

# ロックフィルダムの実測応力ならびに ひずみ挙動に関する検討

佐藤信光<sup>1</sup>・米崎文雄<sup>2</sup>・大藪勝美<sup>3</sup>・太田秀樹<sup>4</sup>・中川浩二<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 正会員 独立行政法人水資源機構 技術研究研修センター(〒338-0812 埼玉県さいたま市桜区神田 936)

nobuteru\_sato@water.go.jp

<sup>2</sup> 財団法人ダム技術センター 研究第二部(〒106-0041 東京都港区麻生台 2-4-5)

yonezaki@jdec.or.jp

<sup>3</sup> 正会員 独立行政法人水資源機構(〒330-6008 埼玉県さいたま市中央区新都心 11-2)

katsumi\_ooyabu@water.go.jp

<sup>4</sup> フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

ohta@cv.titech.ac.jp

<sup>5</sup> フェロー会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

nakagawa@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

ロックフィルダムの力学的挙動の課題として、フィルタ部への応力集中とコア部の応力低下、地震に対する堤体の耐震性能照査法の高度化ならびにコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムへの新たな取り組みなどがあり、堤体挙動解析手法の高度化が進められている。本研究は、上記課題を考慮して堤体挙動評価の基本となる静的挙動のうち、実測された応力ならびにひずみ挙動について検討した。4つのロックフィルダムにおける築堤および湛水時の堤体挙動記録を全般にわたって比較分析し、その中から上記課題に資する堤体挙動評価の可能性をとりまとめた。その結果、今後のダム設計の見直しや堤体挙動解析の高度化に資する有益な知見を提示した。

**Key Words** : rock-fill dam, stress and strain behavior, embankment, filling action, dam-body observation

## 1. はじめに

ロックフィルダムには、施工時や湛水時のすべりや浸透破壊などに対する堤体の安全性の評価や有限要素法を用いた堤体挙動解析による耐震性能照査など、今後のダム設計の高度化のために、多くの観測計器が堤体内に設置されている。現在、この観測計器によって築堤および湛水時の実測挙動記録が蓄積され、その実測記録からフィルタ部への応力集中とコア部の応力低下の課題が論じられている<sup>1,2)</sup>。また、強い地震動に対する堤体の耐震性能照査法の高度化や<sup>3)</sup>、建設コスト縮減の一環としてコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムへの新たな取り組み<sup>4,5)</sup>などの課題があり、これらの対応のために、従来の Duncan らの近似式による方法<sup>6)</sup>や弾粘塑性モデルによる方法<sup>7)</sup>を用いた逐次築堤解析など、有限要素法を用いた堤体挙動解析手法の高度化

が進められている。

ロックフィルダムは一般にダム高約 50m ~ 150m で、最大粒径約 1m の粗粒材料のロック部、土質材料のコア部ならびにそれらの中間的粒度のフィルタ部からなる複合構造をした大規模構造物である。そのため力学的に未解明な分野を多く含み、堤体挙動解析の高度化に当たってはロックフィルダムの種々挙動を実測値から評価することが重要である<sup>3)</sup>。これまでに、多くのダムの実測記録を総括的に評価した研究事例や個別のダムの実測挙動を詳細に検討した事例はあった<sup>2),8),9),10)</sup>。しかし、今後の堤体設計の見直しや特に堤体挙動解析の高度化に当たっては、個別ダムの挙動評価だけでなく、複数のダムの堤体挙動を全般にわたって分析し、その中から今後の設計の見直しや高度化に資する堤体挙動特性の可能性を評価することが重要である。

本研究では、上記課題を考慮して堤体挙動評価の

基本となる静的挙動のうち、先に報告したロックフィルダムの実測変形挙動の検討<sup>11)</sup>に引き続き、実測応力ならびにひずみ挙動を検討することとした。本検討は、水資源機構の4つのロックフィルダムにおける築堤および湛水時の堤体挙動記録を全般にわたって比較分析し、堤体の耐震性能照査法の高度化、フィルタ部の応力集中とコア部の応力低下ならびにコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムへの取り組みの課題に対して、今後のダムの設計の見直しや堤体挙動解析の高度化に資する堤体挙動評価の可能性を取りまとめることとした。

## 2. ロックフィルダムの力学挙動評価の課題

先に示したロックフィルダムの課題を力学挙動評価の観点で以下にまとめた。

### ①地震に対する堤体の耐震性能照査法の高度化

1995年兵庫県南部地震以降、強い地震動に対するダムの耐震性を動的解析により照査する取り組みが進められている。この動的解析では、地震前の応力状態と地震時の応力状態を重ね合わせて評価することがほとんどである。よって、ダムのような大規模構造物における地震時の最大応力状態の算定に際しては、初期応力の影響が比較的大きく、地震時だけでなく地震前の応力状態を精度よく把握することが大切である<sup>12),13)</sup>。特に、地震によるロックフィルダムの堤体損傷の事例をみると、堤頂部のクラック発生や法肩崩れ、堤体沈下などが報告されている<sup>14)</sup>。コア部の土質材の動的強度や残留変形特性は初期応力の影響を受けることから<sup>14),15)</sup>、地震前のコア部の初期応力分布を適切に評価することが重要である。

### ②フィルタ部の応力集中とコア部の応力低下

ロックフィルダムはコア部とフィルタ部の剛性の違いやフィルタ部のアーチ効果から、フィルタ部への応力集中とコア部の応力低下が指摘されている。このため、コア部の応力低下に伴って、湛水時の浸透破壊に対する安全性を懸念する考え方がある<sup>16)</sup>。また、上流ロック部の浸水沈下に伴ってコア部の不等沈下や変形が生じ<sup>17)</sup>、フィルタ部やコア部の応力状態に影響を及ぼす可能性もある。これに対して、築堤時ならびに湛水時のフィルタ部とコア部の応力分布の実態や応力低下の程度などを把握する必要がある。

### ③コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム

最近では、建設コスト削減の観点からコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの研究が取り組まれている。このダムでは、貯水を上流面のコンクリートスラブで遮水して貯水圧をロック部で支える構造となっている。このため、ロック部が予想以上に変形するとコンクリートスラブ

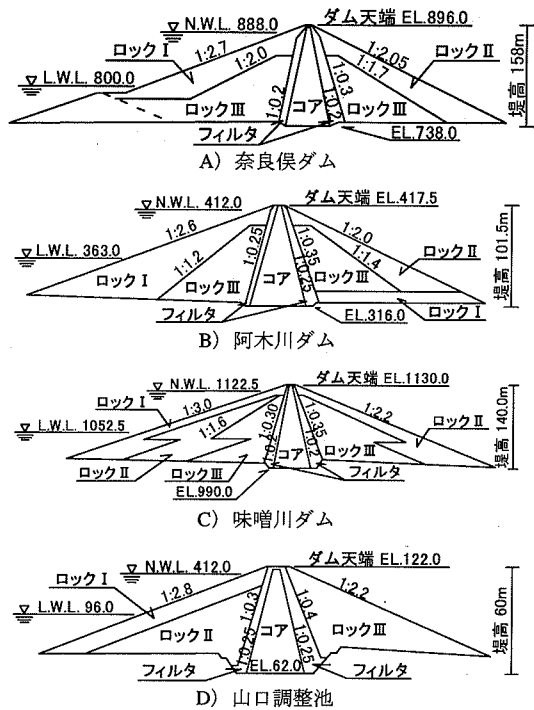


図-1 堤体の標準断面<sup>11)</sup>

の継目が過度に開口し、漏水の要因となる可能性がある。従来、中央土質遮水壁型ロックフィルダムでは、ロック部に対して応力や強度、動的な非線形特性に着目して研究が進められてきた<sup>3),12)</sup>。しかし、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムでは、ロック部の変形性評価が重要で<sup>18)</sup>、特に将来期待される堤高の高いダムではロック部の応力ひずみ特性を精度よく把握することが求められる。

### ④ロックフィルダムの堤体挙動解析の高度化

上記課題に対応するためには、築堤および湛水時の堤体挙動を精度よく再現する必要がある。このため、有限要素法などによる解析の高度化が図られつつある。この解析では、各ダムの堤体に発生する各ゾーンの応力分布、ひずみのばらつきならびに応力ひずみの経路に対して、実測値から堤体挙動を評価し、解析の高度化につなげていく必要がある。

本検討では、上記課題を踏まえて、ロックフィルダムの力学的挙動のうち堤体挙動評価の基本となる静的挙動に着目して実測値から検討を行うこととし、実測変形挙動の検討<sup>11)</sup>に引き続き、堤体の応力分布、ひずみ分布、ならびに応力ひずみ経路を分析することとした。本検討は、図-1に示す水資源機構の4ダムにおける築堤および湛水時の堤体挙動を比較し、各ダムで共通す

