

ロックフィルダム遮水ゾーンの 長期沈下挙動

吉越 洋¹・井上素行²・津田正寿³・内田善久⁴・藤山哲雄⁵・太田秀樹⁶

¹正会員 工博 東京電力(株) 葛野川水力建設所(〒409-06 大月市猿橋町殿上195)

²正会員 工修 東京電力(株) 本店工務部(〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3)

³正会員 東京電力(株) 群馬支店工務部(〒371 前橋市本町1-8-16)

⁴正会員 工修 東京電力(株) 本店工務部(〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3)

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

⁶正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科(〒920 金沢市小立野2-40-20)

ロックフィルダムの長期変形メカニズムを明らかにする目的で、ある中央遮水壁型ロックフィルダムの遮水ゾーンの実測沈下挙動について検討を加えた。ダム完成後の遮水ゾーンの長期沈下が、幾つかの異なる沈下要因の複合によりもたらされている可能性があること、遮水ゾーン沈下量の深度方向分布に顕著な不均一性が見られ、これが築堤時の堤体物性のばらつきと深く関連していること、貯水位を大幅に低下させた際に沈下が増長される現象が見られることなど、幾つかの特徴が明らかとなった。これらの結果から、遮水ゾーンの長期沈下をもたらす5つの要因を明らかにした。

Key Words : rock-fill dam, impervious (core) zone, long-term settlement, deformation mechanism.

1. 序論

ロックフィルダムは、貯水を目的とする土構造物である。完成後のダムには遮水機能が要求され、これが湛水直後のみならず、その後の長期間にわたって維持されなければならない。中央土質遮水壁型のロックフィルダムでは、堤体中央の遮水ゾーン(コアゾーン)が遮水の要であり、コアゾーンの水理的、力学的安定性が堤体の遮水機能に直結する。湛水直後のコアゾーンの安定性については、湛水前のコア内の有効応力状態に関する検討^{1)・2)}(例えば築堤時のアーチング現象や基礎岩盤の不陸の影響検討など)や、湛水時のハイドロリックフラクチュアリング現象に関する検討³⁾など、堤体内部の力学的挙動に着目した研究が幾つか試みられ、初期湛水時の安定性評価に供されている。一方、初期湛水以降の長期運用時に視点を移すと、堤体の応力-変形挙動に立脚した研究事例は数少なく⁴⁾、また、堤体の維持管理の場においても、堤体からの漏水量や堤体の外

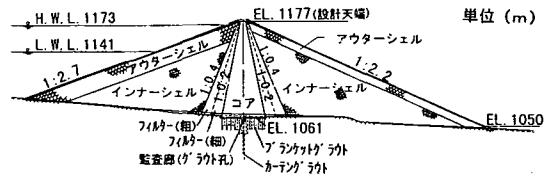


図-1 玉原ダムの標準断面

部変形量を計測し、その収れん傾向を定性的に監視している場合が多い。ロックフィルダムが、初期湛水以降の長期運用時にどのような力学的挙動をとり、これがどのようなメカニズムに支配されているかを理解したうえで、堤体漏水量の収れん傾向を観察することができれば、ダムの維持管理や長期的な安定性評価にとって極めて有用な知見が得られるものと考えられる。本研究は、このような背景に基づいて実施したものである。ある中央遮水壁型ロックフィルダムの遮水ゾーンにおける運用開始後の長期的沈下挙動をとりあげ、実測データに見られる特徴や堤

