴムスリーブ(厚さ 2 mm)、モールド、カ
 ラーを組立てる。

② 設定した密度となるよう密度確認試験と同様に締
 固めを行う。なお、試験材料の計量に先立ち、含水量を
 測定し、精密な密度管理を行う。

飽和供試体は、1 層あたりの碎石質量を計量後、24 時

間以上水浸して碎石自体を飽和させた上、各層の仕上げ
 面まで水を張ったモールド中に碎石をまき出して締固め
 ることで作製する。

③ 供試体作製後、供試体上面に載荷キャップをかぶ
 せ、-0.4kgf/cm² に制御した負圧で供試体を自立させ
 て、モールドを外す。

自立した供試体に、せん断中のゴムスリーブの破損対
 策上、厚さ 1 mm のゴムスリーブをさらに 1 枚かけるこ
 とを原則とする。

④ 三軸室に供試体をセットし、三軸室を組立てた
 後、側圧を 0.4kgf/cm² かけた時点で排水バルブを開い
 て負圧を解除する。

⑤ 碎石 I-I および碎石 I-II では④の後、排水バル
 ブを締め、規定の側圧まで増圧勾配 0.2kgf/cm²・min で
 増圧した後、排水バルブを開けて等方圧縮に入った。碎石
 III-I では排水バルブを開いたまま、等方圧縮に入った。

大型三軸圧縮試験用供試体の作製方法は、厚さ 1 cm
 のゴムスリーブを 1 枚用いる他は、中型三軸圧縮試験用
 供試体の作製方法と同じである。なお、大粒径の粒度の
 悪い碎石のため、底盤の破損防止対策上、碎石 I-III およ
 び碎石 II では、底盤の上に碎石を一ならべした後、碎石

表-20 中型三軸圧縮試験 試験実施状況一覧表

No.	種 別	乾燥密度 (t/m^3)	側 圧 (kgf/cm^2)	特 記 事 項	成功・失敗 ○ ×
1	碎石 I-I	中 (1.55)	2	ゴムスリーブ 2枚のみ	○
2	〃	〃	4		○
3	〃	〃	8		○
4	〃	〃	0.5		○
5	〃	〃	1		○
6	〃	〃	14		○
7	〃	粗 (1.50)	4		○
8	〃	〃	2		○
9	〃	〃	8	せん断中、軸ひずみ $\epsilon_1 \approx 11\%$ にてゴムスリーブに穴があいた。	×
10	〃	〃	8	負圧をかけて、内側のゴムスリーブにできた凹みに油粘土を詰め、外側のゴムスリーブをかけた。	○
11	〃	密 (1.60)	8	ゴムスリーブ 2枚のみ	○
12	〃	〃	4		○
13	〃	〃	2		○
14	〃	中(1.55気乾)	2		○
15	〃	〃	4		○
16	〃	〃	8		○
17	碎石 I-II	中 (1.50)	2	負圧をかけて、内側のゴムスリーブにできた凹みに油粘土を詰め、外側のゴムスリーブをかけた。	○
18	〃	〃	4	同上の処理でせん断中に軸ひずみ $\epsilon_1 \approx 7\%$ でゴムスリーブに穴があいた。	×
19	〃	〃	8①	負圧をかけて内側のゴムスリーブにできた凹みに油粘土をつめ、外側のゴムスリーブをかけたが圧密中にゴムスリーブに穴があいた。	×
20	〃	〃	4	内側のゴムスリーブ表面の凹みに油粘土をつめ、ナイロン100% 腹帯をいれた上で外側のゴムスリーブをかけた。ペDESTALとゴムスリーブの接する位置に硬むりベントナイトをいれた。	○
21	〃	〃	8②	同上の処理で圧密中にゴムスリーブに穴があいた	×
22	〃	〃	8③	2枚のゴムスリーブの間に油粘土とナイロン製腹帯、ゴムスリーブと試料の間にナイロン製腹帯と標準砂 30kg をいれたが、漏水あり	×
23	〃	〃	8④	同上の処理で(但し、標準砂20kg)で再度試験した。	○
24	碎石 III-I (密)	密 (1.74)	4	ゴムスリーブ 1枚のみ。	○
25	〃	〃	2	せん断中、軸ひずみ $\epsilon_1 \approx 12\%$ にてゴムスリーブに穴があいた。	△
26	〃	〃	2	ゴムスリーブ 2枚がけをしたが、供試体にゆるみが生じた。	×
27	〃	〃	1	ゴムスリーブ 1枚のみ。	○

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

I-Iで間詰めを行った。碎石Ⅲ-IIおよび碎石Ⅳにも最下層に同じ母岩の粒径19.1~4.76mmの碎石を敷いたが、間詰めはしなかった。これは碎石I-Ⅲや碎石Ⅱでは、個々の間げき規模が大きいことにより、細粒分を間詰めしても、第1層目の締め固まり方への影響は小さいが、碎石Ⅲ-IIや碎石Ⅳでは間げきの規模が小さいために、間詰めすることで第1層目が締め固まり難くなるからである。また、最上層の上面に不陸整正のため、第1層目に底盤防護対策のため使用した碎石と同じものを敷き均した。この底盤防護と不陸整正のために使用した碎石の質量を除いた質量で供試体密度を算出している。

(4) 三軸圧縮試験結果

中型三軸圧縮試験を行った順序は、表-20のとおりであり、大型三軸圧縮試験を行った順序は、表-21のとおりであった。一般のフィルダム材料の場合には、処女ゴムスリーブを用いる場合、ゴムスリーブの破損による試験の失敗がかなり少い(確率1/100程度)のに比べ、これらの表中に示すように多数の試験失敗があった(表-20、表-21中の成功・失敗は単にゴムスリーブの破壊なしに試験ができたかどうかを示す)。ゴムスリーブの破損を防ぎ、かつ試験結果にあまり影響を及ぼさないと考えられる、表中に記す種々の対策を供試体にほどこしたが、この両者を満たす施策はかなり困難であって、ゴムスリーブが破れない時には、たとえばゴムスリーブと碎石の

表-21 大型三軸圧縮試験 試験実施状況一覧表

No.	種 別	乾燥密度 (t/m ³)	側 圧 (kgf/cm ²)	特 記 事 項	成功・失敗 ○ ×
1	碎石Ⅱ	粗(1.40)	4	側圧4kgf/cm ² の圧密中に載荷キャップがはずれた。	×
2	〃	中(1.45)	2	No.1の失敗により、供試体最上部のゴムスリーブ近傍に間詰めを重点的にした。(以後、実施)	○
3	〃	粗(1.40)	2		○
4	〃	中(1.45)	4		○
5	〃	〃	8		○
6	〃	〃	14	圧密中、側圧を11kgf/cm ² から14kgf/cm ² に上げる際にゴムスリーブに穴があいた。	×
7	〃	粗(1.40)	8	圧密中、側圧を8kgf/cm ² に上げて、しばらくしてゴムスリーブに穴があいた。	×
8	〃	〃	8	供試体作製時、全層にわたって、ゴムスリーブ近傍に間詰めをした。(No.8のみ実施)	○
9	〃	〃	4	圧密終了後、供試体をロードセルに接触させる作業中に、ゴムスリーブに穴があいた。	×
10	碎石I-Ⅲ	中(1.45)	2	せん断中、軸ひずみ $\epsilon_1 \approx 14\%$ でゴムスリーブに穴があいた。	○
11	〃	〃	4	供試体作製時に、ゴムスリーブに接触する箇所に、鋭った部分がないように人手で石をおいた。(以後実施)	○
12	〃	〃	8	せん断中、軸ひずみ $\epsilon_1 \approx 12\%$ でゴムスリーブに穴があいた。	○
13	碎石Ⅱ	粗(1.40)	4		○
14	〃	中(1.45)	1		○
15	碎石Ⅲ-II	密(1.68)	4		○
16	〃	中(1.61)	4		○
17	〃	密(1.68)	2		○
18	〃	〃	1		○
19	碎石Ⅳ	中(1.58)	4		○

註) 碎石Ⅱについて—No.1~No.6は、全量処女材、No.7~No.9は、中間3層のみ処女材。No.13、No.14は中間1層のみ処女材。残分は、原則として、等方圧縮応力のみ経験した材料を使用した。

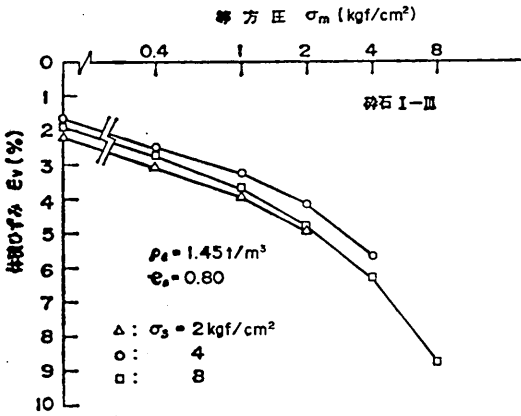
接する場所に入れた標準砂の影響で供試体の剛性が極度に増すと言ったことが生じた。また、試験失敗多発による材料不足のため、処女材でなく、等方圧縮応力のみ経験した材料を混用したケースもある。このような、ゴムスリーブ破損防止処理方法と材料、さらに得られた試験結果の応力～ひずみ関係を考慮して最終的にデータの信頼性のないものを⊗印で、信頼性の若干おつるものを⊙で示し、表-19に記した。そして⊗印のデータは、それ以降の各種の検討において無視している。

等方圧縮中の挙動については以下のものであった。

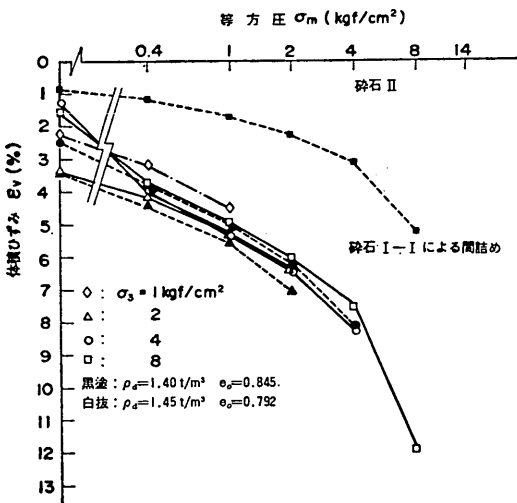
図-30に $e_0 \sim \log \sigma_m$ の等方圧縮曲線を示す。母岩は異なるが同一粒度組成の碎石 I-III と碎石 II を比べる (図-30(a) と (b) 参照) と、碎石 II の方が圧縮されやすい傾向を

示している。

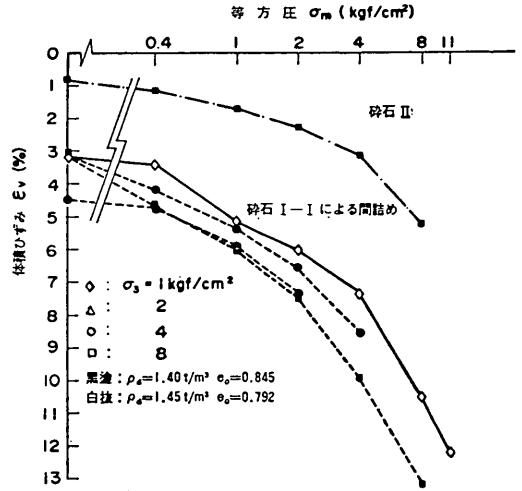
図-30(e) 中で、碎石 III-II, $e_0=0.60$, $\sigma_3=4\text{kgf/cm}^2$ と



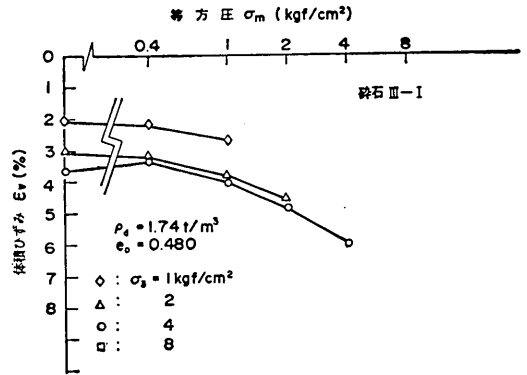
(a) 碎石 I



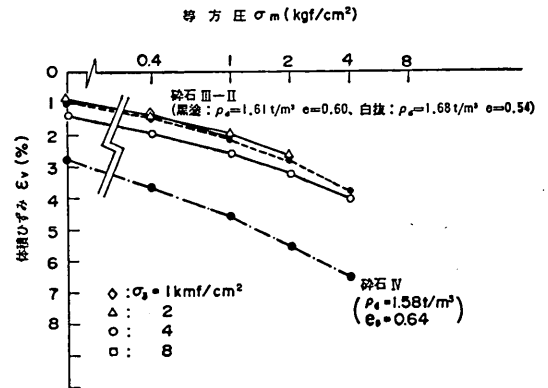
(b) 碎石 II



(c) 碎石 II の失敗ケース



(d) 碎石 III-I



(e) 碎石 III-II, IV

図-30 碎石の等方圧縮曲線

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

表-22 等方圧縮時における実測軸ひずみと換算軸ひずみの関係

供試体直径 (cm)	120	120	30	120	120										
試験 砕石	I-III	II	III-I	III-II	IV										
実現乾燥密度 (t/m ³)	1.452	1.450	1.735	1.617	1.580										
実現初期間げき比	0.813	0.792	0.481	0.600	0.642										
	実測軸ひずみ A(%)	換算軸ひずみ B(%)	A/B	実測軸ひずみ A(%)	換算軸ひずみ B(%)	A/B	実測軸ひずみ A(%)	換算軸ひずみ B(%)	A/B	実測軸ひずみ A(%)	換算軸ひずみ B(%)	A/B	実測軸ひずみ A(%)	換算軸ひずみ B(%)	A/B
負圧 0.4kgf/cm ² 後	(0.219) 0.09	0.55	0.16	(0.120) 0.05	0.44	0.28	(0.060) 0.10	1.03	0.10	(0.170) 0.07	0.31	0.23	(0.249) 0.10	0.91	0.11
側圧 0.4kgf/cm ² 後	(0.252) 0.11	0.83	0.10	(0.120) 0.05	1.33	0.20	(0.066) 0.11	1.07	0.10	(0.171) 0.07	0.46	0.09	(0.270) 0.11	1.22	0.09
側圧 1kgf/cm ² 後	(0.350) 0.15	1.08	0.14	(0.209) 0.09	1.76	0.23	(0.092) 0.15	1.29	0.12	(0.233) 0.10	0.71	0.14	(0.370) 0.15	1.54	0.10
“ 2 “	(0.611) 0.26	1.37	0.19	(0.419) 0.17	2.13	0.31	(0.136) 0.23	1.53	0.15	(0.394) 0.17	0.95	0.18	(0.512) 0.22	1.84	0.12
“ 4 “	(1.194) 0.50	1.88	0.27	(1.065) 0.44	2.75	0.42	—	—	—	(0.823) 0.35	1.29	0.27	(0.801) 0.34	2.19	0.16

註 1) 砕石III-Iは $\sigma_3=2\text{kgf/cm}^2$, その他は $\sigma_3=4\text{kgf/cm}^2$
 2) () の数値は軸変位, 単位 cm

砕石IV, $e_0=0.64$, $\sigma_3=4\text{kgf/cm}^2$ を比較すると e_0 が余りちがわないのに, 後者ははるかに変形しやすいこと。およびこの前者と図-30(b)中の砕石II, $e_0=0.792$, $\sigma_3=4\text{kgf/cm}^2$ を比較すると e_0 に差があるものの, 後者が変形しやすい傾向が顕著であることから, 均等係数が小さい方が圧縮されやすい傾向がうかがわれる。

等方圧縮中の軸変位を測定したケースの一部をとり出して実測軸ひずみと換算軸ひずみ(体積ひずみの1/3)の関係を表-22に示した。換算軸ひずみが実測軸ひずみよりかなり大きくなっている。そして, 等方圧縮応力の小さな範囲でその差が大きくなっていることがわかる。これは供試体周辺部における側圧による供試体へのゴムスリーブの貫入の影響が大きい結果であると思われる。

三軸圧縮試験によって得られた応力~ひずみ曲線を, 図-31~図-41に示す。各図は, 等方圧縮終了時の軸ひずみ(ϵ_1)および体積ひずみ(ϵ_v)をゼロにして描いてある。なお, 等方圧縮後の供試体高さは土質工学会基準「土の三軸圧縮試験法(案)」の軸圧縮を測定しない場合の決定方法¹¹⁾である, 体積ひずみ ϵ_v の1/3をひずみとする方法によって決定した。

三軸圧縮試験結果から, モールの応力円図を, 図-42~図-51に描いた。なお, 図-31~図-41からあきらかな

ように, 軸ひずみが15%以下で軸差応力~軸ひずみ曲線がピークを示さないケースが多くみられる。この場合ひ

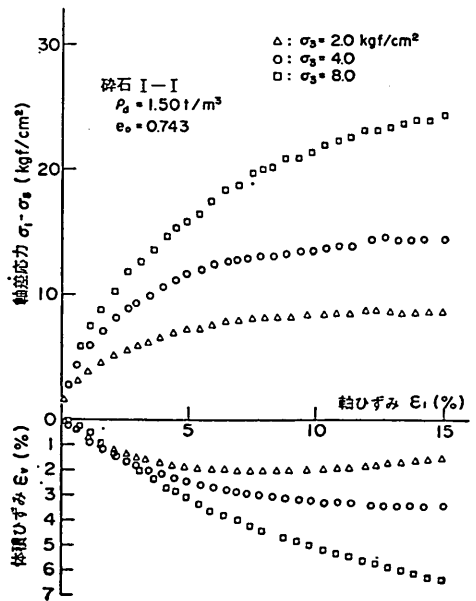


図-31 応力~ひずみ曲線 (砕石I-I, $\rho_s=1.50\text{t/m}^3$, $e_0=0.743$)

ずみ15%の状態を破壊状態として処理している。モー
ル・クーロンの破壊規準を適用し、破壊時の軸差応力と

拘束圧の関係を、最小2乗法によって近似する方法¹²⁾に
よって求めた内部摩擦角 ϕ_{CD} および見掛けの粘着力 C_{CD}

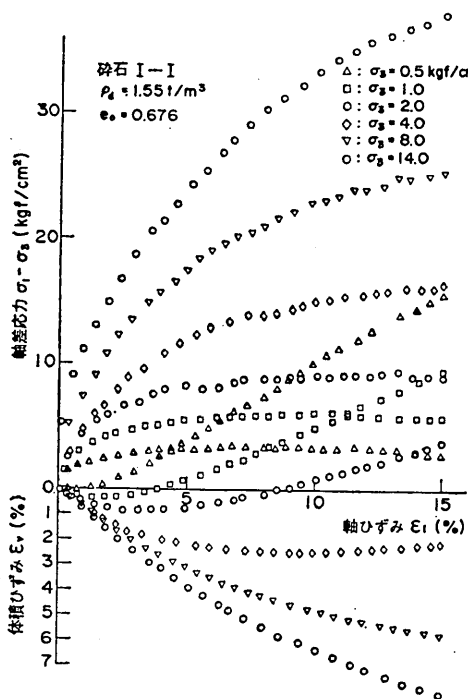


図-32 応力～ひずみ曲線
(碎石 I-I, $\rho_a=1.55t/m^3, e_0=0.676$)

