

ロックフィルダムの実測変形挙動に関する検討

佐藤信光¹・米崎文雄²・大藪勝美³・太田秀樹⁴・中川浩二⁵

¹ 正会員 水資源開発公団 試験研究所 (〒338-0812 埼玉県さいたま市神田 936)

² 水資源開発公団 第一工務部 (〒330-6008 さいたま市大字上落合 2-40)

³ 正会員 水資源開発公団 第一工務部 (〒330-6008 さいたま市大字上落合 2-40)

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

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

ロックフィルダムの力学的挙動は静的挙動と動的挙動に区分される。本検討では、堤体の安定性評価の基本となる静的挙動のうち、堤体の実測変形挙動に着目して検討した。一般に、変形挙動は堤高、形状、堤体材料ならびに施工内容等の影響を受ける。本検討では、5つのロックフィルダムにおける実測変形挙動を全般にわたって比較し、コア、ロックゾーンの変形特性、築堤および湛水時の変形特性ならびに3次元的な変形特性などを広範囲に分析した。その結果、各ダムに共通する一般的な挙動傾向や異なる特徴的な挙動の可能性を示し、今後のロックフィルダムの設計の見直しや堤体挙動解析の高度化に有用な知見を提供することができた。

Key Words : rock-fill dam, deformation behavior, embankment, filling action, dam-body observation

1. はじめに

ロックフィルダムの完成後の堤体変形の検討は、これまで堤頂コア部や下流法面を中心に行われ、評価されてきた^{1)~3)}。しかし、最近の調査では、完成後の堤体の沈下は堤頂コア部よりも上流ロック部の方が大きくなる傾向を示している。そして、堤体の水平変位も堤頂コア部よりも下流ロック部の高標高部の方が大きくなる傾向がある³⁾。今後のダム建設コストの縮減に堤体盛立量の削減があり、余盛高を含めた削減検討において、堤頂コア部のほかにロック部の変形性を含めて評価していく必要が生じている。また、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で照査することが取り組まれている。ロックフィルダムの耐震性能として、従来の安全率の概念ではなく変形量に着目した評価が行われつつあり⁴⁾、地震時の堤体の変形状態に合わせて、地震前の変形状態を把握することがこれまで以上に求められてくる。

最近、ダムの建設工期の短縮ならびに工事費の縮

減のために、コンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムの検討が進められている⁵⁾。このダムは、上流面の遮水壁で水を止水し、堤体は全てロック材で盛立する型式である。よって、ロック部の沈下や変形が遮水壁の変形に直接影響し、このダムではロック部の変形特性の評価が重要となっている。

さらに、ダム堤体の安定解析は、上下流2次元解析から今後は3次元解析への取り組みが進むと考えられ、実ダムの3次元挙動の評価が必要となってくる。また、コア部の浸透破壊に対する安全性を評価する上でも、ダム軸方向の応力変形の評価が重要となりつつある⁶⁾。

これまで、多くのダムを総括的に評価した研究事例や個別のダムについて詳細に検討した研究事例はあった^{7),8),10)}。しかし、上流ロック部の湛水に伴う沈下や変形挙動ならびに築堤段階の3次元的な実測変形挙動を検討した事例はほとんどない。

ロックフィルダムの力学的な安定性の評価は、静的挙動と動的挙動に区分されるが、本検討では上記の現状を踏まえて静的挙動に着目することとした。

表-1 ロックフィルダムの諸元

ダム名	奈良俣ダム	阿木川ダム	味噌川ダム	山口調整池	寺内ダム
堤高	158	101.5	140	60	83
堤頂長	520	352	447	326	420
堤体積	13,100,000	4,500,000	6,500,000	1,060,000	3,000,000
堤頂標高	896.0	417.5	1130.0	122.0	136.0
常時湛水位	888.0	412.0	1122.5	118.0	121.5
制湛水位	881.0	405.5	1113.0		
最高水位	800.0	363.0	1052.0	96.0	93.0
ダム敷標高	738.0	316.0	990.0	62.0	53.0
ダム軸半径		直線	R 1000m	直線	直線
堤頂長/堤高	3.3	3.6	3.2	5.4	5.1
築堤開始	1983/10/15	1985/3/16	1985/8/7	1994/12/22	1975/3/1
築堤終了	1988/6/6	1988/2/15	1993/6/3	1996/4/27	1977/2/1
制湛湛水開始	1988/10/4	1989/10/2	1993/12/10	1997/11/6	1977/4/1
最高水位到達	1991/3/28	1991/1/23	1996/4/30	1998/12/1	1978/6/13
制湛湛水終了	1991/6/22	1991/5/7	1995/8/3	1999/2/4	1978/6/1
現時点	1999/12/2	2000/11/6	2000/12/18	2001/1/9	1998/10/14
築堤期間 (日)	1696	701	2492	492	703
築堤完了～湛水開始	120	595	190	558	59
制湛湛水期間	991	582	967	455	426
築堤完了～現時点	4196	4648	2755	1718	7925
湛水開始～現時点	4076	4053	2565	1160	7866

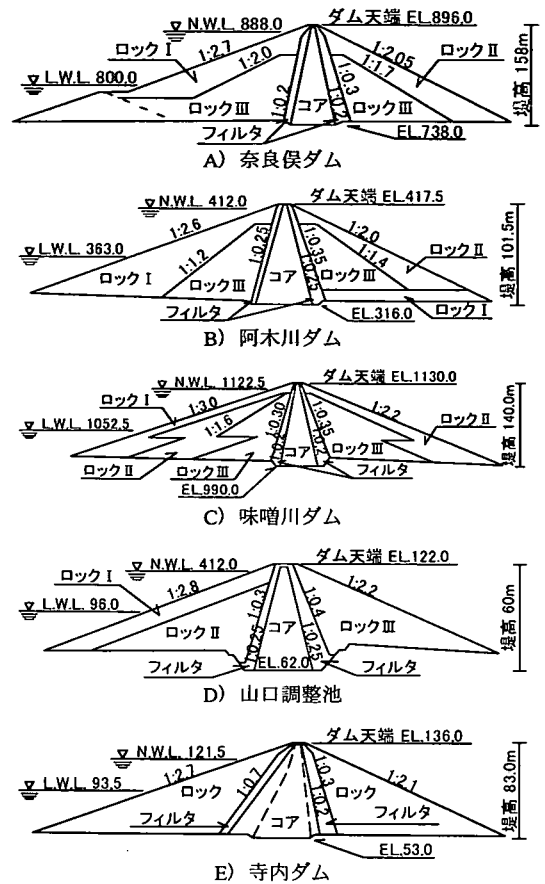


図-1 堤体の標準断面

また、静的挙動の安定性の評価は、堤体の変形と応力挙動の双方が必要となる。この応力と変形は密接に関連し、変形挙動を十分評価することが堤体内部の応力挙動の評価に対して有用な判断要素になるものと考えられることから、堤体の変形挙動を優先して検討することとした。

ロックフィルダムの変形挙動は、堤高、ダム形状、盛立材料、施工内容の影響を受ける。複数のロックフィルダムにおける実測変形挙動を全般にわたって比較し、コアゾーンやロックゾーンの变形特性、築堤および湛水時の変形特性ならびに3次元的な変形特性を広範囲に分析し、各ダムに共通する特性や異なる特性の可能性を見いだすことは、今後のロックフィルダムの設計の見直しや堤体挙動解析の高度化に対して有益な知見となるものである。したがって、本検討では全般的な実測変形挙動の検討を主体とし、材料特性等の詳細な検討は紙面の関係から含めないこととした。また、この実測変形挙動を比較するためには、複数のダムの信頼できる計測値が必要である。以上のことから、水資源開発公団の5ダムの実測値を用いて変形挙動を比較分析し、各ダムに共通する一般的な変形挙動ならびに個々のダムの特徴的な挙動の可能性をとりまとめることとした。

