宇奈月ダム貯水池周辺斜面における計測管理の問題点と今後の展望

ISSUES AND PROSPECTS FOR INSTRUMENTATION OF THE SIDE SLOPES OF THE RESERVOIR OF UNAZUKI DAM

細谷健介*・松本　敏**・小野愼吾***
Kensuke HOSOYA, Satoshi MATSUMOTO and Shingo ONO

An automatic observation system was introduced to monitor the stability of the side slopes of the reservoir of Unazuki Dam to support slope management based on a management system with a reference slope classification at one-meter intervals. As a result of a trial inundation and observation results during the time that followed, it was judged that future slope management needs to consider external primary factors to determine practical management criteria. We present the results of multiple regression analysis performed on the various measurement data to establish quantitative relationships to support management decisions.

Key Words： *reservoir slopes, external primary factors, multiple regression analysis, instrumentation, monitoring system*

1. はじめに

宇奈月ダムでは貯水池周辺の地すべり、崖錐斜面などの安定状況を監視するために自動観測システムを導入し、計器種別ごとに設定した管理基準値に基いた斜面管理を行っている。しかし、試験湛水時（平成12年2～6月）およびその後の期間中、実際の斜面変動以外の要因（外的要因）による数値変動が管理基準値を超過するケースが多々生じており、斜面管理を煩雑なものとする要因となっていた。このため、今後の斜面管理を行う上では、こうした外的要因を考慮した実用的な管理基準を策定することが必要と判断された。

今回、各計測データについて、重回帰分析による統計的手法を用いた解析を行った結果、計測値と外的要因との相関性や、外的要因による数値変動を踏まえた管理手法を確立するための知見が得られたので、ここに報告する。

なお、本論文は第1章から第6章までが2003年7月刊行のダム技術No.202[1)]、第7章以降が2004年3月刊行のダム技術No.210[2)]に掲載された論文で構成し、さらに本誌に掲載するに当たって再編集を行い、新たに得られた検討結果を補筆している。

2. 宇奈月ダムの概要

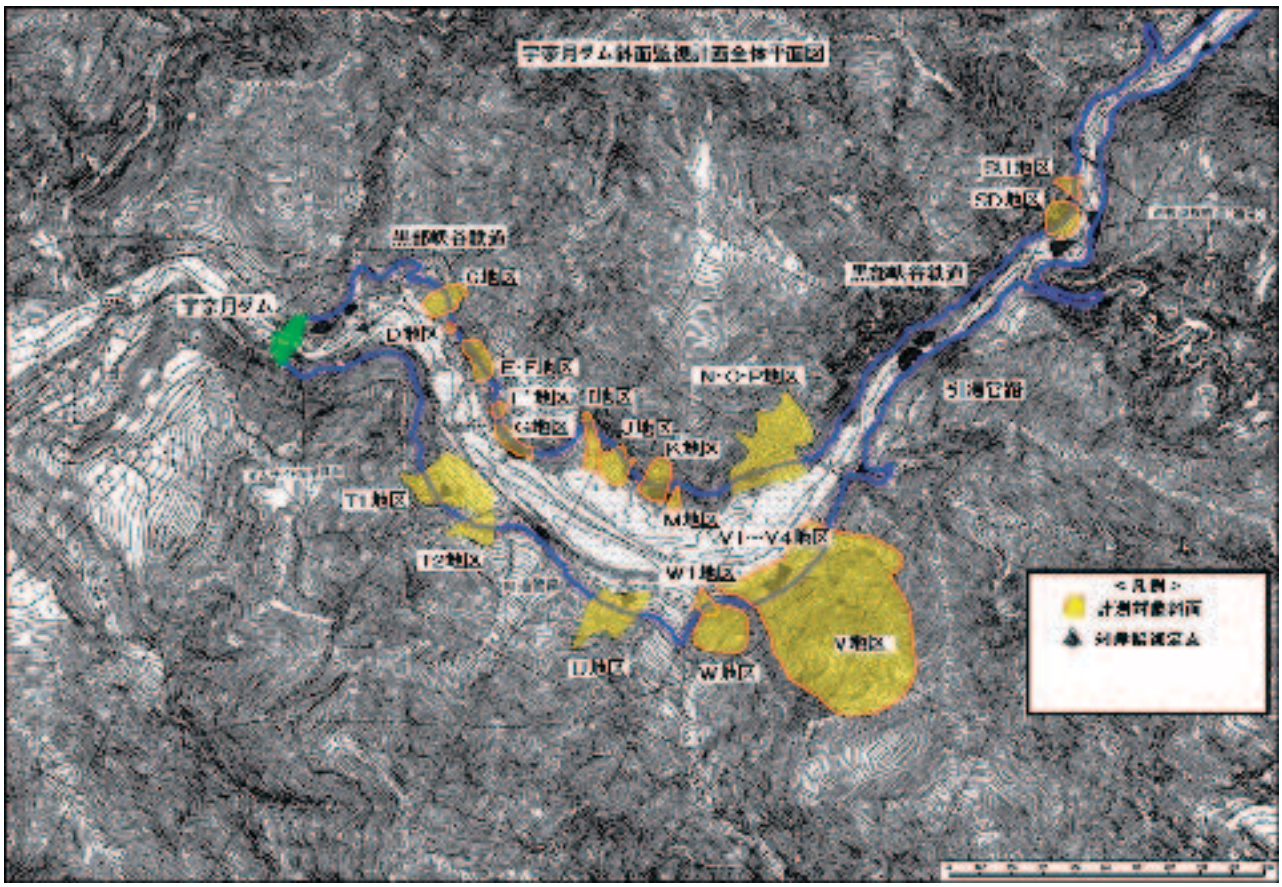
宇奈月ダムは、富山県東部の一級河川黒部川水系黒部川の河口より上流約20kmの富山県下新川郡宇奈月町音沢・内山地内に洪水調節、発電および用水供給を目的とした多目的ダムとして建設された（**写真－1**）。ダムおよび貯水池の諸元は**表－1**に示してある。当ダムの特徴は、定期的な堆砂土砂を排出する「排砂設備」を直轄ダムとして初めて採用しており、排砂時における貯水位急低下速度は25m/日に達する。このような急激な貯水位低下に対する地すべり・崖錐斜面の挙動については、これまで解析および計測事例の報告はされておらず、予測以上の残留地下水の発生や、それに伴う斜面の不安定化が懸念された。そこで、貯水池内の湛水前に抽出した24箇所の精査実施斜面（**図－1**）について自動計測システムによる計測監視を行うとともに、巡視・ITVカメラなどの目視監視を行い、排砂時の貯水位急低下に対する斜面の挙動について計測監視を実施した。