表-1 ロックフィルダムの諸元<sup>1)</sup>

| ダム名       | 奈良俣ダム                     | 阿木川ダム     | 味噌川ダム      | 山口調整池      |
|-----------|---------------------------|-----------|------------|------------|
| 堤高        | m 158                     | 101.5     | 140        | 60         |
| 堤頂長       | m 520                     | 362       | 447        | 328        |
| 堤体積       | m <sup>3</sup> 13,100,000 | 4,900,000 | 8,900,000  | 1,060,000  |
| 堤頂標高      | EL.m 896.0                | 417.5     | 1130.0     | 122.0      |
| 常時湛水位     | EL.m 888.0                | 412.0     | 1122.5     | 118.0      |
| 制限水位      | EL.m 881.0                | 400.5     | 1113.0     | —          |
| 最低水位      | EL.m 800.0                | 363.0     | 1052.0     | 96.0       |
| コア敷標高     | EL.m 738.0                | 316.0     | 990.0      | 62.0       |
| ダム軸半径     | 直線                        | R 800m    | R 1000m    | 直線         |
| 堤頂長/堤高    | 3.3                       | 3.6       | 3.2        | 5.4        |
| 築堤開始      | 1983/10/15                | 1986/3/16 | 1986/8/7   | 1994/12/22 |
| 築堤終了      | 1988/6/6                  | 1988/2/15 | 1993/6/3   | 1996/4/27  |
| 試験湛水開始    | 1988/10/4                 | 1989/10/2 | 1993/12/10 | 1997/11/6  |
| 最高水位到達    | 1991/5/28                 | 1991/1/25 | 1996/4/30  | 1998/12/1  |
| 試験湛水終了    | 1991/6/22                 | 1991/5/7  | 1996/8/3   | 1999/2/4   |
| 現時点       | 1999/12/2                 | 2000/11/6 | 2000/12/18 | 2001/1/9   |
| 築堤期間      | 日 1696                    | 701       | 2492       | 492        |
| 築堤完了～湛水開始 | 日 120                     | 595       | 190        | 558        |
| 試験湛水期間    | 日 991                     | 582       | 967        | 455        |
| 築堤完了～現時点  | 日 4196                    | 4648      | 2755       | 1718       |
| 湛水開始～現時点  | 日 4076                    | 4053      | 2565       | 1160       |

る挙動特性や個々のダムで異なる特徴的な挙動を分析して、上記課題に資する堤体挙動評価の可能性をとりまとめた。なお、本検討は複数のダムによる全般的な実測挙動を主体とすることから、材料特性等の詳細な検討は紙面の関係から含めていない。また、コア部の応力は全応力と間隙水圧を考慮した有効応力に分けられるが、間隙水圧の評価とともに全応力を十分評価することが適切な有効応力の評価にもつながることから、本検討では全応力を優先して行った。

### 3. 対象ダムの概要と堤体観測記録

水資源機構においては、奈良俣ダム(堤高 158m)、味噌川ダム(堤高 140m)、阿木川ダム(堤高 101.5m)、山口調整池(堤高 60m)が最近約 10 年間に完成した。この4ダムでは、築堤時の施工管理、完成後の挙動管理、今後のダムの設計高度化のために多くの観測計器を配置し、築堤時の挙動や湛水後約 10 年間の挙動を詳細に観測している。さらに、その都度、観測計器の点検や観測記録の信頼性の確認を行っている。このうち、堤体応力ならびにひずみに関する観測記録を用いて、実測応力ならびにひずみ挙動を比較評価することとした。これらの4つのロックフィルダムの諸元を表-1に、堤体の標準断面を図-1に示す。いずれのダムも中央土質遮水壁型ロックフィルダムである。

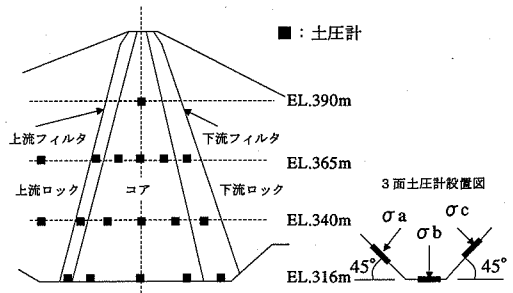


図-2 阿木川ダムにおける土圧計の配置

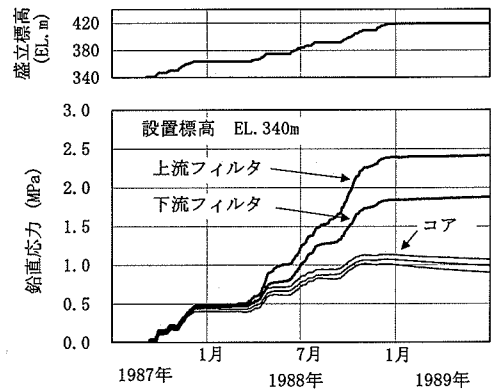


図-3 阿木川ダムにおける盛立標高と鉛直応力の経時変化

## 4. 堤体の応力挙動

### (1) 築堤時の応力

#### a) 鉛直応力の経時変化

ロックフィルダムでは堤体内の応力状態を把握するために、図-2に示すように築堤途中で堤体内に土圧計を設置している。まず、課題として上げられているフィルタ部への応力集中とコア部の応力低下に着目して検討する。

図-2に示すように阿木川ダムでは異なる4標高に土圧計が設置され、コア部とフィルタ部の応力分布が比較できるようになっている。この土圧計は3面土圧計で、底面土圧計を用いて鉛直応力を測定し、上下流 45°の側面土圧計の応力と組み合わせると最大主応力および最小主応力の大きさと方向を求めることができるとされている。しかし、土圧計の計器自体の剛性の問題やレンチ掘削による設置方法の問題、大粒径材料への適用性などから、その計測値をそのまま堤体内の応力状態として評価することへの問題も指摘されている<sup>19)</sup>。また、側面土圧計は傾斜地盤の沈下等によって計測値に

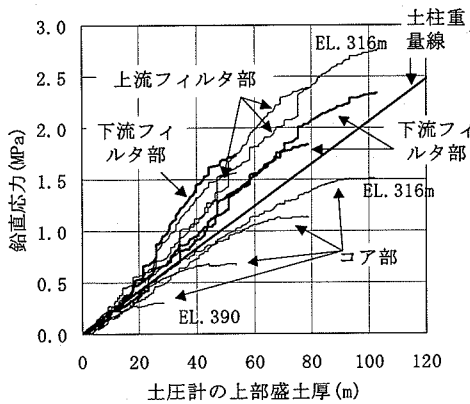


図-4 阿木川ダムの土被り厚と鉛直応力の関係

誤差を生じやすい。よって、比較的信頼性のあると考えられる底面土圧計の計測値(鉛直応力)のみを検討対象として用いることとした。

図-3に阿木川ダムのコア部およびフィルタ部の鉛直応力の経時変化を示す。上図は土圧計上部の盛立標高の経時変化で、下図は堤体のEL.340mに設置された土圧計の鉛直応力の経時変化である。盛立初期は、コア部およびフィルタ部の鉛直応力は同程度の増加傾向を示していたが、盛立標高EL.360m付近より上部の盛立からフィルタ部の鉛直応力の増加傾向が大きくなり、コア部の鉛直応力と差が生じている。上下流フィルタ部の鉛直応力は、上流側が大きく下流側が小さい傾向を示し、盛立の進行とともにフィルタ部への応力集中が顕著になっている。築堤完了後にコア部の鉛直応力が低下傾向を示している挙動については後節で詳述する。

#### b) 土被り厚と鉛直応力の増加

図-3で示した盛立標高と鉛直応力の経時変化に対して、鉛直応力増加の要因となる土被り厚と鉛直応力の関係を図-4に示す。図-4は阿木川ダムにおけるコア・フィルタ部の各標高に設置された土圧計の鉛直応力と土圧計上部の土被り厚の経時変化を示したもので、縦軸が鉛直応力、横軸が土圧計上部の土被り厚さである。図-4には施工管理で得られた堤体の平均単位体積重量( $\gamma_s=20.6\text{kN/m}^3$ )に土圧計上部の土被り厚を乗じて求めた土柱重量線も併記している。標記しているコア部の鉛直応力は、図-2に示すコア部中央に設置したEL.316, 340, 365, 390mの4標高の計測値である。EL.316mの土圧計は鉛直応力が1.5MPaまで、EL.390mが0.3MPaまで増加している。コア部の鉛直応力は、盛立初期では土被り厚の増加とともに鉛直応力が土柱重量線と同程度に増加しているが、盛立後

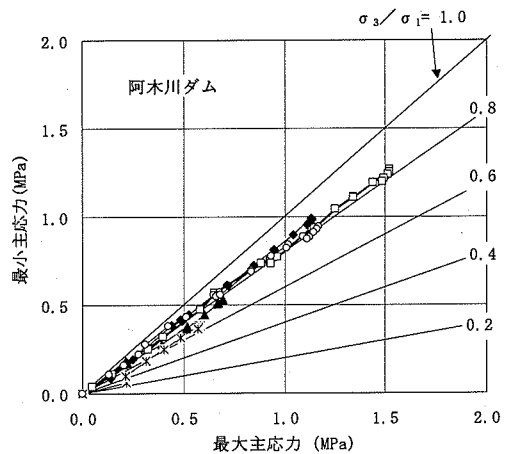
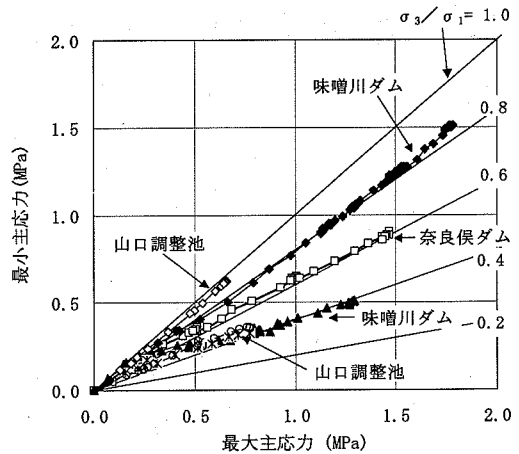


図-5 築堤時のコア部の応力経路

半で各標高の鉛直応力が土柱重量線と比較して顕著に低下する傾向を示している。フィルタ部の鉛直応力は土被り厚の小さい時から土柱重量線を越えて増加しているが、盛立後半ではフィルタ部の鉛直応力もコア部と同様に増加傾向が顕著に低下する傾向を示している。

コア部ならびにフィルタ部の鉛直応力の増加傾向が低下傾向を示す時期は、堤頂部付近の盛立時期に該当する。この理由として、以下の要因が考えられる。堤体形状は図-1に示すように三角形で、盛立は下部から層状に逐次盛立される。このため、各土圧計が設置された直上の盛立では、水平層状に近い盛土荷重が土圧計に作用する。しかし、堤頂部付近の盛立では上下流方向の盛立幅が小さく三角形形状の盛土荷重しか土圧計に作用せず、鉛直応力の増加傾向が顕著に低下してくると考えられる。