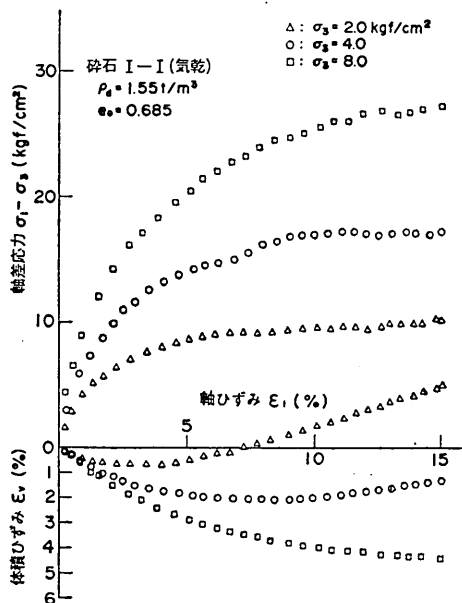


図-34 応力～ひずみ曲線
(碎石 I-I, 気乾, $\rho_a=1.55t/m^3, e_0=0.685$)

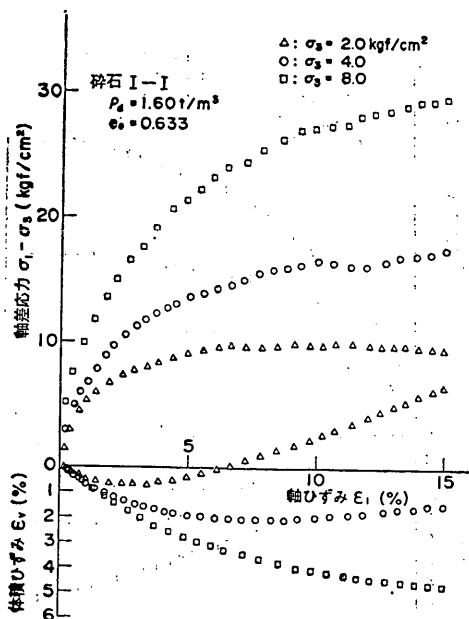


図-33 応力～ひずみ曲線
(碎石 I-I, $\rho_a=1.60t/m^3, e_0=0.633$)

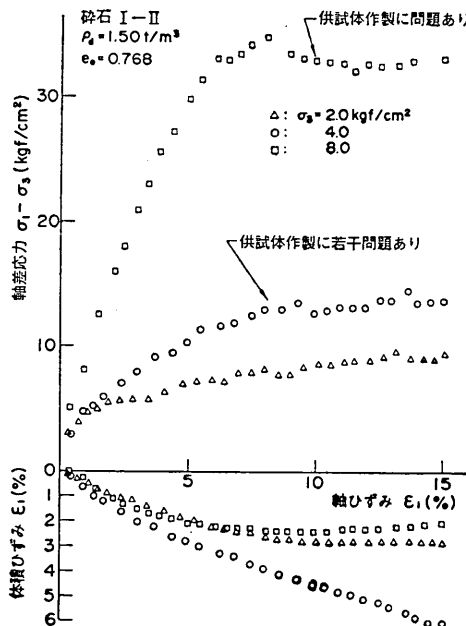


図-35 応力～ひずみ曲線
(碎石 I-II, $\rho_a=1.50t/m^3, e_0=0.767$)

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

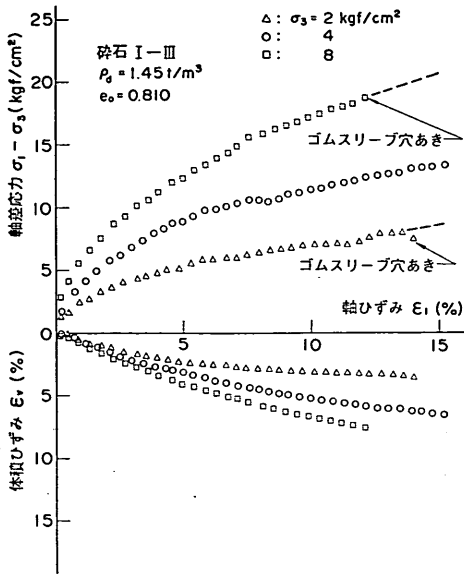


図-36 応力～ひずみ曲線
(碎石 I-III, $\rho_a=1.45t/m^3, e_0=0.810$)

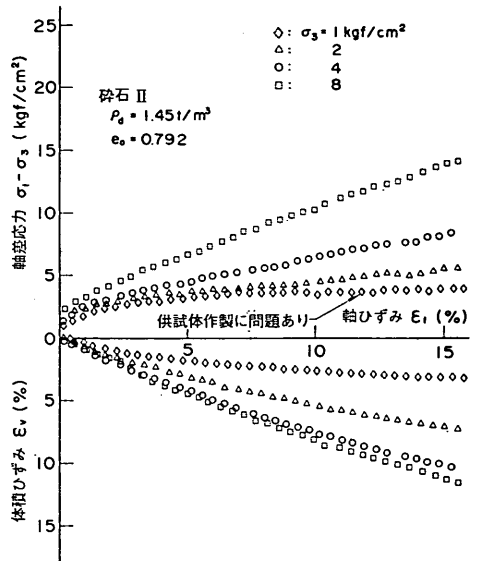


図-38 応力～ひずみ曲線
(碎石 II, $\rho_a=1.45t/m^3, e_0=0.792$)

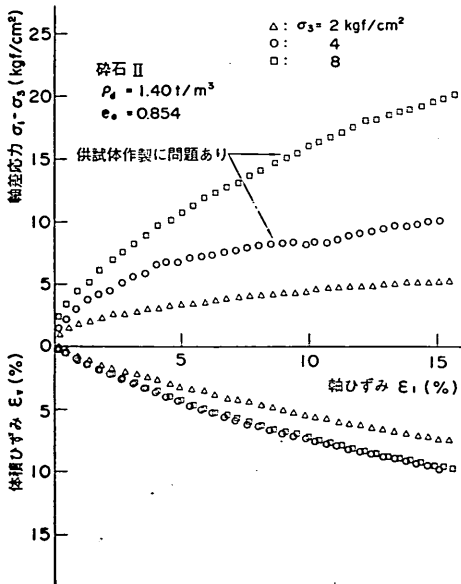


図-37 応力～ひずみ曲線
(碎石 II, $\rho_a=1.40t/m^3, e_0=0.854$)

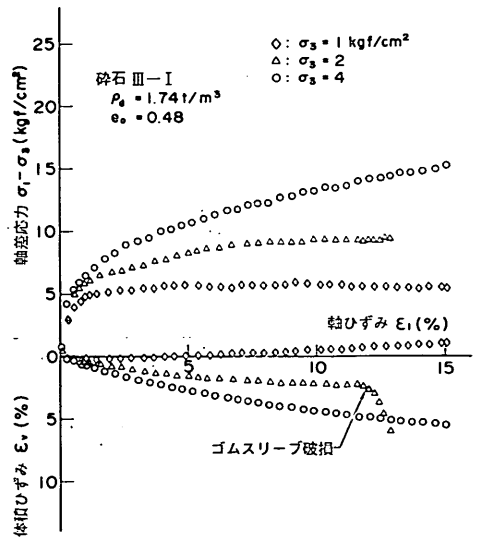


図-39 応力～ひずみ曲線
(碎石 III-I, $\rho_a=1.74t/m^3, e_0=0.480$)

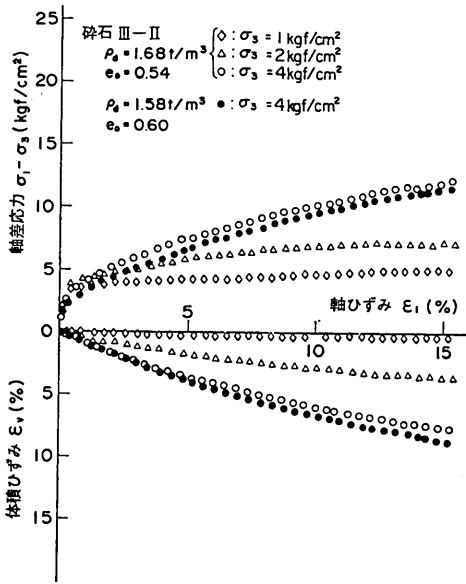


図-40 応力～ひずみ曲線
(碎石Ⅲ-Ⅱ)

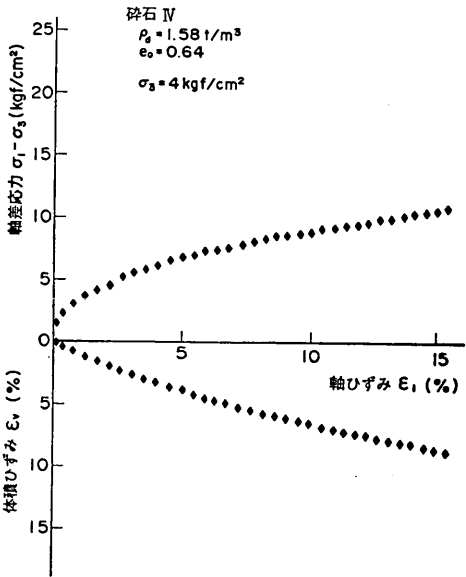


図-41 応力～ひずみ曲線
(碎石Ⅳ, $\rho_a=1.58\text{t/m}^3, e_0=0.64$)

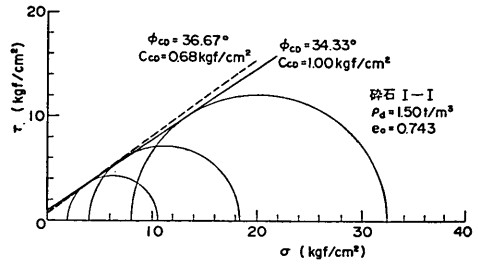


図-42 モールの応力円図
(碎石Ⅰ-Ⅰ, $\rho_a=1.50\text{t/m}^3, e_0=0.743$)

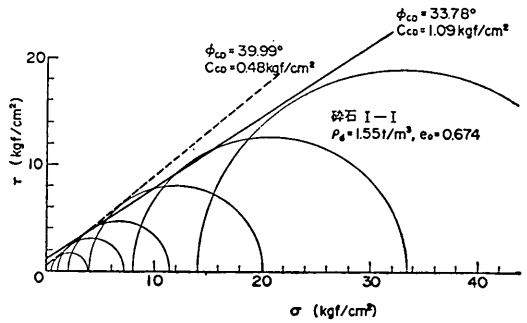


図-43 モールの応力円図
(碎石Ⅰ-Ⅰ, $\rho_a=1.55\text{t/m}^3, e_0=0.674$)

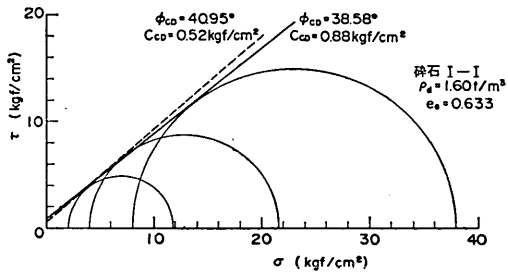


図-44 モールの応力円図
(碎石Ⅰ-Ⅰ, $\rho_a=1.60\text{t/m}^3, e_0=0.633$)

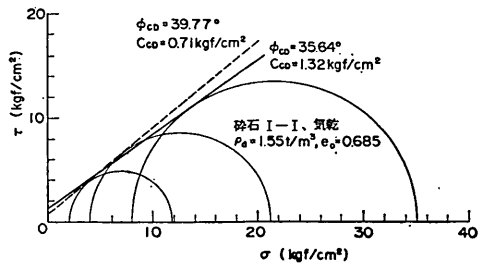


図-45 モールの応力円図
(碎石Ⅰ-Ⅰ, 気乾, $\rho_a=1.55\text{t/m}^3, e_0=0.685$)

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

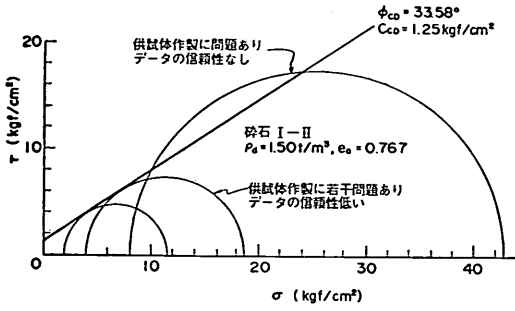


図-46 モールの応力円図
(碎石 I-II, $\rho_d = 1.50 \text{ t/m}^3, e_0 = 0.777$)

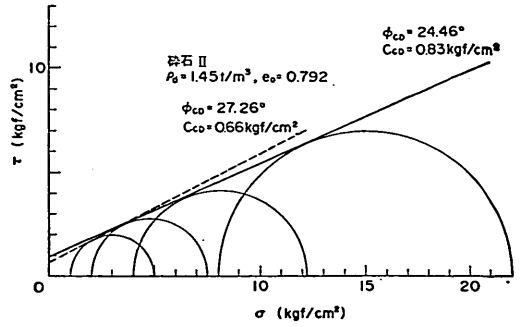


図-49 モールの応力円図
(碎石 II, $\rho_d = 1.45 \text{ t/m}^3, e_0 = 0.792$)

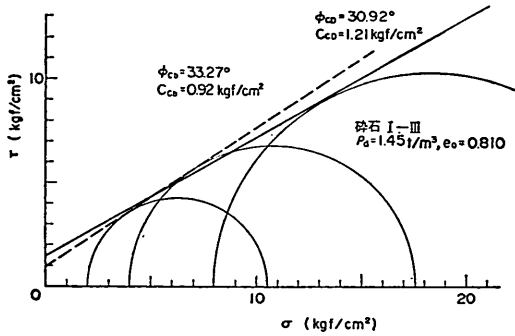


図-47 モールの応力円図
(碎石 I-III, $\rho_d = 1.45 \text{ t/m}^3, e_0 = 0.810$)

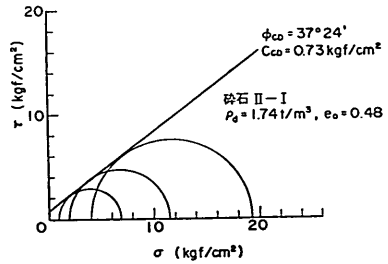


図-50 モールの応力円図
(碎石 III-I, $\rho_d = 1.74 \text{ t/m}^3, e_0 = 0.48$)

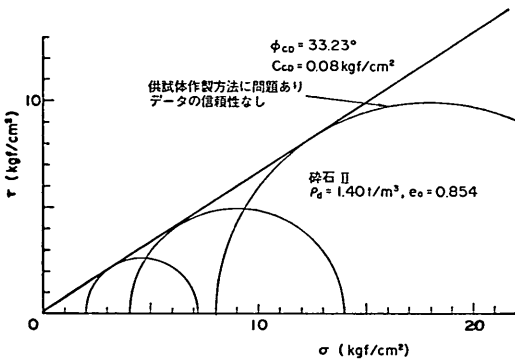


図-48 モールの応力円図
(碎石 II, $\rho_d = 1.40 \text{ t/m}^3, e_0 = 0.854$)

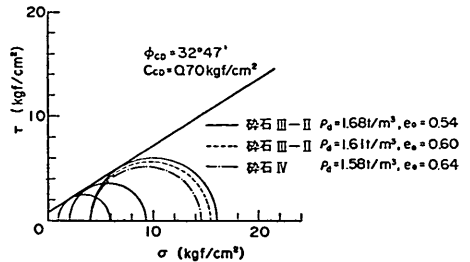


図-51 モールの応力円図
(碎石 III-II, 碎石 IV)

を各図中に記してある。この結果は $C_{CD} \neq 0$ である。また広い範囲の側圧についての試験結果のあるケースについては、低側圧の試験結果だけについて同様に ϕ_{CD}, C_{CD} をもとめて併記してある(図中の破線がこれに対応する)。そしてこの低側圧の試験結果についてもとめたモール・クーロンの包絡線は、高側圧の応力円に接していない傾向がみられる。

三軸圧縮試験後のあるい試験結果から、粒子破碎状況

を示すものとして Marsal の破碎率を式(2)で計算し B_{MIX} (%)とおいた。そして B_{MIX} と密度確認試験で求めている Marsal の破碎率 B_0 (図-28における B_H を B_0 とおく)との差を三軸圧縮試験中に生じた粒子破碎を示す破碎率 B_{SHEAR} (%) (せん断中の粒子破碎率と以下称する)とおき $B_{SHEAR} = B_{MIX} - B_0$ を計算した。その結果については 3.6 考察において言及する。

3.6 力学試験結果の考察

(1) 圧縮性

締めめ試験及び三軸圧縮試験における等方圧縮の過程のデータをもとに碎石の圧縮性について考察する。

今回の締めめ試験結果を考えると、今回の試験方法

は同一の締固め方法によらず、3種類の締固め方法を採っていることに留意する必要がある。すなわち、碎石I-I、I-IIは直径30cmのモールドで突き棒による締固め、碎石III-Iは直径30cmのモールドで振動締固めそして、その他は直径120cmのモールドで振動締固めとなっている。したがって、同一締固め方法によるもの同志でなければ、締固め回数や締固め時間で示す締固めの程度と間げき比で表される締固め効果の関係を比較することはできない。また、粒子破碎を伴った締固めになっているため、締固め方法によって、粒子破碎の程度に差を生じるものと考えられるので、間げき比がほとんど一定となった状態であって、そのときの間げき比が e_{min} とみなせる場合でも、その締固め方法による e_{min} であると考えなければならない。したがって、 e_{min} についても、同一締固め方法による試験結果しか正確な比較はできないということになる。

図-28によると碎石の締固めと粒子破碎は大いに関係があり、試験中に粒子破碎が進んでいることがわかる。そして、データのばらつきのためか、碎石IIと、碎石I-Iに若干、不合理な点がみられるが、総じて、間げき比が小さくなるにつれて粒子破碎が進むという、理解できる結果を示す。また碎石III-IIについて行った水中締固めと気中締固めでは、図-26に示すように、若干締固め曲線に差が出るが、間げき比と破碎率の関係は差がないように見うけられる。