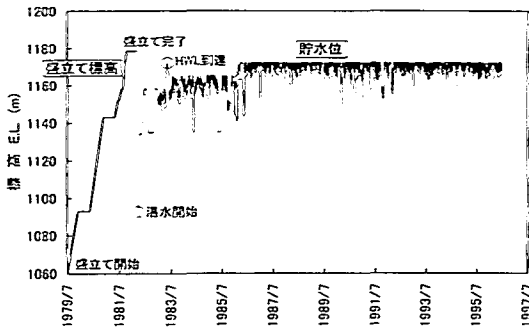


図-2 ダムの盛立ておよび湛水履歴

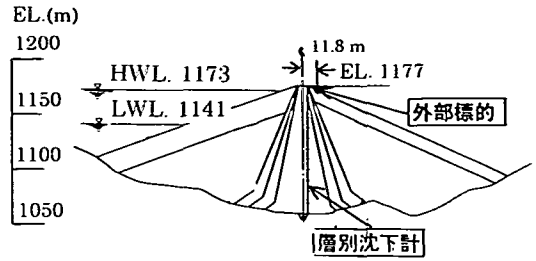


図-3 堤体沈下量の測定位置

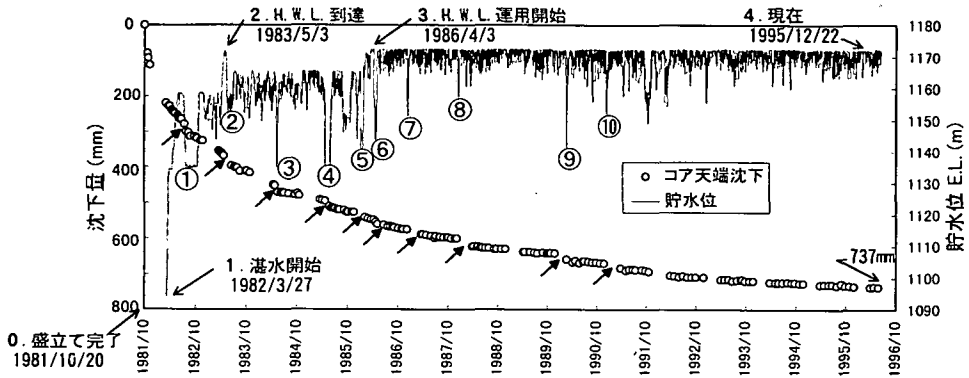


図-4 コアゾーン天端沈下量の時刻歴

体物性との関連性、変形メカニズムの検討等を行った結果について報告する。

2. 玉原ダムの概要

玉原ダムは、堤高116m、堤頂長570.1m、堤体積543.5万 m^3 の中央土質遮水壁型ロックフィルダムである。図-1にその標準断面を示すが、堤体は土質材料を用いた中央の遮水ゾーン（コア）と、その両側の透水ゾーン（シェル）、両ゾーンの間中間的な透水性を有するフィルターゾーンからなる。ダムの盛立て過程、および湛水後の貯水位運用履歴を図-2に示す。ダム本体は1979年に盛立てを開始し、3年後の1981年に築堤を完了した。1982年に初期湛水を開始、1年後に最高水位(HWL)に到達し、以降、現在までに約15年が経過している。本ダムは揚水式水力発電所の上部ダムであり、図-2に示すように日常的に貯水位の昇降を繰り返している他、時折、維持管理のために貯水位を大きく低下させている。図-3には、計測データの測定位置を示す。本論文では、標準断

面のコアゾーン内に設置されたクロスアーム式の層別沈下計データ、およびコアゾーン天端に設置された標的の水準測量データに着目した。その他の玉原ダム実測データ（他ゾーンの変形、間隙水圧、土圧等）の詳細については、文献⁵⁾を参照されたい。

3. 遮水ゾーンの長期沈下挙動とその特徴

(1) 遮水ゾーンの沈下量と深度方向分布

図-4は、コアゾーンの層別沈下計頂部にて水準測量により計測されたコア天端沈下量の時刻歴を示す。コア天端での沈下量は、盛立て完了時を起点として現在までに70cm強を記録している。時間～沈下曲線を見ると、沈下速度が湛水後の各期間で大きく変化し、また全体的には収れんの傾向を見せながらも、貯水位を大きく低下させた際（図中①～⑩）にその都度沈下が助長される（図中の矢印）など、複雑な様相を呈していることがわかる。沈下速度の急変は、コアゾーンの沈下現象が複数の要因の複合によりもたらされていることを示唆しており、これに貯水位