また、フィルタ部の鉛直応力が土被り厚の小さい時期から共通して土柱重量線よりも顕著に増加していることについては、フィルタへの応力集中が土被り厚の小さい

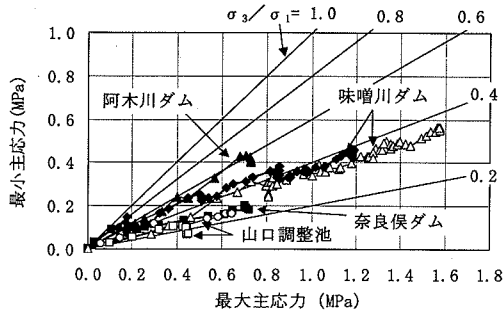


図-6 築堤時のロック部の応力経路

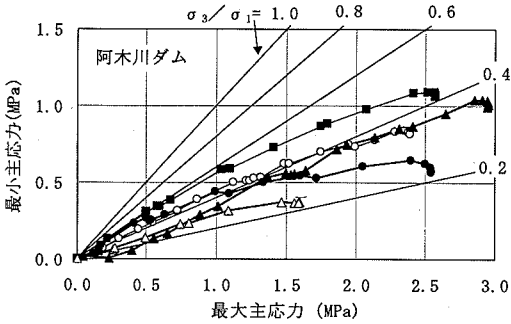
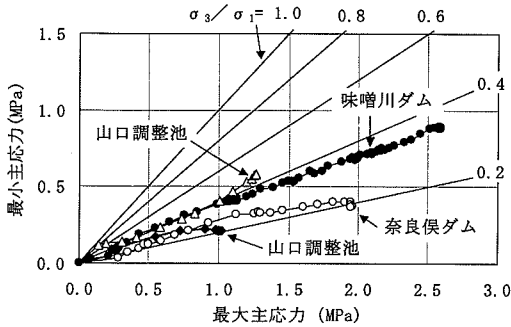


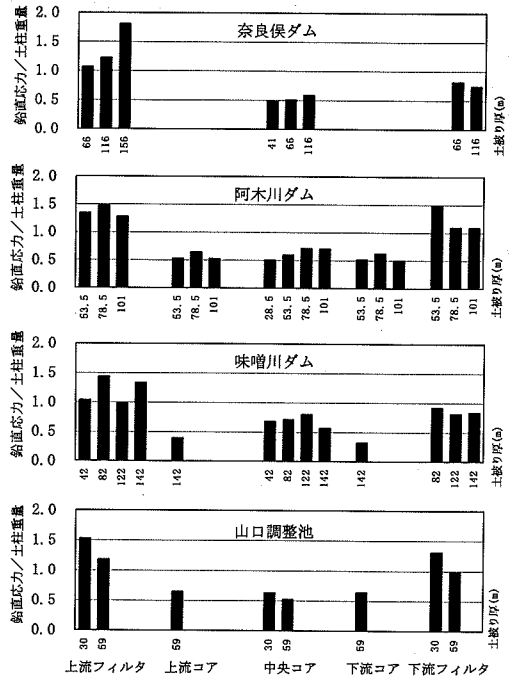
図-7 築堤時のフィルタ部の応力経路

時期から生じていることを示している。

このように、フィルタの鉛直応力の増加傾向が顕著となる時期が盛立初期であること、コアの鉛直応力の増加傾向の低下が盛立後半であることから、コア部の鉛直応力の増加傾向の低下はフィルタの三角形の堤体形状による影響が大きいものと推察される。有限要素法を用いた逐次築堤解析では、図-4に示すようなコア部とフィルタ部の異なった応力経路にも着目して解析精度の向上を図っていくことが望まれる。

### c) 築堤時の応力経路

築堤時におけるコア部の最小・最大主応力の応力経路を図-5に示す。3面土圧計のうち側面土圧計は誤差が生じやすいので、段ずれや急激な応力低下を起



(横軸の数値：計器上部の土被り厚)

図-8 各ダムの鉛直応力/土柱重量の比較

した信頼性の低下した計測値は除外した。縦軸が最小主応力、横軸が最大主応力で、最小主応力と最大主応力の比が  $\sigma_3/\sigma_1=1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$  となる線を併記している。図-5の上図に示すように各ダムのコア部の最小・最大応力比は  $\sigma_3/\sigma_1=0.4 \sim 1.0$  程度とばらつきがあるが、概ね応力比一定で応力増加している。図-5の下図に示す阿木川ダムでは各土圧計で比較的良好な計測値を収録することができており、その応力比はいずれも  $\sigma_3/\sigma_1=0.8$  程度の一定傾向で応力増加している。図-6にロック部の応力経路を示す。各ダムの最小・最大主応力比は  $\sigma_3/\sigma_1=0.2 \sim 0.6$  程度とばらつきがあるが、概ね応力比一定で応力増加している。図-7にフィルタ部の応力経路を示す。各ダムの最小・最大応力比は  $\sigma_3/\sigma_1=0.2 \sim 0.6$  程度とばらつきがあつてやや低下傾向はあるものの、概ね応力比一定で応力増加している。この傾向は、これまでの既往の研究成果と同様な傾向である<sup>9),19),20)</sup>。

### (2) 築堤完了時の鉛直応力

#### a) 各ダムの鉛直応力/土柱重量

各ダムにおけるフィルタ部とコア部の鉛直応力の差を比較するために、図-8に各ダムの鉛直応力/土柱重量の比較を示した。鉛直応力は底面土圧計の計測値を用い、土柱重量は当該土圧計の設置箇所から堤頂まで

表-2 築堤解析に用いた解析パラメータ

| 単位体積重量     | 単位       | ロックI  | ロックII | ロックIII | フィルタ  | コア    |
|------------|----------|-------|-------|--------|-------|-------|
| $\gamma_t$ | $kN/m^3$ | 19.6  | 19.6  | 19.6   | 20.6  | 20.6  |
| 強度定数       | $C$      | 0.098 | 0.078 | 0.078  | 0.078 | 0.069 |
|            | $\phi$   | 43    | 42    | 42     | 38    | 22    |
| 弾性係数       | $K$      | 600   | 450   | 450    | 2000  | 170   |
| $E_t$      | $n$      | 0.60  | 0.70  | 0.70   | 0.40  | 0.85  |
|            | $R_f$    | 0.90  | 0.90  | 0.90   | 0.90  | 0.90  |
| ポアソン比      | $G$      | 0.30  | 0.25  | 0.25   | 0.40  | 0.38  |
| $\nu_t$    | $F$      | 0.20  | 0.20  | 0.20   | 0.20  | 0.00  |
|            | $D$      | 10    | 10    | 10     | 9     | 9     |

$P_a$ : 大気圧(MPa)  $\sigma_1$ : 最大主応力(MPa)  $\sigma_3$ : 最小主応力(MPa)

Duncanらの近似式

$$E_t = K \cdot P_a (\sigma_3 / P_a)^n \left[ 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2$$

$$\nu_t = \frac{G - F \cdot \log(\sigma_3 / P_a)}{1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{K \cdot P_a (\sigma_3 / P_a)^n \left[ 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cdot \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2}}$$

の土被り厚に対して施工管理から得られた堤体の平均単位体積重量を乗じて求め、これを縦軸に鉛直応力/土柱重量として示した。各ダムでは2~4標高に土圧計を設置し、コア部においては中央測線以外に上下流測線にも土圧計を設置していることから、これを比較できるように横軸に併記した。

フィルタ部の鉛直応力/土柱重量はダムによってばらつきはあるものの、概ね土柱重量の0.8~1.5倍で、コア部は概ね土柱重量の0.4~0.7倍程度となり、フィルタ部とコア部の鉛直応力の比率は約2倍である。これは、他のロックフィルダムの実測値と同程度である<sup>2)</sup>。また、上流側フィルタ部の土圧が下流側よりも大きくなっている原因は、上流側のフィルタ幅が下流側よりも小さく、狭いフィルタ幅でロック部とコア部の荷重の一部を受け持つことによるものと考えられる。なお、図-8には各標高の土被り厚を併記しているが、低土被り厚と高土被り厚においてフィルタ部とコア部に顕著な応力差はみられていない。

4ダムは、ダム高が158m, 140m, 101.5m, 60mと幅があって使用している材料も異なっているが、図-1に示すように一般的な中央コア型ロックフィルダムの形状をしている。このような規模と形状をしたロックフィルダムに対して、フィルタ部とコア部の鉛直応力比は平均的に約2倍であることが示された。

b) コア部の鉛直応力の低下

フィルタ部への応力集中とコア部の応力低下の程度を比較するために、阿木川ダムに対して築堤時の物性値とDuncanらの近似式<sup>9)</sup>による非線形逐次築堤解析を行った。解析では、築堤時に計測された土圧計の鉛

