

# 現場転圧された粗粒材料の高応力下 における圧縮性状と材料定数

森 吉昭<sup>1</sup>・内田善久<sup>2</sup>・中野 靖<sup>3</sup>・吉越 洋<sup>4</sup>・石黒 健<sup>5</sup>・太田秀樹<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 東電設計(株)第一土木本部(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>2</sup>正会員 工修 東京電力(株)建設部(〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

<sup>3</sup>正会員 工修 東電設計(株)第一土木本部(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>4</sup>正会員 工博 東京電力(株)建設部(〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

<sup>5</sup>正会員 工博 前田建設工業(株)技術研究所(〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16)

<sup>6</sup>正会員 工博 東京工業大学理工学研究科国際開発工学(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

大型重機により現場転圧された粗粒材料の高応力下での圧縮性状について検討を加えた。フィルダムロックゾーンの築堤時実測沈下データを整理し、大型ダムのような高応力下では転圧された粗粒材料が弾塑性的な圧縮変形挙動をとること、圧縮変形量が粒子サイズ、粒度分布、間隙比などの影響を受けて変化することを明らかにした。実堤体の材料定数を、供試体の粒子サイズに制約を設けた室内試験結果によって直接評価できないことを指摘し、現場材料と室内供試体の材料粒度の違いに関する変形パラメータの補正方法を示した後、これを用いてあるロックフィルダムの築堤、湛水工程を再現した応力変形解析を実施した。解析結果は実測値と概ね良好な一致を示し、提案手法の実務レベルでの適用性が確認された。

**Key Words :** compacted coarse material, high overburden pressure, elasto-plastic deformation  
constitutive equation, input parameter determination.

## 1. はじめに

ロックフィルダム、空港盛土、高速道路盛土などの大型盛土構造物は、様々な種類の土質材料を転圧用の大型重機によって締固めながら、順次盛り立てて建造される。施工中に盛土が安定な状態を保ちうるかどうか、盛土完成後、例えばダムに水を貯めた時にその安定性が損なわれることがないかどうか。これらを確認するために、有限要素法を用いた逐次盛立解析や湛水解析が行われる<sup>1)・2)・3)・4)・5)</sup>。築堤中、あるいは湛水中の堤体の応力変形挙動を精緻に再現するために、例えば堤体のゾーニングや施工履歴を忠実に再現したり、解析に用いる土の力学モデルや材料定数をできるだけ実状通りに設定するなどの努力が払われる。しかしながら、大型ダムのように、転圧用の重機によって密に転圧された土の上に、さらに非常に大きな盛土上載荷重が加わった時の実堤体の変形挙動を詳細に調べた事例<sup>6)・7)</sup>は少ない。

密に締固められた粘性土を、締固め効果と等価な先行圧縮応力を有する過圧密土に置き換える伊勢田、

水野<sup>8)</sup>、Ohia and Hata<sup>9)</sup>、太田ら<sup>10)</sup>、太田ら<sup>11)</sup>、伊藤ら<sup>12)</sup>らの考え方がある。太田ら<sup>13)</sup>は、締固められたフィルダムコア材料(礫分を含む粘性土)を用いて高応力下での大型等体積三軸試験を実施し、実測された力学挙動を関口と太田<sup>4)</sup>により提案された弾塑性モデルによって概ね再現できることを報告した。解析に必要な各種のパラメータは、現場材料を室内に持ち帰り、現場転圧面と同じ密度、含水比状態に調整、すなわち現場転圧面を再現した供試体を作製して求めている。フィルダムのコア(遮水材料)に関する前述の問題点は、これらの研究により、既にある程度解決済みであるようにも思われる。

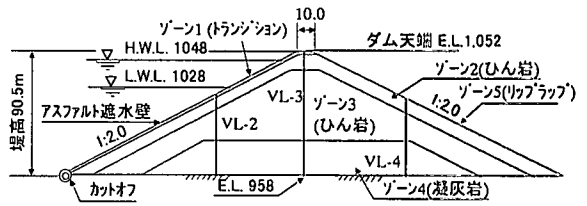
一方、大型ロックフィルダムの堤体の大部分は、粒子サイズが極めて大きな堅固なロック材料(以後、粗粒材料と称する)で占められている。空港盛土においても、重要度の高い滑走路下には粗粒材料が配置されることが多く、高速道路盛土でも、トンネル区間から発生する粗粒材料(トンネルずり)がしばしば盛土材として用いられる。粘性土だけでなく、締固められた粗粒材料に対しても、前述の等価先行

圧縮応力的な考え方が成立するのか、三浦ら<sup>15)</sup>や三浦・山本<sup>16)</sup>が、この問題に対して重要な示唆を与えている。密に締固められた粗粒材料が、ロックフィルダムのような高応力下では粘性土に類似した弾塑性的な変形挙動をとること、高応力下での力学挙動に限っては、粘性土の場合と同様に、カムクレイ系の弾塑性構成モデルの援用が可能であるとの室内試験結果の報告である。これらの知見が、大型ダムのような実堤体でも成り立つことが検証できれば、前述の太田ら<sup>13)</sup>の粘性土に対するモデル化の考え方が、粗粒材料に対してもそのまま適用できることになる。ただし粗粒材料の場合、最大粒径が1mにも及ぶ現場材料をそのまま室内に持ち帰り、転圧面を再現した超大型の供試体を用いて解析に用いる材料定数を調べることは、実務的には不可能に近い。粘土や砂などの土質材料と異なり、粗粒材料ではこの点を解決する必要がある。

本研究では、このような背景のもと、大型重機によって密に締固められた粗粒材料の高応力下における変形特性とそのモデル化、解析に用いる材料定数の実務的な設定の方法について、以下の手順に従って検討を加える。

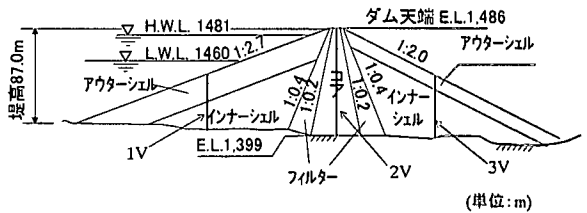
- (1) 高応力下での粗粒材料の弾塑性変形挙動を、ロックフィルダムロックゾーンの築堤中の実測沈下データを用いて検証。同じ材料を室内に持ち帰り、一次元圧縮試験を実施。実測変形挙動と比較。
- (2) 材料特性の異なる幾つかのダムの実測沈下データを分析し、ロックゾーンの圧縮変形量に影響を及ぼす諸要因を検討。
- (3) (1), (2)の結果を基に、実堤体の変形パラメータを予測する手法(粒子サイズに制限を設けた室内試験結果に対し、現場材料と室内供試体の粒子サイズの違いに関する補正を施す方法)を提案。
- (4) (3)の提案手法を用いて、粗粒材料により構成される実ロックフィルダムの築堤・湛水中の挙動解析を実施。実測データとの比較により実務レベルでの適用性を検証。

粗粒材料の高応力下での圧縮性状について、三浦ら<sup>15)</sup>が室内試験から得た知見をさらに発展させ、大型盛土構造物に関わる幾つかの実務問題(築堤時の堤体圧縮変形メカニズム、原粒度ロック材料の物性評価とこれを用いた堤体応力変形挙動解析など)への応用を図ることが本論文の目的である。



(a) 八汐ダム

(クロスアーム設置位置: VL-2, VL-3, VL-4)



(b) 上日川ダム

(クロスアーム設置位置: 1V, 2V, 3V)

図-1 八汐ダムおよび上日川ダムの標準断面図

表-1 対象としたダムの概要一覧

ダム名	形式	堤高 (m)	堤頂長 (m)	堤体積 ( $\times 10^6 \text{m}^3$ )	平均粒径 (mm)	撤出し厚 (m)	転圧方法	出典
八汐	F	90.5	281	1940	53	1.0	13.5t 振動ローラ6回転圧	17
上日川	CC	87	494	4110	88	1.5	13.5t 振動ローラ4回転圧	18
玉原	CC	116	810	5130	53	0.8~1.5	13.5t 振動ローラ2回転圧	19,20
高瀬	CC	178	382	11600	9	1.0~1.5	13.5t 振動ローラ4~6回転圧	21
七瀬	CC	125	340	7240	12.5	1.0~1.5	13.5t 振動ローラ4~6回転圧	
黒旗山	CC	91	255	2338	48	0.5~2.0	材料運搬車の通過1回以上	
Gepetsch	CC	153	800	7100	38	2.0	振動ローラ4回転圧	
Salt Springs	F	100	398	2294	1300 (岩石量より推定)	31.0 (平均)	無転圧(岩石、散水のみ)	22

F:表面遮水壁型 CC:中央遮水壁型

## 2. 締固められた粗粒材料の高応力下での圧縮変形特性

### (1) 対象としたロックフィルダムの概要

堤体の規模やダム形式、築堤材料の粒度特性など、条件の異なる幾つかのロックフィルダムを対象として、築堤中のロックゾーンの実測沈下挙動を調べた。八汐ダム<sup>17)</sup>と上日川ダム<sup>18)</sup>の2つのダムでは、クロスアーム(層別沈下計)のデータを用いて築堤時における実堤体の間隙比~上載荷重関係を求めるとともに、ロック材を室内に持ち帰り一次元圧縮試験を行うなど、詳細な検討を行った。その標準断面図が図-1(a)(b)である。八汐ダムは堤体のすべてが粗粒材料で構成される表面遮水壁型のロックフィルダム、上日川ダムは中央土質遮水壁型のロックフィルダムである。後者は、遮水を目的とする土質コアゾーン、堤体の強度確保を担うロックゾーン、およびその間に配置される中間的粒度のフィルターゾーンの3つのゾーンにより構成されている。両ダムには図中に示す位置にクロスアームが設置され、築堤中の堤体沈下量が実測された。ロックゾーンの圧縮変