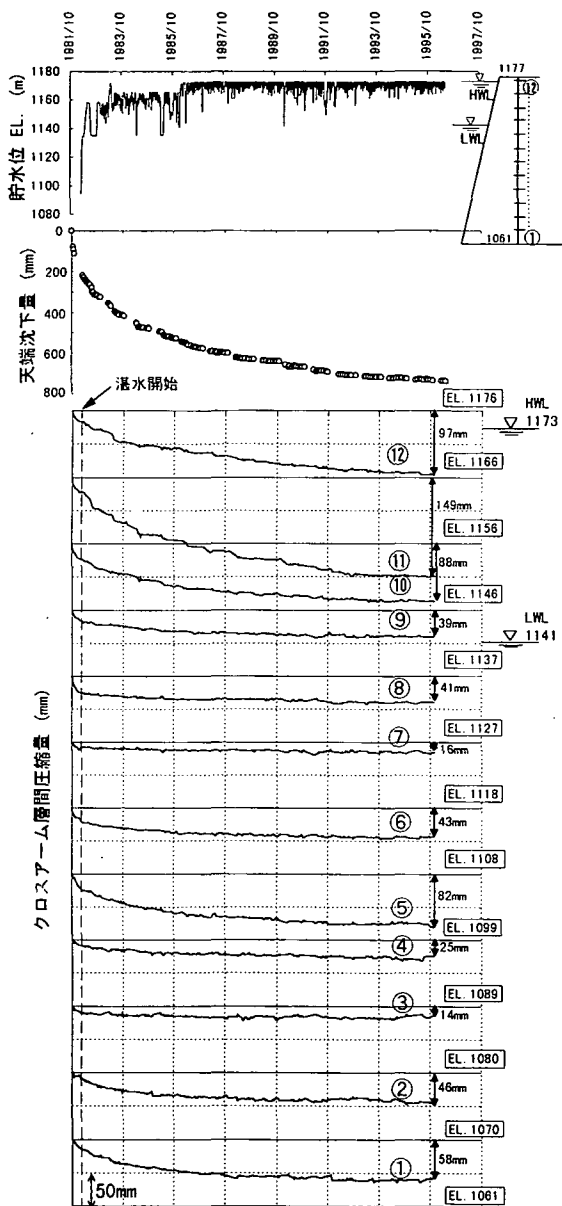


図-5 コアゾーン深度方向別の層間圧縮量の時刻歴

変動の影響が上乘せされる形で天端沈下がもたらされているようである。図-5は、この天端沈下をクロスアームの各層間ごとに分け、層間圧縮量の時刻歴をコアゾーンの深度方向別に描いた結果を示す。これらを最下層から順次累積したものが図-4となる。コアゾーンの沈下挙動は深度方向に均一ではなく、標高の高いクロスアーム10~12や中間の5, 6, 深部

の1, 2での沈下が大きくなっていることが判る。層間圧縮量の時間的推移についても、これらのクロスアーム以外では盛立て完了から湛水開始までの放置期間中に沈下が収れん傾向を示し、湛水後の沈下が相対的に小さいのに対し、上記の沈下量の大きなクロスアームでは、湛水後も継続的な沈下が観測され、湛水によって新たな沈下の発生が助長されていることがわかる。さらに、貯水位低下時の沈下増分は上部3つのクロスアームにおいて顕著に認められ、その標高は貯水位低下区間の上方に相当している。貯水位低下時の沈下については、後の3-(3)にて詳述する。図-6は、各クロスアーム間の層間圧縮量を左に、これを下から累積した累積沈下量を右にまとめた結果を示す。図-5で指摘した通り、堤体の深部、中央部、浅部の3ヶ所で沈下量が大きく、浅部での値が最も大となっている。右側に示すクロスアームの累積沈下曲線には、これらの影響で幾つかの変曲点が認められる。

(2) 堤体材料のばらつきと長期沈下挙動の関係

図-6に示した層間圧縮量の深度方向分布は、盛立て時におけるコアゾーンの物性値のばらつき、すなわち、堤体材料や転圧状況の不均一性の可能性を暗示している。そこで、コア盛立て当時の品質管理データを調査し、そのばらつきについて検討を加えた。転圧状態を表す指標としてコアゾーンの現場密度・含水比を、材料特性を表す指標として細粒分含有率と塑性指数を調査した。図-7は、記録に残された管理日時と盛立てスケジュールから、その材料が盛立てられていた標高を割り出してプロットし、深度方向の各物性値分布を求めたものである。転圧時の密度、含水比を見ると、乾燥密度は $1.6\text{Mg}/\text{m}^3 \sim 2.0\text{Mg}/\text{m}^3$ の範囲にあり、全体傾向としては標高が高いほど密度値が低下する傾向が認められる。密度が低い標高では含水比が高く、従って図-8(a)に示すように、密度・含水比のプロットはゼロ空隙曲線に平行な形で、盛立ての進捗に伴い図の左上から右下に移行する傾向を示しながらばらついている(図中には盛り立て各年度での平均 $\pm\sigma$ の範囲を□で併記)。太田ら⁶⁾によると、コアゾーンのような締固め地盤は、過圧密土に類似した挙動をとり、過去の転圧履歴と等価な上載荷重(等価先行圧縮応力)までは弾性的、これを超えると塑性的な変形が発生する。等価先行圧縮応力値は乾燥密度が低く、含水比が高いほど小さくなり、そのような転圧状態にある締固め地盤ほど新たな荷重増分に対する変形量は大きくなる。コアゾーンの密度、含水比が高標高部ほど低密度、高含