表－1　ダムおよび貯水池諸元

ダム	型式	重力式コンクリートダム
	堤頂標高	EL＝262.0m
	堤高	97.0m
	堤体積	510,000m³
	放流設備	クレストゲート２門 常用洪水吐２門・排砂設備２門 水位低下用放流設備１門 利水放流設備１門
貯水池	流域面積	617.5km²
	総貯水容量	24,700,000m³
	有効貯水容量	12,700,000m³
	ｻｰﾁｬｰｼﾞ水位	EL＝260.0m
	常時満水位	EL＝245.0m
	洪水期制限水位	EL＝242.0m
	最低水位	EL＝220.0m

*　首都圏事業部　国土保全部
**　新潟支店　北陸事務所
***　大阪支店　技術部

写真－1　宇奈月ダム



図－1　宇奈月ダム貯水池周辺の斜面対策・監視位置図

3. 試験湛水の経過

宇奈月ダムの試験湛水は、平成12年2月29日より開始した。その後1m/日程度の速度で貯留が進み、平成12年4月7日にサーチャージ水位EL.260mに達した。その後EL.230mまで低下させた段階で一連の貯水位操作を終了し、洪水期制限水位EL.242mまで回復させた後、排砂に備えた。排砂は、貯水池を空にし、貯水池内の旧河道を流れる河水の掃流力を利用して貯水池にたまった土砂を排出することから、ある規模以上の流入量が必要である。しかし、平成12年の夏季は少雨であり、排砂を実施することが出来なかった。そこで、試験湛水が始まってから、貯水池内に流入した枯葉などの有機物が、長期堆積で変質することを抑制する目的で、貯水池の水を入れ替えるために、貯水位急低下を平成12年9月3日に実施した。この時の貯水位操作は、EL.235mからEL.226mまでであり、低下速度は9m/日であった。その後、常時満水位EL.245mまで貯水位を回復し、貯水位維持期間を経た後、翌年の平成13年6月19日に初めての排砂を実施した。この時点での貯水位操作は、EL.245mからEL.218mまでであり、低下速度は約25m/32時間であった。また、同月の6月30日には2回目の排砂（水位低下約26m/20時間）を実施した（図−2）。

4. 貯水池斜面の観測計器の配置と管理基準値

(1) 貯水池斜面の観測計器の配置

貯水池内の精査実施斜面の内、図−1に示す各地区に各種の計測器を配置し、斜面の安定性の確認や実施した対策工の効果判定を行った。設置した観測計器の種類と数量を表−2に示す。