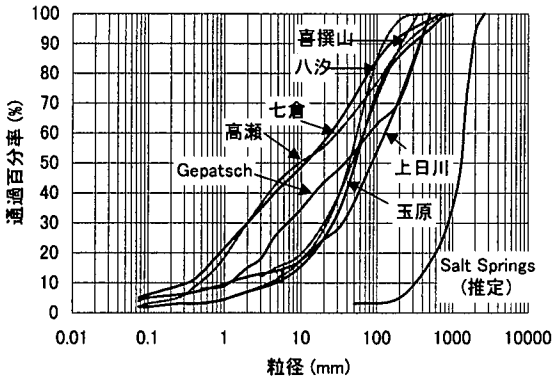


図-2 各ダムロック材料の粒度特性

形量に影響を及ぼす諸要因を調べるために、八汐、上日川ダム以外にも、材料特性や転圧仕様の異なる6つのロックフィルダムの実測沈下量を調査した。紙面の関係から、これらの標準断面図は割愛し、表-1中にその形式と緒元、ロック材の平均粒径や転圧仕様、出典をまとめて示した。詳細は文献19)~22)を参照されたい。

対象とした8つのダムのロック材の粒度特性を図-2に示す。一律に「ロックゾーン」と称しながらも、各ダムでその粒度特性は大きく異なっている。文献22)より引用したSalt Springsダムは、巨大なロックを用いて31mリフトで築造された(いわゆる「投げおろしロック」)ダムであり、粒子サイズが極端に大きな粗粒材料を用いた事例として取りあげた。本ダムについては、工事誌に残されたロック材の平均、最大重量に関する記述から、岩石比重を仮定し平均粒径や最大粒径を図のように推定して用いた。

(2) 現場転圧された土質材料の高応力下での圧縮変形特性

粗粒材料の高応力下における圧縮変形挙動を議論する前に、まず伊勢田、水野<sup>9)</sup>、Ohta and Hata<sup>9)</sup>、太田ら<sup>10)</sup>、太田ら<sup>11)</sup>、伊藤ら<sup>12)</sup>による「等価先行圧縮応力」の考え方を図-3により説明する。盛土材料をダンプで運び、盛立て面に撒きだす。図中のA点(○印)の状態である。これを重機によって転圧すると、例えば軽いブルドーザならばB点(△印)、重い大型重機であればD点(□印)まで間隙比が減少する(細かく言えば、転圧中に重機荷重の自重と振動効果によっていったんA→Cの変化を受け、重機が過ぎ去った後、B点に至る)。転圧が終了した後、この地盤の上に盛土荷重が順次加えられる。ブル転地盤ではB→C→F、大型重機による転圧地盤ではD→E→Fの経路をたどって地盤が変形

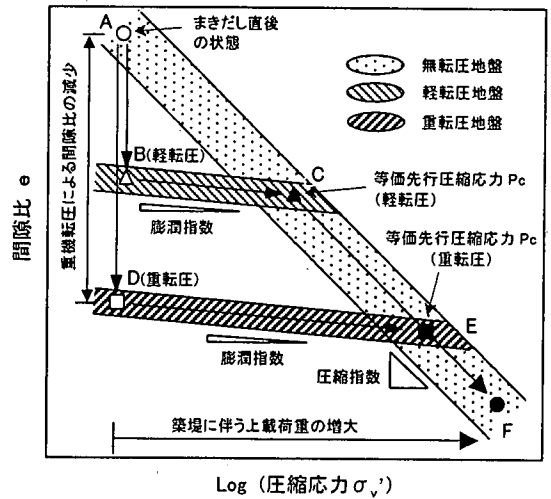


図-3 締固め土の等価先行圧縮応力の概念

する。転圧効果に対応するある上載荷重(C点、E点に相当する「等価先行圧縮応力」)までは転圧地盤はほとんど沈下せず、これを越えると塑性変形が発生して沈下量が急増する。過圧密土に類似した挙動である。折れ曲がり点までの傾きを膨潤指数(再圧縮指数)、以降の傾きを圧縮指数、折れ曲がり点の応力を先行圧縮応力と見なせば、大型の転圧機械によって締固められた地盤を「ある過圧密履歴を受けた土」に置き換えてモデル化することができる。等価先行圧縮応力の値は、転圧効果の大小を表す定量的な指標とみなされる。

この考え方は、元々は粘性土、例えばロックフィルダムでは細粒分を多く含むコア材料のような土を対象として提案された。大型ダムの築堤材料が、実堤体で本当にこのような挙動をとっているのか。粗粒材料に先立ち、まず上日川ダムのコアゾーンの実測沈下挙動を調べてみた。築堤中のクロスアームの実測沈下データを、以下の手順で整理した。

- ① 転圧直後の間隙比は、転圧面での現場密度試験(水置換法)により求められている。この間隙比を間隙比~上載荷重関係の最初の点としてプロットする(便宜的に、撒きだし厚の1/2の上載荷重を横軸にとってプロット)。
- ② クロスアーム設置以降の、盛立てに伴う層間圧縮量の実測値をアーム間隔で除し、圧縮ひずみを求める。地盤が一次元圧縮状態で沈下したものと仮定し、初期間隙比と実測圧縮ひずみから間隙比の変化を各盛土高さごとに逐次追跡する。
- ③ 盛土の進捗と共に転圧面に加わっていく上載荷重の大きさを、別途実施した逐次盛立て解析<sup>23)</sup>により計算する。②で求めた間隙比とこの上載荷重の組み合わせを逐次求め、 $e \sim \log \sigma'_v$  曲線を描

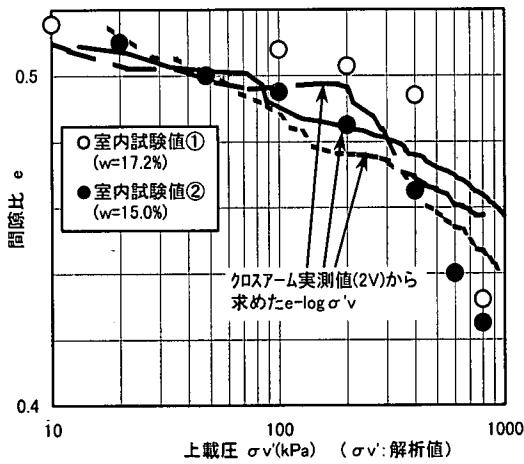


図-4 上日川ダムコアゾーンの実堤体圧縮曲線

く、中央遮水壁型ダムのコアゾーンでは、堤体が三角形の形状をなしていること、およびゾーン間の剛性差によるアーチング現象によって上載荷重は必ずしも盛土高さ $H \times$ 単位体積重量 $\gamma$ とはならない<sup>2), 7), 23)</sup>。上載荷重の値に逐次盛立て解析の結果を採用したのは、このような理由による。

得られた $e \sim \log \sigma'_v$ 関係が図-4である。高応力下での変形挙動を調べるために、上載荷重が大となる堤体深部のクロスアーム3箇所のデータを採用した。実堤体の圧縮曲線に相当するこのカーブは、確かに $\sigma'_v = 200 \sim 500 \text{ kPa}$ 付近で折れ曲がりを生じている。図-3に模式的に示したような弾塑性的な圧縮変形が、実際のダム堤体でも生じているようである。図中には、このコア材料を室内に持ち帰り、現場転圧面と同じ密度、含水比に調整した供試体を作製して一次元圧縮試験を行った結果を○、●印で併記した(直径200mm×高さ50mm供試体)。室内試験では、現場材料に含まれる礫分のうち、19mm以上の部分をカットして用いたため、Walker-Holtzの手法による礫率補正<sup>12), 24)</sup>を施し、現場相当の状態に締固めた(現場材料と室内供試体の粒度の違いを図-14中に比較して示す)。室内試験結果は実堤体の実測圧縮曲線によく似ている。粘性土に近いコア材料の場合、現場の土を持ち帰り、現場転圧面を再現した供試体を用いて室内試験を行っておけば、解析に用いる変形パラメータなども直接決めることができる。