粒度のちがいによる影響をみるため同一試験方法をとった最大粒径がほぼ同じ碎石III-II、碎石IVおよび碎石II（この順に先の方が粒度がよい。）を比較してみる。表-18をみると同一の締固めエネルギーを与えたと考えられる最終状態の間げき比（ $=e_{min}$ ）の値が粒度のよい順に小さい。また、この3つの碎石の $B_u \sim e$ の関係を図-28でみると、粒度のよいものほど、同一の e となるように締固めるのに粒子破碎が少なくてすむという理解できる傾向を示す。

異なる最大粒径で相似粒度を持つ試料を同じ条件で締固めると大きい最大粒径の試料がよく締まるといふ試験結果が多く得られている。これは粒径が大きくなるほど著しい破碎を生ずることに原因するといわれている。しかし、今回の締固め試験では試験ケースが不十分であるので、この傾向の有無の確認はできなかった。

三軸圧縮試験の等方圧縮試験において均等係数の小さい、すなわち粒度の悪い試料の方が圧縮されやすいという傾向は、その時点での粒子破碎の状況を確認していないため断言できないが、締固め試験結果にみられる破碎率と間げき比との関係からみて、粒度の悪いものは粒子

破碎が生じやすく、その結果変形が大きくなるものと推測される。

以上を要約すると以下のとおりである。試験用碎石の締固めや等方圧縮などによる体積変化は粒子破碎と密接に関係している。粒度の悪いほど、粒子破碎しやすいため同一等方圧縮のもとでは圧縮変形しやすい。また同じ締固め方法によって得られる最小間げき比は、粒度の悪い方が粒子破碎量が大きいにもかかわらず大きいという傾向をもつ。このような特徴は現地捨石材についてもあてはまるものと考えてよい。

(2) せん断中の挙動

碎石の三軸圧縮試験におけるせん断中の挙動には、次のような特徴がみられる。

①せん断中の軸差応力 \sim ひずみの関係は、図-31 \sim 図-41を微細にみると滑らかに変化しておらず、軸ひずみの増加に伴って、軸差応力が段階的に増加していくのがみられる。

②軸差応力と軸ひずみの曲線は明瞭なピークを示すことなく、側圧が 2 kgf/cm^2 を越える場合には軸ひずみが15%を越えても軸差応力が定値とならず、さらに漸増する傾向を示す。

③側圧の小さな範囲の少ない試験結果（碎石I-Iの $e_0 = 0.676$ 、碎石I-Iの $e_0 = 0.633$ 、碎石I-Iの気乾等の $\sigma_3 \leq 2 \text{ kgf/cm}^2$ および碎石III-Iの $\sigma_3 = 1 \text{ kgf/cm}^2$ ）を除けば正のダイレイタンスが認められず、常に体積が収縮する方向にあった。

このような特徴はフィルダムに用いるロック材のような粒度のよい粗粒材料では一般に認められないものである。

今回の試験用碎石のなかで最も相対密度が大きく、かつ、試験碎石のなかで最も粒度のよい、碎石III-Iにおいてもなお、上述の傾向がみられることから、他の碎石の相対密度の大きい範囲についてもこのような特徴がみられるものと推定できる。

試験用碎石のこのようなせん断中の挙動の原因は、均等係数が1.2 \sim 2.8であり粒度が非常に悪いことによるものであると推測される。つまり、同一の最大粒径をもつ供試体において、均等係数の小さい試料は、均等係数の大きいそれに比較して構成粒子の数が極端に減少する。したがって粒子と粒子の接触点の数が著しく少なくなり、個々の粒子に応力集中が生じやすくなることからせん断中の粒子破碎が大きくなることが容易に推測できる。母岩が硬質砂岩や花こう岩であるフィルダム材料を、今回と同じ大型三軸圧縮試験でせん断した場合、せん断中の粒子破壊率は側圧が 4 kgf/cm^2 程度のとき7 \sim

8%未満であることが多いと聞いている。これに対して、今回の碎石では、10%以上、碎石IIの場合には約35%にまでなっている。(せん断中の粒子破碎率については、後述 (pp. 98~100) において、詳しく説明されており、図-55にその値をみることができる。) この原因は、碎石粒子自体が碎岩されたばかりで弱点を内包しているため、多少の応力集中に対して弱く破碎されやすいなどという他の要因もあるかも知れないが、前述のように粒度が悪いため粒子に応力集中がおこることが支配的な原因と考えられる。

軸差応力と軸ひずみの関係が階段状に変化しているのは、応力集中で構成粒子が破碎され、構成粒子が再配列される現象が、粒度がよい場合には少ないし、また、供試体の構成粒子が多ければ目立たないのに、粒度が悪く構成粒子が少いために軸ひずみの変化としてはっきりと現われることによるものと考えられる。そして、このような粒子破碎が進行しつづけ、粒子の再配列によって体積が減少するためダイレイタンスは認められず、したがって、試験結果で得られたピーク値がみとめられない軸差応力-軸ひずみ関係になったものと考えられる。

試験用碎石のこのような挙動の特徴は、現地捨石材においても、当然みられるものであると推測される。

(3) せん断強さに及ぼす拘束圧の影響

図-42~図-51に示したモールの応力円群から次の特徴が知られる。モール・クーロンの破壊規準を適用し、 ϕ_{CD} 、 C_{CD} を計算すると $C_{CD} \approx 0$ という結果が出ている。また、破壊包絡線が直線ではなく、横軸が増加するにしたがって、勾配が小さくなる曲線であるという傾向がみられる。このような特性をもつせん断強さについて議論するには、原点からモールの円に引いた接線角度 ϕ_0 を指標に用いることが有効であり、一般に行われる。図-52に示すように ϕ_0 は、(a)図のように上に凸なモールの破壊包絡線を持つ場合、拘束圧の増加に伴い ϕ_0 の値が次第に減してゆく。また、(b)図のようにモール・クーロンの規準 $\tau = C_d + \sigma \tan \phi_d$ により強度が表示できるときにも、 $C_d \approx 0$ ならば拘束圧の増加に伴い ϕ_0 は減少し、 ϕ_0 は ϕ_d 近づいてゆく。(図-52では排水試験の結果であることを示す C_d 、 ϕ_d を用いているが、これはこれまで使ってきた C_{CD} 、 ϕ_{CD} と同じである。) なお、 $C_d = 0$ で $\tau = \sigma \tan \phi_d$ で強度表示できるときは $\phi_0 = \phi_d = \text{const.}$ である。式であらわせば次式のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} \phi_0 &= \arcsin \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_f \\ \text{または } \sin \phi_0 &= \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \right)_f \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

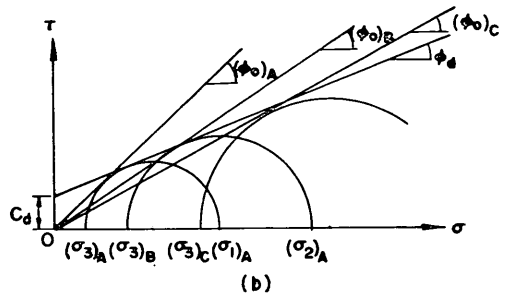
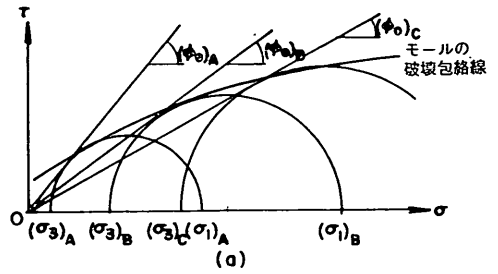


図-52 モールの破壊包絡線およびモール・クーロンの破壊規準と ϕ_0 の関係

ここに、サフィクス f は破壊時の値であることを示す。

図-53、図-54は今回の試験結果から ϕ_0 または $\sin \phi_0$ と拘束圧 σ_3 との関係を整理して示したものである。同図から、 ϕ_0 は σ_3 が大きくなるとともに小さくなるのが明瞭である。数値であげれば、 $\sigma_3 = 1 \text{ kgf/cm}^2$ で $\phi_0 = 41^\circ \sim 49^\circ$ であるのが $\sigma_3 = 10 \text{ kgf/cm}^2$ となると $\phi_0 = 28^\circ \sim 40^\circ$ と 10° 前後も低下している。

このような、 ϕ_0 に与える拘束圧の影響については、砂やロックフィル材についてすでに知られていることであり、第9回土質基礎工学国際会議のState of the Art Report (ラッド・フット・石原・シュロッサ・ポウラス、1977)において「圧密排水試験で求められる最大内部摩擦角 ϕ_0 の値は、拘束圧が増加するにしたがい減少する。この効果はロックフィル材料、れき、そして密詰め砂ほど著しく(σ_3' の10倍の変化に対して ϕ_0 は $5^\circ \sim 10^\circ$ 減少)、一方、非常に緩詰め砂ではほとんど ϕ_0 は変化しない」と述べられている。今回の碎石では、拘束圧の10倍の変化に対する ϕ_0 の減少は $9^\circ \sim 13^\circ$ であったが、これは上述の $5^\circ \sim 10^\circ$ よりも大きな値である。また、Leps (レップス)が1970に行ったロックフィル材料の強度のレビュー¹³⁾によれば、 ϕ_0 の減少割合は、拘束圧の10倍の変化に対して約7°である。このようなことからロックフィル材などに比較して今回の碎石は拘束圧の

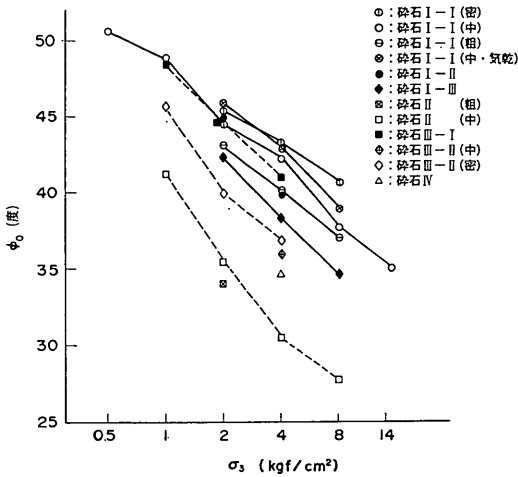


図-53 ϕ_0 と σ_3 の関係

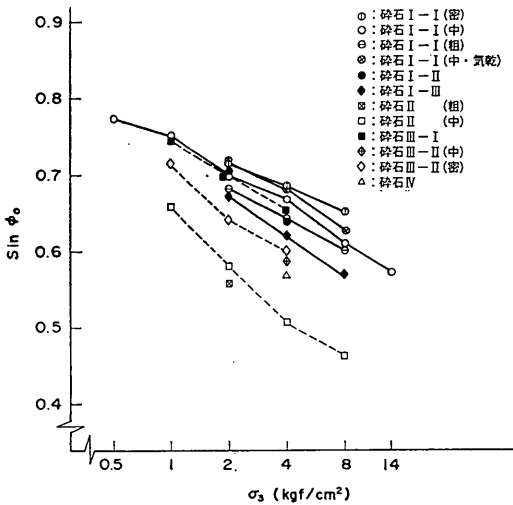


図-54 $\sin \phi_0$ と σ_3 の関係

変化に対するせん断強さの減少が大きいものであったといえよう。

ところで、この ϕ_0 の減少する現象は、破壊時のダイレイタンスー特性の変化および粒子破碎の増大と密接な関係があると考えられている¹⁴⁾。今回の試験結果についてこの点について調べてみる。

まず、せん断強さとせん断中の粒子破碎の関係を調べる。ここで、せん断中の粒子破碎をあらわす指標として p.95, 右1.6で定義しているせん断中の粒子破碎率 B_{SHEAR} をとることとする。図-55は今回の三軸圧縮試験におい

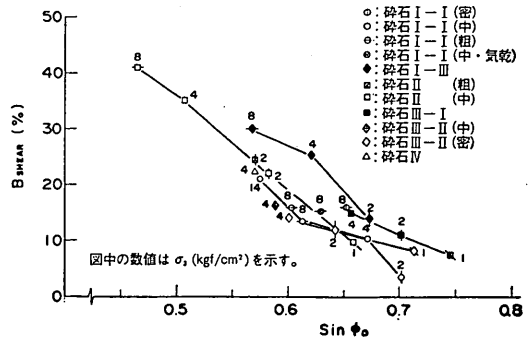


図-55 $B_{SHEAR} \sim \sin \phi_0$ の関係

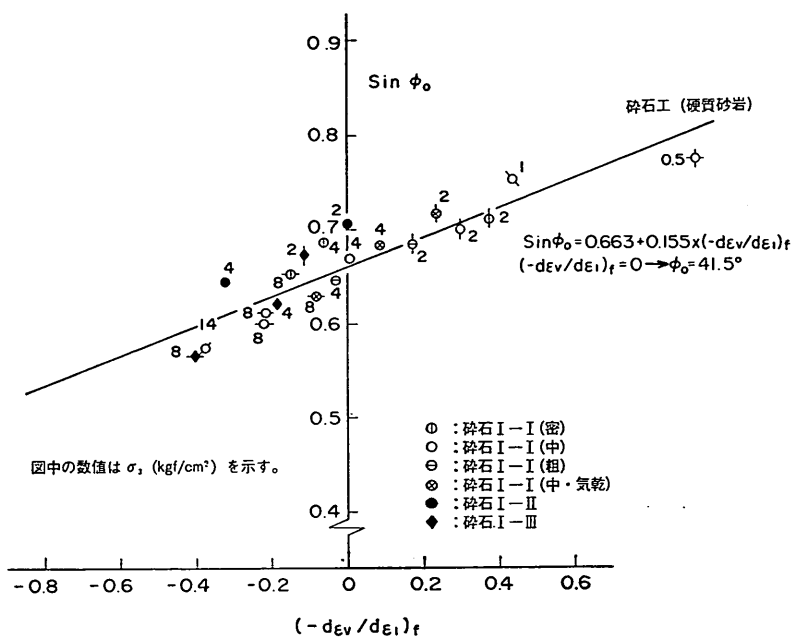
て、試験後ふるい試験を行ったすべてのケースについて、 B_{SHEAR} と $\sin \phi_0$ の関係を整理したものである。同図をみると B_{SHEAR} と $\sin \phi_0$ には、右下りの相関がみられる。すなわち、せん断中の粒子破碎が多ければそれだけ強度も低いということである。そして、粒子破碎は拘束圧の大きい程多いということが同図中においてわかることから、拘束圧増大にともなう $\sin \phi_0$ の低下はせん断中の粒子破碎が大きくなるが一因であることがわかる。

一方、破壊時のダイレイタンスー特性を表す指標として、破壊時のダイレイタンスー比 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ を採り、これと $\sin \phi_0$ の関係を整理して、図-56に示す。同図から $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ と $\sin \phi_0$ との間には、相関関係があることがわかる。すなわち、 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ が大きいほど、 $\sin \phi_0$ が大きいという関係であり、理解しうる結果である。そして、図-56で拘束圧が増すにしたがって、図-56上をプロットした点が左下りに変化していることから、拘束圧が増すと $\sin \phi_0$ が小さくなるのは、拘束圧が増すと破壊時のダイレイタンスー比が低下するという現象に関係があるということがわかる。

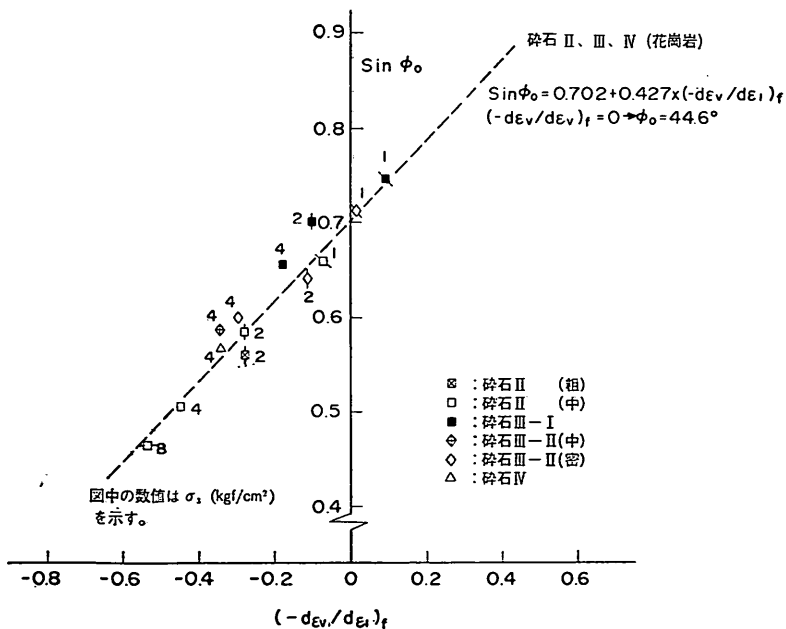
さらに、図-56の(a)と(b)のおおのについてみると、母岩の材質が同じ砕石は、初期間げき比、粒度のちがいににもかかわらず、比較的狭い領域内にあつまっていることがわかる。図中の直線は母岩の同じ砕石すべての点を最小二乗法で近似した結果である。

$(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ の値そのものに着目すると、それは拘束圧の小さいごく少ないケースを除いて、負の値を示している。これは、ダイレイタンスーを起こそうとする状態になっても、粒子破碎がおきてしまうために、結果的にそうならないという現象がおきていることを裏づけるものと考えられる。つまり、粒子破碎がおきやすいということであり、その結果 ϕ_0 の拘束圧依存性が他の粒状材

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察



(a) 砕石 I (硬質砂岩)



(b) 砕石 II, III, IV (花こう岩)

図-56 $\sin \phi_0$ と $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_x$ の関係