2. 対象ダムの概要と堤体観測記録

水資源開発公団には、最近約10年以内に完成させた奈良俣ダム(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)の4ダムと、完成して約20年経過する寺

内ダム(堤高83m)がある。これらの5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。断面図には、コア、フィルタ、ロックI、IIおよびIII材等のゾーニング境界線も記載している。水資源開発公団のダムでは、原石山から採取した材料を有効的に盛立材料として使用するために、ロック材を3種類程度に区分し、外側に堅硬な材料を、内部や下流側に比較的品質な材料を配置し、材料の有効利用を図っている。なお、寺内ダムのロック材は特に材料区分せず、盛立に使用している。

これらのダムでは、ダム設計の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、観測記録を精査し、データの信頼性の確認を行っている。このうち、堤体変形に関する観測記録を用いて、実変形挙動を比較評価することとした。なお、以下の本文中での現時点とはダム毎に収集した

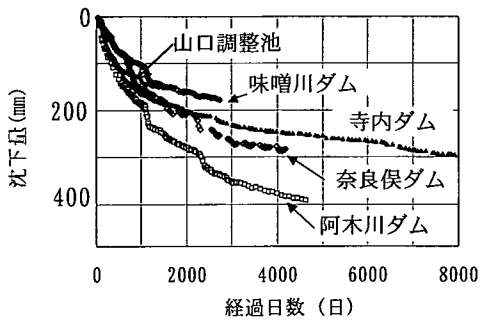


図-2 堤頂コア部の沈下量の経時変化

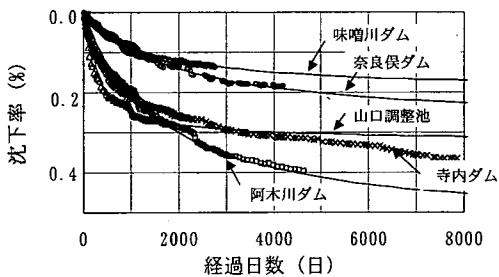


図-3 堤頂コア部の沈下率の経時変化

データの最新記録の時点であってそれぞれ多少異なり、表-1に示すとおりである。

3. 堤体の沈下挙動

(1) 堤頂コア部の沈下挙動

ロックフィルダムの外部変形は堤体の安全管理上重要な計測項目とされ、堤頂コア部の完成後の沈下挙動は長期的な堤体の安定性評価の指標とされている¹⁾。地震時の変形性能の評価でも堤頂コア部の沈下は重要な評価項目となっている^{10),12)}。

対象5ダムについて、堤体最大断面の堤頂コア部の沈下量の経時変化を図-2に示す。図-2は築堤完了時を0基準とし、縦軸に沈下量、横軸に経過日数を示している。なお、寺内ダムは築堤完了から湛水開始までの2ヶ月間のデータがないことから湛水開始時を0基準とした。5ダムの中で、阿木川ダムの沈下量が約400mmと大きくなっている。

図-3に、図-2の沈下量を沈下率(沈下量/堤高)で表現した経時変化を示す。沈下率は、奈良俣ダムおよび味噌川ダムの傾向と、阿木川ダム、山口調整池および寺内ダムの傾向に分けられ、阿木川ダ

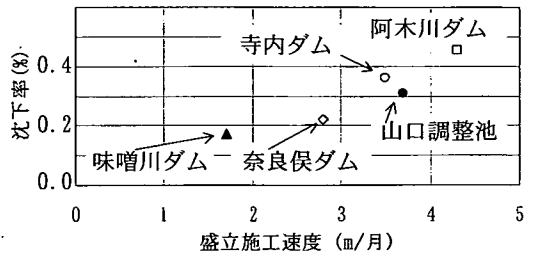


図-4 堤頂コア部の沈下率と盛立施工速度

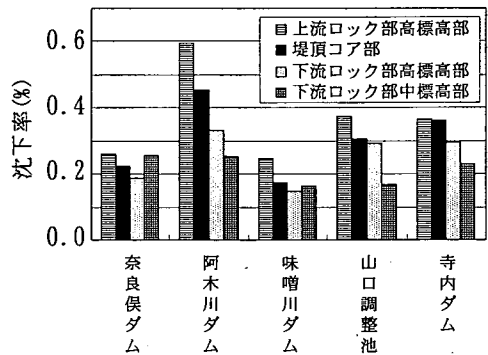


図-5 各ダムの堤体表面の沈下率

ムの沈下率が約0.4%と最も大きくなっている。

この傾向を堤頂コア部の沈下率と盛立施工速度の関係で図-4に示す。縦軸に堤頂コア部の沈下率、横軸に全盛立工期の平均月当たりの盛立施工速度(m/月)を示している。この沈下率の計算に用いた沈下量は、築堤完了時を0基準とし、現時点までの沈下傾向から双曲線近似で用いて求めた20年目の沈下量である。双曲線法による近似線を図-3に併記した。その相関係数(R^2)は全て96%以上である。盛立施工速度が遅い奈良俣ダムおよび味噌川ダムは完成後の沈下率が小さくなっている。この2ダムは冬期間積雪によって盛立施工できないことから、全工期間で換算すると盛立施工速度は遅くなっている。図-4に示すように築堤完了後の沈下率は盛立施工速度の影響を大きく受けていることが推察される。なお、松本ら¹³⁾によれば施工速さと1000日後沈下率では相関性は認められるが、施工速さとダム高に相関性が高いことを示している。今回検討した水資源開発公団5ダムは、ダム高と盛立施工速度の相関性はみられない。

また、図-3に示すように、奈良俣ダムおよび味噌川ダムの沈下傾向と、阿木川ダム、山口調整池および寺内ダムの傾向を比較すると、経過日数1000日付近までに大きな差はあるが、それ以降は沈下速度が同程度となる沈下傾向を示している。吉越ら⁹⁾

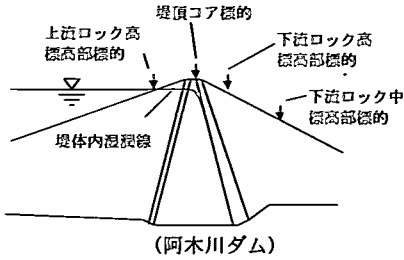


図-6 標的設置位置

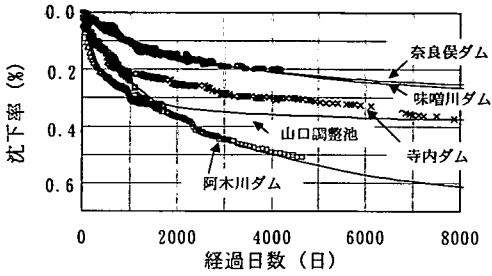


図-7 上流ロック部高標高部の沈下率の経時変化

によれば、ロックフィルダムの堤頂コア部の沈下要因を、放置期間中の圧密沈下、二次圧密による沈下、湛水荷重による沈下、コーラス現象による浸水沈下および貯水位変動に伴う沈下に想定している。奈良俣ダムおよび味噌川ダムにおける築堤完了直後の放置期間中の沈下傾向は小さい。これは、両ダムとも盛立施工速度が遅く、一次圧密が施工期間に進行していたものと推察される。また、約 1500 日までで 5 ダムとも初期湛水を終えており、これ以降は二次圧密および貯水位変動に伴う沈下と推定される。

(2) 上下流ロック部の沈下挙動

現在、堤体の設計余盛り形状は堤頂コア部で最も厚くして、上下流ロックの法面部では堤体法尻で 0 となるような形状が一般に採用されている¹³⁾。完成後の堤体表面の標的測量は、一般に上流側が水没するために堤頂コア部と下流ロック部法面に着目して行われている。