表−2　試験湛水時の貯水池斜面の観測計器

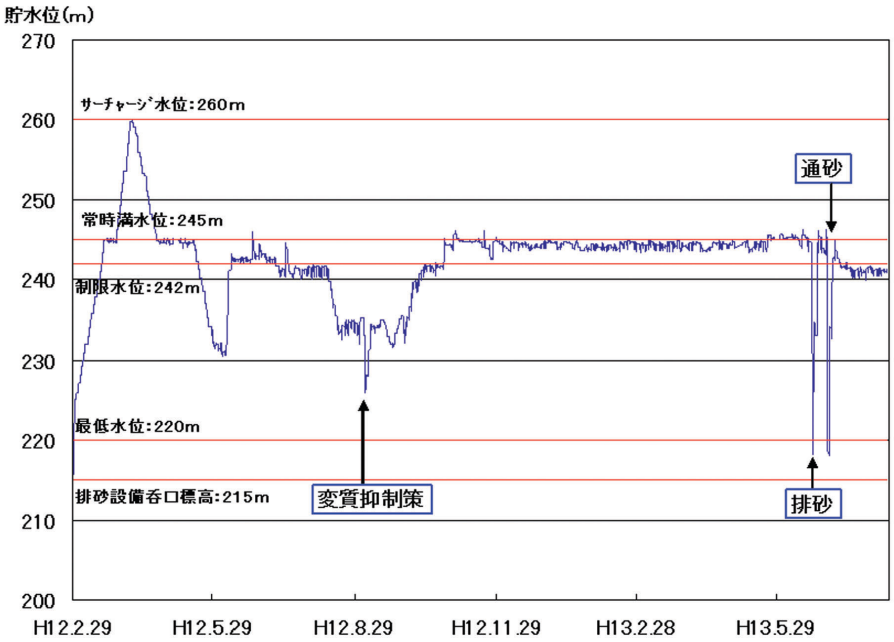
観測計器種別	基数
地盤傾斜計	20
孔内傾斜計	8
アンカー荷重計	10
垂直伸縮計	3
鋼管杭歪計	2
地下水位計	14

(2) 試験湛水中の管理基準値

試験湛水期間中に運用していた管理基準値および管理方針を表−3に示す。

表−3　試験湛水中の管理基準値

計測器	管理基準値
地盤傾斜計	①　10 秒/日を超えた場合 ②　5 秒/日以上が同一方向へ 3 日以上連続した場合
孔内傾斜計	①　0.5mm/日を超えた場合 ②　0.2mm/日以上が同一方向へ 3 日以上連続した場合
アンカー荷重計	外気温などによる日周期、年周期変動や貯水の水没などの影響以外の明らかな荷重増加傾向が見られる場合。
垂直伸縮計	地盤傾斜計、孔内傾斜計とともに明瞭な引張変動が認められた場合。
鋼管杭歪計	貯水の水没などの影響以外の明らかな谷側と山側で変動値の反転（±）が見られ、かつ累積変動が見られる場合。



図−2　試験湛水の実績図

5. 試験湛水時の観測結果および計測管理上の問題点

計測・巡視による斜面監視結果からは湛水に伴う斜面変動の兆候はないと判断された。しかし、各種計器の観測結果には「外気温変化」や豪雪地帯であることによる「積雪荷重」・「雪崩」といった自然現象に起因すると考えられる数値変動が多く含まれていた。また、通常の多目的ダム貯水池では稀な「排砂」時の極めて急速な貯水位変化による水圧変化に起因すると判断される数値変動も検出された。試験湛水段階では、これら「外的要因」による数値変動が観測された場合、該当する斜面に実際に変状が生じたか否かを検討・確認する必要があった。このため臨時点検要員を常に配置するなど、管理上の負担も大きなものにしていた。

以下にこうした外的要因によると判断される変動値の計測事例を報告する。

(1) 地盤傾斜計

地盤傾斜計はセンサーの感度が高く、斜面変動の前兆現象を捉えられることから地すべり観測において多くの採用実績がある。宇奈月ダムでも監視対象となった斜面の大半に設置されている。

当センサーは、感度が敏感である反面、気温変化や降雨・積雪・雪崩・貯水位の変動などに伴う斜面表層部の局所的な変動もすべて捉えてしまうといったデメリットもある。そのためデータの解釈にはこうした点を十分考慮して当たる必要がある。宇奈月ダム貯水池法面に設置した地盤傾斜計において確認された主な外的要因は次のようなものであった。なお、文中に示す地区名は図−1に示すとおりである。