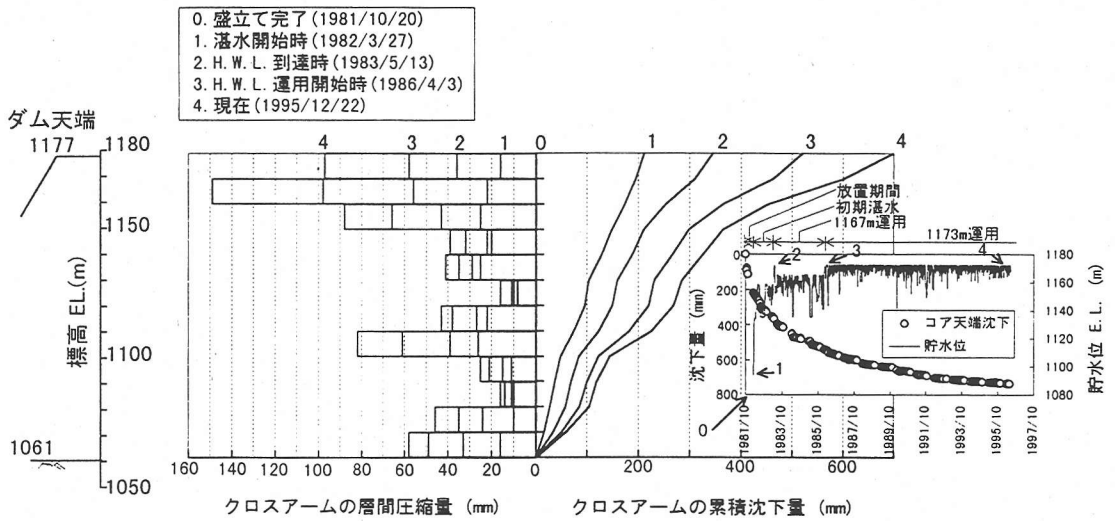


図-6 コアゾーン沈下量の深度分布

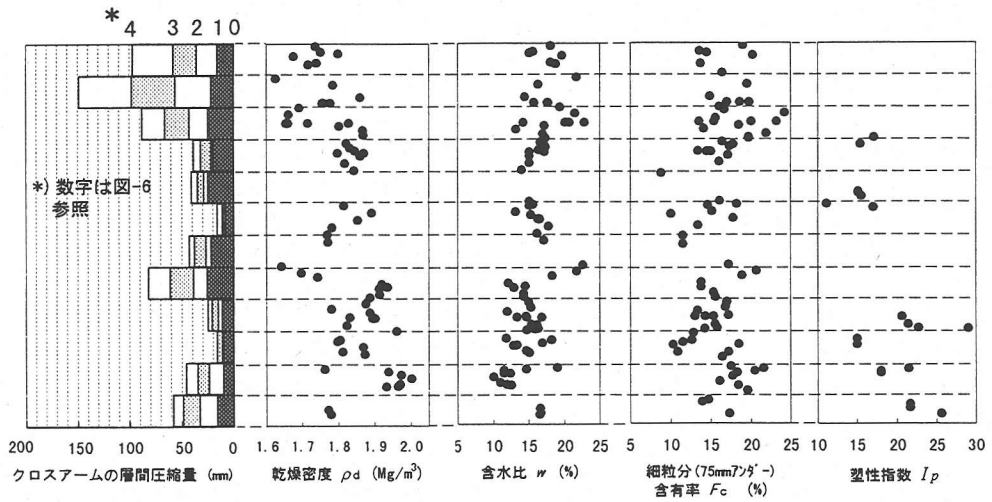


図-7 コアゾーンの物性値分布

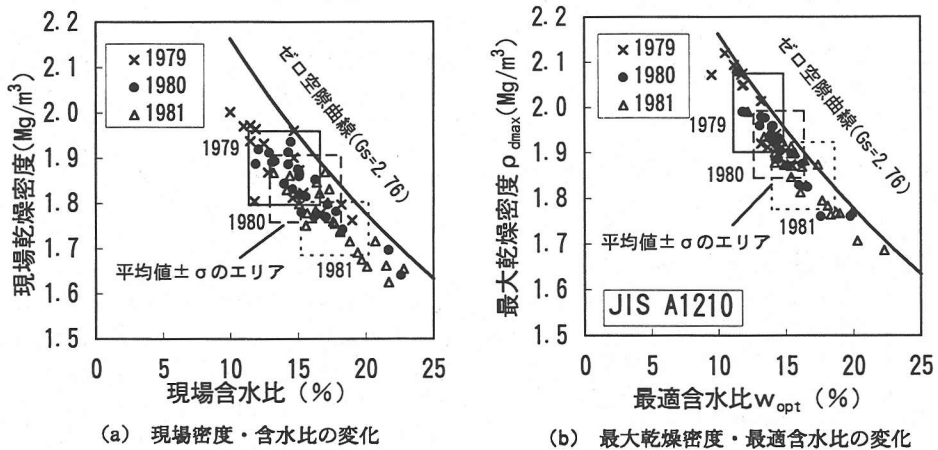


図-8 現場転圧状況とコア材の締固め特性

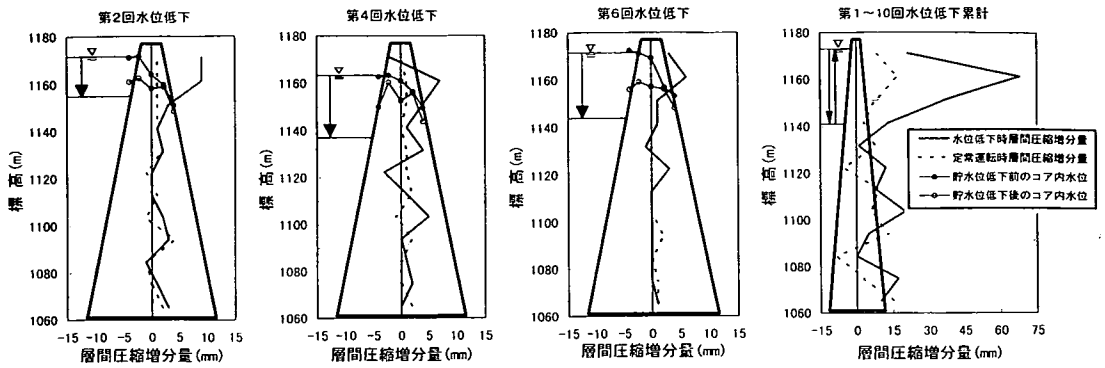


図-9 貯水位低下時の層間圧縮増分量の深さ方向分布

水比の傾向を示す事実は、層別沈下計に見られる実測沈下傾向（高標高部での沈下が大）と定性的には対応するものといえる。また、コアゾーン中央部にも一部低密度の転圧領域が見られ、図-7中に併記したクロスアーム層間圧縮量の深度分布の傾向を、密度、含水比のばらつきによってある程度説明づけることができそうである。現場の転圧方法(30tタンピングローラー12回転圧)は常に一定であった。従って、密度・含水比のばらつきをもたらした要因として、現場含水比の変動によるものと材料自体の変化によるもののいずれかが考えられる。図-8(b)には、品質管理試験として行われた室内締固め試験（JIS A1210による）の結果から、最適含水比と最大乾燥密度の組合せを図-8(a)と同じ座標上にプロットした結果を示す。同一エネルギーでの締固め特性も図-8(a)と同傾向を示して変動しており、高標高部ほど最適含水比が高く、最大乾燥密度が低下する傾向が見られる。この事実は、転圧状況のばらつきが材料変化に起因するものであることを物語っている。図-7中の細粒分含有率のばらつきを見ると、確かに低密度の部分では細粒分が多く、土の特性が粘性土側に変化した傾向がうかがわれる。図-7中にはコア材料の塑性指数を併記した。測定データの個数がかなり少ないものの、盛り立て初期のダム深部に塑性指数の大きな材料が配されていたことがわかる。コアゾーン深部はダム完成後の上載荷重が大きく、ここに塑性に富んだ材料が盛り立てられていた事実は、この部分での二次圧密の顕著な発生を想像させる。層別沈下計の実測データにも、この深度での長期にわたる沈下の発生が認められ、両者の関連性を示唆している。