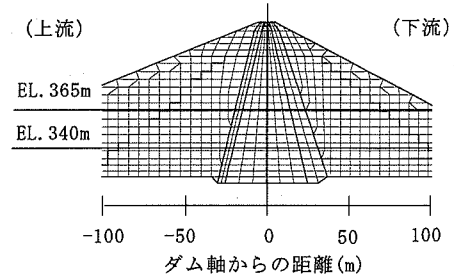


図-9 阿木川ダムの解析モデル

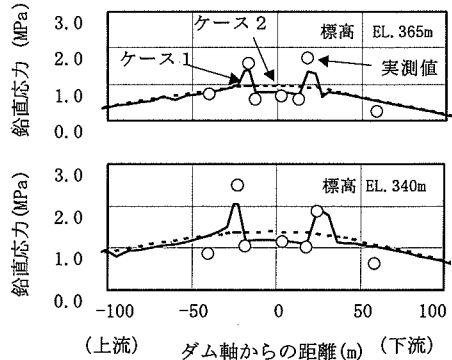
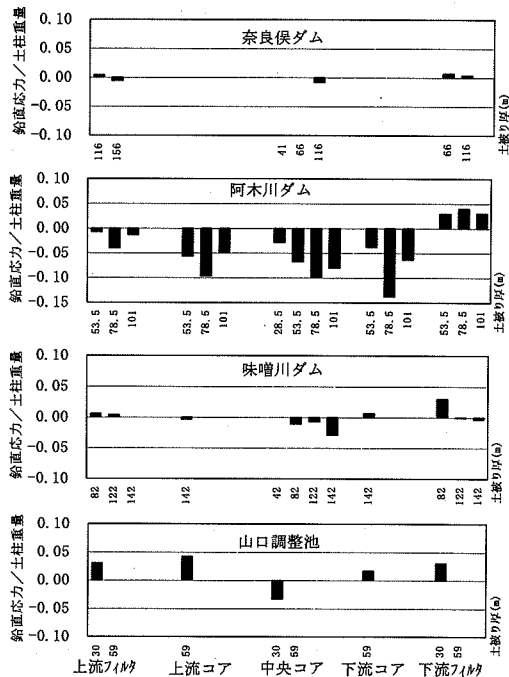


図-10 阿木川ダムにおける鉛直応力の実測値と解析値の比較

直応力や鉛直ひずみに解析結果が適合することを優先して、パラメータを逆解析から求めている。解析に用いたパラメータを表-2に示す。その解析モデルを図-9に示す。この図は全幅478m堤体全体モデルのうち、図-10と比較しやすいようにダム軸から上下流100m範囲のみ図化している。そして、有限要素法で求めた鉛直応力と土圧計の実測値を比較した結果を図-10に示す。この図は、EL.365mと340mの鉛直応力の分布を示したものである。図中の○印が土圧計の鉛直応力の実測値で、実線のケース1がロック部、フィルタ部ならびにコア部の物性値をもとに逐次築堤解析して求めた鉛直応力である。フィルタ部で鉛直応力が高く、コア部で低下する実測値と概ね整合する結果となっている。これは、フィルタ部の剛性がコア部やロック部よりも大きいことによるものである。次に、フィルタ部への応力集中が生じないように、フィルタ部およびロック部の物性値をコア部と同じ物性値で解析した。その結果を図-10に破線のケース2として示すが、当然のことながらフィルタ部への応力集中は発生せず、コア部の鉛直応力が大きくなっている。ケース1とケース2を比較すると、コア部で鉛直応力に約1~2割の差が生じている。実測値はほぼケ



(横軸の数値：計器上部の土被厚)

(築堤完了時を0基準とした湛水開始までの増減)

図-11 放置期間中の鉛直応力/土柱重量の変化

ース1の解析値に近い値が得られていることから、フィルタ部の応力集中によって、コア部の鉛直応力が約1~2割程度低下していることが推定される。

従来からフィルタ部ならびにコア部の応力差が指摘されてきたが、本検討で取りあげた4ダムにおいても、盛立とともにフィルタ部に応力集中する傾向が確認され、コア部とフィルタ部との鉛直応力の差は約2倍程度あることがわかった。しかし、コア部の応力低下については、土被り厚と応力経路からみて堤頂付近の盛土荷重の低減に伴う応力低下の影響が大きく、阿木川ダムではフィルタ部への応力集中が無い場合のコア部鉛直応力に対して、約1~2割程度の応力低下を生じていることを示した。

このように、ロックフィルダムは、築堤時でフィルタ部への応力集中はするものの、コア部の応力低下は約1~2割で、最小・最大主応力比が一定で増加することから、築堤時や築堤完了時の堤体内応力状態は安定したものと考えられる。なお、コア部の応力低下に対して、これを小さくするようなロックフィルダムの研究課題への展開も望まれる。

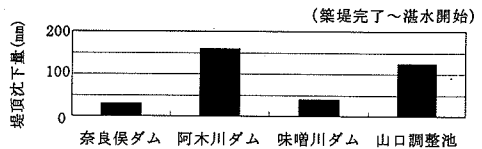


図-12 放置期間中の堤頂の沈下量

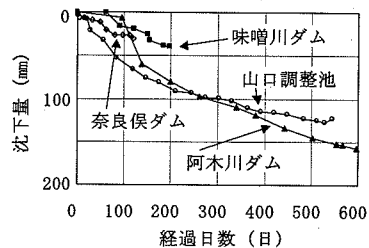


図-13 放置期間中の堤頂沈下量の経時変化

### (3) 放置期間中の鉛直応力の変化

先に示した図-3の阿木川ダムでは、築堤完了後に時間の経過とともにコアの鉛直応力が低下する傾向がみられる。よって、各ダムにおける放置期間中の応力変化を比較するために、図-11に各ダムにおける築堤完了後から湛水開始までの鉛直応力の変化を示した。縦軸はフィルタ部とコア部の鉛直応力/土柱重量を示し、築堤完了時点を0基準とした湛水開始までの放置期間中の応力増減を表している。横軸は、図-8と同様に各ゾーン部と設置箇所上部の土被り厚で分けて示している。

コア部の鉛直応力は全体的に各ダムとも低下する傾向を示し、阿木川ダムの鉛直応力の低下が顕著である。放置期間中は築堤時と比較して応力の変化量が小さいために明確な傾向は示せないが、全体的傾向としてコア部の鉛直応力が低下し、フィルタ部が増加する傾向を示している。次に、図-12に築堤完了時を0基準とした湛水開始までの放置期間中の堤頂の沈下量と図-13にその経時変化を示す。阿木川ダムと山口調整池は放置期間が長いために圧密沈下量大きい傾向を示している。フィルタ部は材料の粒度分布がよいことから推定されるように変形係数が大きい材料である。これに対してコア部は土質材料で、圧密沈下する。このコア部とフィルタ部が接していることから、コア部が沈下しようとした場合にフィルタ部がこれを抑制することが考えられる。コア部の沈下に対するフィルタ部の沈下抑制作用の結果として、フィルタ部にコア部の応力の一部が転化され、フィルタ部の応力が増加してコア部の応力が低下することがあると推定される。堤頂の沈下量大きい阿木川ダムにおいてコア部の鉛直応力の低下が大きい

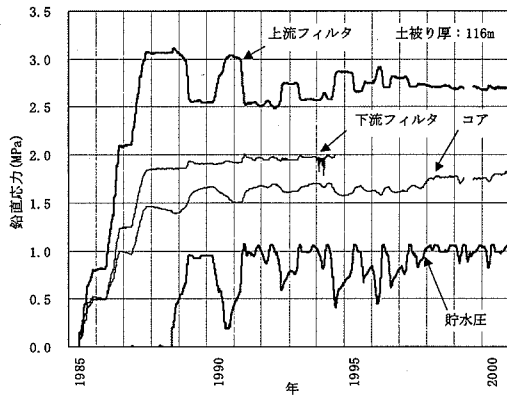


図-14 奈良俣ダムの鉛直応力の経時変化

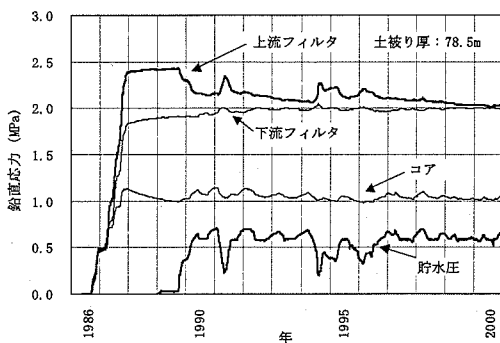


図-15 阿木川ダムの鉛直応力の経時変化

は、この要因が大きいためと思われる。なお、阿木川ダムの上流フィルタ部の鉛直応力/土柱重量が低下傾向を示していること、他ダムでも鉛直応力/土柱重量にばらつきがあることについては、放置期間中は全体的に応力変化量が小さく計測誤差を含むためと考えられる。

従来、築堤完了時点の堤体の安定性は、築堤完了時の応力状態をもとに評価することが多い。しかし、築堤後の放置期間中も、コア部の圧密沈下とともにフィルタ部への応力集中とコア部の応力低下の傾向がみられる。築堤完了後のコア部の沈下量が比較的大きいダムについては、放置期間中の鉛直応力の変化にも留意する必要があると考えられる。

#### (4) 湛水時の鉛直応力の変化

フィルダムの応力変化は大きく築堤時の応力増加時と湛水に伴う応力変化に分けられる。築堤時は図-8に示すようにフィルタ部に応力集中する傾向を確認している。次に、湛水に伴って上流ロック部ならびに上流フィルタ部に浮力が作用し、堤体の応力分布が変化する。特に築堤時に応力集中したフィルタ部と応力低下したコア部に対して、湛水による応力変化を図-14, 15,