阿木川、味噌川、山口および寺内ダムでは上流ロック部の高標高部標的に対して水没時を除いて標的測量を行ってきたことから、図-5に上下流ロック部および堤頂コア部の沈下率を比較した。横軸に各ダムの上下流ロック部および堤頂コア部の標的箇所を示す。標的の測定位置は、図-6の阿木川ダムの例に示すような箇所である。縦軸の沈下率は、堤頂コア部の築堤完了時を 0 基準とした標的の沈下量を当該箇所の盛土高で除した沈下率(沈下量/盛土高)

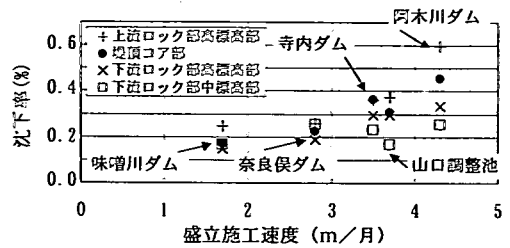


図-8 各ゾーンの沈下率と盛立施工速度

で、計算に用いた沈下量は双曲線近似で 20 年後の沈下量を推定したものである。上流ロック部高標高部の沈下率の双曲線法による近似線を図-7に併記した。図-5に示す双曲線近似の沈下量を求めた時の相関係数 (R^2) は 20 個中 12 個が 95% 以上で、最低が 82% である。なお、奈良俣ダムの沈下量は上流ロック部標的の測量がなされていなかったことから、上流ロック部に埋設された層別沈下計の最上部の沈下量を代用した。寺内ダムは図-2と同様に湛水開始時を 0 基準とした。

上流ロック部高標高部の沈下率は図-5に示すように 5 ダムとも堤頂コア部よりも大きくなる傾向を示している。ロック材は湛水に伴う浸水の影響によってコア材よりも沈下量が大きくなる傾向を示している。特に阿木川ダムの上流ロック部高標高部の沈下率が大きくなっている。この沈下率を各ダムの築堤完了後からの経時変化で比較したものを図-7に示す。縦軸の沈下率は図-6に示すような上流ロック部高標高部の標的沈下量を当該標的箇所の盛土高で割ったものである。横軸は築堤完了時を 0 基準とした経過日数である。1000 日以降の沈下率の増加は、阿木川ダムを除くと同様な傾向である。阿木川ダムの沈下率の増加傾向は大きいままで特徴的な挙動であるが、この要因は現時点では明確ではない。

下流ロック部高標高部は、図-5に示すように 5 ダムとも堤頂コア部よりも沈下率が同等か小さくなる傾向を示している。さらに、下流ロック部の中標高部の沈下率は奈良俣ダムを除くと同等かさらに小さくなる傾向を示して約 0.15 ~ 0.25% の範囲である。下流ロック部の高標高部と中標高部の沈下率に差が生じている要因として、高標高部は図-6に示すようにコアの沈下の影響を受けやすいが中標高部ではその影響がほとんどないこと、中標高部の標的設置箇所が高標高部より盛立完了時期が早いことなどが考えられる。下流ロック部中標高部の沈下挙動の特徴として、各ダムの沈下率が約 0.15 ~ 0.25% とその差が小さい傾向がある。

また、堤頂コア部と上下流ロック部の沈下率と盛立施工速度の関係を図-8に示す。図-4と同様に

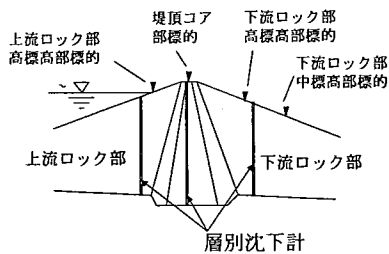


図-9 味噌川ダム 層別沈下計の設置位置

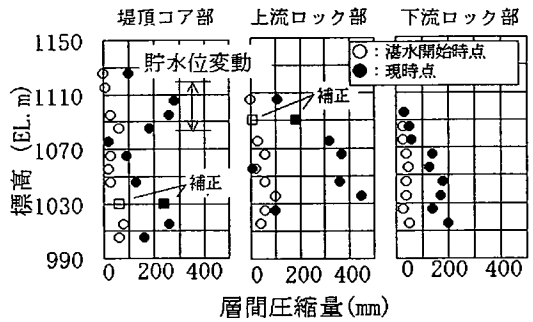


図-11 味噌川ダム 層別沈下計の層間圧縮量

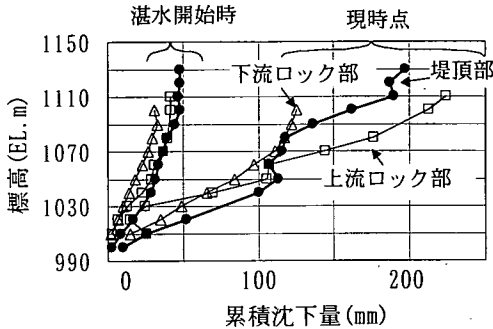


図-10 味噌川ダム 層別沈下計の累積沈下量

縦軸に沈下率を横軸に盛立施工速度を示しているが、この図では上流ロック部高標高部、下流ロック部高標高部ならびに中標高部のほかに堤頂コア部の沈下率も併記している。上流ロック部高標高部と下流ロック部高標高部の沈下傾向は堤頂コア部と同様な傾向がみられ、コア部の影響が含まれていると考えられる。なお、阿木川ダムの上流ロック部高標高部の沈下率が特に高くなっていることは特徴的な挙動であるがその要因は明確でない。コアの沈下の影響を受けない下流ロック部中標高部は、阿木川ダムと奈良保ダムで同程度となっており、盛立施工速度と沈下率に相関関係はみられない。

以上のとおり、上流ロック部高標高部は湛水に伴う浸水の影響で堤頂コア部よりも沈下率が大きくなる傾向を示し、また各ダムの沈下率は約 0.18 ~ 0.45%と差が大きい。これに対して湛水による浸水に影響を受けない下流ロック部中標高部の沈下率は各ダムで約 0.15 ~ 0.25%とその差は小さく、盛立施工速度との相関関係も特にみられなかった。

(3) 堤体内部の沈下挙動

堤体には図-9に示すように堤頂コア部と上下流各ロック部に層別沈下計が設置され、堤体内部の沈下量が計測されている。よって、築堤完了後の堤頂コア部や上下流ロック部の堤体表面の沈下挙動に対

して、堤体内の沈下の発生状況を把握するために、築堤完了後の層別沈下計の沈下量を検討した。築堤段階では層別沈下計の沈下量は大きく計測上の問題はないが、築堤完了後の沈下量は小さく誤差が相対的に大きくなりやすい。その中で味噌川ダムにおいては湛水後も堤体表面の沈下測量記録に整合した層別沈下計の計測記録が得られているので、味噌川ダムの湛水後の層別沈下計の計測記録を用いて検討を行った。図-10に味噌川ダムの各層別沈下計による累積沈下量を示す。縦軸は層別沈下計に 10m 毎に取り付けられた沈下板の設置位置の標高を示し、横軸は築堤完了時を0基準とした各沈下板の累積沈下量を表している。よって、計測誤差を考慮すれば、下部から上部標高に上がるにつれて沈下板の累積沈下量は大きくなる傾向を示す。湛水開始時点の累積沈下量は堤頂コア部および上下流ロック部とも同程度で、堤頂コア部の最上部で約 50mm 程度であった。湛水後は、下流ロック部よりも堤頂コア部および上流ロック部の方が沈下が進行している。