(3) 貯水位低下時の沈下現象に関する考察

貯水位を大幅に低下させた際に遮水ゾーンの沈下が増大される現象は、同タイプのロックフィルダムで、貯水位を季節的かつ大幅に変動させている下小鳥ダムにおいても同様に観察されている⁴⁾。本節では、この現象について若干の考察を加える。貯水位低下時の沈下増分が、主に上部の3つのクロスアームにおいて生じていることを既に図-5に示した。これを詳細に検討するために、貯水位低下前後でのクロスアーム層間圧縮増分量の深度方向分布を求め、どの深度で沈下が生じているかを調べた結果を図-9に示す。図中には、貯水位低下前後での圧縮増分量の他に、その直後の定常運転時の層間圧縮増分量（ただし、貯水位低下期間と同じ時間間隔での圧縮増分。二次圧密的な圧縮増分量を貯水位低下による圧縮増分量から分離することを目的として記載）を併記した。さらに図中には、コアゾーン内に設置された間隙水圧計により求められたコア内の水位変動量を併記している。図に示すように、コア内の水位は、コアの透水性の影響により上流側ロックゾーン内の貯水位低下量とは必ずしも連動していない。そして、貯水位低下時の層間圧縮増分の発生位置は、コアゾーン内部の水位低下区間にほぼ対応していることがわかる。図-9中に併記した、貯水位低下10回分の層間圧縮増分量の累計データを見ると、その傾向は明白である。

この現象のメカニズムを検討するために図-10、図-11を準備した。図-10は、コア天端付近の標的のデータを用い、貯水位低下時の天端沈下と上下流方向変位の軌跡を示したものである。貯水位低下により上流側の湛水荷重が減少し、堤体が上流側に向かって変形していること、この際に発生した沈下が貯