1) 温度相関型（日・年周期変動）

外気温変化との相関を有し、回帰性の変動を示すもので、特にI地区では年間の変動幅が200秒前後と大きくなっている（図−3）。

2) 貯水位相関型

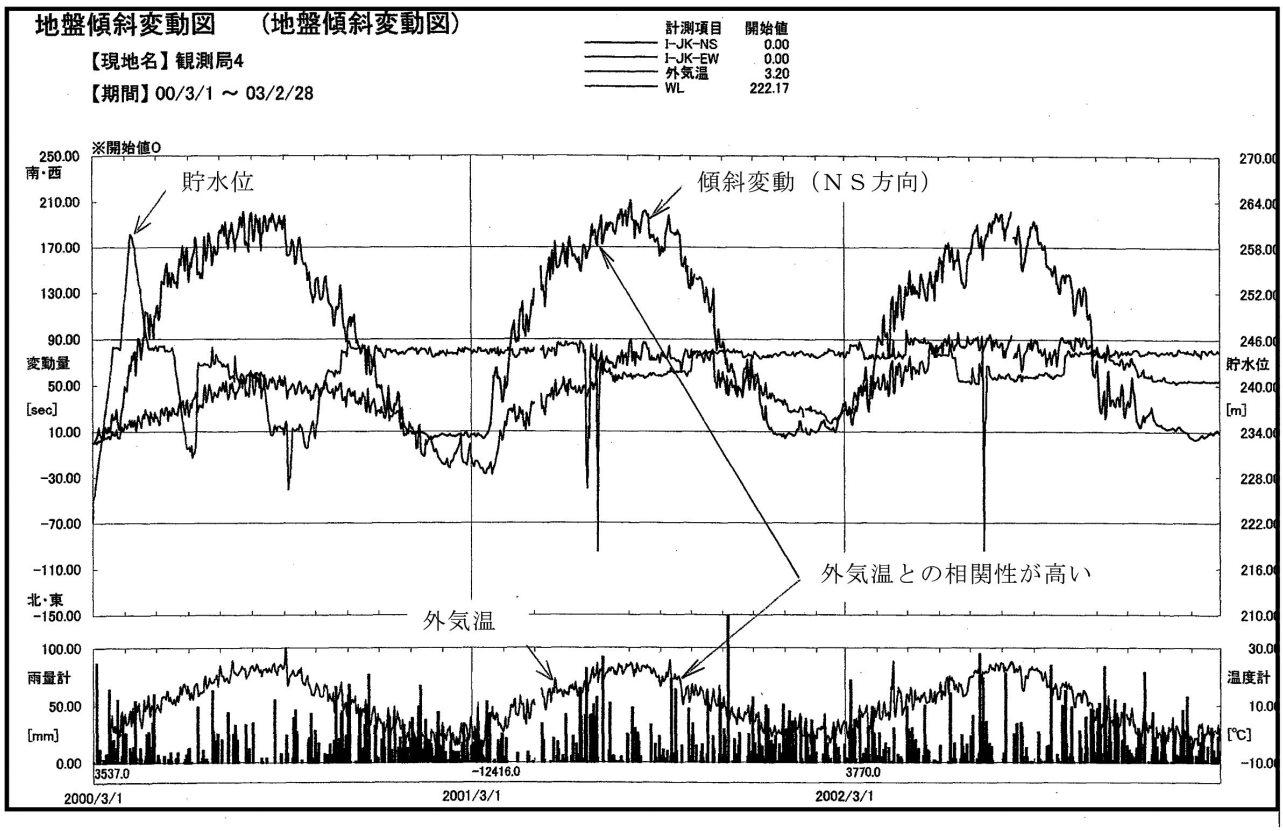
試験湛水初期の貯水位上昇時にD地区で明瞭に認められたもので、その後も不明瞭ながら貯水位変動との相関を有した変動を示し、回帰性を有するものである（図−4）。

3) 積雪荷重・雪崩型

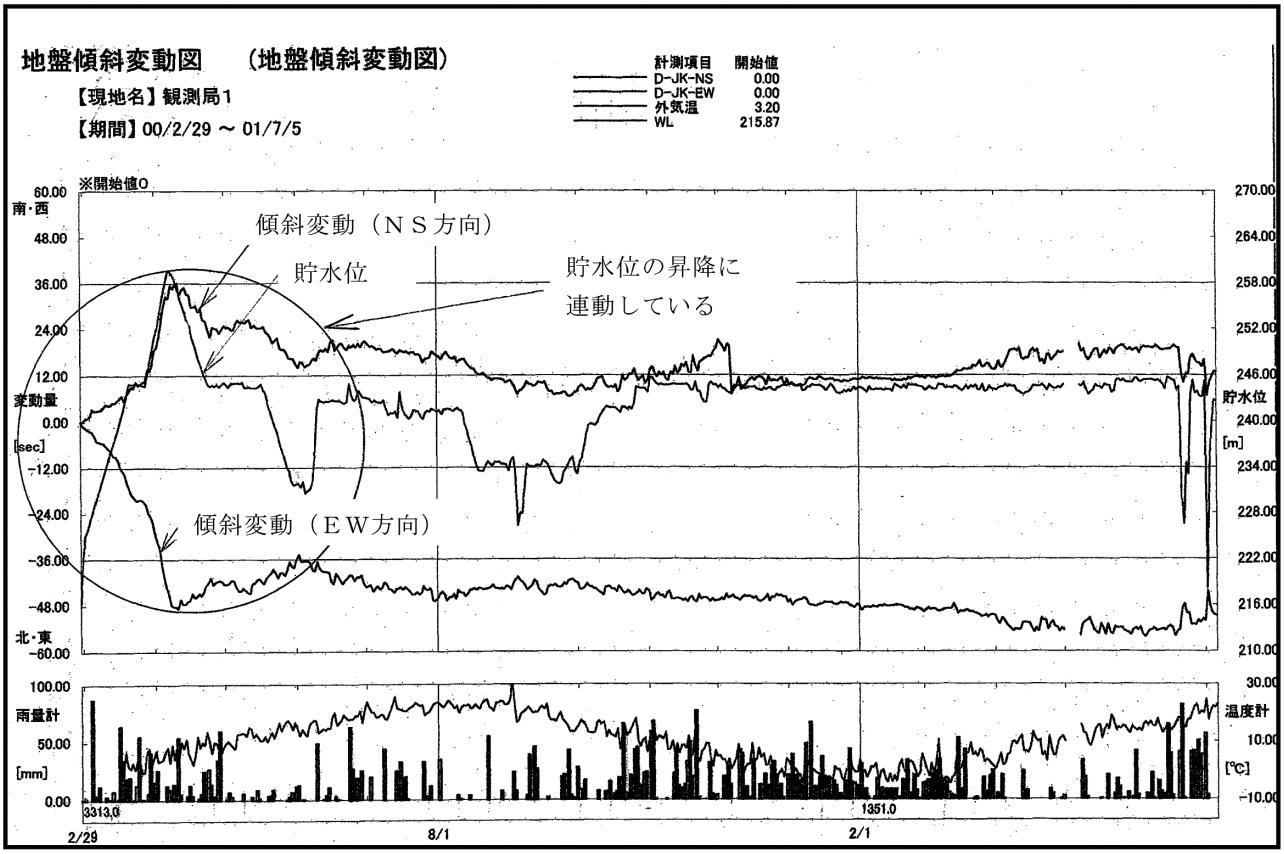
S地区、G地区やV地区において顕著に認められるもので、周辺地域の積雪期に当たる11～3月といった特定期間に大きな変動が観測されるものである（図−5,6）。