図-11に、層別沈下計の各沈下板間の層間圧縮量を示す。縦軸は各標高の沈下板に対する中間標高の位置を、横軸は各沈下板の層間圧縮量を示している。沈下板の設置間隔は 10m ピッチである。欠測している沈下板の箇所は、その上下の沈下板の層間圧縮量を 10m 相当に補正して表記した。築堤完了時点を0基準とし、○印は湛水開始時点、●印は現時点の層間圧縮量を示している。堤頂コア部の層間圧縮量は湛水後に高標高部と低標高部で大きくなっている。高標高部で大きくなった範囲は貯水変動した範囲に該当している。コア部の高標高部の層間圧縮量が大きくなる例については吉越らによる報告でもみられる⁹⁾。また、上下流ロック部の層間圧縮量は中標高部から低標高部で大きくなっている。湛水後は上流ロック部が下流ロック部よりも大きく沈下が進行しているが、深度方向の増加傾向は相似している。味噌川ダムの堤体内の沈下挙動では、堤頂コア部の沈下傾向とロック部の沈下傾向は異なっていること

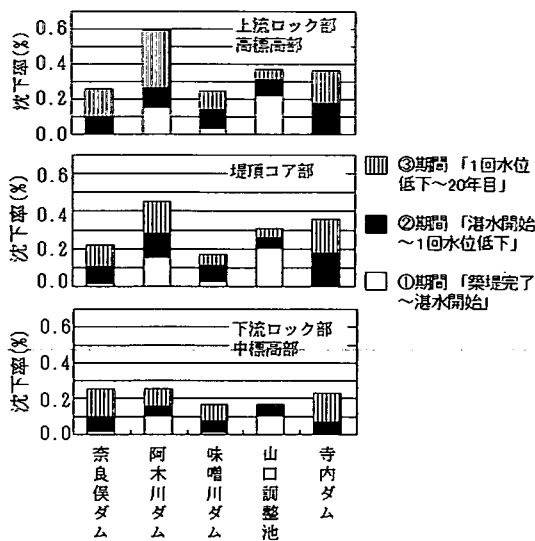


図-12 各期間の沈下率

がわかった。コア部の沈下要因については、(1)堤頂コア部の沈下挙動で示したように、吉越ら⁹⁾は5つの要因を上げている。これによれば、高標高部の沈下は貯水位変動による影響が、低標高部は湛水荷重による影響が大きいとしている。ロック部の沈下要因については、深度方向に層間圧縮量が増加する傾向を示しており、堤体内の拘束圧の影響を受け、浸水とともにその影響は大きくなっていると推察される。

(4) ロック部の長期的な沈下挙動

ロック部の沈下要因については、安井ら¹⁰⁾によれば築堤に伴って上載荷重が増大し、粒子間接点応力がある値を超えると、粒子破砕やこれに伴う粒子の再配列が発生して変形が急増し、見かけ上弾塑性的な変形をきたすとしている。そして、高圧力下で不飽和な状態にあるロック材が浸水を受けると、粒子間接点での破砕によって粒子間のせん断抵抗が低下し、土粒子の相対的な移動に起因する体積変化が生じることが知られている¹⁰⁾。また、室内試験では、1回目の浸水による沈下は即時的に発生し、その後の繰り返し浸水による塑性的な変形は小さいことが知られている¹⁰⁾。

よって、ロック部の長期的な沈下挙動を把握するために、図-12に初期湛水時のその後の沈下挙動の比較を示した。この図は、上流ロック部高標高部、下流ロック部中標高部ならびに堤頂コア部の沈下率を各期間別の積み重ねで示している。縦軸の沈下率の累計値は、図-5と同じ20年の沈下率としている。積み重ねた各期間は、湛水に伴う浸水の影響を

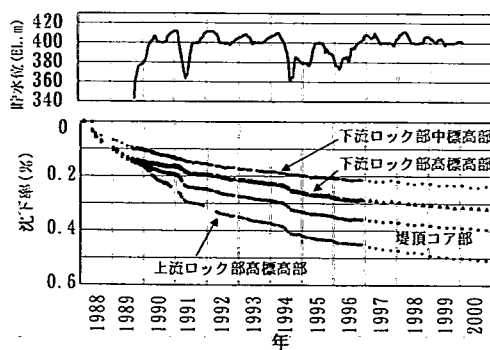


図-13 阿木川ダム 堤体の沈下と貯水位

受けていない「築堤完了～湛水開始」の①期間、初期湛水における貯水位の上昇下降の影響を受けた「湛水開始～1回水位低下」の②期間ならびにその後の長期的な沈下となる「1回水位低下～20年目」の③期間に区分した。

湛水の影響を受ける上流ロック部高標高部の沈下率は、全体の傾向として②と③期間が同等か③期間の方が沈下率が大きくなっている。上流ロック部高標高部は1回目の浸水によって沈下が進行するとともに、それ以降も長期的な沈下傾向を示し、堤頂コア部と同等かそれ以上であることがわかった。なお、阿木川ダムと山口調整池において①期間の沈下率が大きい理由としては、湛水開始までの①期間が1年半以上と長かったことが考えられる。

また、下流ロック部中標高部の沈下率を②と③期間で比較すると、山口調整池以外は②と③期間は同等か③の方が大きくて長期的な沈下の継続傾向がみられる。この①～③期間の沈下率の合計は0.15～0.25%程度と上流ロック部高標高部よりも小さいが、③の比率が大きく長期的な沈下挙動を示している。また、各ダムの③期間の沈下率のバラツキは、山口調整池を除くと堤頂コア部や上流ロック部高標高部よりも下流ロック部中標高部の方が小さくなる傾向を示している。

初期湛水以降の堤体沈下の経時変化をみるために、沈下量の大きい阿木川ダムの沈下率の経時変化を図-13に示す。表記した沈下量の標的は図-6に示す堤頂コア部および上下流ロック部の4箇所である。横軸は貯水位の年間運用がわかりやすいように年で示し、縦軸の沈下量は築堤完了時を0基準としている。図-13に示すように阿木川ダムでは、築堤完了後から湛水開始までは堤頂コア部および上流ロック部高標高部の沈下傾向は同じであったが、湛水に伴って上流ロック部高標高部の沈下が進行しており、浸水による影響が顕著にみられる。また、上流

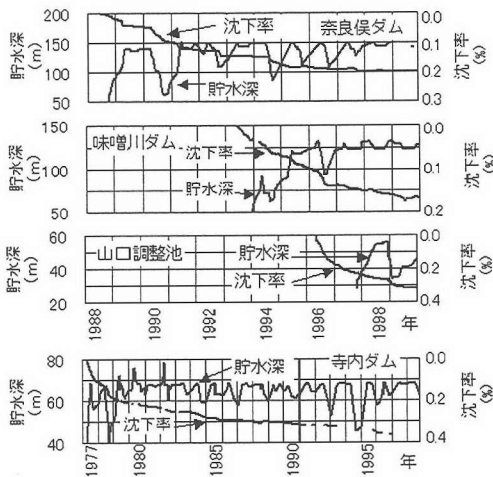


図-14 上流ロック部高標高部の沈下と貯水位

ロック高標高部は初期湛水後の1992年以降も沈下が継続し、特に1994年の貯水位低下時にさらに沈下が進行する挙動を示している。また、下流ロック部中標高部は、貯水位の変動の影響を受けないが、沈下が長期化する傾向を示している。

また、上流ロック部高標高部における湛水後の貯水位変動による沈下挙動を図-14に示す。図-14は阿木川ダム以外の4ダムについて、貯水深と沈下率の経時変化を表したもので、左軸を貯水深、右軸を上流ロック部高標高部の沈下率としている。各ダムとも貯水位低下時に沈下が進行している。貯水位変動の頻度が大きい奈良俣ダムおよび寺内ダムでは、阿木川ダムと同様に2回目以降の水位低下時にも沈下が進行している。このことは、繰り返し浸水に伴うロック材の沈下が小さい傾向¹⁰⁾と異なるものである。図-11から上流ロック部の沈下は堤体内の拘束圧の影響を強く受けている可能性を示し、上流ロック部の貯水位低下の2回目以降の沈下要因としては粒子間のせん断抵抗の低下が水の影響で長期的に進行している可能性が考えられるが、明確な要因は現時点ではわからない。