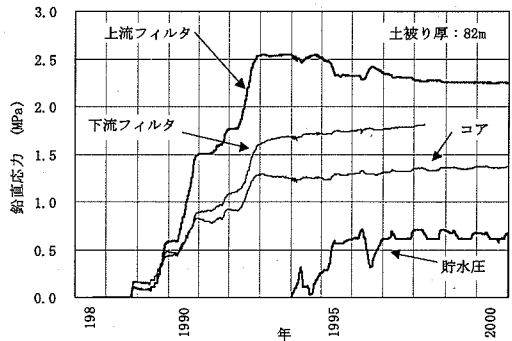


図-16 味噌川ダムの鉛直応力の経時変化

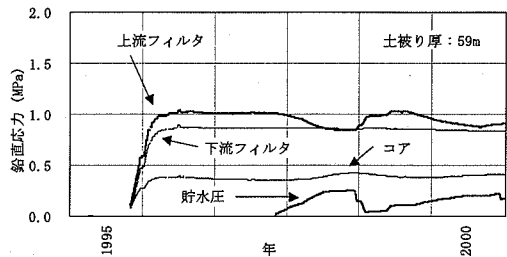
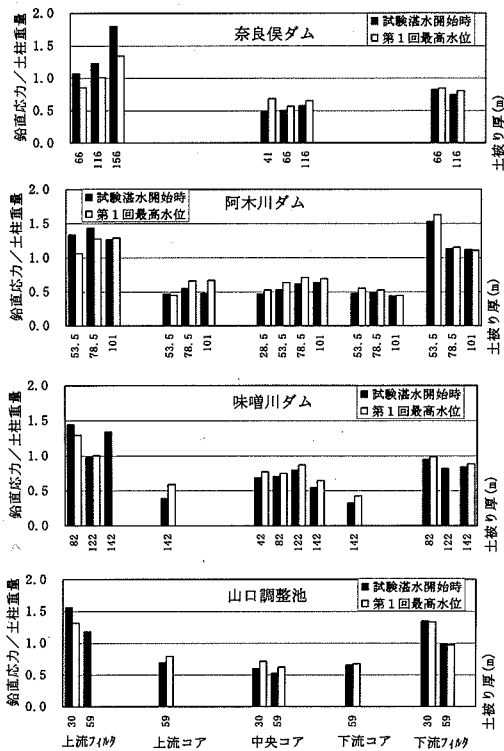


図-17 山口調整池の鉛直応力の経時変化

16, 17に比較した。この図は、4ダムの築堤時ならびに湛水時における長期的な鉛直応力の変化を示している。鉛直応力は底面土圧計の計測値で、4ダムの土被り厚が同じ程度となるように中標高の土圧計計測値とした。なお、山口調整池は堤高が60mと低いため、堤体基礎部の土圧計としている。そして、同一標高のフィルタ部とコア部の鉛直応力のほかに、土圧計設置標高における換算貯水圧も併記した。この換算貯水圧とは、当該日の貯水位から土圧計設置標高を差し引いて貯水圧に換算したものである。

各ダムの上流フィルタ部の鉛直応力は、全体的に湛水後の貯水位上昇とともに逆に低下する傾向を示している。計測値が全応力であることから、本来湛水によって堤体が飽和して上流フィルタ部の鉛直応力は増加すべきところであるが、逆に低下している。また、上流フィルタ部の鉛直応力は、初期湛水以降も貯水位の変動に連動して増減しているが、その変動割合は小さくなる傾向を示している。図-18に、4ダムの上下流フィルタ部とコア部における試験湛水開始時と試験湛水時の第1回最高水位時における鉛直応力/土柱重量の比較を示す。この図は図-8と同様に上下流フィルタ部とコア部における各土被り厚の土圧計の計測値を横軸に示している。なお、試験湛水開始時には計測されていて第1回





(横軸の数値：計器上部の土被り厚)

図-18 湛水に伴う鉛直応力/土柱重量の変化

最高水位時に欠測した土圧計計測値は、試験湛水開始時の計測値のみ記載した。上流フィルタ部の鉛直応力は、全体的に試験湛水開始時に対して第1回最高水位時で低下する傾向を示している。この鉛直応力の低下程度はダムによってばらつきがあり、フィルタ部への応力集中度合や個々の土圧計の測定精度などが影響しているものと考えられる。なお、阿木川ダムの土被り厚101mと味噌川ダムの土被り厚122mにおける上流フィルタ部の鉛直応力は湛水してもほとんど変化せず、堤体中段標高の応力低下とは異なる傾向を示した。この応力変化が小さい土圧計の鉛直応力は、他標高の鉛直応力/土柱重量よりも小さく、試験湛水開始時で応力集中が小さいものである。

貯水位の上昇とともに上流フィルタ部の鉛直応力が低下する要因の一つとして、湛水に伴って上流ロック部に浮力が作用し、上流フィルタ部への応力集中が緩和され、上流フィルタ部の鉛直応力が低下することが考えられる。図-19に阿木川ダムにおける上流ロック部および上流フィルタ部における土圧計の鉛直応力と貯水圧の関係を示す。この土圧計は図-2に示すEL.340mとEL.365mの計測値である。上流ロック部の有効応力

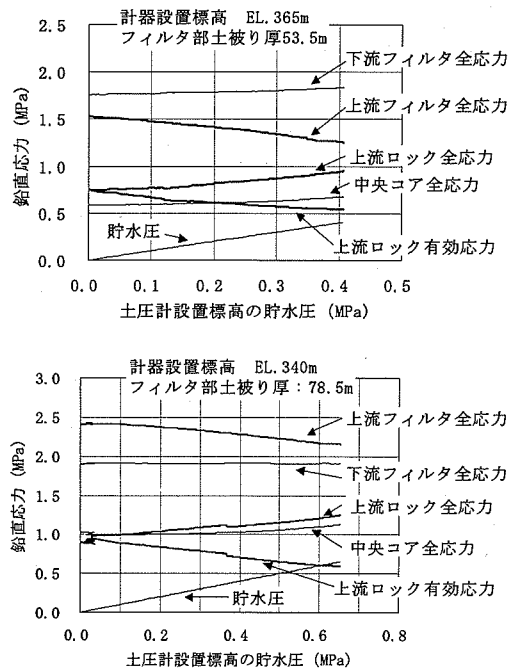


図-19 阿木川ダムにおける鉛直応力と貯水圧

は、全応力から貯水圧を間隙水圧と見なして差し引いたものである。参考にコア中央部と下流フィルタ部の鉛直応力も併記する。両標高とも、湛水前は上流ロック部の応力の一部がフィルタ部に作用していたが、貯水圧の上昇とともに上流ロック部の有効応力が低下し、これに伴ってフィルタ部へ作用していたロック部の応力が低下して、フィルタ部の全応力が低下したことが推察される。なお、貯水圧の増加とともに中央コア部の鉛直応力が増加し、EL.365mの下流フィルタ部では鉛直応力が若干増加する傾向を示している。この要因として、貯水位の上昇とともにコア部に貯水圧が作用してコア部の鉛直応力が増加するとともに、堤体変形によって下流フィルタ部の鉛直応力が若干増加したことが推察される。しかし、この貯水圧の作用だけで上流側フィルタ部の鉛直応力が大きく低下することは考えにくい。また、上流フィルタ部の鉛直応力は、試験湛水開始時から第1回最高水位時で大きく低下するものほとんど変化しないものに分けられるが、試験湛水開始時に応力集中によって鉛直応力が大きい土圧計の方が第1回最高水位時に低下する傾向が多い。このようなことから推察すると、上流フィルタ部の鉛直応力(全応力)が貯水位の上昇とともに低下する主要因として、上流ロック部の有効応力の低下によって応力集中した上流フィルタ部の鉛直応力が低下することが考えられ、一部下流への堤体変形による影響も含まれると思われる。

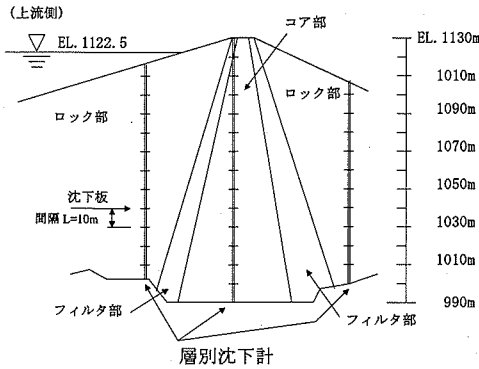


図-20 味噌川ダムの層別沈下計配置図

コア部の鉛直応力/土柱重量の比較を図-18で見ると、第1回最高水位時の方がやや大きくなっている。貯水位上昇に伴う貯水圧の作用や堤体の不飽和から飽和状態への移行などの影響によって、コア部の鉛直応力はやや増加する傾向を示したと考えられる。

下流フィルタ部の鉛直応力/土柱重量の比較を図-18で見ると、ほとんど変化しないかもしくは第1回最高水位時の方が若干増加する傾向を示した。下流フィルタ部で間隙水圧が発生していないことや上流側に傾斜していることを考慮すると、貯水圧の直接の作用ではなく、堤体変形の影響によって鉛直応力が若干増加したと推察される。

湛水時の応力状態は、貯水位の上昇とともに上流フィルタ部の応力集中が緩和され、堤体の安全性に寄与されることから、これを再現できるように湛水解析の向上を図っていくことが望まれる。

## 5. 堤体のひずみ挙動

築堤時に発生する堤体のひずみ分布はダムによってかなりばらつきがある<sup>2)</sup>。このため、堤体内に層別沈下計を設置し、築堤時や築堤完了後の堤体のひずみ分布を把握している。図-20に味噌川ダムにおける層別沈下計の配置図を示す。コア部と上下流ロック部に層別沈下計が設置されている。この層別沈下計は盛立10m毎に沈下板を設置し、堤体内の沈下量を計測している。この層別沈下計の各沈下板の鉛直変位量の相対差から求めた圧縮量( $dL$ )と測点間隔長( $L$ )から鉛直ひずみを求めることができる。よって、層別沈下計が設置されているコア部ならびに上下流ロック部の鉛直ひずみの発生状況を検討することとした。