(2) 孔内傾斜計

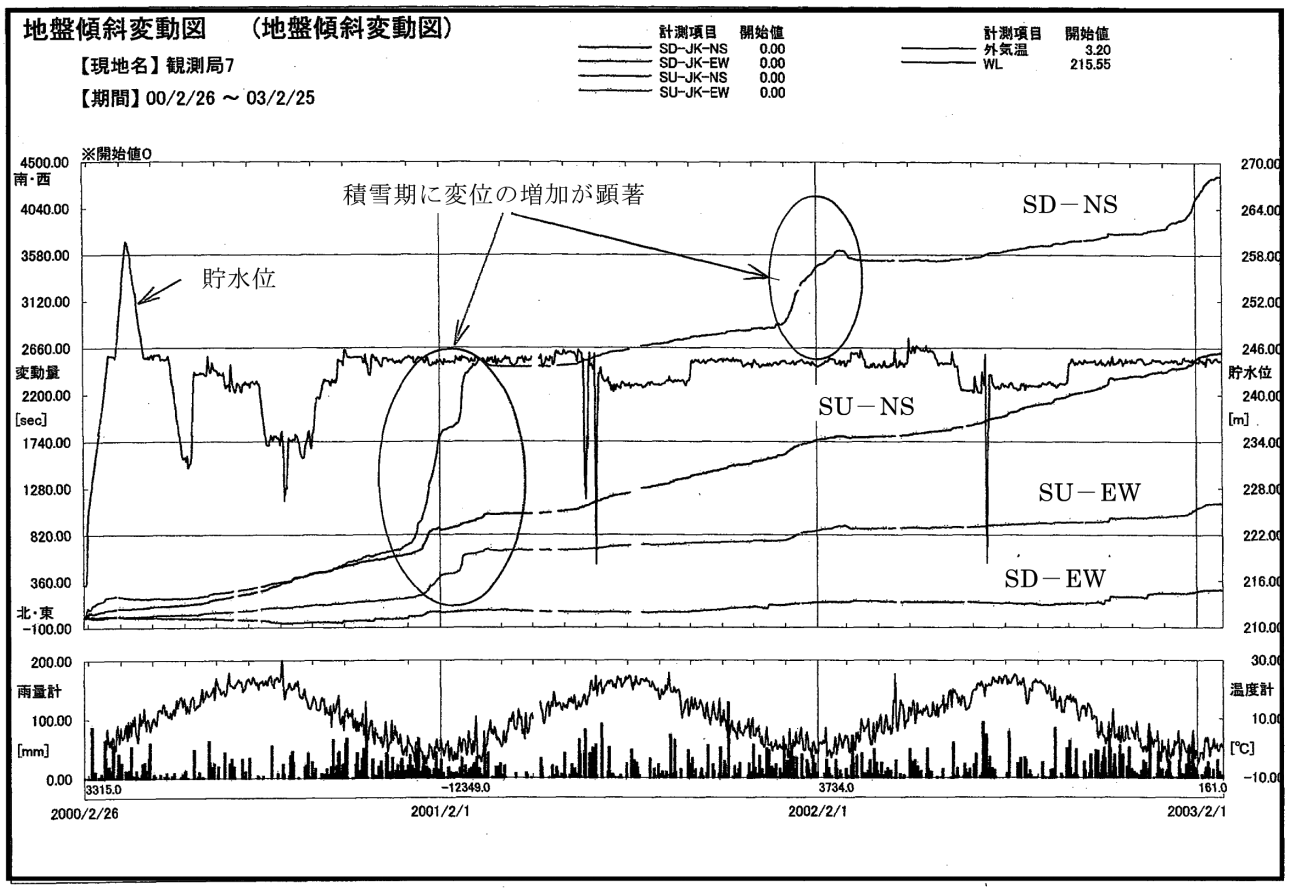
試験湛水期間中では、日変動で管理基準値を超過するケースが数回観測されたが、結果的に貯水位の昇降に伴う貯水圧の変化に起因するものが多かった。図−7は排砂時の変動を拡大して示したものである。貯水位の変化と相関を有する傾斜変動が認められる。変動の形態が貯水位変化に非常に酷似していることから、貯水の変動によ