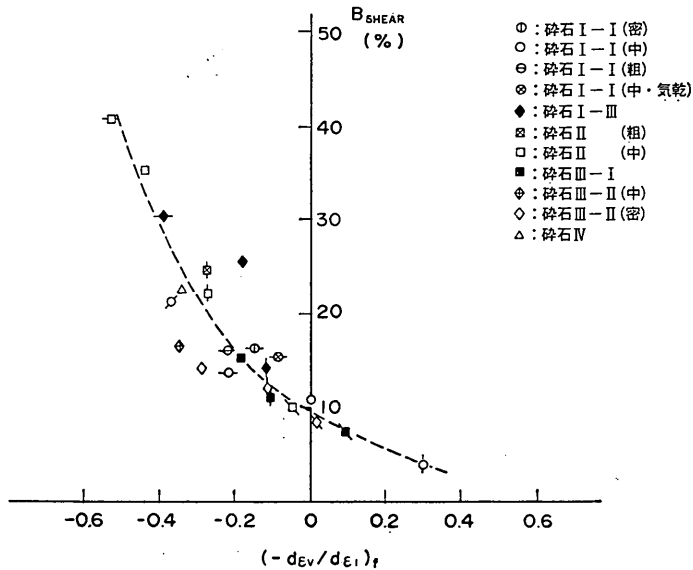


図-57 $B_{SHEAR} \sim (-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ の関係

料に比較して大きいということと結びつくものである。その原因は粒度の悪さであろうと推測される。このように破壊時のダイレイタンシー比もせん断中の粒子破碎率も、ともに、 $\sin \phi_0$ と相関があり、 $\sin \phi_0$ の拘束圧依存に大いに関係があることがわかった。ところで破壊時のダイレイタンシー比とせん断中の粒子破碎率も互に無関係ではないと考えられる。それはごく簡易に考えて、碎石粒子が他の碎石粒子をのりこえようとしてダイレイタンシーをおこそうとする状態は粒子破碎をより起しやすい状態であると考えることによっても推測がつく。そこで、三軸圧縮試験後にふるい試験を実施したすべてのケースについて B_{SHEAR} と $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ の関係を整理して図-57を得た。この図をみると、興味深いことに、母岩が異なり、粒度や初期間げき比 e_0 が異なるにもかかわらず、ごく狭い範囲にプロットされており、 B_{SHEAR} と $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f$ の間にはほとんど一定の関係があるとみなせる程度にある。図中の破線は、平均的な関係を示すと思われる曲線を大胆に引いたものである。 $(-d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_f = 0$ の状態における B_{SHEAR} は約10%になっている。

次上のことを要約すると次のようになる。

碎石の三軸試験結果によれば $\sin \phi_0$ はせん断中の粒子破碎率が大きくなると、ほぼ直線的に小さくなる傾向にある。また、破壊時のダイレイタンシー比が小さいほど、 $\sin \phi_0$ は小さくなる。そして拘束圧が大きくなる程、粒子破碎率は大きくなり、破壊時のダイレイタンシー比は小さくなる事実から、この2つが $\sin \phi_0$ または ϕ_0

の応力依存性に大きく関係していることが確認された。また、粒度が悪いためせん断中の粒子破碎が生じやすく、その結果、ダイレイタンシー比が大きくならないということが、 $\sin \phi_0$ または ϕ_0 の拘束圧依存性を他の粒状材料より大きくしているものと考えられる。このような特徴は現地捨石材についてもあてはまると考えてよい。また、今回の碎石に関しては、岩の種類、最大粒径、均等係数、初期間げき比などの異なる試料について、せん断中の破碎率と破壊時のダイレイタンシー比は、ほぼ一定の関係にあることがわかった。

(4) 間げき比とせん断強さ

間げき比で表される、粒子の詰まり具合がせん断強さに大きく関係することは周知のとおりであり、今回の試験結果をもとに、母岩の種類や粒度のちがう碎石のせん断強度の特徴を吟味するにも、間げき比を考慮しなければならないのは当然である。間げき比と一口に言っても、三軸圧縮試験においては少なくとも、初期間げき比 e_0 、圧密後間げき比 e_c 、破壊時間げき比 e_f の三つの間げき比を規定することができる。どの間げき比を粒子の詰まり具合を表わすパラメータとして採るのが適切であるのかは必ずしも定まっていない。ここでは、 e_0 と e_f をとりあげて以下の検討を行う。

図-58～図-60は $\phi_0 \sim e_0$ 、 $\sin \phi_0 \sim e_0$ 、および $\sin \phi_0 \sim e_f$ の関係を硬質砂岩を母岩とする碎石 I についてまとめたものである。すなわち同一母岩で、均等係数が1.2～1.3の相似粒度をもつグループの結果である。

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

図-61～図-63は花こう岩を母岩とする碎石II, III, IVについて、同様にまとめたものである。図-58～図-63中に記入してある破線は碎石I-Iの乾燥状態の試験例は除いて最大粒径、粒度組成などの違いについて詳細な吟味をせず同質のデータとしてみて、各拘束圧ごとに点がうまくのるように大胆に引いたものである。そして、その曲線は右下がりの傾向を示す。すなわち、間げき比が大きくなればせん断強度が低下するという土質工学の常識と一致した傾向にあるということである。また、硬質

砂岩のグループは花こう岩のグループに比較して大きなせん断強さをもっているということがわかる。

間げき比が粒状材料のせん断強度に及ぼす影響については古くから知られており、せん断強さを間げき比の関数で表そうとする多くの研究がある¹⁵⁾。ここでは、そのなかから最上の式を取りあげて、今回の試験結果についての適用性を調べてみることにする。最上は三軸圧縮試験で得られる内部摩擦角 ϕ_0 (式-(3)参照)と間げき比 e の間に次式の関係があることを理論的に導いている¹⁶⁾。

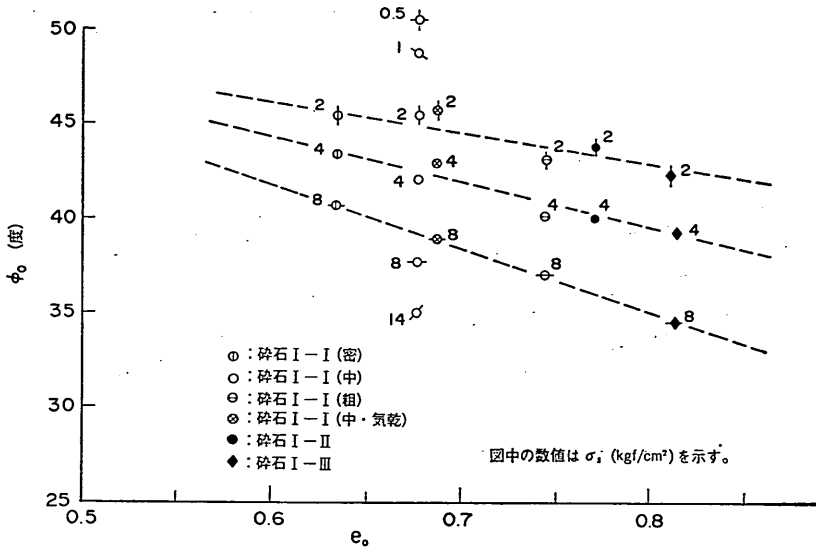


図-58 ϕ_0 と e_0 の関係 (碎石 I, 砂質砂岩)

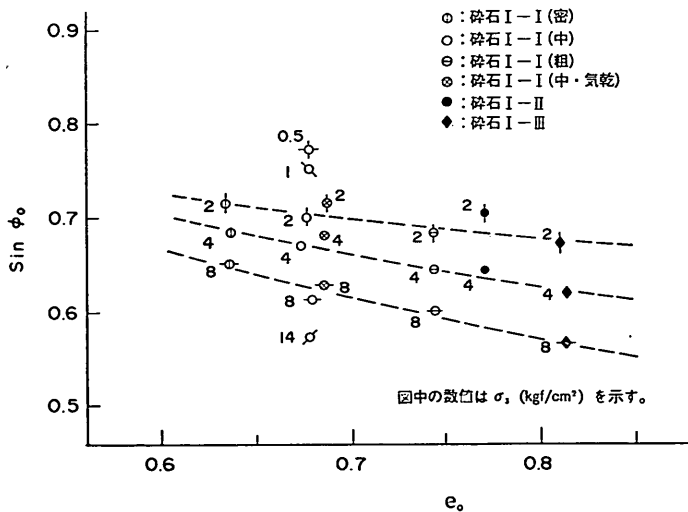


図-59 $\sin \phi_0$ と e_0 の関係 (碎石 I, 砂質砂岩)

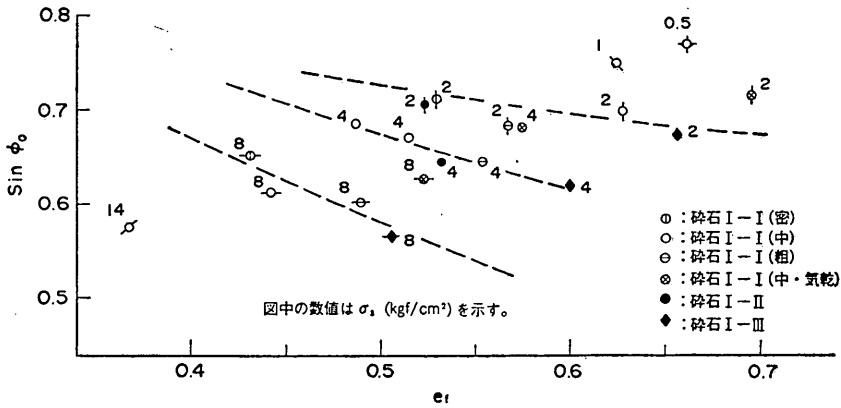


図-60 $\sin \phi_0$ と e_f の関係 (砕石 I, 砂質砂岩)

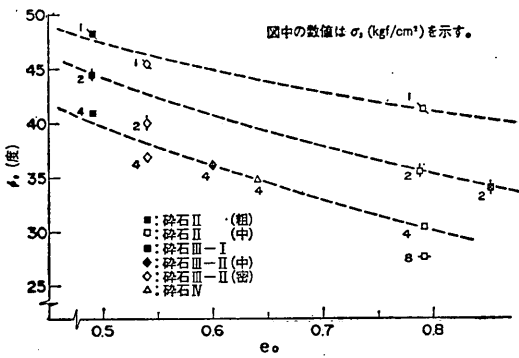


図-61 ϕ_0 と e_0 の関係
(砕石 II, III, IV, 花こう岩)

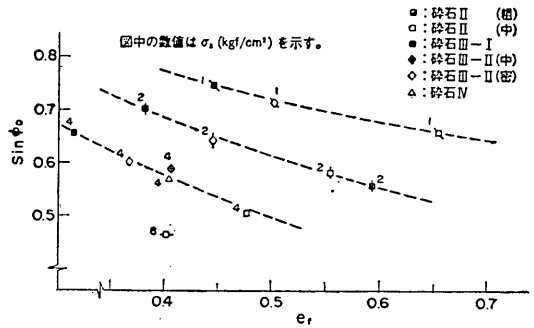


図-63 $\sin \phi_0$ と e_f の関係
(砕石 II, III, IV, 花こう岩)

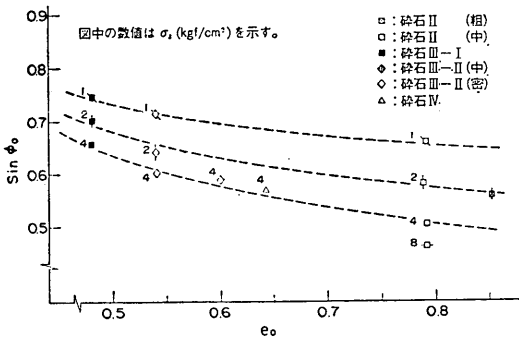


図-62 $\sin \phi_0$ と e_0 の関係
(砕石 II, III, IV, 花こう岩)

$$\sin \phi_0 = \frac{3k_t}{2(1+e) + k_t} \quad (4)$$

ここに、 k_t は通常、最上の常数と呼ばれ、材料によって定まる常数である。また間げき比 e は、最上の理論に

よれば、破壊時の間げき比 e_f である。ただ、今回の試験結果では多くのケースにおいて軸差応力～軸ひずみ曲線が明瞭なピークを示さないで、慣用としている軸ひずみ15%時を破壊状態として処理して、 $\sin \phi_0$ と、 e_f をもとめている。したがって、最上の理論を正しく適物しているとはいいがたいが、工学的には有意であると考えられる。また、 e_f は試験を行った後でなければ知ることのできない値であるので、試験まえに $\sin \phi_0$ の特性をとらえようとする実用面においては極めて不便である。そこで、初期間げき比 e_0 を式(4)の e として、 k_t について吟味することも行われる。ここでは、 $e=e_f$ として求めた最上の常数を k_{t_f} 、 $e=e_0$ として求めた最上の常数を k_{t_0} とおくこととする。

三軸圧縮試験のすべての結果に式(4)を適用し、 k_{t_f} と k_{t_0} を算出し、拘束圧 σ_3 で整理すると、図-64と図-65となる。これらの図をみると、それぞれの母岩の種類ごとに点群が集結していることがわかる。特に初期間げき比で求めた k_{t_0} の方が点群のまとまりがよく、図中でほぼ

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

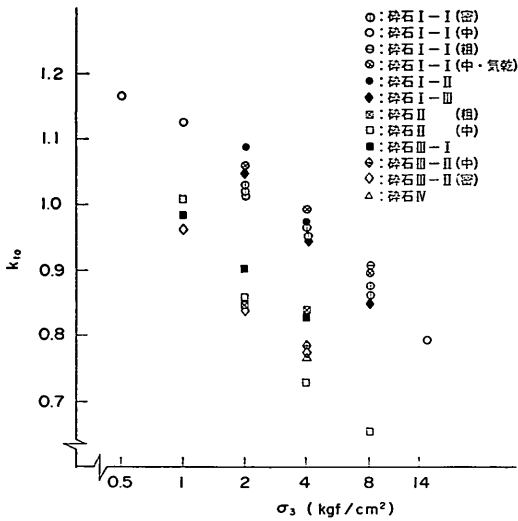


図-64 $k_{10} \sim \sigma_3$ の関係

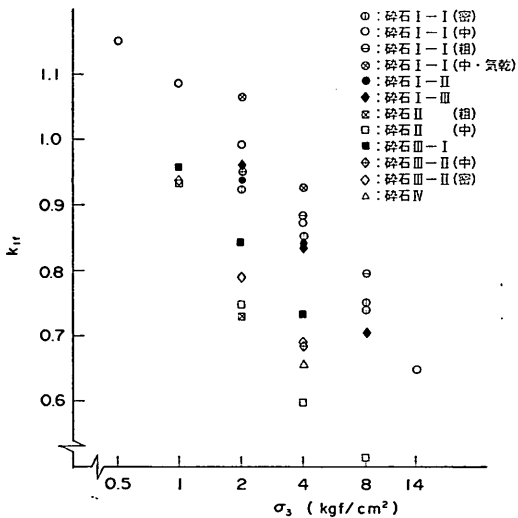


図-65 $k_{1r} \sim \sigma_3$ の関係

直線上にのっていることがわかる。すなわち、 k_{10} と拘束圧 σ_3 の関係は次式で表現できることを示している。

$$k_{10} = n_1 - n_2 \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A} \quad (5)$$

ここに n_1, n_2 : 正の定数

P_A : 大気圧 (kgf/cm²)

ただし、 $P_A \approx 1 \text{ kgf/cm}^2$ として、以下取扱う。このように k_{10} で整理したものの方がまとまりがよいということは、最上の理論の真意はともかく、実用的に取扱いやすい初期間げき比でデータを処理できる点からみても有用

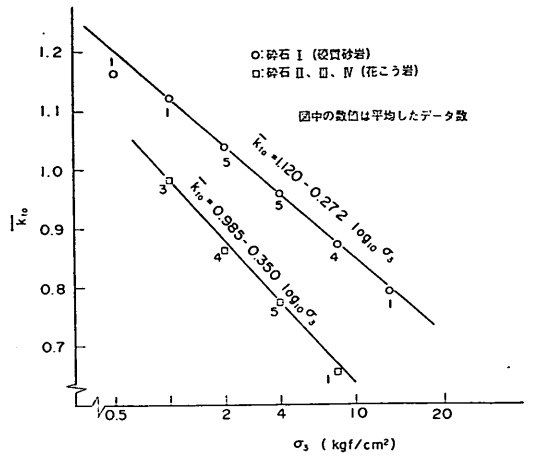


図-66 $k_{10} \sim \sigma_3$ の関係

である。本報告では以降最上の定数として k_{10} をとりあげていくこととする。ここで、各母岩の種類毎に平均的な k_{10} の値を知るために、同一拘束圧についての k_{10} の平均値 (\bar{k}_{10} とおく) を計算して、プロットしてみると図-66になった。ただし、砕石 I-I の気乾状態の実施ケースは計算から除外している。図中の番号は平均値を計算するのに用いたデータの個数である。図-66 から $\sigma_3 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ を除いて \bar{k}_{10} は式(4)で表されるきれいな直線上にのっていることがわかった。各母岩の種類ごとの n_1, n_2 値は図中に示した式で判る。

図-67 と図-68 に式(5)の形で得られた \bar{k}_{10} を式(3)の k_{10} に代入して $1/\sin \phi_0$ と $1+e_0$ の関係を σ_3 ごとにもとめ図示した。同図中には実験結果もプロットしてある。

図-67 をみると砕石 I は、最上の定数 k_{10} を用いると $\sigma_3 < 1 \text{ kgf/cm}^2$ や $\sigma_3 \geq 8 \text{ kgf/cm}^2$ では若干はずれてきている傾向がみられるが、おおむね $\sin \phi_0$ と e_0 の関係を近似できるものと判断される。また、最大粒径の大きい砕石 I-II, I-III も砕石 I-I と同じ k_{10} ではほぼ近似できるのが注意を引く。

今回の砕石のように粒度が悪く、粒子破碎が多く、そのため軸差応力～軸ひずみ関係にピークが生じないような材料の三軸試験結果についても、最上の定数を用いて、 $\sin \phi_0$ と e_0 の関係が近似できるということは有意なことである。

図-68 に示した母岩を花こう岩とする砕石グループは均等係数、最大粒径などが異なっており、かつ実験ケースが多くないので、図-67 の砕石 I のようなはっきりしたことはいえないが、 \bar{k}_{10} を使って計算した $1/\sin \phi_0 \sim (1+e_0)$ の関係をあらわす直線からのはずれ具合を比較

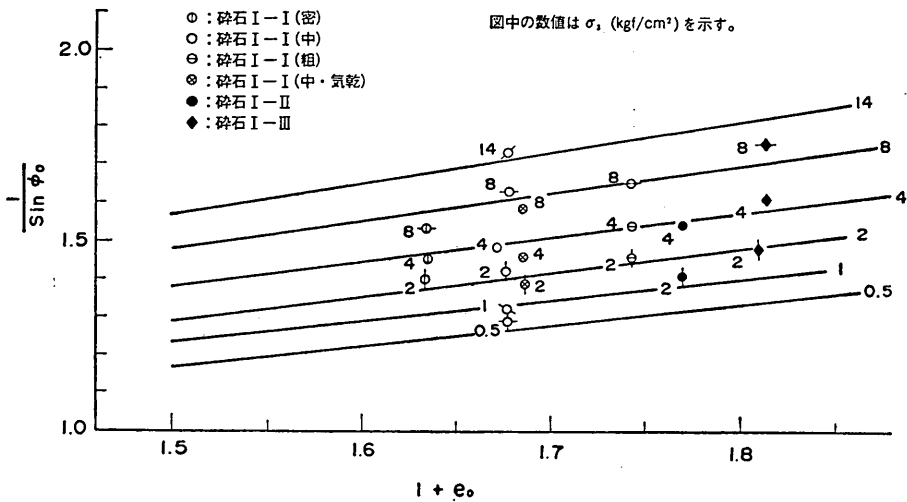


図-67 $1/\sin \phi_0$ と e_0 の関係 $-k_{e0}$ による近似 (砕石 I, 硬質砂岩)