### (3) 現場転圧された粗粒材料の高応力下での圧縮変形特性

図-3のような考え方が、粗粒材料に対しても成り立つかどうか。ある粗粒材料(砂岩)を試験室に持ち帰った。粒径37.5mm以上の部分をカットし、初期

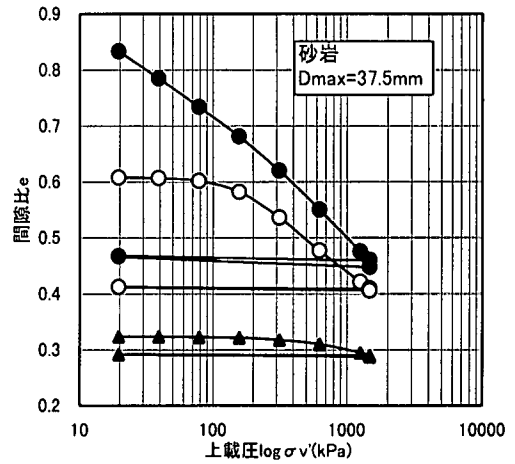


図-5 砂岩を用いた室内一次元圧縮試験結果

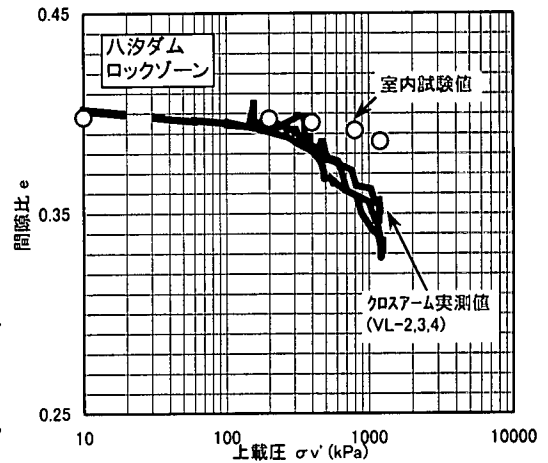


図-6 八汐ダムロックゾーンの実堤体圧縮曲線

間隙比を数種類に変えて締固めた後、自然含水比状態(吸水率2.2%)で一次元圧縮試験を実施した(直径200mm×高さ200mm供試体)。その結果が図-5である。締固めを全く行わない緩詰め状態の供試体は、 $e \sim \log \sigma'_v$ 座標上でほぼ直線的な、すなわち粘性土の正規圧密曲線に類似した圧縮変形特性を示す。締固めによって初期間隙比を減少させると、膨潤指数、圧縮指数の2つの傾きと折れ曲がり点をもった弾塑性的な圧縮変形挙動が現れ、初期間隙比をさらに減少させると、弾性的な挙動のみが卓越するようになる。三浦ら<sup>15), 16)</sup>が主張している通り、図-3に模式的に示した考え方は、締固められた粗粒材料に対しても概ね適用できそうに思われる(ただし、図中の○と●のプロットを見ると、図-3の模式図とは異なって、正規圧縮ラインは実験で採用した上載圧の範囲内では1本には収束しておらず、コア材のような土質材料とは若干傾向が異なっている)。

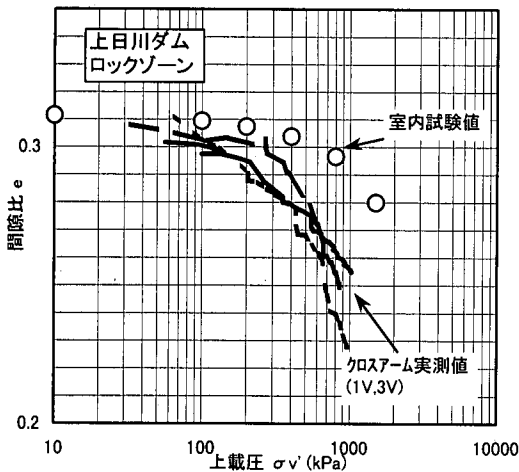


図-7 上日川ダムロックゾーンの実堤体圧縮曲線

実際のダム堤体でもこのような変形挙動が生じているのか、上日川、八汐ダム築堤時のロックゾーンの实测沈下データを用いて、図-4と同じ整理を試みた結果が図-6、図-7である。図-4と同じ理由から、堤体最深部のクロスアームデータを採用した。巨大な岩石で構成されるロックゾーン実堤体の圧縮曲線も、細粒土のコアゾーンと同様、 $\sigma_v = 300 \sim 600 \text{ kPa}$ 付近に折れ曲がりが見られている。図-5の室内試験結果と同じ現象が、実ダムのロックゾーンでも生じているようである。粒子サイズの大きなロック材は、上載荷重を数少ない粒子接点で分担する。大型ダム築堤時のような高応力下では、分担された粒子間伝達荷重が非常に大きなものとなり、粒子破碎やこれに伴う粒子の再配列が生じて塑性変形が発生する。三浦ら<sup>15), 16)</sup>やMarachiら<sup>25)</sup>は、粗粒材料の弾塑性変形のメカニズムをこのように説明している。図中には、図-4にならい、これらのダムのロック材を室内に持ち帰って行われた大型一次元圧縮試験(供試体直径200mm×高さ200mm)の結果を○印で併記した。室内試験結果もまた、上載圧が増加するにつれて圧縮曲線の傾きが次第に大となる、弾塑性的な圧縮変形特性を示しているが、図-4に示したコア材の場合とは異なり、膨潤指数や圧縮指数に相当する圧縮曲線の傾きは現場圧縮曲線のほうがかなり大きい。この理由については、後の3章で再度考察を加える。

#### (4) 粗粒材料の高応力下での圧縮変形量に影響を及ぼす諸要因

締め固められた粗粒材料の高応力下での圧縮変形量の大きさは何によって決まるのか、この点を明らかにするために、表-1に示した8つのダムを対象とし

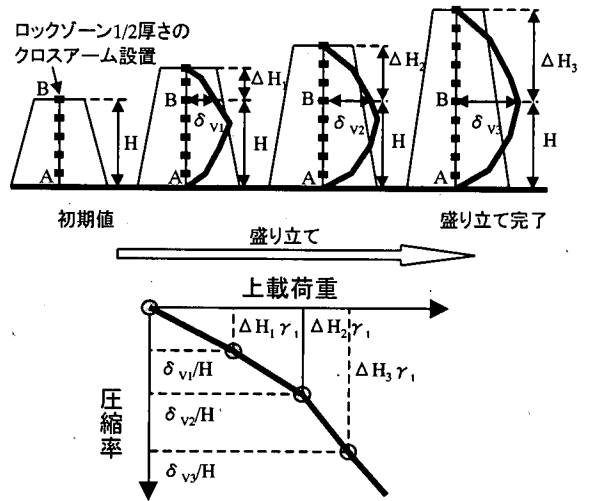


図-8 ロックゾーンクロスアームデータの整理方法

て築堤時のロックゾーンの实测沈下データを整理した。ロックゾーンの圧縮変形量に影響を及ぼす諸要因を概観することが本節の目的であるため、図-6、図-7のような詳細な整理方法ではなく、文献22)にならい、図-8に模式的に示すような簡易な整理方法を採用した。多くのダムでは、上日川ダムや八汐ダムのような詳細なクロスアームデータがデジタル値として残されていなかったことも、理由のひとつである。

- ① ダムの築造工程を、巨大な圧縮試験と考える。堤体高さの1/2の位置に設置されたクロスアームBと基盤位置Aの間の堤体を、ひとつの供試体とみなす。クロスアームBが設置された時点初期状態とし、その後の築堤に伴うA～B間の層間圧縮量 $\Delta\delta$ を逐次求める。これをA～B間の層厚Hで除し、見かけの圧縮率 $\varepsilon$ を計算する<sup>21)</sup>。
- ② クロスアームBの上の盛土厚 $\Delta H \times$ 単位体積重量 $\gamma$ として上載荷重 $\sigma_v$ を計算し、圧縮率 $\varepsilon$ と上載荷重 $\sigma_v$ の関係を求める(前述したように、この $\sigma_v$ 値は実堤体の上載荷重とは一致せず、

注) ロックゾーンがB点まで盛立てられた時点で、A～B間にある粗粒材料の多く、特に下部では、自重によって既に弾性領域から塑性領域へ移行している。このため、このような整理方法では図-6、図-7に示したような、盛立ての初期を含めた弾塑性的な変形挙動を詳細にとらえることはできないが、定性的には、塑性域での圧縮曲線に近いものと思われる。

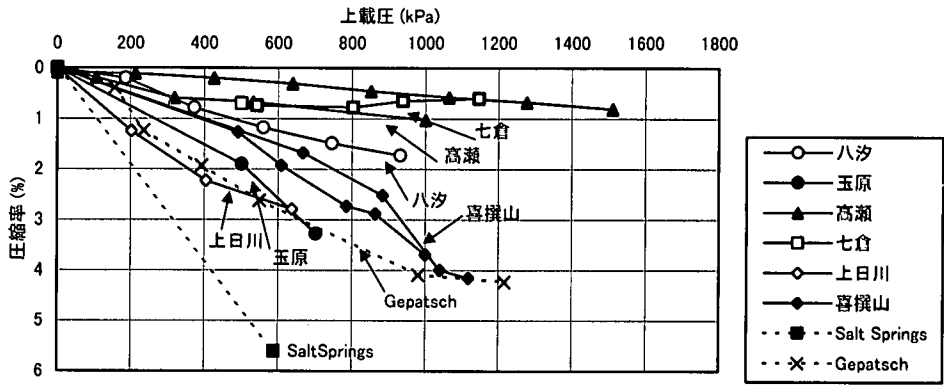


図-9 各ダムの上載荷重～圧縮率関係

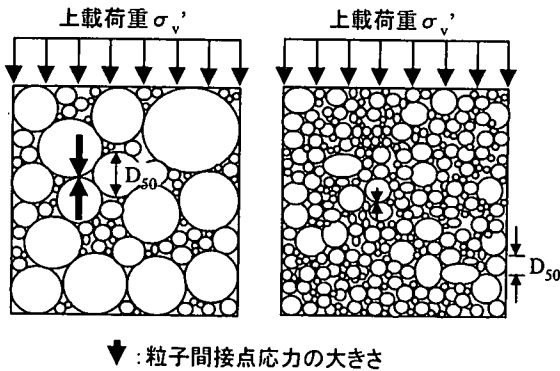


図-10 粗粒材料の圧縮性と材料特性の関係

この意味からも簡易な整理方法である)。

8つのダムの上載荷重～圧縮率関係を併記して示した結果が図-9である。各ダムで、圧縮曲線の傾きは大きく異なる。この違いが何に起因するのかを考察するために、図-10を準備した。図は、粗粒材料の粒子サイズや粒度組成、間隙比と圧縮性との関係を模式的に表したものである。三浦らの主張通り、粗粒材料の塑性圧縮変形が粒子間接点での破碎やこれに伴う相互のずれによって生ずるならば、その大きさは粒子間伝達荷重の大小に左右される。同一の上載荷重のもとでは、これを粒子間接点の数で分配した値が粒子間伝達荷重となるため、結局、粒子間接点数の多少が圧縮変形量を決めることになる。例えば、平均粒径が大きいほど、砂分などの間隙充填材料が少ないほど、そして平均的な間隙比が大きいほど、ある一定容量内に詰められた粗粒材同士の粒子接点数は少なくなる。上載荷重をこの接点数で分配した後の平均的な粒子間伝達荷重が大きくなり、変形量が大となる。締めめられた粗粒材料の高応力下での圧縮変形量は、