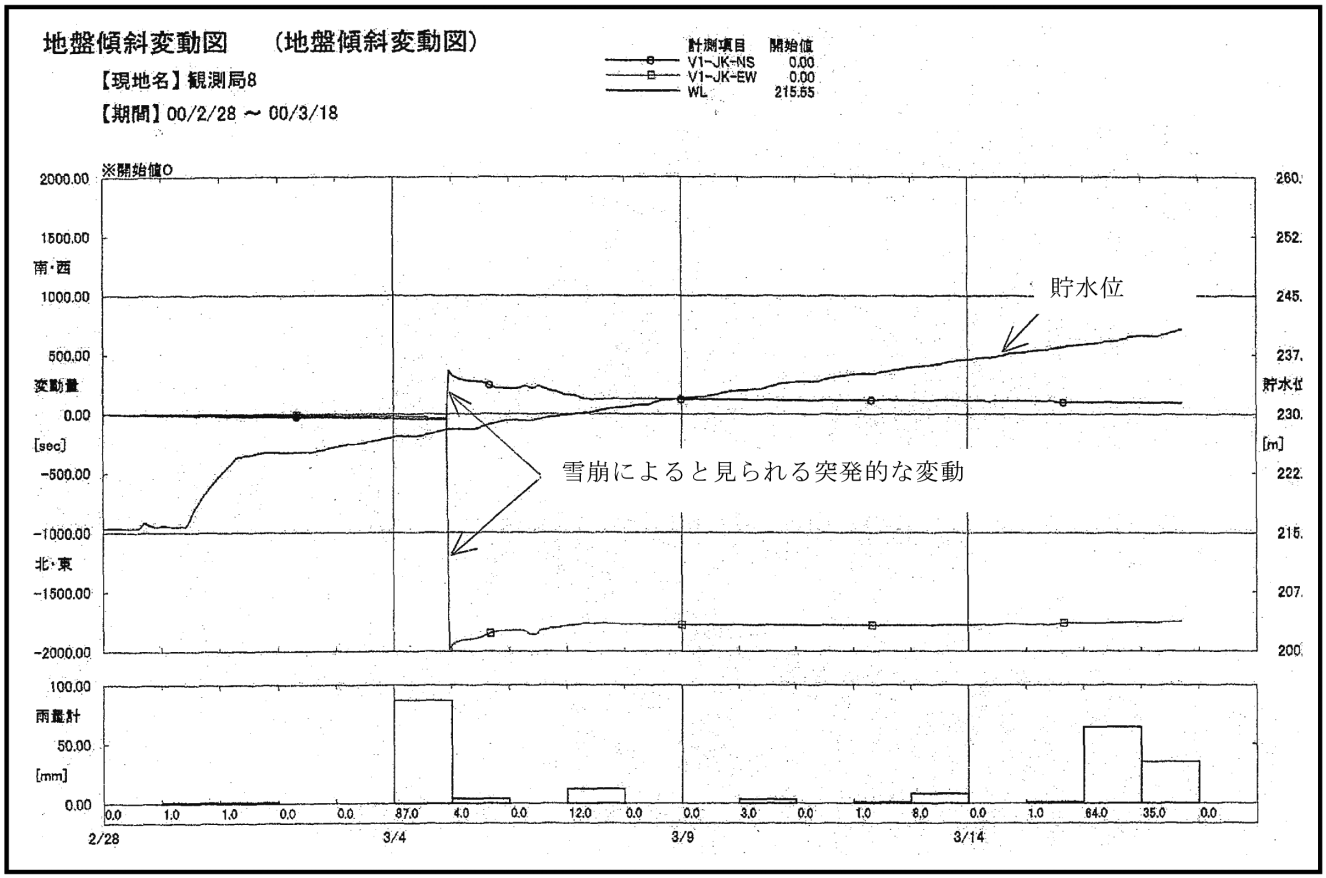
図−3　温度と相関した地盤傾斜計の変動事例（Ｉ地区）



図－4　貯水位と相関した地盤傾斜計の変動事例（D地区）



図－5　積雪荷重によるとみられる変動事例（SD・SU地区）



図―6　雪崩によるとみられる変動事例（V1地区）

る水圧変化の影響が推測されるが、この点については定かではない。

(3) 垂直伸縮計

観測期間のうち、主に初期段階において、湛水や降雨との相関性を持たない圧縮変動が計測されている。

垂直伸縮計は、地中側のアンカー部が固定され、地表側が自由な状態にあることから、地すべり変動が生じた場合には、測定値は原則として引張り側（＋）の値を示すこととなる。しかし、ここに示すように設置直後の計測時には、圧縮側（－）の測定値が得られるケースも多く知られている。このような現象の発生要因として、①定着地盤の付着力が弱いことによるアンカー定着部の「抜け」、②設置直後のインバー線の“たるみ”の解消、あるいは、③設置地盤表層部の沈下といったものが考えられる。宇奈月ダムにおいては圧縮変動の発生頻度や変動幅が年々縮小傾向にあることから、主に②によるものと推察される（図―8）。