コア部の鉛直ひずみ分布を図-21に、上下流ロック部の鉛直ひずみ分布を図-22に示す。縦軸は、層別

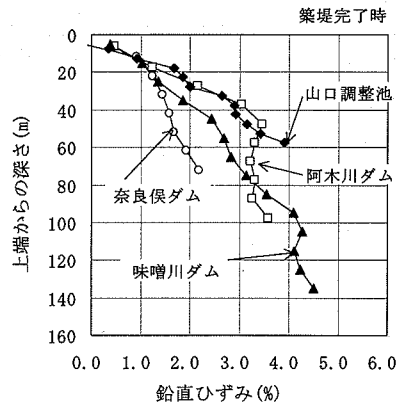


図-21 層別沈下計によるコア部の鉛直ひずみ

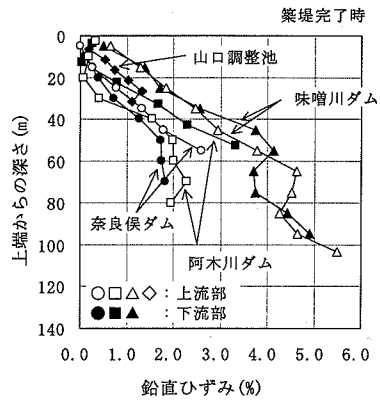


図-22 層別沈下計によるロック部の鉛直ひずみ

沈下計の上端からの深さを、横軸は鉛直ひずみを示している。なお、沈下板の沈下量のうち1箇所の値が計測誤差等によって変動するとその上下の鉛直ひずみが大きく変化することから、久納<sup>21)</sup>が行った4測点間を平均する方法を用いて鉛直ひずみの誤差を小さくした。コア部の鉛直ひずみは、深さ方向に対して大きくなる傾向を示す。さらに、鉛直ひずみの増加傾向は浅部で大きく、深部で低下する傾向を示している。ロック部の鉛直ひずみは、深さ方向に対して直線的に大きくなるダムと、コア部と同様に深部で増加傾向が低下するものがある。この鉛直ひずみと堤体表面からの深さとの関係は概ね次式で表現される。 $\alpha$ は堤体表面からの深さに対する鉛直ひずみの増加割合を表すものである。

$$\varepsilon_v = \alpha \times h \quad (1)$$

ここに、

$\varepsilon_v$ : 深さ方向の鉛直ひずみ(%)

$h$ : 堤体表面からの深さ(m)

これについては、次節で詳述する。

## 6. 堤体の応力・ひずみ挙動

### (1) コア部の応力・ひずみ挙動

堤体内には築堤時の応力ひずみ経路を把握するために層別沈下計の近くに土圧計を設置している。本検討では、4ダムについてコア内の層別沈下計沿いに設置している土圧計の鉛直応力と層別沈下計から求めた鉛直ひずみから、鉛直ひずみと鉛直応力の関係を整理した。築堤時の鉛直ひずみと鉛直応力の関係を図-23に示す。図には土圧計上部の土被り厚も併記した。以下に、実測された鉛直応力と鉛直ひずみから求めた見かけの変形係数の特徴を示す。

奈良俣ダムでは層別沈下計の下部の計器が測定不能となったために中段から上部の土圧計の値を標記している。奈良俣ダムの E17 の見かけの変形係数は、鉛直応力が小さい時期で約 30MPa、鉛直応力が大きくなると約 60MPa 程度に増加している。また、E22 の見かけの変形係数は平均的に 40MPa 程度である。

阿木川ダムにおける堤体下部の E3 と E9 の見かけの変形係数は、鉛直応力 0.5MPa 以下では約 20 ~ 30MPa で、鉛直応力が大きくなると約 50 ~ 60MPa に増加している。また、堤体上部の E17 と E21 の見かけの変形係数は、鉛直応力と鉛直ひずみの関係が直線的で、すなわち見かけの変形係数が一定の傾向を示し、E17 が約 25MPa、特に E21 が約 10MPa と小さくなっている。

味噌川ダムでは、積雪のために冬期盛立が休止されたことから、冬期間に圧密が進行して鉛直ひずみが増加している。よって、図-23には、鉛直ひずみの実測値と、冬期間の圧密沈下による鉛直ひずみの増分を除外した冬期沈下調整値を併記した。以下、冬期沈下調整値で見かけの変形係数を比較する。CE3 と CE16 の見かけの変形係数は、鉛直応力が 0.5MPa 以下では約 30MPa と小さい。CE3 は他の土圧計と比較して鉛直応力の発生が低めの傾向を示しており、土圧計の計測値の信頼性が落ちている可能性がある。また、CE9 と CE13 は見かけの変形係数は約 50MPa と大きい。そして、CE3、CE9 および CE13 の見かけの変形係数は、鉛直応力が大きくなると増加する傾向を示し、鉛直応力が 1MPa を越えると見かけの変形係数は約 100 ~ 150MPa となっている。なお、堤体上部の CE16 の応力ひずみの関係は直線的で、見かけの変形係数は 30MPa と小さいままである。

山口調整池の応力ひずみの傾向は、堤体底部の CE3 と中段部の CE10 とも直線的で、見かけの変形係

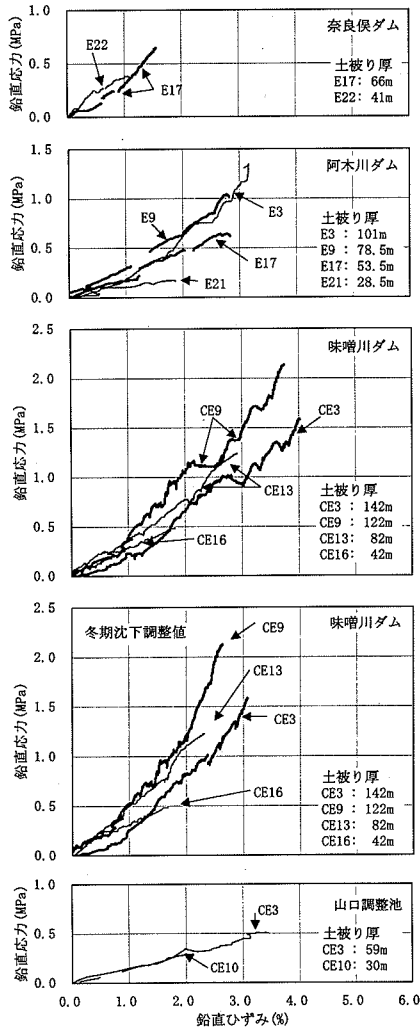


図-23 各ダムのコア部の鉛直ひずみ～鉛直応力

$\alpha$ : コア (0.03 ~ 0.09)  
 ロック (0.03 ~ 0.08)

この関係は、坂本ら<sup>2)</sup>が最終盛立標高と最大鉛直ひずみでまとめた相関関係と概ね整合するもので、堤体材料によって鉛直ひずみの分布はかなりばらつきがあることを示している。

4ダムのうち特に味噌川ダムのロック部の鉛直ひずみについては、図-22に示すように深さ 60m 以上で鉛直ひずみが一旦低下する傾向を示し、深部でまた増加している。このことは、堤体の上部、中段部ならびに深部において盛立段階の堤体の鉛直ひずみの増加傾向すなわち変形係数が顕著に異なる可能性を示している。

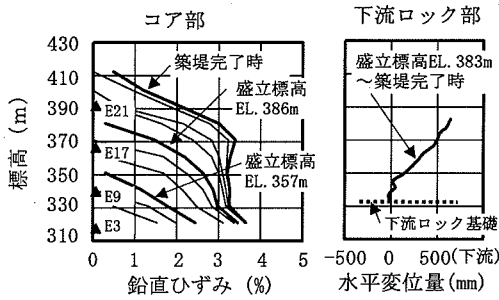


図-24 阿木川ダム築堤時のコア部鉛直ひずみおよび下流ロック部の水平変位の増加傾向

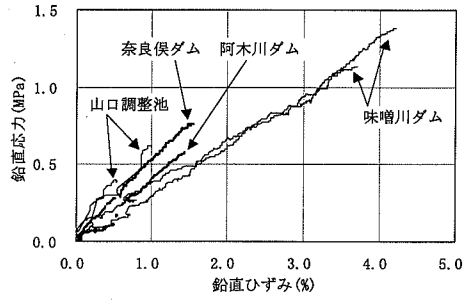


図-25 各ダムロック部の鉛直ひずみ～鉛直応力

数は 15MPa と他ダムと比較して小さい。

築堤時の応力ひずみの全体的な傾向として、鉛直応力が小さい 0.5MPa 程度までは、見かけの変形係数は 10 ～ 50MPa と小さいが、それ以降は約 40 ～ 80MPa と増加し、休止期間の圧密沈下を除けばさらに大きくなる傾向を示している。そして、堤体上部の応力ひずみは、鉛直応力がまだ小さいこともあるが、見かけの変形係数は一定傾向を示している。特に阿木川ダムの堤体上部の E21 は見かけの変形係数が約 10MPa と小さく、下部の E3, E9, E17 の見かけの変形係数と大きく傾向が異なる特徴を示した。

阿木川ダムについて、コア部の標高毎に築堤時の鉛直ひずみの増加傾向を図-24の左図に示した。図は縦軸に盛立標高を横軸に鉛直ひずみを示し、各盛立途中の鉛直ひずみの増加傾向がわかるように盛立約 10m 毎の鉛直ひずみを示している。標高約 EL.370m 以上において鉛直ひずみの増加傾向が大きくなっている。図-23で示した阿木川ダムの E21 の応力ひずみの傾向は、図-24の EL.390m 付近の鉛直ひずみの増加傾向に該当する。阿木川ダムには、下流ロック部の層別沈下計に傾斜計が組み込まれている。この傾斜計において盛立標高 EL.383m から築堤完了時までの上下流方向の水平変位が測定されている。これを図-24の右図に示す。標高約 EL.350m よりも上部で急激に下流側に水平変位量が増加している。堤体上部は三角形状をしてロック部の上下流方向の堤敷幅が短く、上下流方向に変位しやすい構造で、佐藤ら<sup>13)</sup>はロック部の盛立段階の側方変位を示している。ロック部の上下流方向への変位に伴ってコア部の水平ひずみが大きくなって鉛直ひずみの増加傾向が低下せず、コア部上部の応力ひずみが直線的で見かけの変形係数が小さいままとなった可能性が考えられる。コア部上部の見かけの変形係数が増加しない傾向は奈良俣ダムの E22 や味噌川ダムの CE16 でもみられる。なお、山口調整池では、ダ