以上のとおり、湛水の影響を受けた上流ロック高標高部は初期湛水の後も長期的な沈下傾向を示し、湛水の影響を受けない下流ロック部中標高部も長期的な沈下傾向がみられた。

4. 堤体の水平方向変位挙動

堤体の水平方向変位は、沈下と合わせて堤体の外

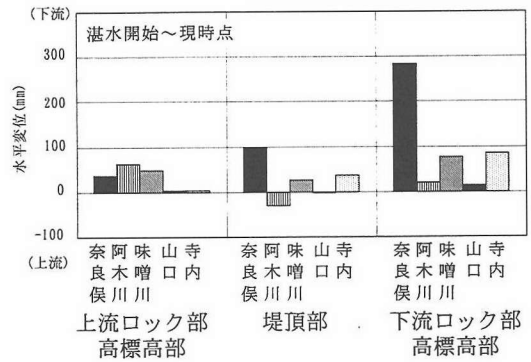


図-15 堤頂部およびロック部の水平変位

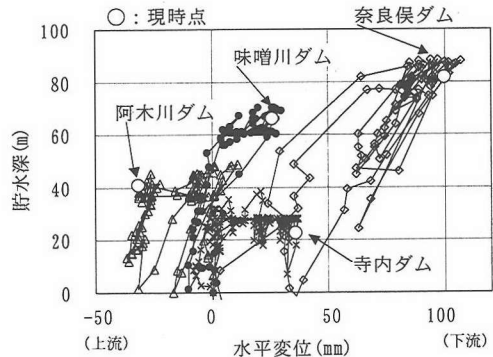


図-16 堤頂部の水平変位と貯水位変動

部挙動の安定性を表す重要な指標である。一般に、築堤段階では、堤体は盛土荷重の増加に従って堤体表面は沈下し、水平変位は外側に向く。湛水段階になると、水圧荷重によって堤体が下流側に変位する。

図-14に5ダムの堤頂コア部および上下流ロック部高標高部の水平変位量を示す。縦軸は湛水開始時点から現時点までの水平変位量で、横軸の堤頂コア部および上下流ロック部は図-6の例に示す標的の位置である。水平変位量は奈良俣ダムが285mmと特に大きくなっている。また、下流側への水平変位は堤頂コア部よりも下流ロック部高標高部の方が大きくなる傾向を示した。特に阿木川ダムでは堤頂コア部が-31mmと上流側に変位している。これについては、上流ロック部の湛水に伴う浸水挙動が関連しており、次節で詳述する。

次に堤頂部の上下流方向の水平変位と貯水位変動の関係を図-16に示す。縦軸は各ダムの最低水位を0とした貯水深で、横軸は湛水開始時点から現時点までの水平変位量である。山口調整池は水平変位量が小さいので除外した。奈良俣ダムは貯水位の上昇とともに下流へ変位し、水位低下で一旦上流に戻るが、徐々に下流に水平変位が累積する傾向が見られる。

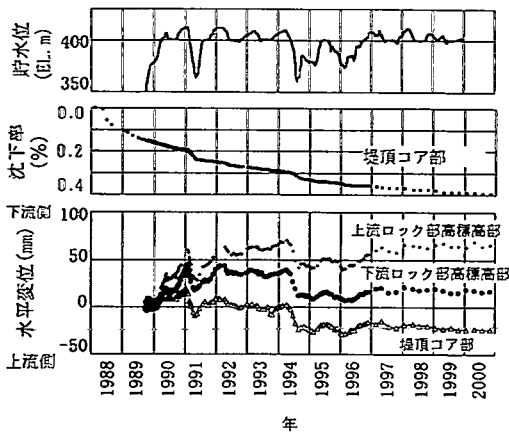


図-17 阿木川ダムにおける貯水位、沈下率および上下流方向水平変位の関係

味噌川ダムおよび寺内ダムも水平変位量に差はあるものの徐々に下流側に水平変位が蓄積していく傾向を示している。阿木川ダムは、湛水初期は水平変位量は 0mm 付近を上下していたが、途中で上流側に変位し、堤頂は上流側に変形したままで現在に至っている。この4ダムの計測結果からは、堤頂部の水平変位量と貯水深の関係に共通するような相関的な傾向はみられなかった。

図-17に阿木川ダムにおける貯水位、堤頂コア部の沈下率ならびに堤頂コア部および上下流ロック部高標高部の水平変位の経時変化を示す。沈下率は堤頂コア部で築堤完了時点をも基準としている。水平変位の3箇所は図-6に示す位置の標的データで、湛水開始時を0基準としている。湛水時の初期の水平変位は全体に下流側に向き、その後1994年に堤頂コア部および上下流ロック部高標高部とも上流側に変位し、残留している。これは、貯水位低下に伴って堤頂コア部の沈下が進行した時期にあたる。また、下流側への水平変位は上流ロック部が大きく、堤頂コア部が上流に向く逆転現象を示している。この現象は上流ロック部の沈下挙動と関連しており、次節で詳述する。

次に堤体の上下流方向の水平変位と鉛直変位の関係を図-18に示す。この図は湛水開始時点をも基準とし、左図に堤頂部を、右図に下流ロック部高標高部を示している。まず、図-18の左図の堤頂部を比較する。奈良俣ダムでは、初期は鉛直変位の増加に伴って下流側への水平変位が大きくなる傾向を示している。途中からは上下流への変位を相互に繰り返しつつ鉛直変位が進行しているが、下流側への最大水平変位量は増加しなくなっている。阿木川ダムは、

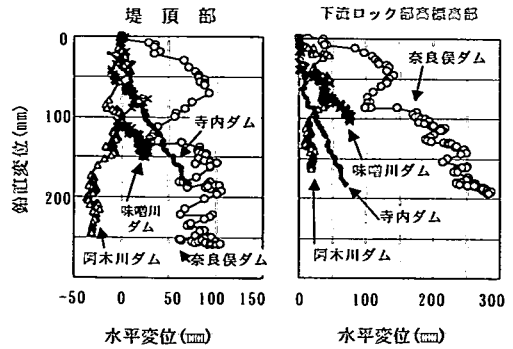


図-18 堤体の水平変位と鉛直変位

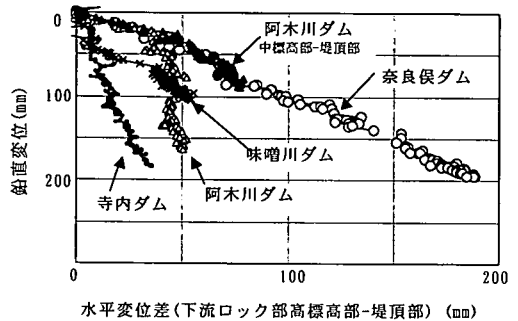


図-19 水平変位差(下流ロック部高標高部-堤頂部)と鉛直変位

途中までは、鉛直変位の増加に対して水平変位は 0 付近を変動しているが、図-17で説明した貯水位低下時に上流に変位し、上流に止まって鉛直変位が進行している。味噌川ダムは鉛直変位が進みつつ、水平変位は上下流に変動し、徐々に下流側に蓄積する傾向を示している。寺内ダムは鉛直変位の増加とともに下流側への水平変位が大きくなる傾向を示している。各ダムの堤頂部の変位を比較すると系統的な関係は見られない。水平変位の上下流方向の変位は貯水位変動によるものだが、堤頂部の水平変位の蓄積形態は各ダムに共通する相対的な傾向は見られない。