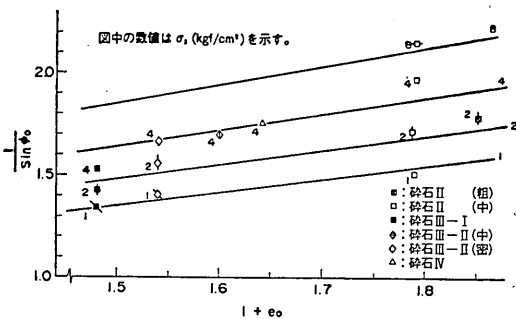


図-68 $1/\sin \phi_0$ と e_0 の関係 $-k_{e0}$ による近似 (砕石 II, III, IV, 花こう岩)

することにより、次のような傾向をうかがうことができる。

最大粒径が余りちがわない砕石 II, 砕石 III-II, 砕石 IV の間での比較をすると粒度の最も悪い砕石 II と最も良い砕石 III-II の間では、 σ_3 が 4 kgf/cm^2 になるといくぶん砕石 II の方が $1/\sin \phi_0$ が大きい、すなわちせん断強度が小さい傾向にあるが、それ以下の σ_3 ではほとんど差がない程度である。また、中間的粒度組成をもつ砕石 IV は、砕石 II とほとんど差のないせん断強度をもつようである。したがって三つの砕石のせん断強さは、ほとんど差がないようである。相似粒度で最大粒径が 63.5 mm と 200 mm と約 3 倍違う砕石 III-I と砕石 III-II では、 $\sigma_3 \geq 2 \text{ kgf/cm}^2$ では最大粒径の小さな砕石 III-I がかなりせん断強度が大きい傾向を示す。この事は砕石 I-III が砕石 I-I とほとんど同じせん断強度特性を有していること

と対照的である。このことは、粒度が良い方が最大粒径の差によるせん断強度の差が生じやすいということを示唆するようにも思われるがはっきりしない。

硬質砂岩グループと花こう岩グループを比較した場合は前者の方がせん断強度が大きい傾向がある。それは、同じ粒度である砕石 I-III と砕石 II を比較すればよくわかる。この原因としては、引張強度が 2~3 倍ちがうということに代表される岩質のちがいが岩質に帰因する形状のちがいで (p, q ではほとんど差がなく、区別できないが、硬質砂岩の方が花こう岩のグループのものに比較して、角張った形状を呈していた) などが考えられる。

(5) 捨石材のせん断強さ

実用設計において、捨石材は粘着力成分 $C_d=0$ として $\tau = \sigma \tan \phi_d$ の形でせん断強度 $\tau (\text{kgf/cm}^2)$ を規定している。ここに、 σ はせん断面上の直応力 (kgf/cm^2) である。そして一般に $\phi_d = 40^\circ$ の値をとることが多い。つまり、拘束圧に頼らない円部摩擦角 ϕ_d により強度を規定しているのである。

一方、今回の砕石の三軸圧縮試験の結果によるモールの応力円群をみると、破壊拘絡線は直線とならない傾向がみられること、あえて、モール・クローンの破壊規準を適用して C_{CD}, ϕ_{CD} をもとめると $C_{CD} \approx 0$ であることが明らかになっている (C_{CD}, ϕ_{CD} は C_d, ϕ_d と同じ)。したがって現地の捨石材にもこのような特徴があると考えてよい。つまり、実用設計におけるせん断強度と異なる特性を有するということである。

ここで、まず、今回実施したような三軸圧縮試験で得られたせん断強さが、試験用砕石と相似粒度をもつ現地

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

捨石のせん断強さをそのまま示すものであるという仮定をおく。そして、実用設計で用いられるせん断強さが現地捨石のせん断強さと比較して問題ないものとなっているかという点について考察を加える。

今回の試験用碎石のモール・クローンの破壊規準では広い拘束圧の範囲についてもとめた ϕ_d が碎石Ⅰのグループでは $30^\circ\sim 38^\circ$ の範囲、碎石Ⅱ、碎石Ⅲのグループでは $25^\circ\sim 33^\circ$ の範囲であり、実用設計における ϕ_d の値である 40° より小さい。また、その値は、ダム用のロックファイル材¹⁸⁻¹⁹⁾などに比較しても小さく、碎石Ⅱ、碎石Ⅲのグループは特に小さな値となっている。一方、現地の捨石を直接試験して ϕ_d を検証した実績はないのであるから、実用設計にあたって現地捨石を過大に評価しているのではないかという疑問もいだかれる。しかし、以下の点を考えれば、必ずしも過大評価をしているということにはならないと判断される。

第1には次のことがあげられる。原点を通るモールの破壊円の接線の角度 ϕ_0 は設計に用いる ϕ_d と対比して考えることができるものである。そして図-53でみると $\phi_0 \leq 40$ となっているのはすべての σ_3 の範囲ではないことがわかる。そして、 $\sigma_3 \leq 2\text{kgf/cm}^2$ 以下では、ほとんどの碎石が、 $\phi_0 \geq 40$ となっていることがわかる。一方、実際の捨石基礎の安定問題においては、基礎内部の応力状態を考えると拘束圧のそう大きな範囲におけるせん断強さが支配的になるとは考えられないのである。

第2に次のことをあげることができる。実用設計における計算法では実際の現象を正確には再現していないモデルを扱っている。そのため計算法(手法と安全率)とせん断強さ(せん断強さの定義および強度定数値)とは一対のものとして考える必要がある。したがって、真の捨石材のせん断強さと実用設計に用いるせん断強さとは同一でなければならないとはいえない。

同一のせん断強さをを用いた場合の、設計法の違いによるせん断抵抗評価の差異が生ずる例として、円形すべり計算法におけるチエボタリオフ法とビショップ法の安全率の違いがあげられる²⁰⁾。そして、通常は ϕ 材のせん断抵抗による抵抗力を過小に評価するチエボタリオフ法を用いて設計がなされている。

また、設計法と一対となったせん断強さを採っている例として、偏心傾斜荷重の計算方法である片山・内田法をあげることができる。同法は摩擦円法を用いた極限平衡状態の力の釣合いにもとづく、支持力解析法であるが、この方法では、波浪時や地震時における被災例との照合の結果、捨石材をはじめとする、 ϕ 材の内部摩擦角を通常用いる値より $5^\circ\sim 10^\circ$ 大きい値をとることを提示

している²¹⁾。つまり、片山・内田の方法による検討には現地の捨石の ϕ_d の値として、実用的な評価がすでになされている値を用いているということである。

ところで、前述の三軸圧縮試験結果が現地の捨石のせん断強さをそのまま示すものであるという仮定は正しくない。その理由のいくつかを以下に述べる。

まず第1に三軸圧縮試験の結果は、試験法そのもののもつ限界のため、現地のせん断強さとするには問題がある²²⁾。たとえば、三軸圧縮試験の応力状態と現地の応力状態とは同じではないことがあげられる。現地は三軸圧縮状態とちがう平面ひずみに近い状態にある。そして、平面ひずみ状態の方が内部摩擦角が大きい。ロックファイル材について試験した例では、 5° 程度²³⁾あるいは 15° 程度²⁴⁾という報告がある。また砂の例では、多くの報告の結果をまとめると緩詰め砂で $1.5^\circ\sim 4^\circ$ 、密詰め砂では $2.5\sim 8^\circ$ となっている²⁵⁾。

第2に粒子寸法の問題があげられる。今回の試験用碎石は捨石材と相似な粒径をもつのである。しかし、捨石と試験用碎石の最大粒径は違っていることをあげなければならない。今回使用した供試体直径120cmの大型三軸圧縮試験機は現状の国内で最大規模のものである。しかし、このような大型の試験機を用いても、試験できる試料の最大粒径は一般に供試体直径の $1/4\sim 1/8$ とされており、せいぜい300mm程度であろう(今回の碎石は、粒度が悪いことから $1/6$ におさえ最大粒径を200mmとした)。しかし、現地の捨石材の最大粒径は1mをこえるものも存在する。このために、最大粒径がせん断強度に及ぼす影響の把握はこの分野における大きなテーマであり、多くの報告がある。これらについて大勢は「同じ間げき比で比較すれば、大きい最大粒径の試料は一般に小さなせん断強度を持ち、その原因は、粒子破砕の難易差にある」と要約されている²⁶⁾。例としてMarachiらが泥質岩の碎石について行った三軸圧縮試験結果を図-69²⁷⁾に示す。同試験の試料は $U_c \approx 8$ 、 $e_0 \approx 0.5$ で、最大粒径は供試体直径の約 $1/6$ となる供試体である。(図-69において最大粒径が大きくなると、 ϕ_0 の変化が小さくなっている傾向がみられるが、このような傾向が捨石材についてもいえるならば、捨石材における粒径の違いによるせん断強さの影響が少ないことを示すものとして救いがある。) 今回の試験の範囲では、碎石Ⅰについては最大粒径の差による $\sin \phi_0$ の変化は大きくなかった。一方、碎石Ⅲでは最大粒径の差が比較的大きかった。この結果は、粒度の悪いものでは差がなくて、粒度がよくなると最大粒径の差が生じるということを示すものなのか、試験結果のばらつきあるいは母岩の材質が関係する

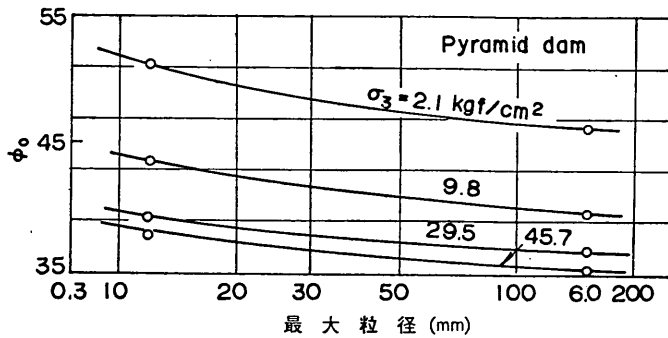


図-69 ϕ_0 に及ぼす最大粒径の影響 (Marachi, et al. 1969)

ためにそうは云えないのか、現状で結論を出すことはできない。とにかく、現状では、少なくとも捨石材のような粒度の悪い粗粒材料の最大粒径によるせん断強さに与える影響の問題が解決されていないといえよう。

第3に、捨石材の粒子の詰まり具合の把握が非常に難しいという点があげられる。まず、現地捨石の間げき比がどの程度かについて把握されていないので、現地間げき比に対応した試験結果を得れないということがあげられる。これは、現地において間げき比を調査することが極めて難しいということによる。また、同一の方法で相似粒度の材料を締固めると最大粒径の大きいものが粒子破碎を生じやすいために締固まりやすいこと、締固め方法によって粒子破碎のしかたがちがってくることなどの理由により室内試験によって、現地捨石の締まり具合を推定することが無理であるということにもよる。

以上のことを要約すると、三軸圧縮試験結果によって現地捨石材のせん断強さを推定することには多くの問題がある。そして、仮に現地捨石材のせん断強さが正確に把握できたとしても、たとえば捨石基礎をふくむ構造物の安定解析などを行う場合の手法によって、せん断抵抗の評価が変わってくる。そのため、その手法に用いるべき捨石材のせん断強さの設定をさらに考える必要がある。したがって今回の試験結果だけで、現状における実用的な計算手法と一対になっている捨石材のせん断強さの妥当性についてうんぬんするには至らない。

しかしながら、一方においては、数値計算の発達とともに、複雑な破壊規準や変形特性を定量化し、捨石基礎をふくむ構造物の安定解析によって、従来の塑性平衡状態における力の釣合い計算のような域をふみだした複雑な設計や、研究的な検討を必要とする現状にある。このような解析に必要なデータは、前述のような問題はあるにしろ三軸圧縮試験結果を用いるのが極めて有効であるという現状にある。ここで、そのような場合において、

三軸圧縮試験によって得られたせん断強さの特徴を反映させた、実用的なせん断強さすなわち破壊規準の設定方法を検討する。

ここで、提示しようとする破壊規準は①同一材料については、初期間げき比 e_0 をパラメータにとることにより、粒子の詰り具合の違いを考慮して一元的に扱える。②拘束圧 σ_3 による ϕ_0 あるいは $\sin \phi_0$ の変化を考慮したものである——という点に留意したものである。

まず、第1の方法は、間げき比として e_0 をとった式(4)で定義される最上の常数 k_{10} は同一材料について式(5)の形で表現できるという点に着目したものである。したがって試験結果から式(5)の n_1, n_2 を決定すれば、式(5)を式(4)に代入して $\sin \phi_0$ が e_0 と σ_3 の関数として定まる。

$$\sin \phi_0 = \frac{3(n_1 - n_2 \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A})}{2(1 + e_0) + n_1 - n_2 \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A}} \quad (4)'$$

ここに、 n_1, n_2 : 定数

$$P_A: \text{大気圧} (\cong 1 \text{kgf/cm}^2)$$

一方、 ϕ_0 の定義にしたがうと、 $\sigma-\tau$ 平面における幾何学的関係から

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2\sigma_3 \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0} = 2\sigma_3 \sqrt{\frac{1 + \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0}} \quad (6)$$

ここに、 f は破壊状態における値であることを示すサフィクス

の関係が成立する。したがって式(6)に式(4)'を代入すると次式のような破壊規準が得られる。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 2\sigma_3 \sqrt{\frac{1 + e_0 + 2(n_1 - n_2 \log_{10}(\sigma_3/P_A))}{1 + e_0 - 2(n_1 - n_2 \log_{10}(\sigma_3/P_A))}} \quad (7)$$

ここに、 f, n_1, n_2, P_A は式(4)'および式(6)と同じ

ここで、式(7)の適用限界について吟味する。定義のとおり $\sin \phi_0 = 3k_{10} / \{2(1 + e_0) + k_{10}\} = 3 / \{2(1 + e_0) / k_{10} + 1\}$

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

であるので、 σ_3 がある値以下では k_{10} が大きくなって $\sin \phi_0 > 1.0$ となる範囲が出てくる。したがって $\sin \phi_0 \leq 1$ の範囲が式(7)のもつ、数学的適用範囲である。 $\sin \phi_0 \leq 1$ に式(4)'を代入して整理すると次式をうる。

$$\sigma_3 \geq P_A \cdot 10^{\frac{n_1 - 1 - e_0}{n_2}} \quad (8)$$

今、砕石Iのケースを例にとり $P_A = 1 \text{kgf/cm}^2$, $n_1 = 1.120$, $n_2 = 0.272$ とし、 $e_0 = 0.50 \sim 0.70$ の場合について式(7)を計算すると $\sigma_3 \geq 0.07 \sim 0.04 \text{kgf/cm}^2$ となる。しかし、このような数学的限界まで式(7)を適用することは、実際上問題があろう。その理由は、まず試験において確認できないので、このような小さな σ_3 の範囲まで外挿することの問題があげられる。また今回の試験結果でも図-66の砕石Iの $\sigma_3 = 0.5 \text{kgf/cm}^2$ の点が、近似直線より小さくなっている傾向があることである。この点を実験のバラツキの範囲としてとらえるのか、この結果どうりの真実なのか、断ずる段階ではないが、実用面からは、 σ_3 が小さくなると式(5)より小さな k_{10} となると考える方が安全である。このようなことから式(8)の数学的適用限界とは別に、ある小さな σ_3 以下では、 k_{10} を一定とするなどの実用的な処理をとることが必要となろう。

次に、第二の方法は、 $\sin \phi_0$ と e_0 の関係を k_{10} のような理論的背景をもった定数を導入しないで、実験式として表現しようとするものである。

まず、間げき比による $\sin \phi_0$ の変化を、最も簡単な次式のような関係であらわせないか考えてみる。

$$\sin \phi_0 = \frac{k}{1 + e_0} \quad (9)$$

ここに、 k : 定数

この式は最上が平面ひずみ試験で得られる関係式にお

いて、間げき比として初期間げき比をとったものになる。そして、この関係式は簡潔で実用的にみて有意であることから $\sin \phi_0$ と間げき比を結びつける式としてしばしば用いられる。図-70は、砕石Iについての試験結果について $\sin \phi_0$ と $1/(1 - e_0)$ の関係を整理したものである。式(8)が成立するとすれば、 σ_3 が同一のデータは原点を通る直線上に並ぶことになる。そして、そのときの傾きが式(9)の定数 k になる。しかし図-70では同じ σ_3 のデータが原点を通る直線にのる傾向はなく、この関係が成立しないことを示している。

ただし、側圧ごとに眺めれば、かなり直線上に乗っている傾向がみられることから、側圧ごとに、最小二乗法で処理して、次式で表される回帰直線を求める。

$$\sin \phi_0 = \frac{k_1}{1 + e_1} + k_2 \quad (10)$$

そして求められた k_1 , k_2 の関係をプロットすると図-72のように直線関係になっていることが判明したので次式のような関係式で近似する。

$$k_1 = A_0 k_2 + B_0 \quad (11)$$

ここに、 A_0, B_0 : 定数

さらに、 k_2 と σ_3 の関係をプロットすると図-73のようになり k_2 は $\log_{10} \sigma_3$ に関して直線的に変化するとみなしてよいと思われる。そこで、次式で近似する。

$$k_2 = C_0 \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A} + D_0 \quad (12)$$

ここに、 C_0, D_0 : 定数

P_A : 大気圧 ($\cong 1 \text{kgf/cm}^2$)

結局、式(10)は

$$\sin \phi_0 = \frac{A_0 k_2 + B_0}{1 + e_0} + k_2$$

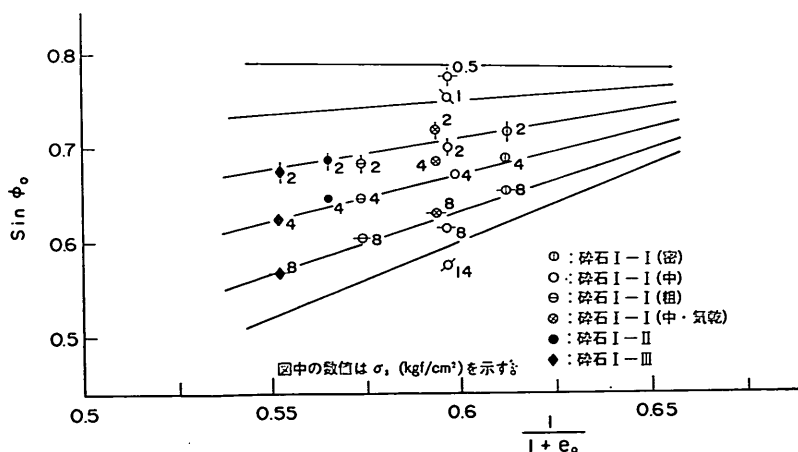


図-70 $\sin \phi_0$ と $1/(1 + e_0)$ の関係—最小二乗法による近似—(砕石I, 硬質砂岩)