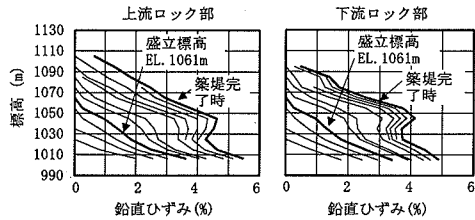


図-26 味噌川ダム築堤時のロック部の鉛直ひずみの増加傾向

ム高が低くて鉛直応力が3ダムの堤体上部と同程度しかないことから、コア部上部と底部の双方が見かけの変形係数一定の傾向を示したと考えられる。

以上のとおり、コア部で実測された鉛直応力と鉛直ひずみから求めた見かけの変形係数は、鉛直応力約 0.5MPa 以下では 10 ～ 30MPa と小さいが、それ以降では約 40 ～ 80MPa と増加し、休止期間の圧密沈下を除けばさらに大きくなる傾向を示した。岩片<sup>23)</sup>がコア部の応力ひずみの傾向を標高に関係なく全体的な傾向で非線形挙動として示していたのに対して、本検討では堤体下部の応力ひずみは非線形な挙動を示すが、堤体上部は線形的で見かけの変形係数も小さく、堤体形状の影響の可能性を示した。なお、一般の三軸圧縮試験から得られる変形係数が側圧を一定にした試験結果であるのに対して、堤体の実測値から得られた見かけの変形係数は最小・最大主応力比一定の条件下で得られたもので、条件が異なるものである。これらの知見は、逐次盛土による築堤解析の評価や、解析技術の高度化に対して重要な指標となるものである。

## (2) ロック部の応力・ひずみの挙動

最近注目されているコンクリート表面遮水型ロックフィルダムでは、ロック部の変形性評価が重要であることから、ここではロック部の築堤時の応力ひずみの関係を検討した。

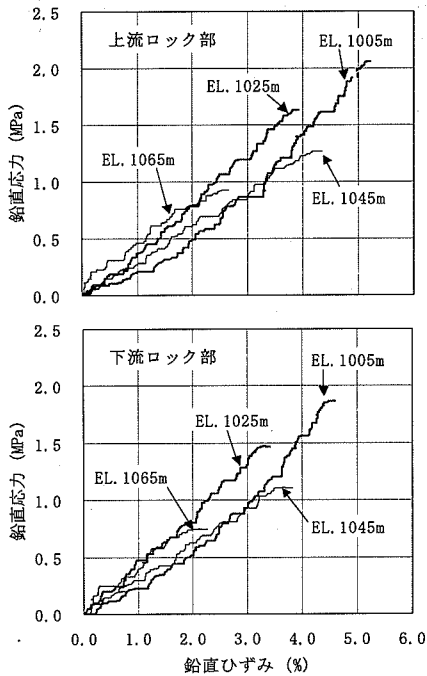


図-27 味噌川ダムにおけるロック部の鉛直ひずみ～鉛直応力

ロック部の築堤時の鉛直応力と鉛直ひずみの関係を図-25に示す。対象とした土圧計は、層別沈下計の近くに位置するものを対象とした。ロック部の土圧計は、ロック材の粒径との関係で精度が劣るものがあり、土圧計上部の土被り厚による土柱重量に対して、土圧計の鉛直応力が2割以上増減しているものは除外した。また、奈良俣ダムの土圧計はコア部と同様の理由で上部標高のみである。以下に、ロック部で実測された鉛直応力と鉛直ひずみから求めた見かけの変形係数の特徴を示す。

各ダムの応力ひずみの増加傾向は直線的で、見かけの変形係数は奈良俣ダムで約 50MPa、阿木川ダムで約 40MPa、味噌川ダムで約 30MPa、山口調整池で約 60MPaと、ダムによって差がある。コア部の応力ひずみの関係が鉛直応力の小さい時期と大きい時期で見かけの変形係数が異なるのに対して、ロック部は概ね一定傾向の特徴を示した。また、鉛直応力の約 1MPa 以上ではロック部の見かけの変形係数は 30 ~ 60MPa でコア部の 50 ~ 80MPa より小さく、ロック部の方が高圧縮応力下で変形しやすい特徴を示した。

味噌川ダムでは、図-22に示すように鉛直ひずみの大きさが上端からの深さで逆転する箇所がある。そこで、図-24と同様に、味噌川ダムの上下流ロック部における築堤時の鉛直ひずみの増加傾向を図-26に示し

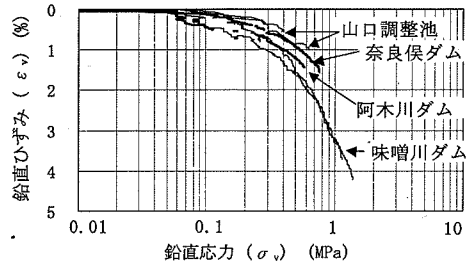


図-28 各ダムのロック部の  $\log(\sigma_v) \sim \epsilon_v$

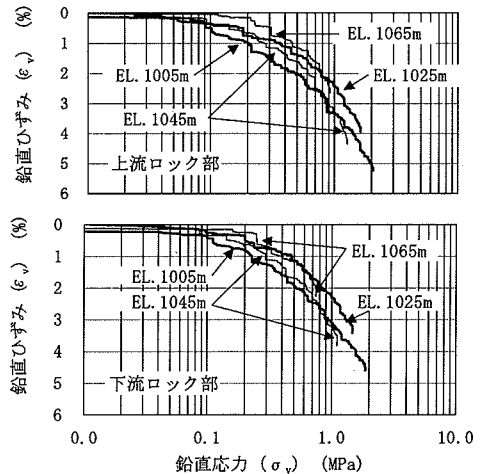


図-29 味噌川ダムにおけるロック部の  $\log(\sigma_v) \sim \epsilon_v$

た。図には盛立高約 10m 毎の鉛直ひずみの増加傾向を示している。上下流ロック部では盛立標高が約 EL.1060m を越えると、堤体内の鉛直ひずみの増加傾向が EL.1030 ~ 1060m 付近で大きくなっている。また、最下部の鉛直ひずみの増加傾向は盛立初期から大きい傾向を示している。

次に、図-27に各標高における鉛直ひずみと鉛直応力の増加傾向を比較した。土圧計は、層別沈下計の測線で深度方向に2箇所しか設置しておらず、図-27に示す鉛直ひずみの代表点となる標高には EL.1005m を除いて設置されていない。よって、層別沈下計の各標高の鉛直ひずみに対応する鉛直応力は、Duncan らの近似式<sup>9)</sup>による非線形逐次築堤解析から各土被り厚に応じた鉛直応力を求めた。縦軸は解析から求めた鉛直応力で、横軸は層別沈下計から求めた鉛直ひずみである。

図-27に示すように、上下流ロック部とも EL.1005m と EL.1045m の見かけの変形係数は、鉛直応力 0.5MPa 以下では約 20 ~ 30MPa と小さく、EL.1025m

と EL.1065m は約 40MPa と大きい。また、上下流ロック部とも、EL.1005m 以外は応力ひずみの関係は直線的であるが、底部の EL.1005m の見かけの変形係数は鉛直応力 0.5MPa 以下では約 20 ~ 30MPa と小さく、1MPa 以上では約 50 ~ 60MPa に大きくなり、コア部と似た傾向を示している。

図-23と図-25の比較からわかるように、コア部の見かけの変形係数は鉛直応力の増加とともに大きくなる傾向を示すのに対して、ロック部は一定の傾向を示している。この要因の一つとして、コア部は堤体中央に位置し、フィルタ部、ロック部に側方を拘束されて側方変位しにくいのに対し、ロック部は佐藤ら<sup>10)</sup>が示すように築堤時に側方変位していることがあげられる。ロック部で実測された鉛直ひずみは、盛立時に発生する側方変位に伴って増加傾向が低下せず、見かけの変形係数が一定になることが推定される。また、味噌川ダムの上流ロック部 EL.1005m の応力ひずみの傾向は、図-20と図-27に示すように該当箇所が土被り厚約 100m の底部に位置するために側方変位しにくく、コア部と似た傾向を示した可能性が推定される。

三浦ら<sup>20)</sup>は、密に締め固められた粘性土と同様に、締め固められた粗粒材料は弾塑性的な変形挙動となる等価な先行圧縮応力的な考え方が成立するかについて重要な示唆を与えている。また、森ら<sup>7)</sup>は、大型重機によって現場転圧された粗粒材料が高圧縮応力下で弾塑性的な圧縮変形挙動を示すことを報告している。よって、図-25に示した鉛直応力ならびに鉛直ひずみの関係を  $\log(\sigma_v)$  と鉛直ひずみ ( $\varepsilon_v$ ) の関係で図-28に示した。各ダムとも低応力領域では弾性的な挙動を示し、高応力領域で塑性的な挙動に推移している。このデータから推察すると等価な先行圧縮応力は 0.2 ~ 0.5MPa 付近にみられる。これは、森ら<sup>7)</sup>が実ダムから推定した等価な先行圧縮応力と同程度である。また、図-27で示した鉛直ひずみと鉛直応力の関係を  $\log(\sigma_v)$  と鉛直ひずみ ( $\varepsilon_v$ ) の関係で表すと図-29のとおりである。上下流ロック部とも、底部の EL.1005m の等価な先行圧縮応力は他の標高の等価な先行圧縮応力よりも小さい傾向を示した。

このように、ロック部で実測された鉛直応力と鉛直ひずみから求めた見かけの変形係数は堤体材料によって約 30 ~ 60MPa の差はあるものの一定の傾向を示し、鉛直応力約 1MPa 以上ではロック部はコア部より見かけの変形係数が小さく、高圧縮応力下では変形しやすい特徴を示した。そして、味噌川ダムの底部ロック部の応力ひずみの傾向はコア部に類似した傾向を示し、堤体形状の影響の可能性が推察された。さらに、ロック部の応力ひずみの関係を  $\log(\sigma_v) \sim \varepsilon_v$  の関係でみると、等価な先行圧縮応力が 0.2 ~ 0.5MPa 付近にみられた。