図-18の右図に下流ロック部高標高部の水平変位と鉛直変位の関係を示す。奈良俣ダムは後半で鉛直変位の増加に対して下流側への水平変位が相対的に増えている。味噌川ダムおよび寺内ダムも同様な傾向を示している。阿木川ダムは鉛直変位の増加に対して水平変位は上下流に変動するものの下流側に蓄積する傾向は示していない。

次に図-19に下流ロック部高標高部と堤頂部の水平変位の差と鉛直変位の関係を示す。縦軸は下流ロック部高標高部の鉛直変位を示している。すなわち、

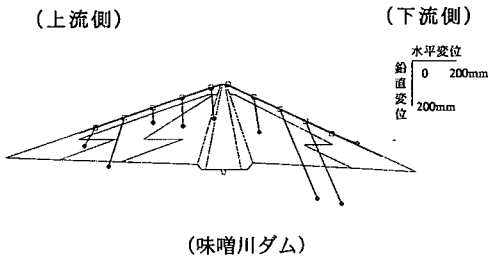


図-20 築堤時の上下流断面水平鉛直変位ベクトル

堤頂の水平変位の影響を取り除いて、下流ロック部高標高部の鉛直変位と水平変位の関係を示したものである。奈良保ダム、味噌川ダムおよび寺内ダムは鉛直変位の増加とともに水平変位差が相対的に増える傾向を示している。阿木川ダムは湛水初期に水平変位差が増加するが、その後は水平変位差はほとんど増加していない。そこで阿木川ダムの下流ロック部中標高部と堤頂部の水平変位差と鉛直変位を図-19に併記したが、鉛直変位と水平変位差は他ダムと同様に相関関係を示した。このことから、下流ロック部は沈下とともに下流側に変位する相対的な傾向を示した。なお、ダム毎に鉛直変位と水平変位差の相関関係に差があるが、この要因は現時点ではわからない。

以上のとおり堤頂部の水平変位は、貯水位変動の影響を受けて上下流方向に変動する傾向を示すが、堤頂部の鉛直変位と水平変位には各ダムに共通する相関関係は見られなかった。これは、堤頂変位が貯水位だけでなく、上流ロック部の沈下の影響を受けていること、ダム毎に上流ロックの沈下量の差が大きいことなどが推察される。また、下流ロック部高標高部は、堤頂よりも大きい水平変位を示すものの、下流ロック部自体の沈下による水平変位が含まれ、これが見かけ上、水平変位量を大きく示していると考えられる。

5. 堤体の3次元変位挙動

(1) 築堤時の挙動

a) 上下流および鉛直方向の挙動

堤体の初期応力解析や動的解析は上下流方向の2次元解析が主に行われている。しかし、最近の電子計算機の能力向上と合わせて3次元堤体挙動解析も行われつつある。この3次元堤体挙動解析では、実堤体の3次元応力変形挙動を評価して解析に取り入れていくことが重要である。また、コアの浸透

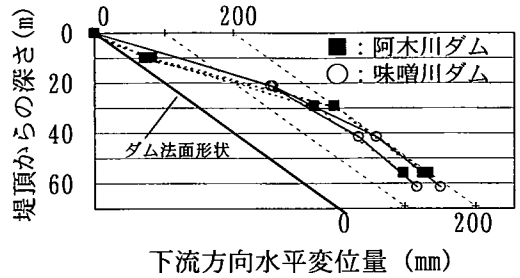


図-21 堤頂からの深さ別の水平変位量

破壊に対する安全性の評価ではダム軸方向の応力変形挙動が重要なデータとなる⁶⁾。

しかし、ダム軸方向の応力変形状態を把握できる観測計器は堤体内にほとんど埋設されておらず、これまでダム軸方向の応力変形挙動はほとんど検討されていない。ダム軸方向を含めた水平2方向、鉛直方向の3次元変位挙動を把握できるデータとして、堤体表面に設置された標的の測量データがある。この標的の測量記録は、目視で直接観測されたもので、堤体内に埋設された計器のデータと比較して計器誤差や段ずれなどの計器異常がなく、微小な変位測量の誤差を除けば信頼性のあるものである。従来は、築堤途中の標的の測量はあまり行われていなかったが、阿木川ダムおよび味噌川ダムについては、盛立途中に標的が設置され、その直後から標的測量がなされ、築堤中の堤体変形の推移が記録されている。よって、本検討では堤体表面に設置された標的の変形挙動から3次元変位挙動を評価することとした。

まず、上下流方向の水平変位と鉛直変位を検討した。図-20に味噌川ダムの築堤時の上下流断面水平鉛直変位をベクトル化したものを示す。水平変位および鉛直変位を1:1スケールで表記している。変位の0基準は各標的の設置時でそれぞれ異なっている。図に示す水平鉛直変位ベクトルは標的設置時から築堤完了時の変位量を表している。法面に設置された標的の設置時期が標高順に異なることや、標的の下部の盛土高厚と標的の上部の上載荷重の関係で中標高の変位量が大きくなっている。

ダムの上流側は法面に工事用道路が取り付けられて、標的測量の基準にばらつきがある。よって、ダムの下流側に設置された標的の測量データを用いて検討した。図-21に阿木川ダムおよび味噌川ダムの下流側標的の上下流方向の水平変位量を示す。縦軸は堤頂部を0として各標高に設置された標的位置を示している。横軸は下流方向水平変位量を表してい

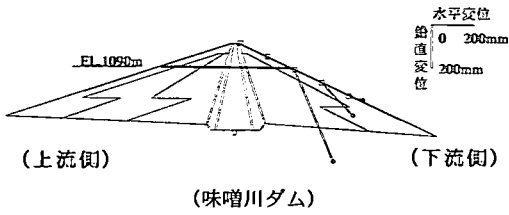


図-22 高標高部盛土時の上下流断面水平鉛直変位ベクトル

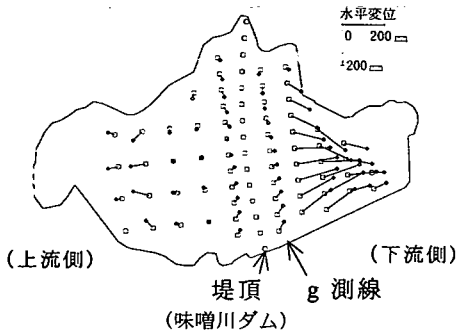


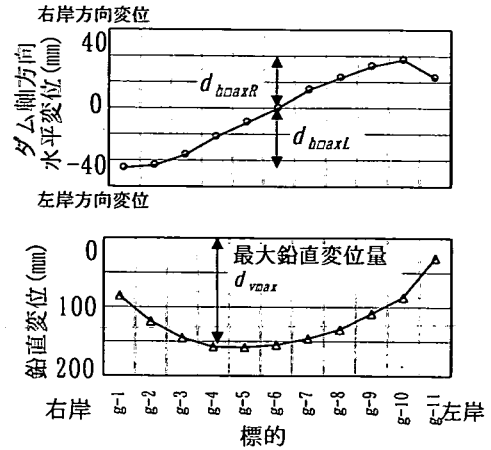
図-23 築堤時の水平変位ベクトル

るが、堤体法面の傾斜がイメージできるように水平変位量の0線を斜めに引いた。この水平変位量の0基準は標的が設置された時点とし、築堤完了時までの水平変位量を表している。また、表記した水平変位の値は、水平変位量が大きい中央付近の複数標的の測定値を記載している。阿木川ダムおよび味噌川ダムとも堤頂からの深さ約40m以深では水平変位量200mm程度に収まっている。盛立の進捗によって下部標高の標的は盛土荷重の影響が小さくなり、水平および鉛直変位量の増加量が減少し、水平変位量が一定値に収束するものと考えられる。