- ① 上載荷重  $\sigma_v'$  が大きいほど
- ② 粒子サイズ  $D$  が大きいほど
- ③ 間隙比  $e$  が大きいほど
- ④ 間隙を充填する材料が少なく、均一粒度に近いほど

大となることが予想される。三浦ら<sup>15), 16)</sup>はさらに、粗粒材料の粒径が大きくなるほど1個の岩石の中に存在する潜在クラックの数が増加し、これが塑性変形を助長させることを述べている。このような影響や岩種の違い、岩石の節理の有無、あるいは粗粒材料の間隙における水の有無や粒子の含水状態といった影響<sup>26)</sup>も、当然、上に示した各要因に加えられるべきと思われる。このような予想のもと、ロックゾーンの圧縮率と材料特性の関係を調べてみた。着目する圧縮変形量として、上載荷重600kPaでの圧縮率を採用した(図-6、図-7から、粗粒材料が確実に塑性変形領域に至るとと思われる上載荷重として採用。

図-9の実測データより上載荷重600kPaに相当する圧縮率を直線補間して内挿的に求めた)。これと対応づけるために、各ダムで用いられた粗粒材料の粒度特性や転圧時の間隙比を調査した。各ダムのロック材の粒度曲線は、既に図-2に示した。Salt Springsダムの推定粒径が最も大きく、逆に高瀬、七倉ダムは最も粒径が小さい。その間は、細粒側の八汐ダムから粗粒側の上日川ダムまで材料粒度が変化している。この順番は、図-9に示した圧縮沈下曲線の上下の位置関係(すなわち同一上載荷重での圧縮沈下率の大小)の順番に良く対応している。図-11(a)に圧縮率  $\epsilon$  (上載荷重600kPaにおける圧縮率) と平均粒径  $D_{50}$ 、図-11(b)に圧縮率  $\epsilon$  と粒径2mm以下の細粒土の含有率(ロック材の間隙を充填する成分の多少を表す指標として採用)、図-11(c)には圧縮率  $\epsilon$  と間隙比  $e$  の関係を示す。各ダムで用いられた粗粒材料の岩種や岩級、含水状態などは必ずしも一定ではない。その影響もあつてかデータにはばらつきが見られるものの、図-11の結果は、いづれも図-10で考察

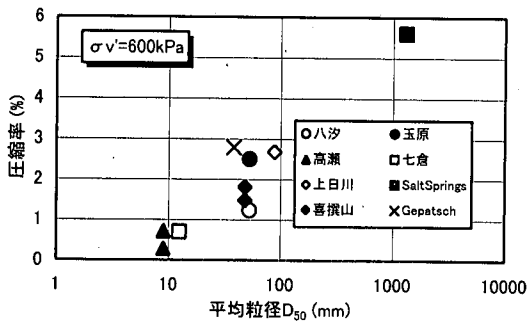


図-11(a) 平均粒径  $D_{50}$  と圧縮率の関係

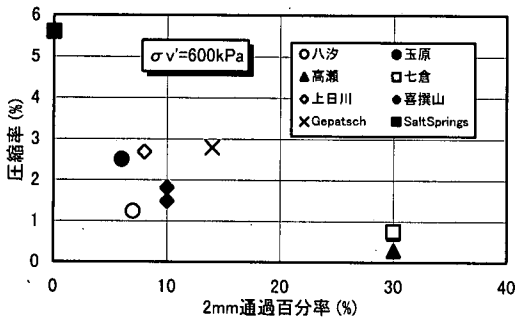


図-11(b) 2mm通過百分率と圧縮率の関係

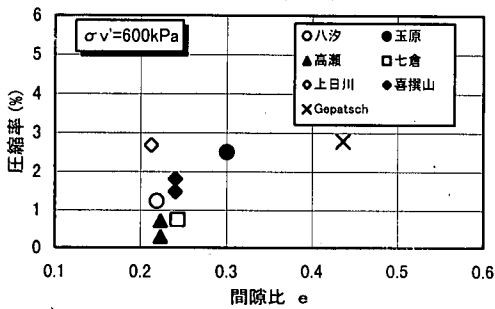


図-11(c) 間隙比  $e$  と圧縮率の関係

した予想結果と概ね符合するものといえる。

ここまで得られた知見を、一度まとめておく。  
『現場転圧された粗粒材料は、ロックフィルダムのような高応力下では粘性土に類似した弾塑性的な圧縮性状を示し、「等価先行圧縮応力」の考え方に基づく過圧密土としてのモデル化が可能である。粗粒材料の圧縮変形量の大きさは、粒子サイズや粒度、間隙比の影響を受けて変化し、これは粒子間伝達荷重の大小によって説明づけられる』

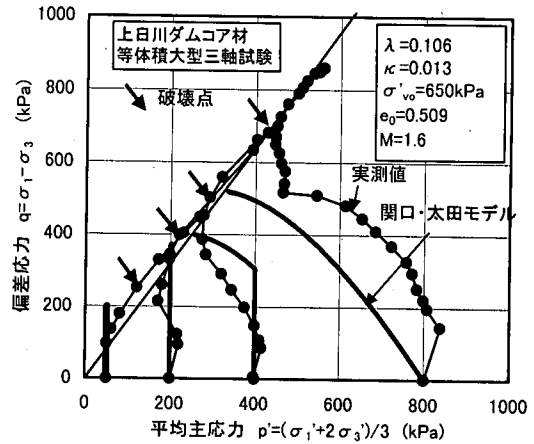


図-12 上日川ダムコア材のせん断時のストレスパス

### 3. 現場転圧された粗粒材料の高応力下での力学挙動のモデル化と材料定数の推定

現場転圧された粗粒材料の高応力下での力学挙動を、どのようにモデル化するか。前章では、実ダムの実測圧縮変形挙動から、これを「転圧効果と等価な先行圧縮応力を有する過圧密土」に置き換えることを述べた。一次元的な圧縮変形挙動だけではなく、例えばせん断時の挙動にも弾塑性的な振る舞いを見いだすことができるのか。太田ら<sup>13)</sup>は、現場と同じ状態に締固められたコア材料に対してこのことを確認し、既往の弾塑性モデルの援用が可能であることを報告している。上日川ダムのコア材料を用いて、これを再度確認した結果が図-12である。現場相当に締固められたコア材料のせん断時のストレスパス(大型等体積三軸試験。供試体直径300mm×高さ600mm)を見ると、拘束圧の増加に伴うダイレイタンスー特性の変化など、せん断時の挙動も過圧密から正規圧密的なものへと移行している様子がよく判る。図中には、関口と太田により提案された弾塑性モデル<sup>14)</sup>による理論値を併記したが、図中に矢印で示した破壊点に至るまでのストレスパスに限定すれば、実測値との整合性は比較的良好といえる。粗粒材料に関しても、等価先行圧縮応力を越えるような高応力下での力学挙動に限っては、既往の弾塑性モデルの援用が可能であることが、三浦ら<sup>15)、16)</sup>により報告されている。三浦ら<sup>16)</sup>の論文中に記載された粗粒材料の大型三軸試験結果(排水せん断試験)<sup>25)</sup>を読みとり、この上に既往の弾塑性モデルによる理論値を併記した結果が図-13である(残念ながら、上日川ダムや八汐ダムでは粗粒材料を用いた大型の等体積せん断試験や体積ひずみを計測しながらの大型三軸試験が行われていなかった)。三浦、安福<sup>27)</sup>は、

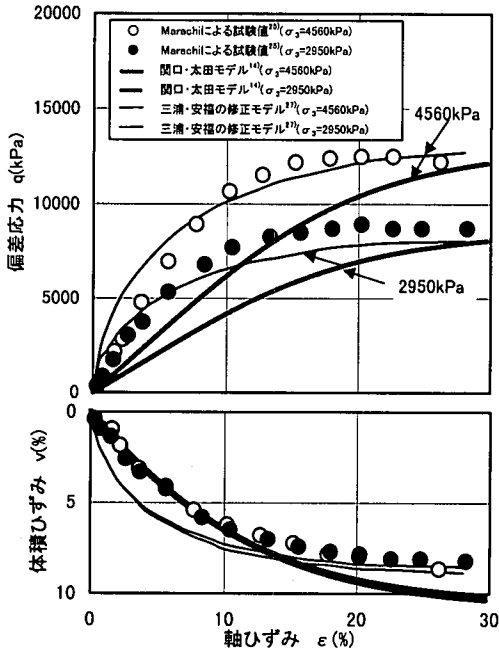


図-13 粗粒材料の大型三軸試験結果（三浦ら<sup>16)</sup>に加筆）

砂や礫を用いた高応力下での室内三軸試験結果と粘性土の既往弾塑性モデルによる理論値との比較を行い、降伏曲線式を適宜修正することで実験で求められた応力～ひずみ関係との整合性が高まること、一方、せん断時の体積変化特性に関しては、むしろ修正前の既往理論式のほうが整合性が高い場合があることを報告している<sup>27)</sup>。図-13中に併記した2つの構成式、関口・太田モデルと三浦、安福の修正式に基づく理論値も、確かにこれと同様の傾向を示しており、応力～ひずみ関係の立ち上がりの勾配は修正式のほうが、体積変化特性については、実堤体の築堤時のひずみレベル（図-9より最大でも数%）内では、むしろ既往理論式のほうが整合性が高い結果を与えている。応力～ひずみ関係と体積変化特性の両者を同時に精度良く再現することは現時点では難しく、さらに実堤体の築堤時の応力経路は室内三軸試験の単純なストレスパスとは当然異なり、これが実測挙動との整合性にどう影響するかも不明である。このため、図-13の結果のみから構成モデルの適否を判断することは難しく、今回はまず、関口と太田による既往モデルを用い、これが大型ダム築堤時の実現象をどの程度まで再現できるのかを検討することとした（修正式をFEMに組み込む煩雑さや、関口・太田モデルを組み込んだ市販ソフトの援用の可能性など、実務面での使いやすさを勘案）。