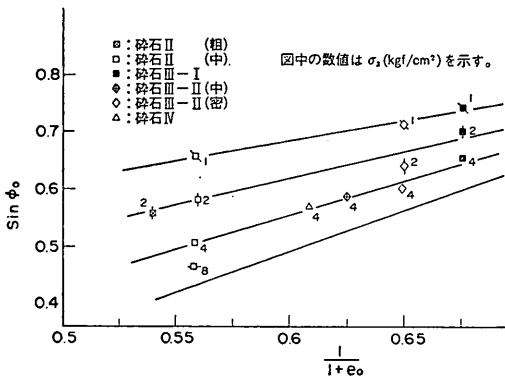


図-71 $\sin \phi_0$ と $1/(1+e_0)$ の関係—最小二乗法による近似(砕石II, III, IV, 花こう岩)

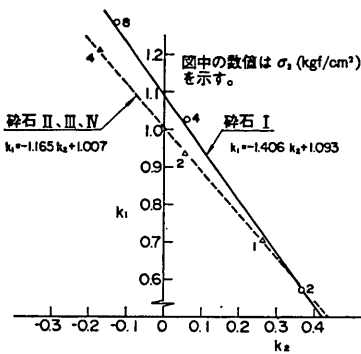


図-72 $\sin \phi_0 = k_1/(1+e_0) + k_2$ における k_1 と k_2 の関係

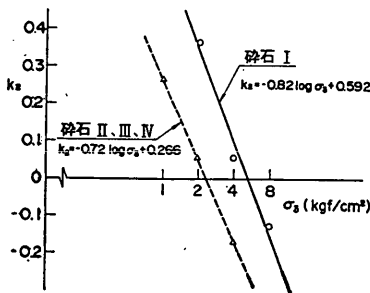


図-73 $\sin \phi_0 = k_1/(1+e_0) + k_2$ における k_2 と σ_3 の関係

$$\begin{aligned}
 &= \frac{A_0 C_0 \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A} + A_0 D_0 + B_0}{1+e_0} \\
 &\quad + C_0 \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A} + D_0 \\
 &= \frac{A_0' \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A} + B_0'}{1+e_0} + C_0 \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A} + D_0
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

A_0, B_0, C_0, D_0 については、具体的には図-72、図-73の式に示した値であるので、これと $P_A = 1 \text{ kgf/cm}^2$ を代入すると次式となる。

$$\begin{aligned}
 \sin \phi_0 &= \frac{1.153 \log_{10} \sigma_3 + 0.261}{1+e_0} \\
 &\quad - 0.820 \log_{10} \sigma_3 + 0.592
 \end{aligned}
 \tag{13'}$$

この式により σ_3 ごとに直線をもとめて図-70中に記入した。これをみると実験結果をよく近似していることがわかる。

次に、砕石II, III, IVについては、粒度特性が異なっているため、これらのデータを扱って、それらを近似する関係をもとめることの工学的意味は小さいが、近似の程度を知るうえで、砕石Iと同様の検討をしてみる。その結果は k_1, k_2 については、図-72、と図-73に示すとおり砕石Iと同様の傾向を示した。また、式(13)で近似した結果を図-71に示すが近似度がよいことがわかる。

このように、式(13)で $\sin \phi_0$ を近似した場合の破壊規準は式(13)を式(6)に代入することにより次式で示される。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 2\sigma_3 \sqrt{\frac{A_0' \log_{10}(\sigma_3/P_A) + B_0' + (1+e_0)C_0 \log_{10}(\sigma_3/P_A) + D_0}{A_0' \log_{10}(\sigma_3/P_A) + B_0' - (1+e_0)C_0 \log_{10}(\sigma_3/P_A) + D_0}}
 \tag{14}$$

ここに、 A_0', B_0', C_0, D_0 : 定数

P_A : 大気圧

ここで、この破壊規準における問題点をあげる。それは図-70の $\sigma_3 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ にみられるように σ_3 が小さな範囲になると $1/(1+e_0)$ の増加に伴って、すなわち e_0 の減少に伴って $\sin \phi_0$ が減少するという結果を生む。これは土質工学的常識からすると不合理な結果である。そのような不合理が生じない限界は

$$A_0' \log_{10} \frac{\sigma_3}{P_A} + B_0' \geq 0
 \tag{15}$$

すなわち

$$\sigma_3 \geq P_A \cdot 10^{-\frac{B_0'}{A_0'}}
 \tag{15'}$$

である。例として砕石Iの場合は、具体的数値をあてはめ、 $P_A = 1 \text{ kgf/cm}^2$ としてみると、 $\sigma_3 \geq 0.59 \text{ kgf/cm}^2$ である。このような範囲をこえる σ_3 では、 $\sin \phi_0$ を一定の値とするなどの実用面での工夫を行う必要がある。

以上のように実験結果から $\sin \phi_0$ を e_0 と σ_3 の関数として表し、それをもとにした実用的破壊規準を提示した。この破壊規準が、実験結果得られたモールの応力円群をどの程度近似するか確認する。例として、砕石I-I, $e_0 = 0.677$ と砕石I-III, $e_0 = 0.810$ について示す。

式(7)および式(14)で示される破壊規準を τ - σ 平面であらわすには、 σ, τ は幾何学的関係から

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{2\sigma_1\sigma_3}{\sigma_1+\sigma_3} \\ \tau &= \sqrt{\sigma_1\sigma_3} \frac{\sigma_1-\sigma_3}{\sigma_1+\sigma_3} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

で表される。ただし、ここで示した σ_1, σ_3 は破壊時の値である。そして、 $\sin \phi_0 = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$ の関係から次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{2m\sigma_3}{1+m} \\ \tau &= \frac{\sqrt{m(m-1)}\sigma_3}{1+m} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ただし $m = \frac{1 + \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0}$

したがって、各方法に対応して、 σ_3 を変えて式(4)または式(13)を使って σ, τ を計算し、プロットを連ねて曲線をもとめればよい。その結果が図-74、図-75に示してある。同図中にはモール・クーロンの破壊規準をも併記してある。

両図から、ここで提示した破壊規準がよく、モールの応力円群を包絡していることがわかる。実際の捨石基礎の支持力解析では、比較的小さな σ_3 状態における破壊規準も重要となるがそのような場合においては、モール・クーロンの破壊規準を適用し $C_d \approx 0$ とした場合より、有効であると考えることができる。

(6) 捨石材の応力～ひずみ関係

現地捨石材の応力～ひずみの関係を室内試験結果をもとに推定することは、(5)で言及したせん断強さについて

と同様に難しい問題をふくんでいる。しかし、現状においては、室内試験によって得られた応力～ひずみ関係をそのまま現地に適用せざるを得ないという状況にある。そのため、ここでは、今回の三軸圧縮試験結果をそのまま現地捨石材の応力～ひずみ関係に用いるという割り切りにたった検討を行っている。

今回、得られたような非線形な応力～ひずみ関係を数量化する方法として、まず、ダンカン・チャンの開発した応力～ひずみ曲線を双曲線で近似する方法の適用性を調べる。

この方法は、側圧一定試験に拠るため、せん断の進行に伴う異方圧密について分離しないで評価するので、現実の構造物建設時に複雑な応力径路によって生ずる変形の解折に物いるには問題をふくんでいるが、試験が簡単でパラメータ決定も容易であることに優れている。一般のロックフィル材料では、この双曲線近似がうまく行く例が多い。同方法については文献²⁹⁾に詳しいので、ここでは以下に極く簡単に示す。

応力～ひずみ曲線を双曲線で近似できるとすると

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{a + b\epsilon_1} \quad (18)$$

$$a = 1/E_t$$

$$b = 1/(\sigma_1 - \sigma_3)_{uu}$$

ここに、 $\sigma_1 - \sigma_3$: 軸差応力 (kgf/cm²)

ϵ_1 : 軸ひずみ

E_t : 初期接線弾性係数

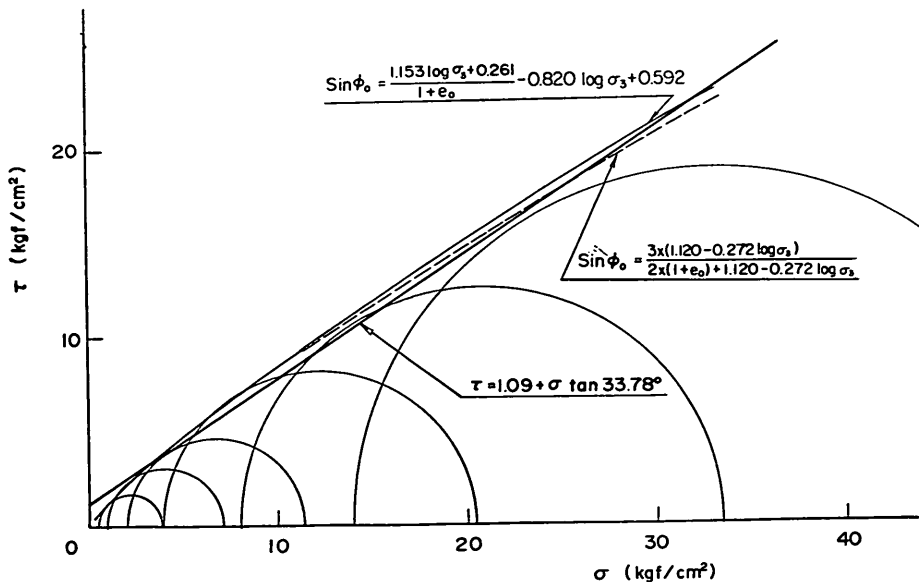


図-74 破壊規準の比較 (砕石 I-1, $\rho_d = 1.55t/m^3, e_0 = 0.676$)

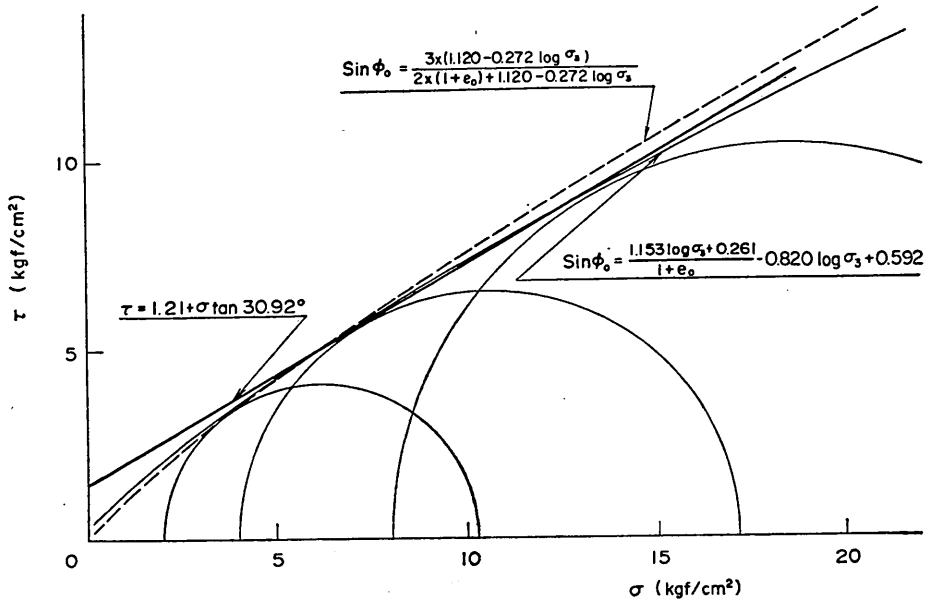


図-75 破壊規準の比較 (碎石 I-III, $\rho_d=1.45t/m^3$, $e_0=0.810$)

$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$: ϵ_1 が無限大の時の終局軸差応力 (kgf/cm²)

今, 式(18)を変形すると

$$\frac{\epsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b\epsilon_1 \quad (19)$$

となり, $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3)$ と ϵ_1 の関係は直線となる。

また, 破壊時の軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ の比を R_f とすると

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (20)$$

である。一方, E_t に Janbu らの仮定が成立すれば

$$E_t = K \cdot P_A \left(\frac{\sigma_3}{P_A} \right)^n \quad (21)$$

ここに, K, n : 定数

σ_3 : 最小主応力 (kgf/cm²)

P_A : 大気圧 (≈ 1 kgf/cm²)

である。

ここで, モール・クーロンの破壊規準が成立するとすれば, $\sigma \sim \tau$ の座標における幾何学的関係から次式が成立する。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2C_d \cos \phi_d + 2\sigma_3 \sin \phi_d}{1 - \sin \phi_d} \quad (22)$$

したがって, 式(18)に式(20), 式(21), 式(22)を代入していけば次式のような応力 \sim ひずみの関係を得る。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\epsilon_1}{K P_A \left(\frac{\sigma_3}{P_A} \right)^n + \frac{(1 - \sin \phi_d) R_f \cdot \epsilon_1}{2 - C_d \cos \phi_d + 2\sigma_3 \sin \phi_d}} \quad (23)$$

この式で明らかなように R_f は定数でなければならないが, 実際にはかなり異なるので, 各側圧における R_f を平均した \bar{R}_f を採用し, K, n を変化させて, 最もよくフィットする K, n を試行によって決定した。

具体的に碎石 I-I, ($\rho_d=1.55t/m^3$, $e_0 \approx 0.676$) のケースを例にとり, 説明する。

図-76のように $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ の関係を整理して, 各 σ_3 ごとに直線近似で $a(=1/E_t)$ と $b(=1/(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult})$ をもとめ, 図-80 に示すとおり, $E_t \sim \log \sigma_3$ の関係で整理する。

そこで, 各側圧ごとに R_f をもとめ, その平均値 \bar{R}_f を R_f と固定して, 図-80 において各点を近似する K, n を定めるという手順になる。ただし, 実際には, 図-80 の $E_t \sim \log \sigma_3$ と関係を機械的に近似させるというよりはしないで, $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ の関係をもっともよく近似するものを試行的に決定した。

4種の碎石について, 以上の手順でもとめた結果が図-76~図-83である。

図-76~図-79 は $\epsilon_1/(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ 関係であり, 破線が最終近似の結果である。図-80~図-83 は $E_t \sim \sigma_3$ 関係である。図中の破線は, 最終近似した式(21)をあらわす。そして, 図-84~図-87 は, 近似した軸差応力とひずみの関係と実験結果の対比を示す。以上の図から次のことがいえる。

碎石 I のグループは比較的よい近似度を示す。しか

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

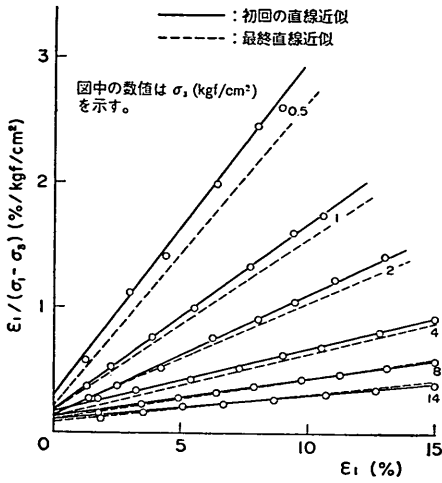


図-76 $\epsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) \sim \epsilon_1$ の関係 (碎石 I-I, $\rho_d=1.55t/m^3$, $e_0=0.676$)

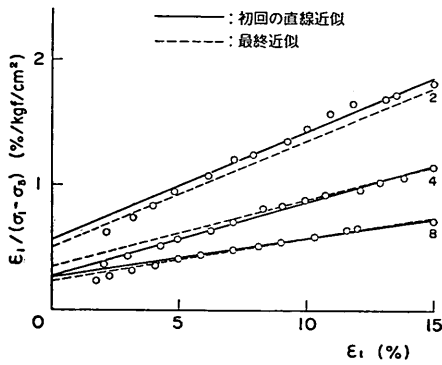


図-77 $\epsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) \sim \epsilon_1$ の関係 (碎石 I-III, $\rho_d=1.45t/m^3$, $e_0=0.810$)

し、碎石 II, III-II は総じて近似度が悪い。特に、 $E_1 \sim \sigma_3$ の関係をみると E_1 のデータを式(2)で表現するのが不適ともおもえる結果となっている。ただし、図-84～図-87 をみれば、実用的には許容できる程度の近似度があるようにも思える。なお、同図中には以下のようにして近似した軸ひずみ ϵ_1 と体積ひずみ ϵ_0 の関係をも併記してある。

軸ひずみ ϵ_1 と横ひずみ ϵ_3 の間に、双曲線近似式を適用すると

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_3}{\nu_i + d\epsilon_3} \quad (24)$$

ここに、 ν_i : 初期接線ポアソン比
 d : 定数

となる。これを変形すると $\epsilon_3/\epsilon_1 = \nu_i + d\epsilon_3$ となる。した

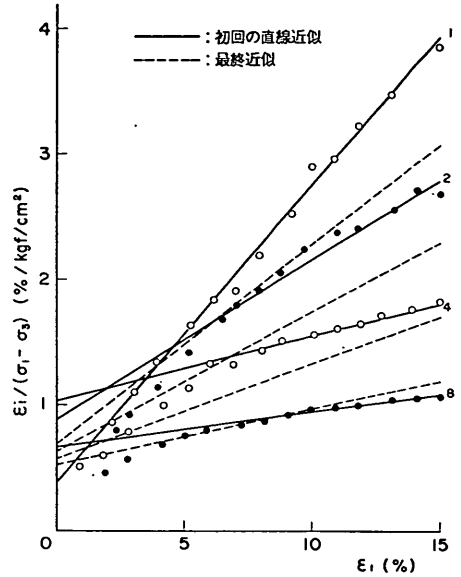


図-78 $\epsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) \sim \epsilon_1$ の関係 (碎石 II, $\rho_d=1.45t/m^3$, $e_0=0.792$)

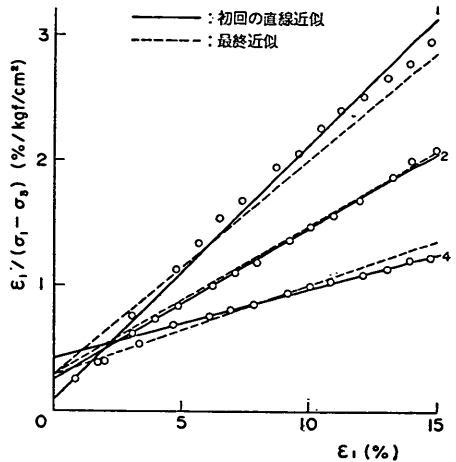


図-79 $\epsilon_1/(\sigma_1-\sigma_3) \sim \epsilon_1$ の関係 (碎石 III-II, $\rho_d=1.68t/m^3$, $e_0=0.540$)