また、図-22に味噌川ダムにおける高標高部の盛土荷重による標的の上下流断面水平鉛直変位ベクトルを示す。この図はEL.1090mの標的が設置された時点をも0基準とし、これより上部の高標高部の盛土期間に生じた水平鉛直変位ベクトルを表示したものである。EL.1090mの標的は鉛直および水平の双方の変位が大きくなっている。これより下部の標的では水平および鉛直変位とも小さくなる傾向を示している。この要因として、盛立直下の標的は盛土荷重の影響が大きく、上下流断面における水平および鉛直変位量の双方大きい、下部標高の標的は盛土荷重の影響が小さく水平および鉛直変位量は小さくなる傾向があると考えられる。

b) ダム軸および鉛直方向の挙動

次に、ダム軸方向の水平変位と鉛直変位について



(味噌川ダム 設置～築堤完了時)
図-24 ダム軸方向水平変位と鉛直変位

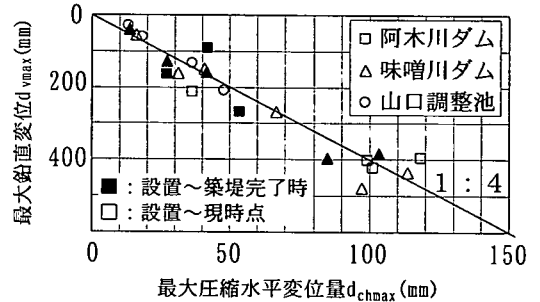
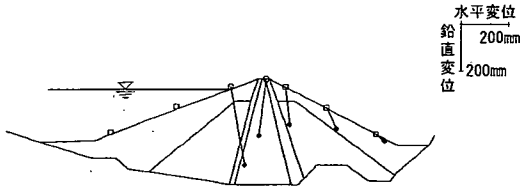


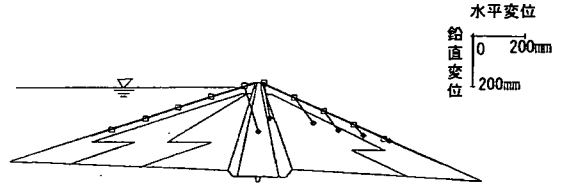
図-25 各ダムの d_{chmax} と d_{vmax} の関係

検討した。図-23に味噌川ダムの築堤時の平面上の水平変位ベクトルを示す。縦横の変位は1:1スケールでベクトルの変位基準は図-20と同じである。下流側への水平変位は中標高部で大きくなっているが、これは図-20で示したと同じ理由と考えられる。また、V字谷の影響を受けて、盛土による鉛直変位に伴って、ダム軸方向の水平変位は谷中央方向に向かっていく。味噌川ダムの標的g測線(図-23参照)におけるダム軸方向の水平変位と鉛直変位を図-24に示す。図-24の上図は、横軸をダム軸の標的位置、縦軸をダム軸方向の水平変位量で表し、右岸方向を正としている。ダム軸方向の水平変位は左右岸で大きく中央に向かって変位し、中央付近では双方から拘束されて変位は小さくなっている。図-24の下図は縦軸を鉛直変位として表している。この鉛直変位は中央付近で大きくなり、谷形状の盛土深さに沿った沈下形状を示している。

図-24の上図に、ダム軸方向の水平変位において



A) 阿木川ダム



B) 味噌川ダム

図-26 湛水時の上下流断面の水平鉛直変位ベクトル

左右岸で最大となる水平変位量のうち右岸方向を dh_{maxR} 、左岸方向を dh_{maxL} としてそれぞれ抽出した。これを(1)式で最大圧縮水平変位量 d_{chmax} と定義した。

$$d_{chmax} = (dh_{maxR} + dh_{maxL}) \div 2 \quad (1)$$

ここに、

d_{chmax} : 最大圧縮変位量

dh_{maxR} : 右岸方向最大水平変位量

dh_{maxL} : 左岸方向最大水平変位量

次に、図-24の下図に、各標的のうち最大となる箇所の鉛直変位量を最大鉛直変位量 d_{vmax} と定義した。この d_{chmax} と d_{vmax} の関係を図-25に示す。この図は縦軸を d_{vmax} 、横軸を d_{chmax} としている。そして、各ダムにおいて g 側線と同様に下流側の各標高別に求めたダム軸水平方向の d_{chmax} と鉛直方向の d_{vmax} を示したものである。図には標的設置から築堤完了時までと現時点までの2種類を併記している。また、山口調整池は築堤完了後に標的が設置されていることからこれを0基準に現時点の変位量を示した。各ダムの谷形状を堤頂と下流各標高の L/H_{max} (堤頂長/堤高)の平均値と最大、最小と比較すると、阿木川ダムで L/H_{max} =平均 4.4 (最大 5.7, 最小 3.6)、味噌川ダムで L/H_{max} =平均 3.9 (最大 5.5, 最小 3.2) と急であるが、山口調整池は L/H_{max} =平均 5.7 (最大 6.5, 最小 5.3) と緩い傾斜である。しかし、図-25に示す d_{chmax} と d_{vmax} は L/H_{max} に関係なく $d_{vmax} / d_{chmax} = 4$ 程度と一定値の傾向を示している。

(2) 湛水時の挙動

阿木川ダムでは、湛水時に堤頂部の水平変位が上流に向き、上流ロック部高標高部の水平変位が下流に向くという逆転現象を示した。また、上流ロック部が湛水に伴って沈下が大きくなっている。

図-26 A)に、阿木川ダムの上下流方向最大断面における水平鉛直変位ベクトルを示す。この変位は湛水開始時を0基準とし、縦横は1:1の同スケ-

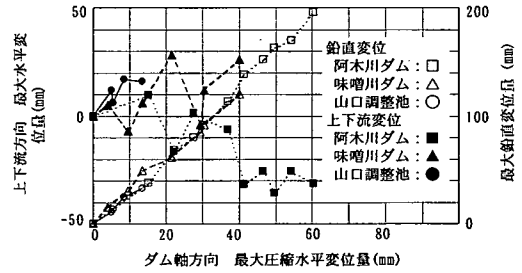


図-27 湛水時のダム軸・上下流方向水平変位と鉛直変位

ルで示している。上流ロック部高標高部の標的は堤頂部よりも鉛直変位が大きく、下流側に水平変位するベクトル変位を示している。そして、堤頂部は上流側に水平変位し、上流ロック部高標高部と堤頂部のベクトル変位は上下流方向で相反する方向となっている。堤頂部よりも大きい上流ロック部高標高部の沈下の影響によって、堤頂部が上流側に水平変位したと推察される。

味噌川ダムの上下流断面水平鉛直変位ベクトルを図-26 B)に示す。味噌川ダムの上流ロック部高標高部の沈下量は同様に堤頂コア部よりも大きく、堤頂標的よりも上流側標的の水平変位量の方が下流側に変位している。味噌川ダムでも、上流ロック部の沈下の影響によって、堤頂コア部よりも上流ロック部高標高部の方が大きく下流側に変位する現象が現れたものと推察される。この現象は山口調整池でも観測されている。

このように、堤頂部の上下流方向の変位は、上流ロック部の沈下の影響を強く受けていることが推定される。

湛水時の堤頂コア部のダム軸および上下流方向水平変位と鉛直変位を図-27に示す。図にはダム軸方向の変位挙動が計測されている阿木川ダム、味噌川ダム、山口調整池の湛水時の挙動を示している。横軸を(1)式で定義するダム軸方向の最大圧縮水平変位量を、縦軸の右側に図-24に示す最大鉛直変位量