実ダムの築堤解析結果は4章で報告するが、その前に、実粒度の粗粒材における材料定数の決定とい

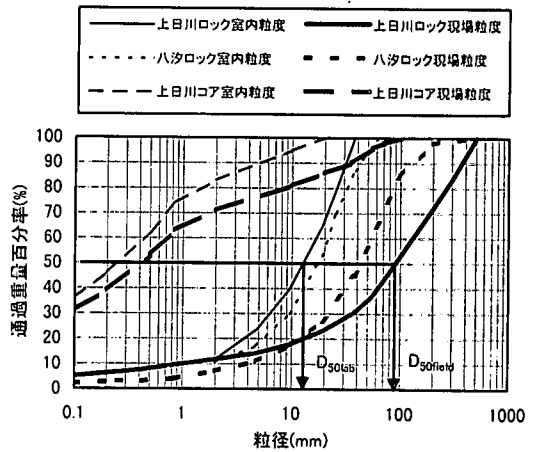


図-14 現場材料と室内供試体の粒度の違い

う問題を検討しなければならない。巨大な岩石を含まないコア材料では、現場材料を室内に持ち帰り、現場転圧面と同じ状態（密度、含水比）にこれを調整した供試体を作製して、各種のパラメータを決めるための圧密試験や三軸試験を実施することができる。現場材料が礫分を含む場合の粒度補正には、従来のWalker-Holtzの礫率補正法<sup>24)・12)</sup>を用いればよい。図-4では、上日川ダムコアゾーンの実測圧縮曲線と室内圧縮曲線を比較したが、確かに両者はよく整合しており、室内供試体を用いて実堤体の材料定数を直接求めることができそうである。粘土や砂などの土質材料であれば、パラメータの決定にさほど問題は生じないであろう。

粗粒材料の場合どうか。図-6、図-7では、図-4にならって実堤体ロックゾーンの実測圧縮曲線と室内試験結果を併記して示した。コアゾーンとは異なり、ロックゾーンの実測圧縮曲線の傾きは、室内試験のそれよりもかなり大きい。その理由は、次のように説明される。圧密パラメータを決めるために室内で一次元圧縮試験を行おうとすると、実験に用いるモールドには、用いる土の最大粒径の5倍以上の直径が要求される<sup>28)</sup>。ところが、最大粒径1mの現地の粗粒材料を室内に持ち帰り、直径5mの大型圧縮試験を2000kPaもの高応力下で実施することは不可能に近い。やむなく室内では、モールド直径の1/5以下に最大粒径を制限し、図-14に示すような、現場材料に比べて粒子サイズがかなり小さな供試体を用いて試験を行わざるを得ない（参考のために、図中には上日川ダムコア材の現場粒度と室内試験粒度を併記した）。図-11(a)～(c)では、粗粒材料の高応力下での圧縮変形量が粒子サイズ、粒度、間隙比等の影響を受けて変化することを示した。室内試験では、材料



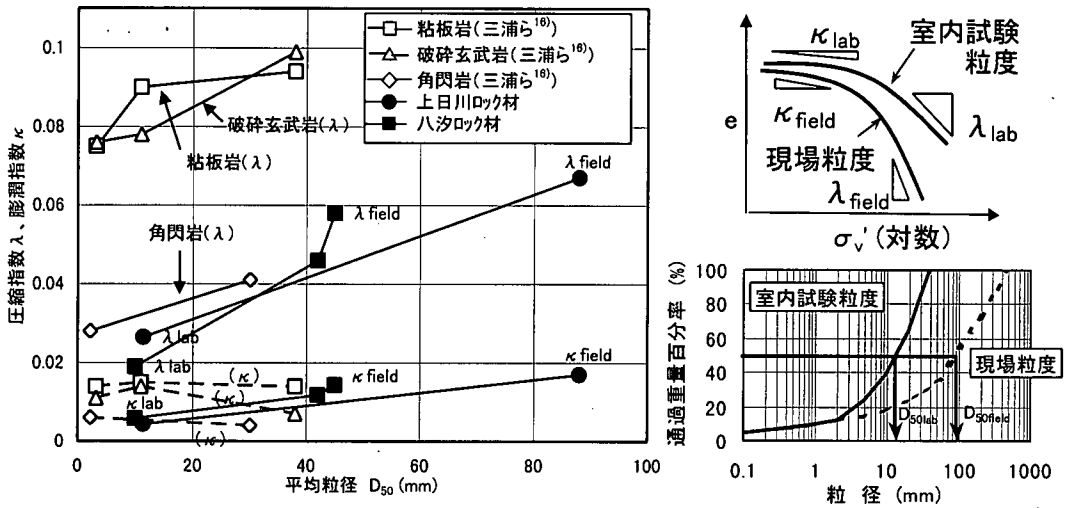


図-15 圧縮指数λと平均粒径 $D_{50}$ の関係

を現場と相似な粒度に調整し、現場間隙比相当に供試体を締めて現場転圧面を再現する努力がなされる。しかし前述の理由から、平均粒径に代表される粒子サイズだけは、室内で現場条件を再現することができない。図-10の模式図を再び思い返してみる。室内試験では供試体の粒径が現場材料よりも小さいため、ロック材同士の粒子接点数が増加し、同じ上載荷重を分配した後の平均的な粒子間伝達荷重が現場よりも小さくなる。室内試験の圧縮変形量は、当然現場よりも小さくなってしまふ。図-11(a)では、材料特性の異なる幾つかのダムの実測沈下データをもとに平均粒径の影響を議論したが、室内供試体と現場材料の粒子サイズの違いがもたらす圧縮性状の違いも、同じ粒子間伝達荷重という言葉で説明できるものと思われる。

粗粒材料の場合、室内試験結果を直接用いて材料定数を決めると、実堤体の変形量を過小に評価してしまう。室内試験の結果を利用して現地相当のパラメータを推定することができないか。三浦・山本<sup>16)</sup>にならい、図-15のような整理を試みた。図-6、図-7に示した室内、現場圧縮曲線の傾きから各々の膨潤指数 ( $\kappa_{lab}$ ,  $\kappa_{field}$ ) と圧縮指数 ( $\lambda_{lab}$ ,  $\lambda_{field}$ ) を読みとる (ただし、室内試験から求められる  $\lambda_{lab}$  については、実験装置の上載荷重の制約から、圧縮曲線の傾きを十分に確認することができなかったため、便宜的に最後の2つのプロットの傾きを採用した。今後、より大きな上載荷重のもとで室内圧縮曲線を確認することが必要と思われる)。現場相当の値は室内試験のそれよりも大きい。これを縦軸にとり、現場材料と室内材料の平均粒径  $D_{50}$  を横軸にとって各々の組み合わせをプロットした結果が図-15である。図中に  $\blacksquare \rightarrow \blacksquare$ ,  $\bullet \rightarrow \bullet$  で示した右上がりの変

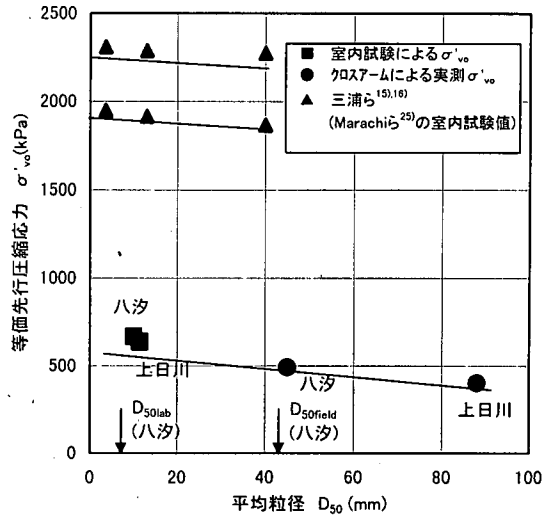


図-16 平均粒径 $D_{50}$ と等価先行圧縮応力 $\sigma'_{v0}$ の関係

化が室内と現場の違いに相当する。Marachiら<sup>25)</sup>の実験結果に対して三浦・山本<sup>16)</sup>が同じような整理を試みた結果が図中に併記されている (三浦らは最大粒径  $D_{max}$  を横軸にとったが、例えばダム材料の現場最大粒径は撒きだし厚さとの関係から規定される値に過ぎず、材料特性を忠実に反映する指標ではないものと考え、本研究では平均粒径  $D_{50}$  を採用した)。Marachiら<sup>25)</sup>の3種類の岩に対する室内試験結果から得られた「平均粒径の増加に対する圧縮指数λの増加傾向」は、上日川ダム、八汐ダムのそれと良く似ており、三浦・山本の考え方<sup>16)</sup>を援用して室内試験値を補正 (例えば、図の右上がりの傾きを用いて室内試験値を外挿するなど) し、実堤体相当のパラメータを概略推定することもできるように思われる。ただし膨潤指数κについては、Marachiらのデータは明確な増加傾向を示していない。その理由は現時点では不明である。平均粒径と等価先行圧縮応力 $\sigma'_{v0}$