(4) アンカー荷重計

アンカー荷重計の観測結果では、特に大きな変化がないが、緩やかな荷重減少傾向を示しているものがある。

荷重の減少傾向は中長期的には収束しつつあり、アンカー体のリラクゼーションによるものと考えられる。また、荷重減少傾向以外には1日の気温の上昇による荷重の減少、気温の下降による荷重の増加傾向が見られる（図―9）。

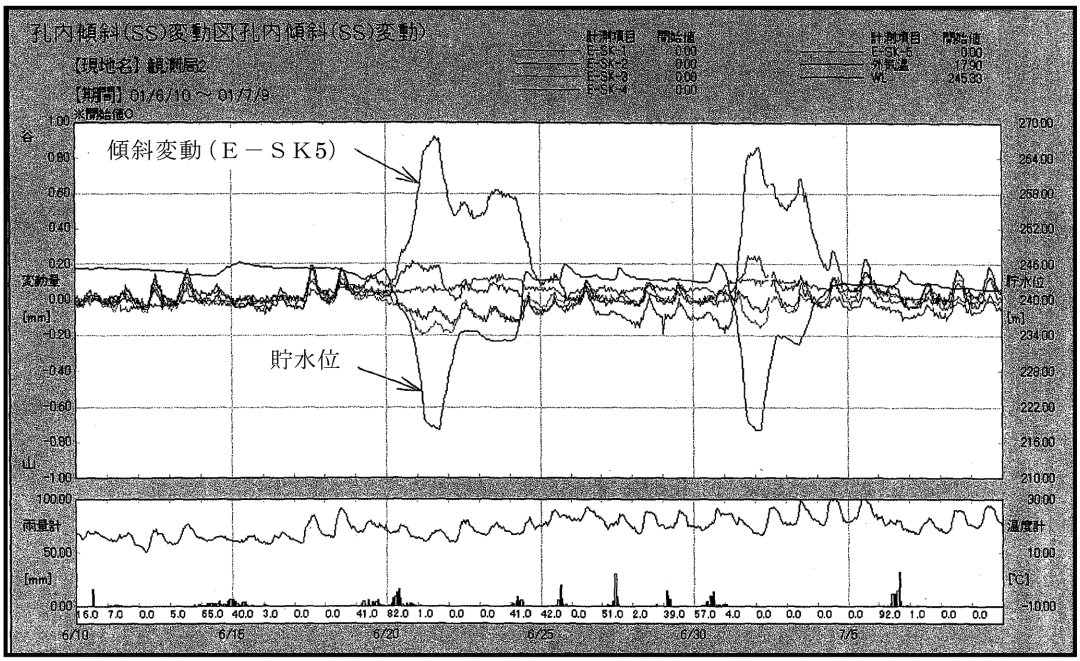
(5) 鋼管杭歪計

鋼管杭を施工したC・J地区についてのみ実施している。杭の内壁に谷側と山側に歪ゲージを取り付けて計測している。計測結果では、ダム貯水位以下（ほぼ常時満水位以下）に設置されているセンサーにおいて、水位の上下動に連動した応力変化が観測されている。しかし、杭の谷側・山側に働く応力傾向が同様であり、累積性も見られないことから、浮力による杭本体の挙動、あるいは水圧による応力を捉えているものと判断される（図―10）。

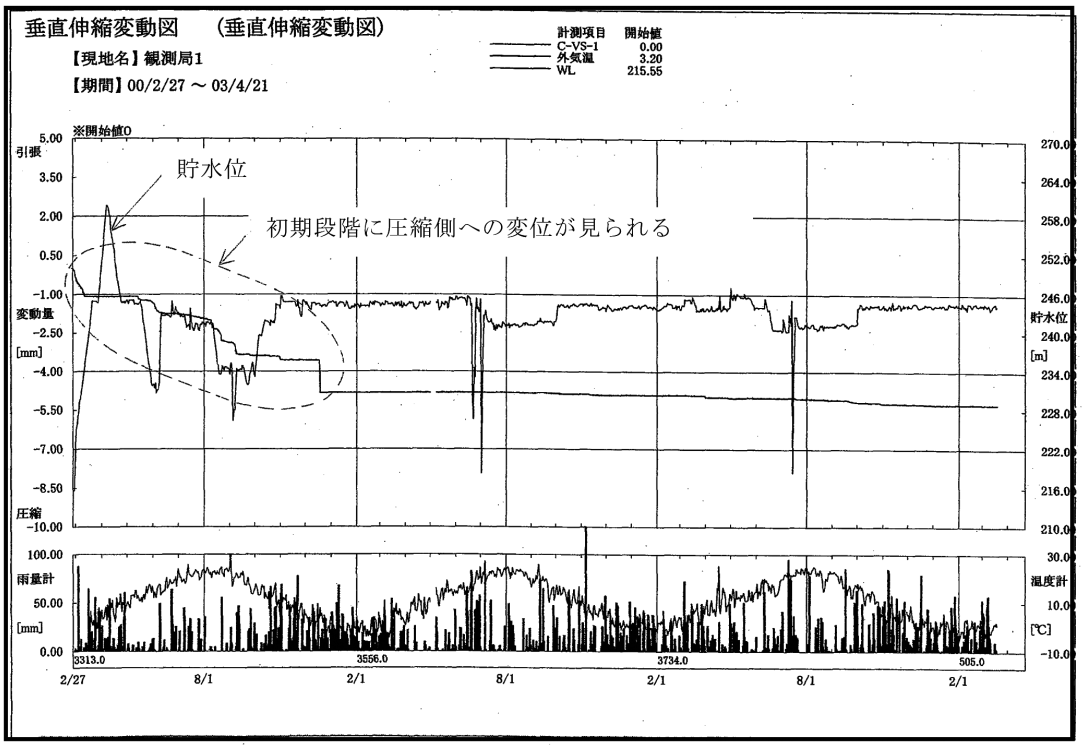
また、各年度の4月下旬～12月中旬にかけて、計測値に細かな変動が認められるが、この期間は貯水池斜面監視区域を通過している黒部峡谷鉄道の運行期間と一致している。一日単位での変動形態からも鉄道運行時間（7:00～18:00）に変動が多く計測される傾向が明らかであることから、鉄道運行時に軌道周辺に発生する電気ノイズが計測値に表れている可能性が高いと推察される（図―11）。