表-2 堤体の実測変形挙動のまとめ

区 分		変形挙動のまとめ
沈下挙動	堤頂コア部の沈下挙動	堤頂コア部の築堤完了後の沈下率は盛立施工速度が遅いほど小さく、相関関係がみられた。
	上下流ロック部の沈下挙動	上流ロック部高標高部の築堤完了後の沈下率は浸水の影響によって堤頂よりも大きく、0.18～0.45%程度となっている。阿木川ダムの上流ロック部の沈下率が特に大きく特徴的である。下流ロック部中標高部の築堤完了後の沈下率は0.15～0.25%程度で盛立施工速度との相関関係がみられなかった。
	堤体内部の沈下挙動	味噌川ダム堤体内部の築堤完了後の沈下挙動ではコア部とロック部で沈下分布が異なり、ロック部は拘束圧の影響を強く受けていることが推察された。
	ロック部の長期的な沈下挙動	上流ロック部高標高部の沈下は初期湛水以降も長期的に進行していることがみられる。下流ロック部中標高部も長期的な沈下の進行がみられる。
水平変位挙動		堤体の下流側への変形は堤頂コア部よりも下流ロック部高標高部で大きくなる傾向を示した。 なお、下流ロック部高標高部の下流への水平変位挙動は、貯水圧による水平変位だけでなく、下流ロック部自体の沈下に伴う下流側への水平変位が含まれていることを示した。
3次元変位挙動	築堤時の挙動	築堤段階の上下流方向の水平変位は上載盛土初期では大きいですが、その後は収束する傾向を示した。 ダム軸方向の水平変位は同標高の標的において最大鉛直変位量 d_{max} / 最大圧縮水平変位量 d_{cmax} = 4程度 of 相関的な傾向がみられた。
	湛水時の挙動	堤頂部の上下流方向の水平変位は、上流側のロック部の湛水に伴う沈下の影響を強く受けていることがわかった。特に阿木川ダムの浸水沈下による水平変位への影響が大きく特徴的である。 また、湛水時は堤体が上下流変位するなか、ダム軸方向の変位は鉛直変位と相関関係を保ち、圧縮挙動を示していることがわかった。

を、縦軸の左側に上下流方向の最大変位量を示し、これを湛水後の時系列でプロットした。■▲●で示す上下流方向最大水平変位は、貯水位の変動に伴って上下流方向に変位するが、ダム軸方向には圧縮挙動を示している。□△○で示す最大鉛直変位とダム軸方向の最大圧縮水平変位量は、概ね 1:4 の相関関係を示している。湛水時には貯水変動にともなって、堤体は上下流に変位するが、ダム軸方向の変位は鉛直変位と相関関係を示し、圧縮挙動を維持していることを示した。

6. おわりに

水資源開発公団の5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変形挙動を検討した。得られた結果を表-2にまとめて示す。この結果に対する今後のロックフィルダムの設計や解析への活用性を以下に示す。

今後のダム建設コストの縮減の一環として堤体の盛立量の削減があり、堤体の余盛高の見直しも重要な検討項目になると考えられる。現在の設計余盛高は堤高の1～2%程度で、実沈下傾向に対して余裕がある。また、その余盛も堤頂コア部で最も高くしロック部法尻で0とする形状が一般に採用されてい

る。実際の堤体の沈下傾向は上流ロック部が浸水の影響で堤頂コア部よりも沈下率が大きくなる傾向を示し、堤頂コア部の沈下傾向は盛立施工速度の影響を強く受けている。今後の堤体の余盛形状の見直しに当たっては、堤頂コア部だけでなくロック部の沈下挙動も踏まえて将来の堤体沈下量の予測精度を向上させる必要がある。これらの挙動特性は有用な知見となるものである。

また、兵庫県南部地震以降、検討されつつある地震時の堤体の変形性能の評価では、地震時の許容変形量を設定する必要があるが、このためには地震前の堤体の沈下や変形状態を地震時と同様に評価する必要がある。堤頂コア部の変形にはダム軸形状や上流ロック部の沈下挙動が影響しており、これらを踏まえて地震前の変形性を評価することが求められる。今後の堤体変形性能の評価に対して、基礎的な資料となるものである。

最近検討が進められているコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダムは、上流側のコンクリート遮水壁で水を止水し、ロック材からなる堤体でこれを支える構造である。遮水壁には約15m間隔で縦継目が設けられている。よって、ロック材からなる堤体の変形性を把握し、これに追従する遮水壁の継目の開閉程度を評価することが、遮水壁の止水性の確保に重要な課題となる。従って、これらのロック部の沈下特性やダム軸方向の変形特性の知見は、コン

クリート表面遮水壁型ロックフィルダム設計において、今後の技術的な進展に対して貴重なデータとなるものである。

さらに、堤体の3次元堤体挙動解析の取り組みがこれまで以上に進むものと考えられ、実ダムの3次元挙動の評価が求められるが、築堤段階における3次元挙動評価をした事例はほとんどなかった。また、コアの浸透挙動に対する評価でもダム軸方向の応力変形挙動の評価が求められている。この築堤段階の3次元変位挙動は、3次元挙動解析の評価に対して貴重な知見となるものである。

以上のとおり、本検討結果で得られた知見は、ロックフィルダムにおける堤体設計の見直し、地震前の堤体変形性の評価、新たなコンクリート表面遮水壁型ロックフィルダム設計、3次元堤体挙動解析の高度化ならびにコアの浸透破壊に対する安全性に対して有用なものである。

参考文献

- 1) 近藤信昭：長期観測結果に基づくロックフィルダムの挙動に関する研究、大ダム No.140, pp.71-83, 1992.
- 2) 寺田昌史：ロックフィルダムの長期挙動について、大ダム No.152, pp.29-38, 1995.
- 3) 中村 昭, 安田成夫, 小嶋光博, 藤沢侃彦, 伊藤基博：フィルダムの挙動解析(その2) -変位, 浸透-, 土木研究所資料 第 3255 号, pp.9, 1994.3.
- 4) (社) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言, pp.2-5, 2000.6.
- 5) 播田一雄, 米崎文雄, 佐藤信光, 染矢武彦, 小野紘一：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.
- 6) 岡本敏郎：破壊形態からみた浸透破壊に関する要素試験結果の評価とフィルダムへの適用性に関する考察, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.1309-1310, 2001.6.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 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) 染矢武彦, 佐藤信光, 米崎文雄, 播田一雄, 龍岡文夫：レベル2地震動による行川ダムの耐震検討, 土木学会第 55 回年次学術講演会, pp.856-857, 2000.9.
- 12) 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.
- 13) 松本徳久, 安田成夫, 伊藤基博：フィルダムの挙動解析(その1), 土木研究所資料第 3001 号, 1991.3.
- 14) 建設省河川局：多目的ダムの建設 第3巻, 設計I編 第 23 章フィルダムの設計, pp.260-263, 1987.
- 15) 安井利彰, 森 吉昭, 中野 靖, 高橋 章, 太田秀樹：ロックフィルダム堤体材料の変形特性とモデル化 - (その2) 透水ゾーンの弾塑性変形挙動とモデル化の考え方-, 土木学会第 54 回年次学術講演会, pp.656-687, 1999.9.
- 16) 安井利彰, 石黒 健, 中野 靖, 太田秀樹：高圧力下におけるロック材の浸水沈下特性に関する実験的検討, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.1561-1562, 2000.6.

(2002.6.7 受付)

STUDY ON THE OBSERVED DEFORMATION OF ROCKFILL DAMS

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

Mechanical behavior of dams is classified into two categories: the static behavior and dynamic behavior. In this study, deformation observed during the period of dam construction and reservoir ponding of 5 rockfill dams is investigated. General characteristics and individual characteristics of the observed deformation are delineated in this paper. The authors believe that the present investigation could provide useful information to dam design method and sophisticated analyses of dam body behavior.