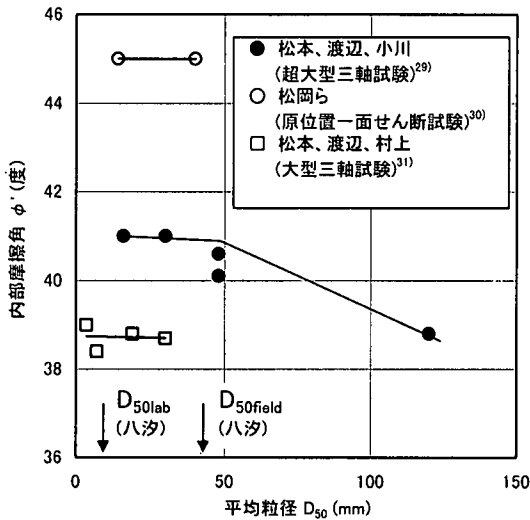


図-17 平均粒径 $D_{50}$ と内部摩擦角 $\phi'$ の関係

の関係を調べた結果が図-16である。圧縮曲線の折れ曲がり点に相当する等価先行圧縮応力の値は、平均粒径の増加に伴って若干減少する傾向を示している。圧縮指数 $\lambda$ と同様、これも粒子間伝達荷重の違いにより説明づけることができよう。図中には、三浦・山本<sup>16)</sup>がMarachiらの実験結果<sup>29)</sup>に対して同様の整理を行った結果を併記したが、両者の右下がりの傾向はよく似ている。一方三浦らは、ロック材の最大粒径が15倍となっても $\sigma'_c$ 値は高々2%~10%程度しか低下しないことを報告している<sup>16)</sup>。 $\sigma'_c$ 値に対する粒子サイズの影響は、圧縮指数などに比べると、実務的な範囲内ではさほど大きくないものといえる(図中の横軸には、試みに図-14中に示した八汐ダムロック材の室内、現場平均粒径 $D_{50lab}$ 、 $D_{50field}$ の大きさを矢印で転記した)。

関口と太田による弾塑性モデルでは、ここまで述べてきた圧密特性以外にダイレイタンシーに関するパラメータが必要となる。ダイレイタンシー係数 $D$ は、初期間隙比 $e_0$ や圧縮指数 $\lambda$ 、膨潤指数 $\kappa$ の値を用いて $D = (\lambda - \kappa) / M(1 + e_0)$ にて求められる<sup>14)</sup>。限界状態応力比 $M$ は内部摩擦角 $\phi'$ (ただし、正規圧縮状態での限界状態に相当する値)を用いて計算されるため、粗粒材料の強度試験結果があれば、ダイレイタンシーに関するパラメータを定めることができる。一方、一次元圧縮試験の場合と同じ理由から、現場粒度の材料に対して内部摩擦角 $\phi'$ を直接求めることは容易ではない。しかしながら、内部摩擦角に関しては供試体の粒子サイズの影響はさほど大きくないことが、松本ら<sup>29)</sup>、松岡ら<sup>30)</sup>、松本ら<sup>31)</sup>により報告さ

れている。これらを平均粒径と内部摩擦角の関係としてまとめた結果が図-17である(ただし、図中の内部摩擦角の値は、各文献ごとにその定義も異なり、必ずしも後の4章で述べるような正規圧縮状態での限界状態応力比には相当しない。ここでは、同一の整理方法のもとで平均粒径が内部摩擦角に及ぼす影響を相対的に示すにとどめる)。図中には、図-16と同様に八汐ダムロック材の室内、現場平均粒径を併記したが、この範囲内での内部摩擦角の変化は高々1度程度に過ぎない。供試体の粒子サイズの違いが強度定数に及ぼす影響は、今回対象としたダム材料の室内、現場粒度の範囲内ではさほど大きくはなく、実務的には室内供試体に対して得られた値を採用することに大きな問題はないものと思われる。

#### 4. 実ロックフィルダムの築堤・湛水時挙動解析への適用事例

前章で提案した粗粒材料の材料定数設定法が、大粒径のロック材を用いた実際の大型盛土構造物にどの程度適用可能なのか。このことを調べるために、堤体のすべてが粗粒材料で構成されている八汐ダムを対象として、築堤、湛水時の応力変形解析を実施した。

八汐ダムの標準断面図は、既に図-1(a)に示した。堤体は、ひん岩および凝灰岩の2種類の粗粒材料を大型の振動ローラによって転圧して造られており、上流側にはアスファルト製の遮水壁が設けられている。本ダムでは、図1(a)中に示す位置にクロスアームが設置され、築堤中の堤体沈下量が実測された。さらに、湛水に伴う堤体変形(沈下および上下流方向の変位増分)も、上流側遮水壁に設けられた特殊な計測装置<sup>32)</sup>を用いて実測された。解析に用いたモデルを図-18(a)に、築堤工程を再現した要素追加の様子を図-18(b)に示す。実堤体のゾーニングを再現し、基礎岩盤も解析領域に取り込んだ。築堤解析では図-18(b)に示したように実盛立て工程に対応した要素追加を順次行い(図では基礎岩盤は省略し、堤体のみを示した)、湛水解析では引き続き上流側の遮水壁表面に全応力で水圧荷重を加えた(堤体中には水は存在しないため、水圧はゼロである)。前述した理由から、今回は構成則として関口と太田による弾塑性モデルを採用し、解析に用いるパラメータは、図-6に示した八汐ダムロック材の室内一次元圧縮試験結果に対して、図-15のような粒径補正を施すことにより定めた(ダム建造前の、図-6の実測圧縮曲線が得られていない状況を想定し、試みにMarachi

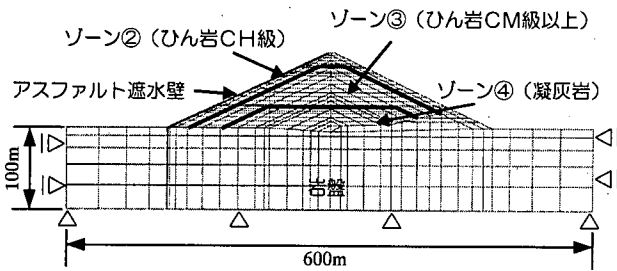
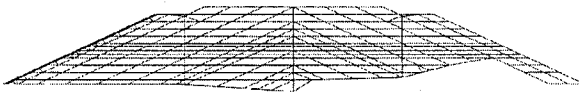


図-18(a) 八汐ダムの解析モデル

①盛立て開始後81日経過



②盛立て開始後662日経過



③盛り立て完了

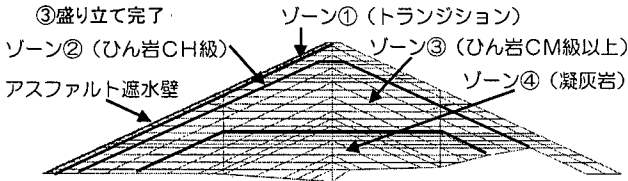


図-18(b) 築堤時の要素追加の状況

らのデータの平均的な傾きを用いて現場平均粒径相当の値に圧縮指数 $\lambda$ を外挿した。ただし膨潤指数 $\kappa$ はクロスアーム逆算値をそのまま使用した。内部摩擦角 $\phi'$ については、別途行われた室内三軸試験での実測データをそのまま採用した。室内三軸試験は、建設当時に強度管理試験として実施されたものであり、必ずしも今回の解析に用いる限界状態応力比を意識したものではなかった。そこで、これに最も近い条件として、実施された三軸試験の中で圧縮過程での拘束圧が最も大きなケース ( $\sigma_v' = 784\text{kPa}$ ) を選び、せん断時の最終ひずみ ( $\varepsilon = 15\%$ ) 状態を限界状態と規定して、その際のモール円より求める内部摩擦角 $\phi'$ を採用した。従って、ここに示した内部摩擦角の値は円弧すべり計算に用いられる設計値とは必ずしも一致しない。解析に用いた築堤、湛水工程を図-19に、パラメータの一覧を表-2に示す。

築堤中の堤体沈下の時系列変化に関して、解析値と実測値を比較した結果が図-20である。図-21には、上下流および中央部のクロスアームで得られた築堤時沈下量の深度方向分布に関する比較結果を示す。築堤に伴って発生する堤体沈下の時系列変化や、そ

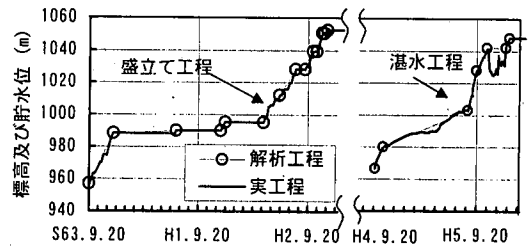


図-19 解析に用いた築堤および湛水工程

表-2 解析に用いたパラメータの一覧

	ゾーン① (トランジション)	ゾーン② (ひん岩CH級)	ゾーン③ (ひん岩CM級以上)	ゾーン④ (凝灰岩)	基礎岩盤	遮水壁 (アスファルト)
単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.40	20.01	20.01	18.74	23.05	22.96
初期孔隙率 $n_0$	0.288	0.314	0.309	0.398	-	-
先行圧縮応力 $\sigma_v'$ (kPa)	667	667	667	667	-	-
圧縮指数 $\lambda$	0.046	0.043	0.058	0.076	-	-
膨潤指数 $\kappa$	0.012	0.01	0.014	0.017	-	-
二次圧縮係数 $C_c$ ( $\times 10^{-3}$ )	0.026	0.25	0.75~6.4	2.0~8.8	-	-
内部摩擦角 $\phi'$	45.9	45.9	43.1	43.6	-	-
平均粒径 $d_{50}$ (mm)	43	42	45	60	-	-
ヤング係数 $E$ (kPa)	-	-	-	-	$1.08 \times 10^4$	$9.81 \times 10^4$
ポアソン比 $\nu$	-	-	-	-	0.3	0.45
備考	<ul style="list-style-type: none"> <li>室内三軸試験結果から得られる値より決定。</li> <li>ゾーン④(凝灰岩)の入力<math>\sigma_v' = 60\text{m}</math>を用いて外挿。</li> <li><math>\phi'</math>は室内三軸試験結果 (<math>\sigma_v' = 784\text{kPa}</math>, <math>\varepsilon = 15\%</math>)より</li> <li>初期孔隙率<math>n_0</math>は現場平均密度より決定。</li> </ul>				平均値	試験結果より