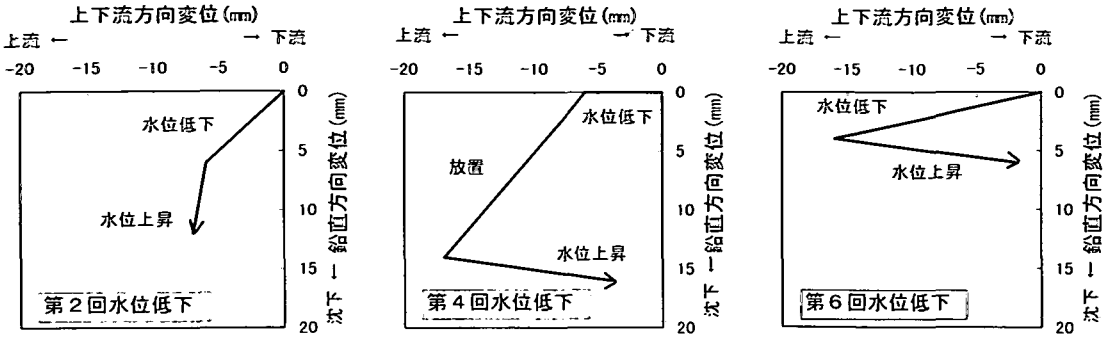


図-10 貯水位低下時の天端標的の変位軌跡

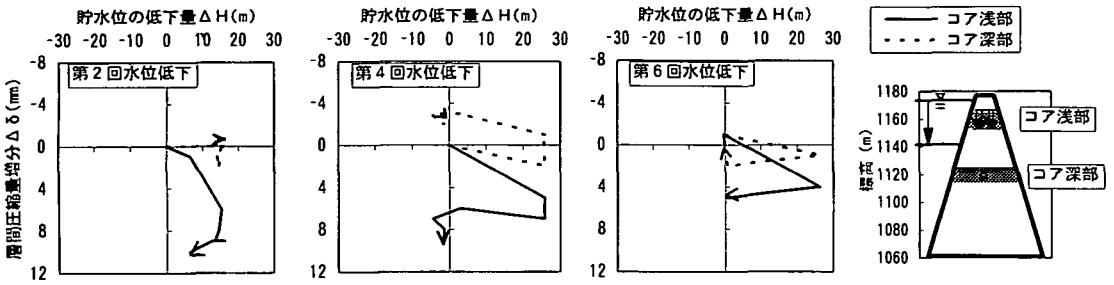


図-11 コア内水位低下区間と深部での沈下挙動の比較

水位回復後もそのまま残留し、非回復な沈下増分をもたらしていることがわかる。このような上下流の荷重バランスの変動は、コアゾーンにせん断変形をもたらすものと予想される⁴⁾。土にせん断応力が加わると、ダイレイタンスーによる体積変化が生ずること、この際に発生する体積ひずみがほぼ塑性的な、非回復なものであることは周知の事実である。これらを勘案すると、貯水位低下時のコアの非回復な沈下現象が、コアゾーンのせん断変形に伴うダイレイタンスーに起因するものである可能性が考えられる。コア内の水位低下区間では、ゾーン幅が大きい深部に比べて排水が容易であり、このような体積変化が即時的に生じうるものと思われる。さらに、この標高では築堤時の転圧密度が低く、かつ上載荷重も小さかったため、転圧地盤のせん断剛性が深部に比べて小さいものと考えられる。従って、コア上部ほどせん断変形の影響を受けやすく、このことも層間圧縮増分量がこの標高に集中した一要因と推察される。一方、コアゾーン深部の沈下挙動との比較を行うために、図-11を準備した。図は、コアゾーン浅部の水位低下区間、および深部のクロスアーム

の両者で、貯水位低下時の貯水位変動量～層間圧縮増分量関係を比較したものである。水位低下区間内(→)では、貯水位低下に伴い発生した沈下が貯水位の回復時にもほぼ残留しているのに対し、深部(-->)では圧縮量自体も小さく、かつヒステリシスを描きながらも貯水位回復に伴い原点に戻ろうとする弾性的な挙動が見うけられる。上流側の貯水位低下とコア内の水位低下によって、コアゾーン内には応力の変動もたらされる。これをコアの上下流方向変形に伴うせん断応力増分と、水位低下時の間隙水圧変動に伴う等方応力増分に分離して考えると、図-11の結果は、コアゾーン浅部の水位低下区間内においてはせん断応力成分(非回復な変形をもたらす)の、深部では間隙水圧変動に伴う等方応力成分(弾性的な変形をもたらす)の変動が、貯水位低下時に卓越して生じていることを示唆するものといえよう。