がって、 ϵ_3/ϵ_1 と ϵ_3 の関係を直線近似して ν_i をもとめ、 ν_i と側圧 σ_3 の関係を片対数上において、直線近似すると次式が得られる。

$$\nu_i = G - F \log\left(\frac{\sigma_3}{P_A}\right) \quad (25)$$

ここに、 G, F : 定数

P_A : 大気圧 ($\approx 1\text{kgf/cm}^2$)

したがって、式(24)と式(25)から次式のとおりの軸ひずみ ϵ_1

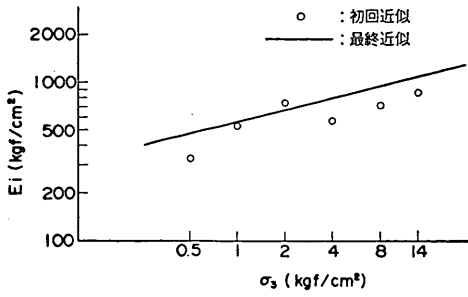


図-80 $E_1 \sim \sigma_3$ の関係 (碎石 I-I, $\rho_d=1.55t/m^3, e_0=0.676$)

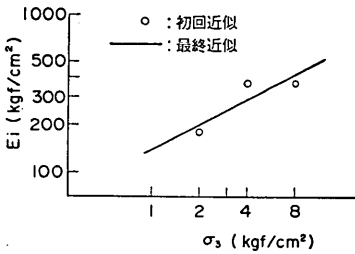


図-81 $E_1 \sim \sigma_3$ の関係 (碎石 I-III, $\rho_d=1.45t/m^3, e_0=0.810$)

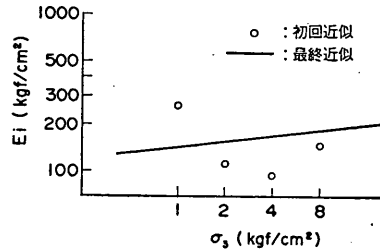


図-82 $E_1 \sim \sigma_3$ の関係 (碎石 II, $\rho_d=1.45t/m^3, e_0=0.792$)

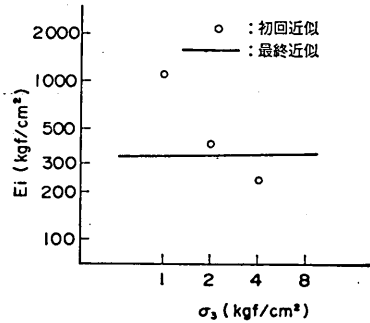


図-83 $E_1 \sim \sigma_3$ の関係 (碎石 III-II, $\rho_d=1.68t/m^3, e_0=0.540$)

と横ひずみ ϵ_3 の関数を表現することができる。

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_3}{G - F \log\left(\frac{\sigma_3}{P_d}\right) + d\epsilon_3} \quad (26)$$

式(24)と $\epsilon_0 = \epsilon_1 + 2\epsilon_2$ の関係を使って計算した $\epsilon_1 \sim \epsilon_0$ の関係が図-84～図-87に描いてある。

図-88と図-89は、碎石 I-III ($\rho_d=1.45t/m^3, e_0=0.810$) について、 $-\epsilon_3/\epsilon_1 \sim \epsilon_3$ 関係と $\nu_1 \sim \sigma_3$ 関係を例示したものである。

表-23 にダンカン・チャンの理論による近似を行った結果のパラメータをまとめて示す。

以上のような応力とひずみ関係の近似方法で、実用的には許容できるものと云ったが、比較的近似結果のよかった碎石 I-I ($\rho_d=1.55t/m^3, e_0=0.676$) の場合においても、 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ の関係 (図-84) において $\sigma_3=0.5, 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ については、近似度がわるく、実験結果が近似曲線より下にずれている。この傾向は碎石 II ($\rho_d=1.45t/m^3, e_0=0.792$) の場合 (図-86) においても、同様である。

これは、応力とひずみ関係の近似にあたって式(22)に示す。モール・クーロンの破壊規準 (直線) を適用した結

表-23 ダンカン・チャン理論のパラメーター一覧

材 料	γ_d (t/m^3)	e_0	ϕ_d	c_d (kgf/cm^2)	R_f	n	K	G	F	d
碎石 I-I (中)	1.55	0.676	33.78	1.09	0.834	0.25	550	0.33	0.21	4.00
〃 I-II	1.50	0.767	33.58	1.25	0.802	0.50	240	0.35	0.27	2.60
〃 I-III	1.45	0.810	30.92	1.21	0.708	0.52	140	0.31	0.25	2.90
〃 II (中)	1.45	0.792	24.46	0.83	0.615	0.13	140	0.22	0.20	2.65
〃 III-I	1.74	0.480	37.40	0.73	0.907	0.01	750	0.31	0.20	3.40
〃 III-II (中)	1.61	0.600	32.78	0.70	0.854	0.01	330	0.40	0.40	1.65

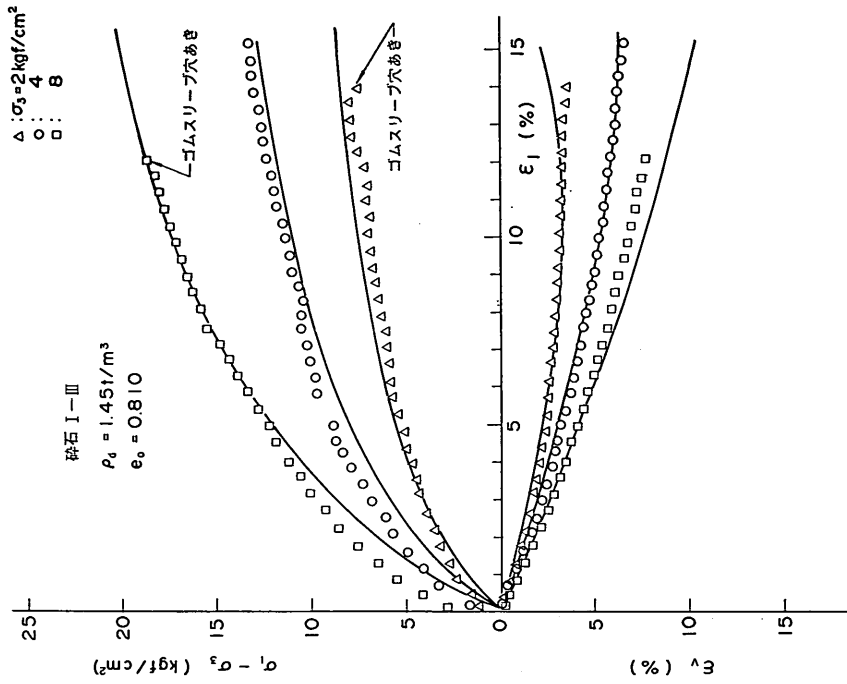


図-85 マンカンチャンの方法による応力~ひずみ曲線
(砕石 I-III, $\rho_d = 1.451/\text{m}^3$, $e_0 = 0.810$)

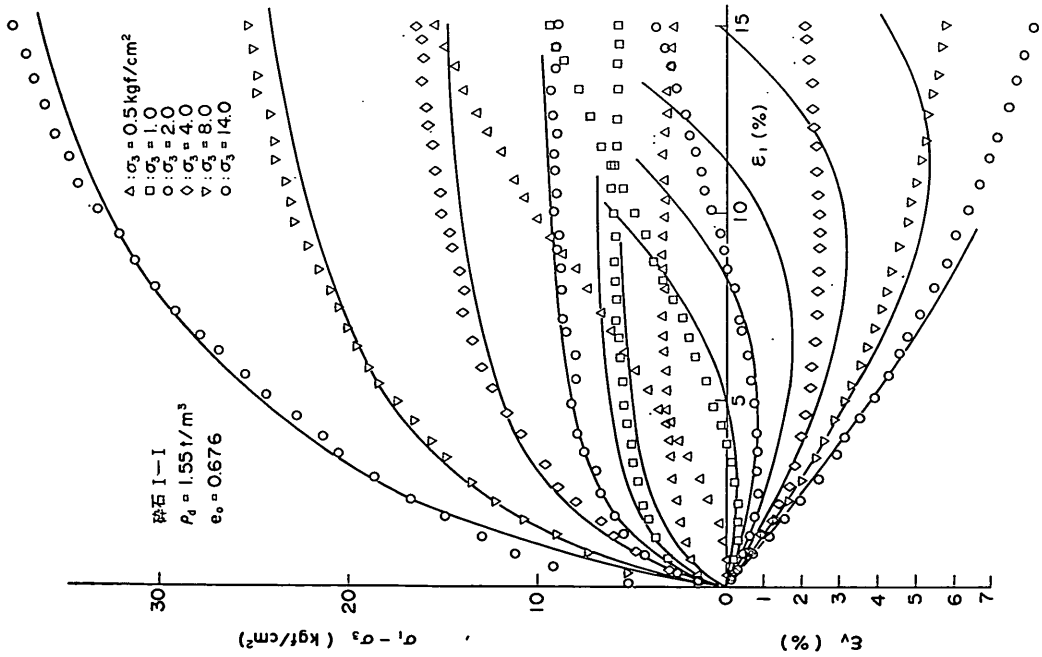


図-84 マンカンチャンの方法による応力~ひずみ曲線
(砕石 I-I, $\rho_d = 1.551/\text{m}^3$, $e_0 = 0.676$)

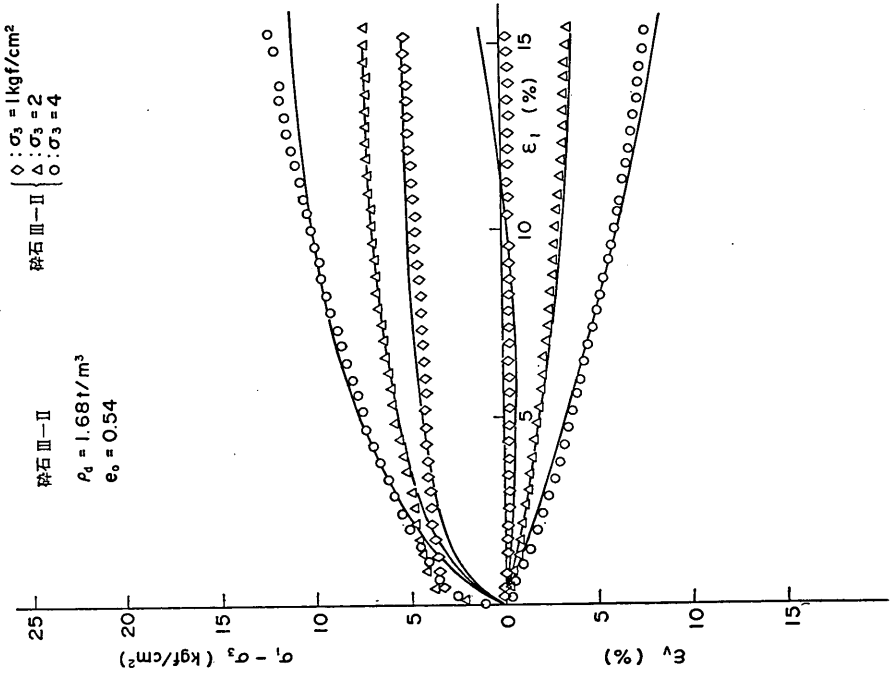


図-87 マンカンチャンの方法による応力~ひずみ曲線
(砕石 III-II, $\rho_d = 1.68 \text{ t/m}^3$, $e_0 = 0.54$)

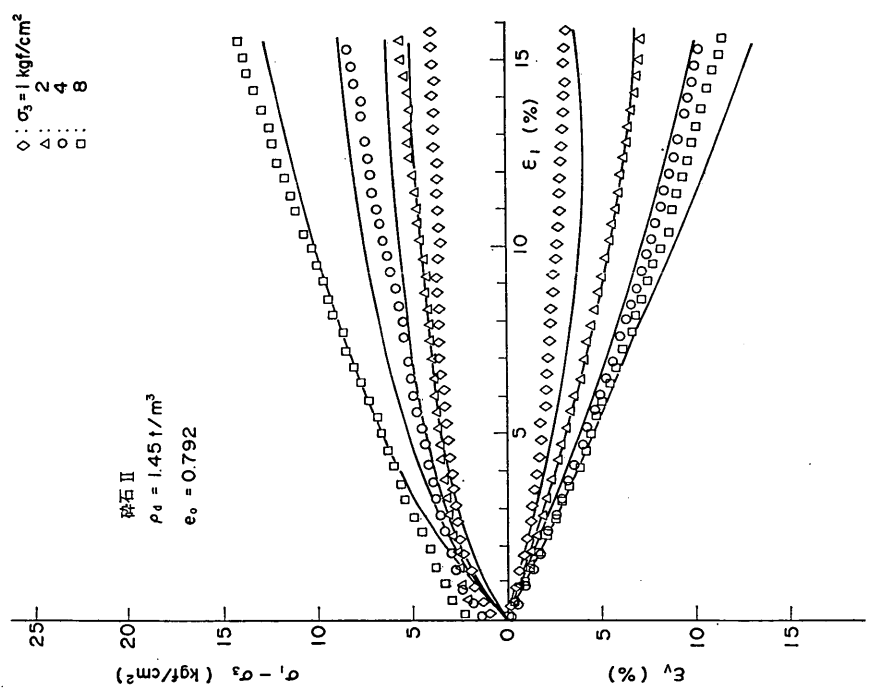


図-86 マンカンチャンの方法による応力~ひずみ曲線
(砕石 II, $\rho_d = 1.45 \text{ t/m}^3$, $e_0 = 0.792$)

大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察

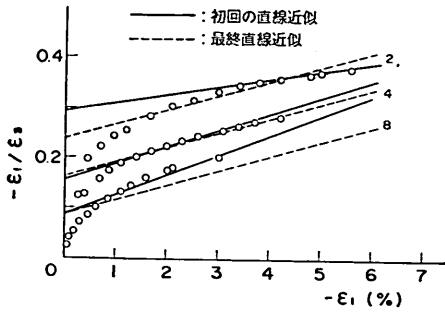


図-88 $-\varepsilon_3/\varepsilon_1 \sim -\varepsilon_1$ 関係 (碎石 I-III, $\rho_d=1.45t/m^3, e_0=0.810$)

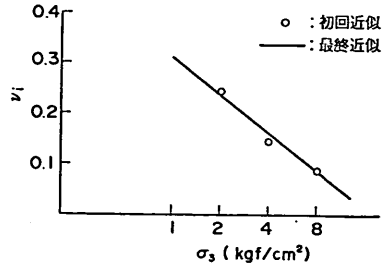


図-89 $\nu_x \sim \sigma_3$ の関係 (碎石 I-III, $\rho_d=1.45t/m^3, e_0=0.810$)

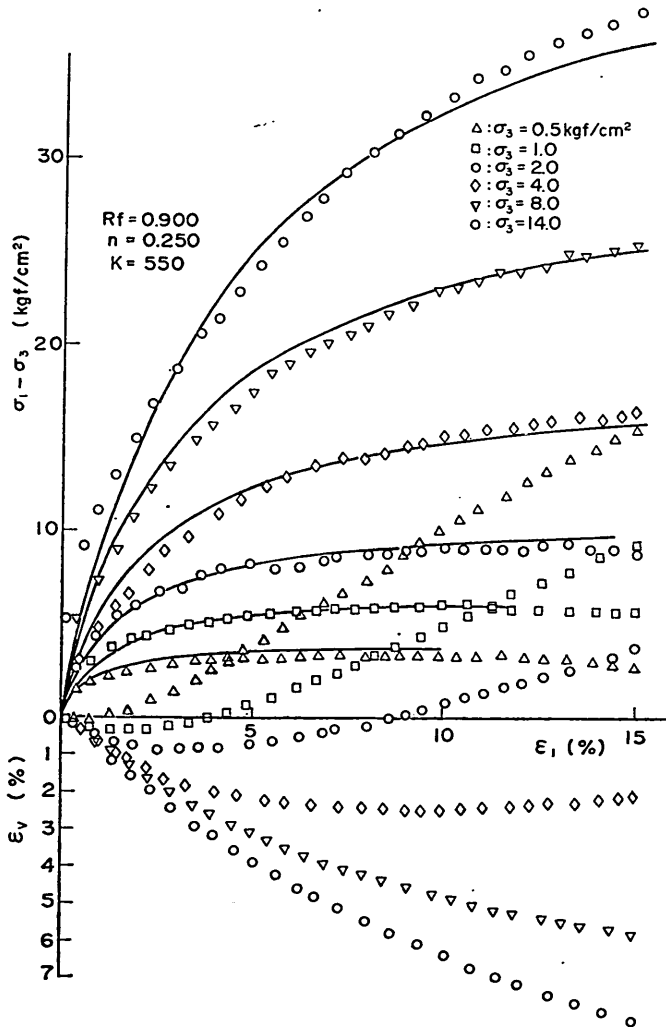


図-90 $\sin \phi_0$ を σ_3 と e_0 で推定する方法による応力～ひずみ関係 (碎石 I-I, $\rho_d=1.55t/m^3, e_0=0.676$)

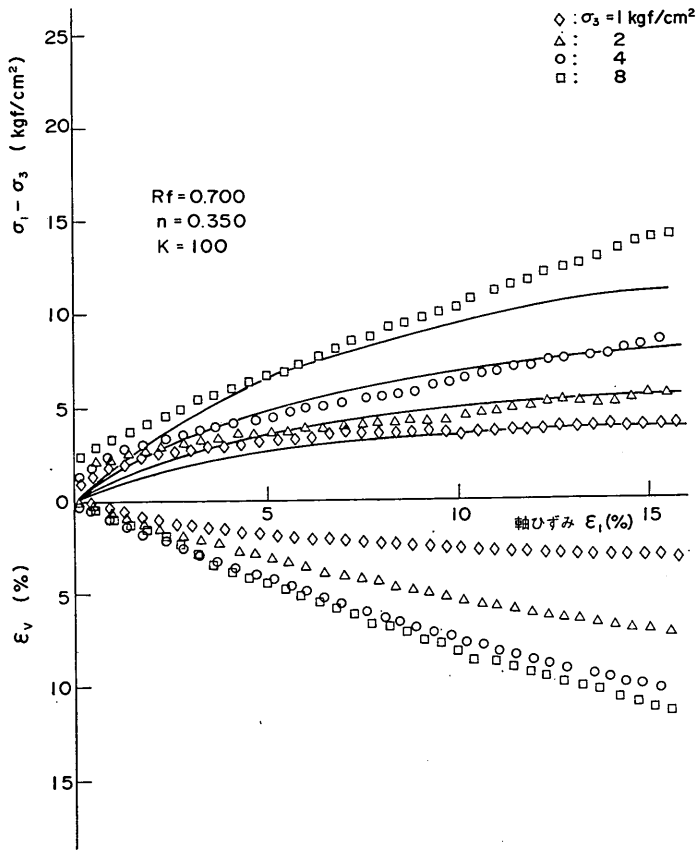


図-91 $\sin \phi_0$ を σ_3 と e_0 で推定する方法による応力～ひずみ関係
(碎石II, $\rho_d=1.45t/m^3$, $e_0=0.792$)