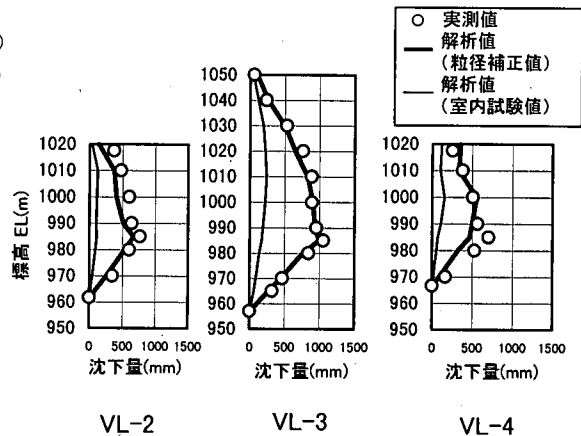


図-21 築堤時沈下量の深度方向分布

の深度方向の分布形状など、解析値は実測挙動を比較的良好に再現できているが、上流ロック高標高部など、一部には若干の乖離が認められる。これらの図中には、室内試験によって求められたパラメータ (粒子サイズの小さな室内供試体で得られたもの) をそのまま入力した場合の解析結果を併記した。この場合、解析値は堤体の実測変形量をかなり過小に評価している。図-22(a)(b)は、湛水開始以降の堤体変形量に関する比較結果である。図22(a)は、クロスアームにより計測された堤体沈下量 (湛水開始以降の増分量) の深度方向分布、図-22(b)は上流側遮水壁の変形量について、実測値と解析値を比較した結果を示している。部分的には若干の乖離が見られるものの、湛水圧による堤体の沈下増分や上下流方向

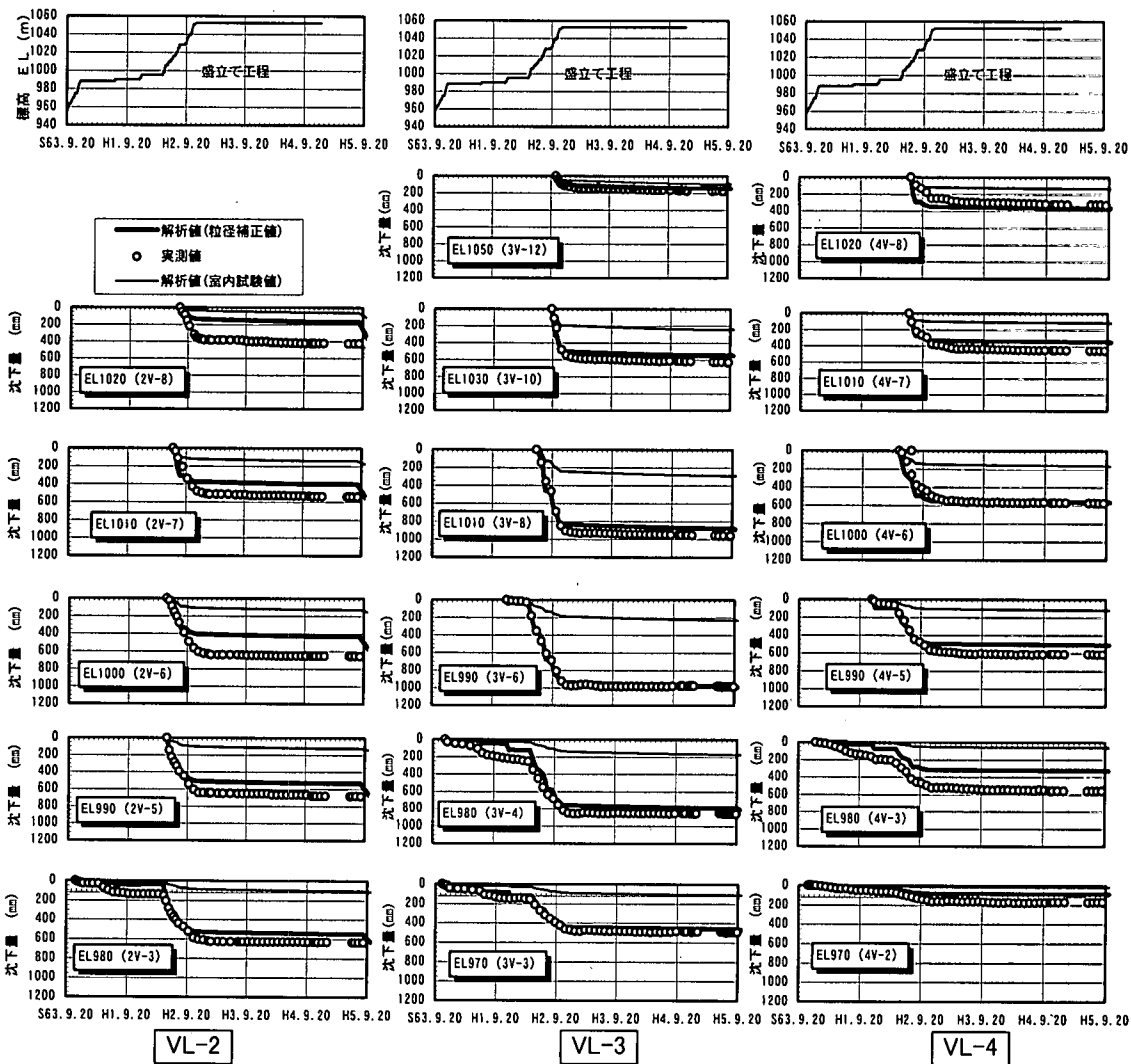


図-20 築堤時の堤体沈下の時系列変化

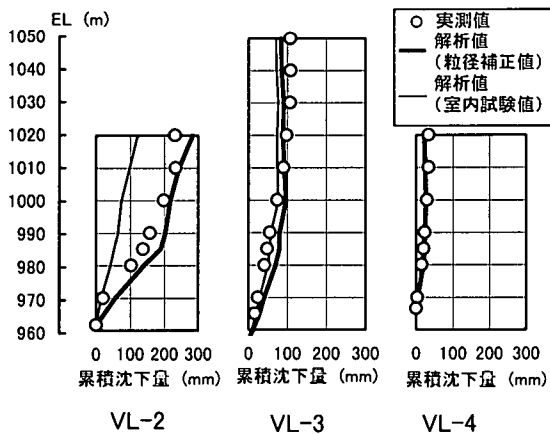


図-22(a) 湛水開始以降の沈下増分量の深度方向分布

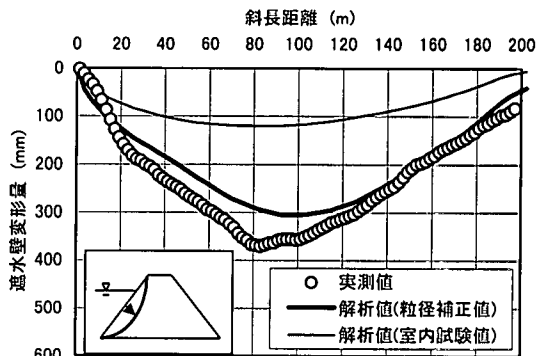


図-22(b) 湛水開始以降の遮水壁の変形量

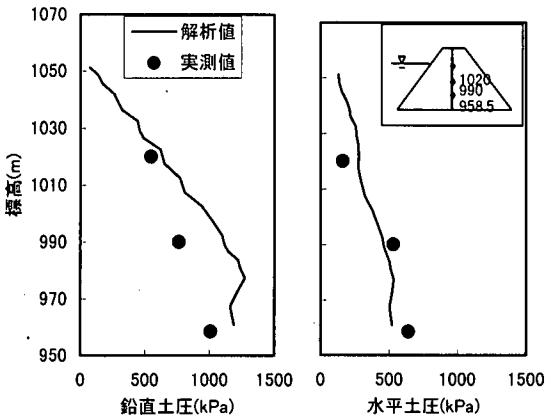


図-23 堤体土圧の深度方向分布

の変位増分に関して両者の整合性は概ね良好であり、また粒径に関するパラメータの補正が必要不可欠であることもよく判る。堤体内に設置された土圧計データを対象として、築堤完了時の実測値と解析値の比較を試みた結果が図-23である。鉛直、水平土圧の深度方向分布に関して、解析結果は実測挙動を概ね再現できている。

室内三軸試験結果と関口・太田モデルによる理論値を比較した図-13では、本モデルが実堤体で想定される数%程度までの体積変化特性を良好に再現できるものの、応力～ひずみ関係の整合性は十分ではないことを述べた。解析値と実測値の比較結果を見ると、全体傾向としては概ね整合する結果となっているものの、整合性の高い部分と乖離する部分が混在し、上記のモデル化の難しさを伺わせる。これに加えて、室内三軸試験と実堤体の応力経路の違いや実堤体密度のばらつき（室内試験で採用した現場平均密度と実情の不一致）の影響など、幾つかの不確定要素が混在するものと思われるが、結果的には、図-15に示したような、かなり乱暴なパラメータの設定方法でも、図-20～図-23に示した程度の精度で大型ダムの応力変形挙動を再現できているようである。