これらの知見は、今後のコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの設計に当たって、ロック部の変形特性を評価する上で重要な知見となるものである。

## 7. おわりに

水資源機構の4つのロックフィルダムについて、築堤および湛水時の実測応力ひずみ挙動を検討した。得られた結果を表-3にまとめた。

中央土質遮水壁型ロックフィルダムの場合、フィルタ部への応力集中に伴ってコア部の応力低下が 1 ~ 2 割程度生じていることがわかった。湛水時の堤体の安全性向上に関する研究課題として、コア部の応力低下を極力小さくするようなロックフィルダムの研究がある。例えば、以前よく採用されていた傾斜土質遮水壁型ロックフィルダムのようにコア部に上流側ロック部の荷重が大きく作用するようなゾーン型式の研究などがあり、再検討していくことが望まれる。今後は本検討で得られたフィルタ部およびコア部の応力分布に対して、コアの応力低下を小さくする取り組みを進めていく必要がある。

また、地震時の堤体安全性評価として重要となる地震前の応力状態については、堤体の低標高から高標高までフィルタ部への応力集中とコア部の応力低下が生じていること、湛水時は上流フィルタへの応力集中が緩和されていることがわかった。このことから、地震時の堤体変形やクラック等の堤体損傷を評価するに当たって、本検討で得られた応力分布を参考に地震前の初期応力の精度を向上させ、地震時の堤頂損傷の耐震性能評価の向上に努めていく必要がある。

さらに、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムではロック部の変形特性の評価が重要で、ロック部の見かけの変形係数は高圧縮応力下ではコア部よりも大きくなる傾向がある。今後の堤高の高いコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの取り組みでは、本検討で得られたロック部の変形特性を参考に堤体変形解析の高度化を図っていく必要がある。

以上のように、実測値をもとに評価して得られた上記の知見は、湛水時の堤体安全性評価、ロックフィルダムの地震前の堤体挙動評価ならびにコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの堤体挙動解析の高度化に有用なもので、ロックフィルダムの力学的挙動研究の発展に寄与できるものである。

表-3 堤体の実測応力ならびにひずみ挙動のまとめ

| 区分         | 応力ひずみ挙動のまとめ  |
|------------|--|
| 堤体の応力挙動    | <p>築堤時の応力<br/>フィルタ部の鉛直応力は土被り厚の小さい時から鉛直応力が増加傾向を示した。コア部の鉛直応力は盛立の後半で低下する傾向を示し、フィルタ部の三角形の堤体形状による応力低下の影響が顕著にみられた。築堤時の応力は、最小・最大主応力比がほぼ一定で増加する傾向を示した。</p> <p>築堤完了時の鉛直応力/土柱重量<br/>フィルタ部の鉛直応力は土柱重量の0.8～1.5倍、コア部は0.4～0.7倍程度で、フィルタ部とコア部の鉛直応力の差は約2倍程度を示し、低土被り厚と高土被り厚で顕著な差を示さなかった。</p> <p>築堤完了時のコア部の鉛直応力低下<br/>阿木川ダムにおける非線形築堤解析の結果、コア部の応力低下はフィルタ部への応力集中が無い場合に対して、約1～2割程度であることを示した。</p> <p>放置期間中の鉛直応力<br/>コア部の鉛直応力はコア部の圧密沈下に伴って応力低下する傾向を示し、フィルタ部は逆に増加する傾向を示した。</p> <p>湛水時の鉛直応力<br/>上流フィルタ部の鉛直全応力は湛水に伴って低下する傾向を示し、湛水によって上流フィルタ部の応力集中が緩和される傾向を示した。なお、下流フィルタ部の鉛直全応力は湛水による下流側への変形により鉛直応力がやや増加する傾向を、コア部は若干増加する傾向を示した。</p> |
| 堤体のひずみ挙動   | <p>築堤完了時の鉛直ひずみ<br/>コアおよびロック部の鉛直ひずみは深さ方向に大きくなるが、コア部は増加傾向が深部で低下する傾向を示し、ロック部では増加傾向が低下するケースと一定傾向のケースを示した。</p>  |
| 堤体の応力ひずみ挙動 | <p>築堤時のコア部の応力ひずみ<br/>コア部で実測された見かけの変形係数は、鉛直応力約0.5MPa以下では10～30MPaと小さいが、それ以降では約40～80MPaと増加し、盛立休止期間の圧密沈下を除けばさらに大きくなる傾向を示した。なお、堤体上部の見かけの変形係数は一定傾向で小さく、堤体形状の影響の可能性が推察される。</p> <p>築堤時のロック部の応力ひずみ<br/>ロック部で実測された見かけの変形係数は、堤体材料によって約30～60MPaの差はあるものの一定の傾向を示した。また、鉛直応力約1MPa以上ではロック部はコア部より見かけの変形係数が小さく、高圧縮応力下では変形しやすい特徴を示した。味噌川ダムの底部ロック部の応力ひずみの傾向はコア部に類似した傾向を示し、堤体形状の影響の可能性が推察された。<br/>ロック部の応力ひずみの関係を <math>\log(\sigma) \sim \epsilon</math> の関係でみると、等価な先行圧縮応力が0.2～0.5MPa付近にみられた。</p>  |

参考文献

1) 安田成夫, 小嶋光博, 中村昭: ロックフィルダムの土圧挙動, 第28回土質工学研究発表会, pp.231-232, 1993.6.

2) 坂本忠彦, 竹林征三, 中村昭, 安田成夫, 小嶋光博: ゾーン型ロックフィルダムの実測挙動と安全性評価, 大ダム, No.150, pp.51-61, 1994.

3) 日本大ダム会議 技術委員会 地震時のダム安全分科会: 既設ダムの耐震性能評価法の現状と課題, 大ダム, No.180号, pp.3-70, 2002.7.

4) 播田一雄, 米崎文雄, 佐藤信光, 染矢武彦, 小野統一: コンクリートスラブの応力と変形について, 大ダム, No.175(2001-4), pp.87-95, 2001.

5) 山口温朗, 小坪洋巳: 徳山ダム上流二次締切におけるCFRDの試験施工について, 大ダム, No.699, pp.39-64, 2002.

6) Duncan, J.M., Chang, C.Y.: Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil Mechanics, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, SM5, pp.1629-1653, 1970.

7) 森 吉昭, 内田善久, 中野 靖, 吉越 洋, 石黒 健, 太田秀樹: 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, 土木学会論文集, No.687 / III-56, pp.233-247, 2001.9.

8) 原田次夫, 松井家孝: ロックフィルダムの築堤中およびたん水後の挙動, 土と基礎, 25-5(231), pp.67-74, 1977.5.

9) 吉越 洋, 井上泰行, 津田正寿, 内田善久, 藤山哲雄, 太田秀樹: ロックフィルダムの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, 1997.12.

10) 井上泰行, 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, 1997.12.

11) 佐藤信光, 米崎文雄, 大藪勝美, 太田秀樹, 中川浩二: ロックフィルダムの実測変形挙動に関する検討, 土木学会論文集, No.736 / III-63, pp.179-192, 2003.6.

12) 土木学会: ダムの耐震設計と動的解析, 動的解析と耐震設計, 第3巻, pp.3-108, 1989.7.

13) 唐沢成明, 島津義郎, 白川信之, 桑島孝暢: ゾーン型ロックフィルダムの挙動に関する一考察, 大ダム, No.150, pp.20-32, 1994.12.

14) 建設省河川局開発課監修: フィルダムの耐震設計指針(案), pp.13-67, 1991.3.

- 15) 佐藤信光, 米崎文雄, 龍岡文夫: ひずみ軟化理論を適用したロックフィルダムの地震後残留沈下の検討, 土木学会第 56 回年次学術講演会, pp.682-683, 2001.10.
- 16) 電力土木技術協会: 改訂新版最新フィルダム工学, pp.253-323, 1981.3.
- 17) Marsal, R. J. and Ramirez, E. G. : Performance of El Infiernillo Dam, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol 93, ASCE, SM4, pp.265-289, 1967.
- 18) 坂本忠彦, 松本徳久, 福永和久: 海外のCFRDの動向, *ダム技術*, No.162, pp.8-22, 2000.3.
- 19) 森富雄, 白石幸久, 松澤宏: 地中土圧および間隙水圧の計測例, *基礎工*, Vol.12, No.5, pp.48-53, 1984.5.
- 20) 笹川栄志, 松本徳久, 尾芦直人: ロックフィルダムにおける漏水量, 変形, 温度の実測及び解析, *大ダム*, No.100, pp.42-58, 1982.6.
- 21) 久納誠: フィルダムの実測値による応力・ひずみ解析, 第1回ダム工学研究発表会, pp.10-12, 1991.
- 22) 岩片透: ゾーン型フィルタイプダムの透水性材料の力学特性の評価に関する研究, *東電設計技術資料*, pp.137-142, 1987.9.
- 23) 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.

(2003. 8. 21)

## STUDY ON THE OBSERVED STRESS AND STRAIN OF ROCKFILL DAMS

Nobuteru SATO, Fumio YONEZAKI, Katsumi OOOYABU,  
Hideki OHTA and Koji NAKAGAWA

There are several themes in the mechanical behavior of a rock-fill dam. They are the stress concentration at the filter zone, the drop of the stress at the core zone, the highly sophisticated analysis method of the earthquake resistance of a rock-fill dam, and the new design method of a concrete-faced rock-fill dam (CFRD). In this study the stresses and strain behavior observed at the 4 rock-fill dams were compared with each other and analyzed from an overall viewpoint. The authors believe that the present investigation could provide useful information to dam design method and sophisticated analyses of dam body behavior.