果である。このことは図-43と図-49の両試験ケースの破壊円群が直線のモール・クーロンの破壊規準からはずれて、上に凸な、いわゆるモールの包絡線になっているためである。

そこで、先に検討した実用破壊規準を適用すれば、この点は解釈されると思われるが、その確認を試みる。ここでは第二の方法による破壊規準、式(14)について行ってみる。

検討例は碎石I-I、($\rho_d=1.55t/m^3$, $e_0=0.676$)と碎石II ($\rho_d=1.45t/m^3$, $e_0=0.792$)の2ケースとする。

図-90、図-91にその結果を示すが、予想どおり、モール・クーロンの破壊規準によって図-84、図-86よりは近似度がよいことがわかる。このように、先に検討した実用的破壊規準を応力～ひずみ関係にまでもちこむことは有効であることが確認できた。ただ、その場合、次の点が今後の課題として残るように思われる。破壊規準の方は e_0 の関数となっているので、試験した e_0 次外の状態

についても拡張して破壊規準をとることができるが、応力～ひずみ関係は試験した間げき比 e_0 についてしか、決定できないということである。したがって、 K , n , R_f に対する e_0 の影響度について究明していくことが求められる。図-92は表-23中の K を e_0 に関して整理したものであるが、それによれば、 e_0 の減少とともに K が変化する傾向がみられる。

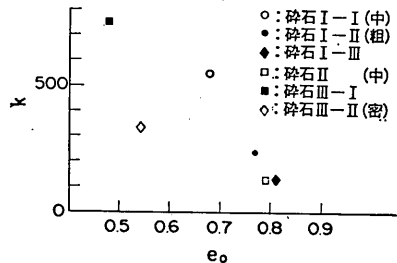


図-92 $K \sim e_0$ の関係

4. ま と め

全国の代表的な捨石材産地4箇所において、捨石材の粒度と粒子形状の現地調査を実施した結果、次のような知見が得られた。

—捨石材の質量段階毎の構成比の調査結果から—

① 調査した捨石材の質量分布は、規格の質量範囲をこえるものを質量で約20~40%もふんだものであった。ただし、現地に搬入され、投入されるまでに調査対象捨石材についてさらに規格外の粒子を除去する手段は構じられるということなので構築されたマウンドの捨石は、これより、いくぶん、規格外の含有率は低くなるものと思われる。

—実測した質量段階毎の構成比と、中間径と質量の関係式をもとに、粒径加積曲線を推定した結果から—

② 均等係数 U_e は1.3~2.5の範囲で、非常に粒度が悪いものであることが確認された。このような捨石材の粒度は、他の粗粒材料のロックフィル材や、道路用の粒度調整砕石やクラッシュランに比較しても、はるかに粒度が悪いものである。

—粒子形状試験から—

③ Zingg の分類によれば寸法比の平均は $p=c/b=0.60\sim 0.79$, $q=b/a=0.71\sim 0.75$ であり、ほぼ塊状であるといえよう。ただし、 a , b , c はそれぞれ長辺長、中間長、短辺長を示す。

—現地採石場における捨石材の岩質の既応資料の収集の結果から—

④ 岩質の評価のための、比重、吸水率などの試験方法については不統一であった。現状の試験方法の規定の見なおしの要不用の検討をしたうえで、周知をはかることが望ましい。

締固め試験と三軸圧縮試験を7種類の砕石（岩質は硬質砂岩と花こうの2種。均等係数 U_e は、現地捨石材のうち粒度の悪いグループに相当する $U_e=1.2\sim 1.3$ 、良いグループを想定した $U_e=2.8$ およびその中間の $U_e=2.0$ の3種。最大粒径は25.4mm~200mmの範囲）について実施した。三軸圧縮試験の供試体寸法は最大粒径が63.5mm以下の場合 $30\text{cm}^p \times 60\text{cm}^q$ 、最大粒径が63.5mmをこえる場合 $120\text{cm}^p \times 240\text{cm}^q$ である。試験条件は圧密排水試験（ただし、少ないケースの気乾状態の供試体の場合では圧密排気試験）で、拘束圧 σ_3 は0.5~14kgf/cm²、初期間げき比 e_0 は0.48~0.85の範囲から選定した。締固め試験は三軸圧縮試験装置のモールドを使って行った。

以上のような力学試験の結果から次のような知見が得

られた。

—締固め試験と三軸圧縮試験の等方圧縮の結果から—

① 締固めや等方圧縮による体積変化は粒子破壊によるえいきようが大きい。そして、粒度の悪いほど、粒子破碎しやすいので、同一等方圧のもとでは圧縮しやすい。

② 同一締固め方法のもとで得られる最小間げき比は、粒度の悪い方が、粒子破壊率が大きいにもかかわらず、小さくならない。

—三軸圧縮試験によるせん断過程の結果から—

③ 拘束圧が2kgf/cm²以下の数少ないケースを除いては、軸差応力と軸ひずみの関係曲線には明瞭なピーク値が認められなく、軸ひずみが15%を越えてもなお漸増の傾向が認められる（ただし、このような場合、軸ひずみ15%を破壊状態として処理した）。また、同曲線は、応力が一定であったり、わずかに減少しても、軸ひずみ軸差が増加するという傾向が間々みられ、なめらかな変化を示さないケースが多くみられる。

④ 拘束圧が2kgf/cm²以下のなかの数少ないケースを除いては正のダイレイタンスーが認められず、常に体積が収縮する方向にあった。

⑤ 試験砕石より粒度の良いフィルダム材料では③④の現象はみられないこと、また、それらのせん断中の破碎率は、試験砕石より少ないことから、③④の現象は粒度が悪いことに起因するせん断中の粒度破碎の起きやすさによるものと考えられる。

⑥ 破壊時の応力状態を $\sigma-\tau$ 平面でモール円群として示すと、それらの包絡線は直線ではなく、上に凸なモールの破壊包絡線となる傾向を示している。またあえて、モール・クーロンの直線が近似すると粘着力は0とならない結果をうる。

⑦ 原点を通りモールの破壊円に接する直線の σ 軸となす角度を ϕ_0 とすると⑥の事実から、 ϕ_0 は拘束圧が大きくなると小さな値となる、応力依存性を有している。そして、拘束圧の増加に伴う減少率は、粒度のよいロックフィル材などより大きい。

⑧ $\sin \phi_0$ は、せん断中の粒子破碎率が大きくなるとほぼ直線的に小さくなる傾向にある。また、破壊時のダイレイタンスー比が小さいほど、 $\sin \phi_0$ は小さくなる。そして、拘束圧が大きくなるほど、破碎率は大となり、破壊時のダイレイタンスー比は小さくなる事実から、 $\sin \phi_0$ の応力依存性がこの二つに密接に関係していることが確認された。また、粒度が悪いため、せん断中の粒子破碎率が生じやすく、その結果、ダイレイタンスー比が大きくなるということが $\sin \phi_0$ または ϕ_0 の拘束

圧依存性を他の粒状材料よりも大きくしていると思われる。そして、今回の試験砕石に関しては、岩の種類、最大粒径、均等係数、初期間げき比などの異なるにもかかわらず、せん断中の破砕率と破壊時のダイレイタンシー比は、ほぼ一定の関係にあることがわかった。

⑨ 最上が三軸圧縮試験結果に適用できるとして導いた、次式

$$\sin \phi_0 = \frac{3k_t}{2(1+e) + k_t} \quad (4) \text{再掲}$$

ここに、 k_t : 最上の常数

e : 間げき比

において、 $e=e_0$ としたときの k_t を k_{t0} と定義すれば、同一材料について k_{t0} は拘束圧 σ_3 の関数として次式の形で近似できることがわかった。

$$k_{t0} = n_1 - n_2 \log_{10}(\sigma_3/P_A) \quad (5) \text{再掲}$$

ここに、 n_1, n_2 : 定数

P_A : 大気圧

したがって $\sin \phi_0$ は e_0 と σ_3 の関数として近似できる。一砕石の三軸圧縮試験結果にみられるせん断特性をもとに、捨石材のせん断特性について考察するとともに、捨石材に適用する実用的なせん断特性の取扱い方法について検討した結果は次のとおり—

⑩ 捨石材と相似粒度をもつ砕石の三軸圧縮試験結果によって得られたせん断強さから、現地捨石材の三軸圧縮試験によるせん断強さを精度よく推定するには、最大粒径のせん断強さに与える影響、現地捨石の間げき比の把握が不可欠であり今後の課題である。

⑪ 今回の三軸圧縮試験結果だけでは実用設計法における現地捨石材のせん断強度の設定値の妥当性をうんぬんすることはできない。

⑫ ϕ_0 の定義にしたがって、 $\sigma-\tau$ 平面における幾何学的関係から得られる次式に σ_3 と e_0 の関数として数式化した $\sin \phi_0$ を与えて、破壊規準とすることを検討した。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2\sigma_3 \sin \phi_0}{1 - \sin \phi_0} \quad (6) \text{再掲}$$

ここに f は破壊状態における値であることを示すサフィックス

その第1の方法は、三軸圧縮試験の結果から式(5)の n_1, n_2 を決定して、式(4)の形で $\sin \phi_0$ を表わす方法である。

もう1つの方法は、比較的間げき比と σ_3 を変えた試験データ数がある場合に、 $\sin \phi_0$ と次式で数式化する方法である。

$$\sin \phi_0 = \frac{k_1}{1+e_0} + k_2 \quad (10) \text{再掲}$$

k_1, k_2 については次式の関係が成立するとして、定数 A_0, B_0, C_0, D_0 を決定する。なお、 P_A は大気圧である。

$$k_1 = A_0 k_2 + B_0 \quad (11) \text{再掲}$$

$$k_2 = C \log_{10}(\sigma_3/P_A) + D_0 \quad (12) \text{再掲}$$

いずれの方法も σ_3 が極く小さな範囲での適用には不都合があるので、その領域では $\sin \phi_0$ を一定とするなどの実用的面からの工夫がいろいろあると思われる。

この2つの方法で得られた破壊規準は実験結果のモールの破壊応力円をよく包絡することが確認された。

⑬ 応力～ひずみ関係を双曲線近似するダンカンジャンの方法では破壊規準としてモール・クーロンの破壊規準をとっているため、広い拘束圧の範囲をよく近似できないが⑩で述べた破壊規準を適用すれば、より近似度がよいことを確認した。

以上の知見をふまえて現状の捨石材についてももう一度ふりかえてみると、粒度が悪いことによる、粒子破砕のおきやすさが、捨石材の力学的特性を大きく支配していることがわかる。そして、それは好ましい特性ではない。したがって、単に力学的特性だけを考えれば、捨石材の質量範囲の規定は広いもの程望ましいことは明白である。また、質量の小さなものの方が有利であるとも考えられる。もちろん捨石の質量規定にあたっては力学的特性以外に、波浪に対する安定性、投入時の水中落下中の拡散、マウンドの施工厚さとも関連する上部工のなじみやすさなどの項目を考慮する必要がある。したがってそれらの許す限りにおいてできるだけ広い範囲の規定をとるべく、考え方の転換をする必要がある。

今回得られた知見は、今まで全く確認されていなかった、捨石材の実態とせん断特性を主とした力学特性の基礎的特徴を知るうえで、有用なものと考えている。しかし、これだけでは、基礎的特徴の把握というレベルにおいても十分とはいえないし、まして、捨石材のせん断特性をより正確に把握するためには、まだまだ多くの研究の積み重ねを必要とする。特に重要な視点として、最大粒径のせん断強さに及ぼす影響、現地捨石基礎マウンドの間げき比の把握などがあげられると思われる。また、慣用的に用いている安定計算法とそこで用いられているせん断強度定数の妥当性の検討という面からは、捨石材のせん断中の変形もふくめたせん断特性を数量化し、それを用いて数値計算による解析を積み重ねることが重要と考える。

5. 結 論

これまでの考察をふまえて、次のような結論を得る。

① 捨石材の均等係数は1～3程度であることや、規

格外質量の粒子の含有率など、捨石材の実態が把握できた。

② 捨石材と相似な粒度をもつ碎石の締りめや等方圧縮の過程における圧縮性は粒子破碎と密接な関係にある。

③ 捨石材と相似な粒度をもつ碎石の三軸圧縮試験においてみられたせん断中の挙動とせん断強さはせん断中に生ずる粒子破碎と密接に関係する。

④ ②と③の具体的な特徴は粒度が悪いため、粒子破碎が生じやすいことが原因となっている。

⑤ 捨石材と相似な粒度をもつ碎石の三軸圧縮試験結果をもとに $\sin \phi_0$ ($\sin \phi_0 = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3)$, ここに σ_1 , σ_3 は最大と最小主応力, f は破壊時の値であることを示すサフィックス) を σ_3 と e_0 の関数として表す実用的方法を示したが、その関係を用いた破壊規準はモールの破壊円群をよく包絡する。

⑥ 碎石の三軸圧縮試験で得られた応力～ひずみ関係はダンカン・チャンの方法より、同法においてモール・クーロンの破壊規準の代りに⑤の破壊規準を物いる方がより近似できる。

⑦ 今回実施した碎石の力学試験の結果から、捨石材の力学特性に関する基礎的知見を得ることができた。また、提示した破壊規準や応力～ひずみ関係は従来の方法より精度よく捨石材の特性を表現するものとして実用されることがのぞまれる。

⑧ 力学特性だけから考えると、捨石材の質量規定は現状より広い範囲のものとするのが望ましい。

6. あとがき

捨石材と相似粒度の碎石の大型三軸圧縮試験を主体とする一連の試験を実施した。その結果、捨石材のせん断特性に関する基礎的事項の把握という当面の目標をある程度は達したと考えている。しかし、まだ不十分ではあるし、捨石材のせん断特性の把握という目標に達するには長い道りがある。今後は、今回と同様のデータの蓄積をはかるに加えて、最大粒径のせん断強さに及ぼす影響や現地捨石基礎マウンドの間げき比の把握などの課題に取り組むことが必要である。捨石基礎は港湾構造物特有のものであり、その材料特性も他の粒状材料にはみられないものである。それゆえに、捨石材に関する諸問題の究明は港湾関係者において解決されるべきものと考えられる。

本報告は下記の多数の方の尽力を得てとりまとめるに至ったものであります。

奥村樹郎土質部長には、捨石マウンドの支持力に関す

る研究全体の推進という大局から、本研究の進め方について終始御指導をいただいた。

捨石材の現地調査や三軸圧縮試験等の室内試験の実施はマルフジェンエンジニアリング(株)に委託した。それらの実施中の各種の工夫やトラブル処理、あるいは調査試験結果の整理などにあたっては、ロックフィル材の試験について豊富な経験をもつ同社、石井武美氏の適切な助言をいただいた。

現地調査の実施に際しては、各調査地を管轄する港湾建設局の調査設計事務所および最寄りの工事事務所の職員をはじめ、採石場関係者の方々の御協力をいただいた。

報告のとりまとめにあたっては、八戸工業大学の諸戸靖史助教授に貴重な助言をいただいた。

報告書のとりまとめ作業に際しては、高橋邦夫主任研究官をはじめ土質部基礎工研究室内の各員に多大の協力をいただいた。

以上の方々に対し、心からの謝意を表します。

(1983年9月30日受付)

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1979年3月，pp. 5-7～5-9.
- 2) 運輸省港湾局編集：港湾工事共通仕様書，日本港湾協会，1983年3月，p. 44.
- 3) 運輸省港湾局編集：港湾工事事質・出来高管理基準，日本港湾協会，1980年4月，pp. 42～43.
- 4) 近畿地区石材協同組合：家島と小豆島の石材，1983年4月，p. 23.
- 5) 最上武雄編著：土質力学，技報堂，1979年8月，p. 897.
- 6) 文献 3) 参照
- 7) 土質工学会：ロックフィル材料の試験と設計強度，1982年10月，pp. 112～116，p. 125，図-7・11，p. 215.
- 8) 石井武美他：自動化した超大型三軸試験機によるロック材料試験，フジタ工業技術研究所報 第17号，1981年6月，pp. 113～120.
- 9) 鎌田正孝・石井武美・酒井徳行・小山田吉孝・栗原明美：砂による大型三軸圧縮試験機の検出，フジタ工業研究所報，第12号，1975，pp. 85～92.
- 10) 文献 7) 参照，pp. 80～81.
- 11) 土質工学会：土質試験法，1979年12月，p. 500
- 12) 文献 11) 参照，p. 520.
- 13) 文献 7) 参照，p. 15，図2-16.
- 14) 文献 7) 参照，p. 15.
- 15) 文献 7) 参照，p. 88.
- 16) 文献 5) 参照，pp. 998～1029.
- 17) 最上武雄：レキの内部摩擦角と常数 k について，土と基礎，Vol. 16, No. 11, 1968, pp. 29～37.
- 18) 川村幸司：白川フィルダムの盛立て施工について，

- ダム建設の施工技術総集編(I), 日本ダム協会, 1978, p. 51.
- 19) 宇野文雄: フィルダム技術ノート—材料の基本と実際一, 日刊工業新聞社, 1979, p. 94, p. 173.
- 20) 野村建司・早藤能伸・長友文昭: 斜面安定解折におけるビショップ法とモエボタリオフ法の比較, 港湾技術研究所報告, Vol. 7, No. 4, 1968.
- 21) 片山猛雄・内田豊彦: 偏心傾斜荷重を受ける二層系地盤上の帯状基礎の支持力, 港湾技術資料, No. 140, 1972.
- 22) 文献 7) 参照, pp. 15~22.
- 23) 野口俊郎・知久 徳: 玉原ダムの設計と施工計画, 大ダム, No. 88, 1979, pp. 1~18.
- 24) Marsal, R.J.: Contribution to Panel Discussion, Division 2, Proc. 6th ICSMFE, Montreal, Vol. 3, 1965, pp. 310~316.
- 25) 文献 7) 参照, p. 21.
- 26) 文献 7) 参照, p. 87.
- 27) 文献 7) 参照, p. 87, 図4-12.
- 28) Duncan, J.M. and Chang, C.Y.: Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, Proc. ASCE, No. SM5, Sept. 1970, pp. 1629~1653.