図-12には、貯水位低下回数に対する圧縮増分量の変化を示す(水位低下回数は図-4中に併記。第1回目は、図-9に破線で示した他の沈下要因との分離が難しく、プロットしていない)。各回数での貯水

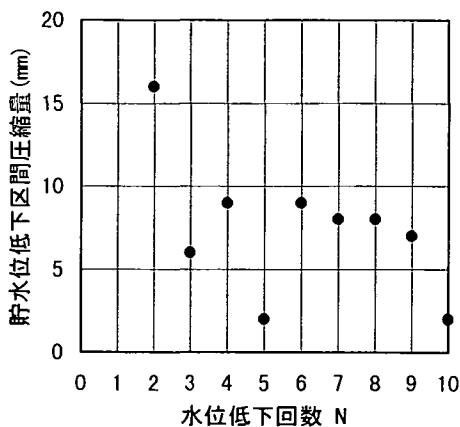


図-12 貯水位低下回数と層間圧縮増分量の関係

位低下条件の違いによって、層間圧縮増分量にばらつきが見られるものの、全体的には、水位低下回数が増えるほど圧縮増分量が次第に収れんする傾向を図-12は示している。排水条件下で土にせん断応力が繰返し加えられ、体積変化が蓄積する「繰返しせん断」⁷⁾の現象に定性的に類似している点が注目される。貯水位低下時の沈下量は、コア内の水位低下量（低下後の放置期間に関連）、水位低下の繰返し回数、転圧地盤のせん断剛性（転圧密度や上載荷重に関連）等が関与していることが明らかになったが、定量的なメカニズムの解明は今後の課題といえよう。

4. 遮水ゾーンの長期沈下のメカニズム（試案）

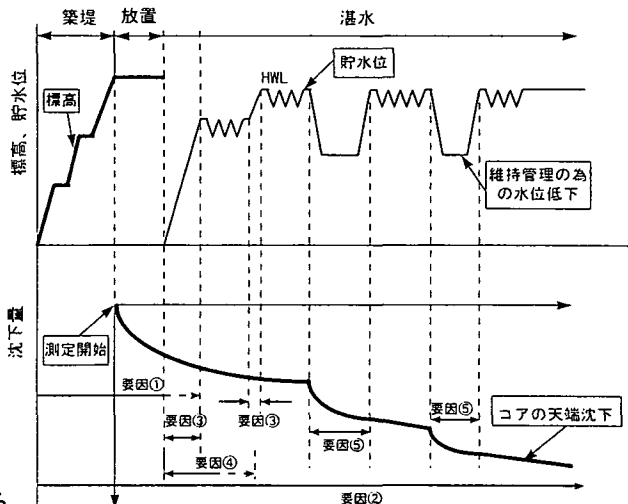
玉原ダムの実測沈下挙動の特徴、堤体物性のばらつきとの相関性、および盛立て完了以降に堤体に作用する外的な荷重要因等をすべて勘案すると、ダムの長期沈下要因として、以下のようなものが想定される。

① 放置期間中の圧密沈下

盛立て完了後、湛水開始までの放置期間中には、新たな荷重増加はなく、築堤時に発生したコアの間隙水圧の消散のみが継続する。この間の沈下は、一種の圧密現象に起因するものと考えられる。

② 二次圧密による沈下

間隙水圧消散の後も、上載荷重一定下で長期的な二次圧密現象が発生する。図-7によれば、細粒土の縮固め特性を示すコアゾーン中央部と浅部、および上載荷重、塑性指数共に大きいコア深部で実測層間圧縮量が大となっている。一般に、土の二次圧密は上載荷重が大きいほど、塑性指数が大



沈下要因	沈下要因の概念
① 放置期間中の圧密沈下	コアの残留間隙水圧
② 二次圧密	上載荷重一定下での二次圧密
③ 湛水荷重による沈下	湛水圧
④ 湛水時の浸水沈下（コラプス現象）	不飽和一飽和への変化
⑤ 貯水位低下に伴う沈下	コア内水位低下に伴う沈下

図-13 遮水ゾーンの長期沈下要因の想定

きいほど大となり⁸⁾、図-7の実測傾向は既往の知見と定性的に斉合する。この事実より、沈下要因のひとつとして二次圧密が想定される。

③湛水荷重による沈下

湛水後に堤体に作用する荷重として、初期湛水時にコアゾンの上流側側面に作用する湛水荷重を挙げることができる。コアゾーンが、これにより下流側へ変形し、その鉛直成分としてコアの沈下が発生するものと考えられる。