## 5. 結論

本論文で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 大型重機によって現場転圧された粗粒材料は、ロックフィルダムのような高応力下では粘性土に似た弾塑性的な圧縮変形挙動をとる。
- (2) 高応力下における粗粒材料の圧縮変形量は、粗

粒材料の粒子サイズ、粒度、および間隙比の影響を受けて変化する。これは、粗粒材料の粒子接点数の多少と、これによる粒子間伝達荷重の大小によって説明づけられる。

- (3) 高応力下における粗粒材料の力学挙動に対して、粘性土の既往構成モデルを援用することが可能である。ただし、解析に用いるパラメータの設定に際しては、室内と現場の材料の粒子サイズの違いに対する補正が不可欠である。
- (4) 室内と現場の粒子サイズの違いに対して、平均粒径を指標とするパラメータ補正法の試案を示した。
- (5) 本手法を実ロックフィルダムの築堤、湛水問題に適用したところ、解析値と実測値の間には比較的良好な一致が見られた。

大型重機によって現場転圧された粗粒材料の高応力下での力学挙動をどうモデル化し、実験不可能な実粒度材料の材料定数をどうやって定めるか。本研究では、実務問題への適用を優先させるために、あえて厳密な議論を避け、この問題に対する現時点での一案を示した。粗粒材料に対する弾塑性モデルの適用性の可否や粒子サイズの補正方法の妥当性の吟味など、今後検討すべき多くの課題が残されている。

謝辞：本研究を実施するにあたり、前田建設工業（株）技術研究所研究員、菅井正澄、藤山哲雄、藤谷雅義、安井利彰、前田和亨、武部篤治の各氏の助力を得た。また、八汐ダムの実測データや解析に際しては、東京電力（株）日比野悦久氏、鈴木英雄氏の助力を得た。末筆ながら記して謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) 林 正夫：ロックフィルダム築造中および湛水中の内部挙動—喜撰山ダム—（弾塑性解析ならびに実測値との比較），電力中央研究所報告，No. 70012，1970。
- 2) 松井家孝：ロックフィルダムの弾塑性解析—築造，湛水過程における内部挙動と材料物性との関連—，電力中央研究所報告，No. 72012，1973。
- 3) 中川加明一郎，駒田広也，金沢紀一：フィルダムの盛立ておよび初期湛水時における間隙水圧挙動の解析，土木学会論文集，No. 339，pp. 119-126，1980。
- 4) 仲野良紀，田中忠次，山下 進：有限要素法による深山ダムの応力，変形解析，土と基礎，No. 23-1，pp. 19-26，1975。
- 5) 向後雄二，浅野 勇，田頭秀和，林田洋一：フィルダムの築堤および初期湛水時の応力・変形解析，ダム工学会第

- 11回研究発表会講演集, pp. 4-6, 2000.
- 6) Kulhawy, F. H., Duncan, J. M. and Seed, H. B.: Finite Element Analysis of Stresses and Movements in Embankments during Construction, Report No. TE-69-4 to U. S. Army Engineers, WES, Univ. of California, 1969.
  - 7) 原田次夫, 松井家孝: ロックフィルダムの築造中およびたん水後の挙動, 土と基礎, No. 25-5, pp. 67-74, 1977.
  - 8) 伊勢田哲也, 水野正憲: 締固めた土の圧縮性状に関する研究, 土木学会論文集, No. 188, pp. 45-52, 1971.
  - 9) Ohta, H. and Hata, S.: Strength of dynamically compacted soils, Proceedings of the 9th Conference of JCSMFE, Tokyo, pp. 239-242, 1977.
  - 10) 太田秀樹, 西田義親, 国安逸朗, 金子義信: 土の締固め - 管理基準と品質管理 -, 土と基礎, Vol. 34, No. 5, pp. 43-48, 1986.
  - 11) 太田秀樹, 伊藤雅夫, 石黒 健, 米谷 敏: 締固められた粘性土の先行圧縮応力と強度の推定, 土木学会論文集, No. 436/III-16, pp. 27-36, 1991.
  - 12) 伊藤雅夫, 太田秀樹, 石黒 健, 米谷 敏: 礫分を混入する締固め土の先行圧縮応力と強度の推定, 土木学会論文集, No. 439/III-17, pp. 27-36, 1991.
  - 13) 太田秀樹, 伊藤雅夫, 石黒 健: 締固め土に対する弾塑性構成式の適用, 第23回土質工学会研究発表会, pp. 561-564, 1988.
  - 14) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clay, Proceedings of the 9th Conference of JCSMFE, Tokyo, pp. 229-239, 1977.
  - 15) 三浦哲彦, 村田秀一, 安福規之, 赤司六哉: 粗粒材の材料定数と応力ひずみ特性, 土と基礎, No. 33-6, pp. 13-18, 1985.
  - 16) 三浦哲彦, 山本紀之: ロックフィル材料の応力ひずみ特性に関する一考察, 山口大学工学部研究報告, 第30巻, 第2号, 1980.
  - 17) 藤谷雅義, 日比野悦久, 森 嘉紀, 太田秀樹: アスファルト表面遮水壁型フィルダムの経年挙動に関する検討(その1) ダム堤体のモデル化と築堤時沈下に関する検討, 第54回土木学会年次学術講演会, pp. 678-679, 1999.
  - 18) 中野 靖, 吉越 洋, 森 吉昭, 石黒 健, 太田秀樹: 弾塑性圧密連成解析手法を用いたロックフィルダムの築堤シミュレーション(その1) 対象ダムの概要と堤体の材料特性, 第54回土木学会年次学術講演会, pp. 688-689, 1999.
  - 19) 吉越 洋, 井上素行, 津田正寿, 内田善久, 藤山哲雄, 太田秀樹: ロックフィルダム遮水ゾーンの長期沈下挙動, 土木学会論文集, No. 582/III-41, pp. 197-205, 1997.
  - 20) 井上素行, 内田善久, 望月直也, 石黒 健, 太田秀樹: ロックフィルダム遮水ゾーンの湛水後長期沈下メカニズム, 土木学会論文集, No. 582/III-41, pp. 275-284, 1997.
  - 21) 東京電力株式会社: 高瀬川電源開発工事報告, II ダム編, 第4, 5章, 1981.
  - 22) (社) 電力土木技術協会: 最新フィルダム工学, 8章ダムの挙動, 15章 盛立て工, 1981.
  - 23) 内田善久, 中野 靖, 高橋 章, 石黒 健, 太田秀樹: 弾塑性圧密連成解析手法を用いたロックフィルダムの築堤シミュレーション(その3) 築堤時の間隙水圧と土圧に関する検討, 第54回土木学会年次学術講演会, pp. 692-693, 1999.
  - 24) Walker, F. C. and Holtz, W. G.: Control of Embankment Material by Laboratory Testing, Proc. ASEC, No. 108, pp. 1-25, 1951.
  - 25) Marachi, N. D., Chan, C. K., Seed, H. B. and Duncan, J. M.: Strength and deformation characteristics of rockfill materials, Report No. TE69-5, to State of Calif. Dept. of Water Resources, Univ. of Calif., Berkeley, pp. 1-139, 1969.
  - 26) 安井利彰, 内田善久, 中野靖, 太田秀樹, 石黒 健: 弾塑性圧密連成解析手法を用いたロックフィルダムの湛水シミュレーション(その3) 湛水時の堤体変形に関する検討, 第55回土木学会年次学術講演会, III-B346, 2000.
  - 27) 三浦哲彦, 安福規之: 砂, 礫の応力ひずみ特性について, 山口大学工学部研究報告, 第34巻, 第1号, 1983.
  - 28) (社) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 第3章土の三軸試験, 3.2.2 粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法, pp. 448-454, 2000.
  - 29) 松本徳久, 渡辺和夫, 小川優: ロック材の最大粒径に着目した三軸圧縮比較試験, 土木技術資料, 24-7, 1982.
  - 30) 松岡元, 劉 斯宏, 孫 徳安, 工藤アキヒコ, 西方卯佐男, 安原敏夫: ロックフィル材のような大粒径粗粒材の原位置簡易一面せん断試験, 土と基礎, 47-3, pp. 25-28, 1999.
  - 31) 松本徳久, 渡辺和夫, 村上清基: ロック材の最大粒径と三軸圧縮強度, 土木技術資料, 25-12, 1983.
  - 32) 日比野悦久, 鈴木英雄, 石黒 健, 太田秀樹: アスファルト表面遮水壁型フィルダムの経年挙動に関する検討(その3) 遮水壁の変形挙動の分析・評価, 第54回土木学会年次学術講演会, pp. 682-683, 1999.

(2000.12. 8 受付)

# COMPRESSIBILITY AND MATERIAL CONSTANTS OF IN-SITU COMPACTED ROCK MATERIAL UNDER HIGH OVERBURDEN PRESSURE

Yosiaki MORI, Yoshihisa UCHITA , Yasushi NAKANO ,  
Hiroschi YOSHIKOSHI, Takeshi ISHIGURO and Hideki OHTA

The mechanical behaviour and material constants of in-situ compacted rock materials under high overburden pressure have been investigated based on the field measurements, laboratory tests, and computational analysis. By analyzing the actual settlements of rock zone during construction of several large-scaled fill dams and laboratory compression tests for rock materials, the elasto-plastic deformation of rock materials under high overburden pressures have been found to exist. Several factors affecting the compressibility of rock materials; mean grain size, grain size distribution, and void ratio have been investigated by detailed analysis of field measurements of several fill dams. As a result, a tentative procedure of estimating the material constants of in-situ rock zones based on the laboratory tests is suggested. Stress-deformation analysis of an actual rockfill dam during construction and first reservoir filling process by an elasto-plastic finite element method, using the constitutive equation by Sekiguchi and Ohta is carried out. Good agreements between calculated and measured deformations and earth pressures are obtained.