④コラプス現象による浸水沈下

一般に、不飽和な土が飽和されると、間隙への水の流入によって土粒子接点の表面張力（メニスカス）が消失したり、粒子接点間のせん断抵抗の低下によって土粒子相互の移動が生ずる^{9), 10)}。浸水沈下は、土が緩い状態にあるほど大となるが、コアゾーン浅部では転圧時の密度が低く、かつ上載荷重による圧縮効果も少ないために、浸水沈下の発生する可能性が高い。この部分の沈下が、特に湛水後に大きく進展している事実から、沈下要因の一つとして浸水沈下を想定することができる。

⑤貯水位変動に伴う沈下

3-(3)で述べたように、貯水位低下時に発生する非回復な沈下がコアゾーン内の水位低下区間で発生する。そのメカニズムとしては、コア内の応力変動に伴う繰返しせん断の現象が想定される。

図-13には、以上で述べた長期沈下のメカニズムと沈下要因を模式的にとりまとめた。玉原ダム遮水ゾーンの長期沈下は、上記の各沈下要因が、築堤時の材料物性のばらつき、転圧状態のばらつきなどと複雑に交絡した結果もたらされたものと結論づけられる。

5. 結 論

ある中央遮水壁型ロックフィルダムの長期沈下挙動をとりあげ、実測データに見られる特徴を整理し、長期沈下のメカニズムについて考察を加えた。得られた結論を以下に列挙する。

- (1)ダム完成後の遮水ゾーンの沈下量は、その速度が湛水後の各期間で大きく変化し、長期沈下が複数の沈下要因の複合によりもたらされていることを示唆している。
- (2)さらに、貯水位低下時にコアゾーン内の水位低下区間で非回復な沈下増分が発生し、これが水位低下を行うごとに収れんする傾向を示している。
- (3)遮水ゾーンの沈下量は深度方向に不均一な状態で生じており、これが堤体物性のばらつきと深く関連している。
- (4)貯水位低下時の沈下現象に関しては、コア内の

水位低下区間において排水繰返しせん断に類似した挙動が見られるが、そのメカニズムの解明は今後の課題である。

- (5)長期沈下のメカニズムとして、堤体完成から湛水までの圧密現象、長期的な二次圧密、湛水荷重の作用、浸水沈下、貯水位変動による沈下の5つの沈下要因を想定した。

今後は、(5)で想定した各沈下要因毎にそのメカニズムをモデル化し、遮水ゾーンの長期沈下量の定量的評価を試みていく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ご協力をいただいたソイルアンドロックエンジニアリング㈱、前田建設工業㈱、長期間にわたり良好な挙動観測データをご提供いただいた関係各位に対し、末筆ながら謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 松井家孝：フィルダムの変形と内部応力，土と基礎，20(12)，1972。
- 2) 村瀬祐司，大根義男，成田国朝，奥村哲夫：土質コアを有するロックフィルダムの水理的破壊現象に関する研究，ダム工学，No. 2，pp.16-28，1996。
- 3) 福島伸二：ハイドロリックフラクチュアリングによるフィルダムコア材の破壊基準について，土と基礎，34(12)，pp. 23-28，1986。
- 4) 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，東京大学博士論文，1995。
- 5) 増田民夫：玉原ダムの挙動について，大ダム，148号，pp. 58-84，1994。
- 6) 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，土学会論文集，No. 436，Ⅲ-16，pp. 2-36，1991。
- 7) 西 好一，金谷 守，松井家孝，当麻純一：地震時における基礎地盤の安定性評価（その1），動的解析に基づく砂・砂礫地盤の安定性評価手法の開発，電力中央研究所報告U8002，1986。
- 8) 安川郁夫，嘉門雅史：粘性土の二次圧密における荷重条件の影響，土質工学会論文報告集，Vol. 27，No. 2，pp. 93-106，1987。
- 9) 八木則男，矢田部龍一，榎 明深：締固め土の圧縮とせん断に関する2，3の特性，不飽和土の工学的性質の現状シンポジウム発表論文集，pp. 29-34，1987。
- 10) 福田 護，中沢重一：盛土地盤の浸水に伴う沈下とその解析，土質工学会論文報告集，Vol. 12，No. 3，pp. 55-64，1972。

(1997. 1. 6 受付)

ON THE BEHAVIOUR OF LONG-TERM SETTLEMENT OF IMPERVIOUS ZONE IN ROCK-FILL DAM

Hiroshi YOSHIKOSHI, Motoyuki INOUE, Masatoshi TSUDA, Yoshihisa UCHIDA,
Tetsuo FUJIYAMA and Hideki OHTA

To investigate the mechanism of long-term settlement of rock-fill dam, the field observations of impervious zone of a center-core type rock-fill dam were carried out. As a result of observation, the long-term settlement, occurred by some factors, is found distributed ununiformly in the core zone related to the scattering properties of fill materials, and is also increased when the water level draws down significantly. By these results, five factors which cause the long-term settlement were clarified.