(6) 落雷によるシフト変動

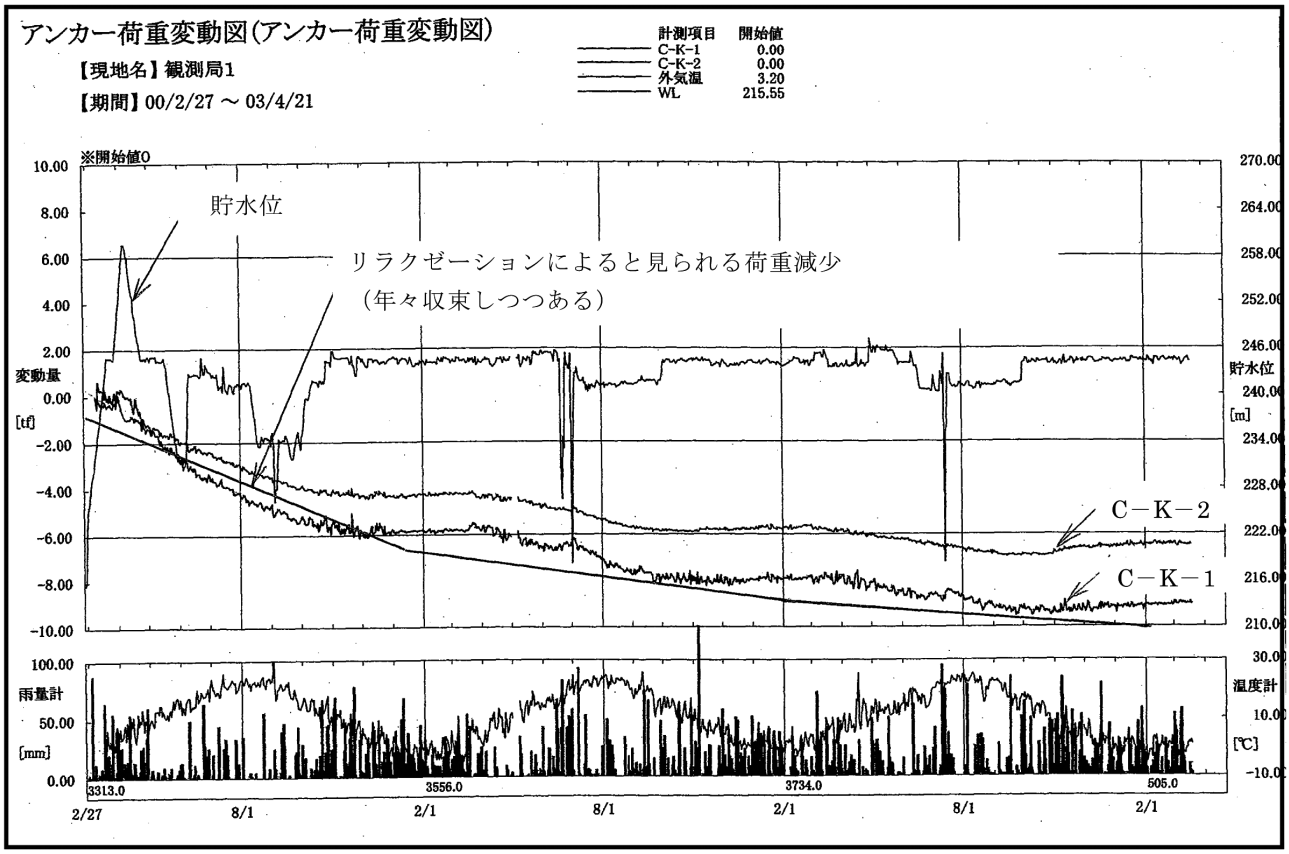
これまでに紹介してきた外的要因とは別に計測データに突発的な変動（シフト変動）を生じる要因として、落雷、あるいは人為的操作による電気ノイズが挙げられる。図ー12は、落雷発生記録から落雷によると判断されたシフト変動を示したものである。



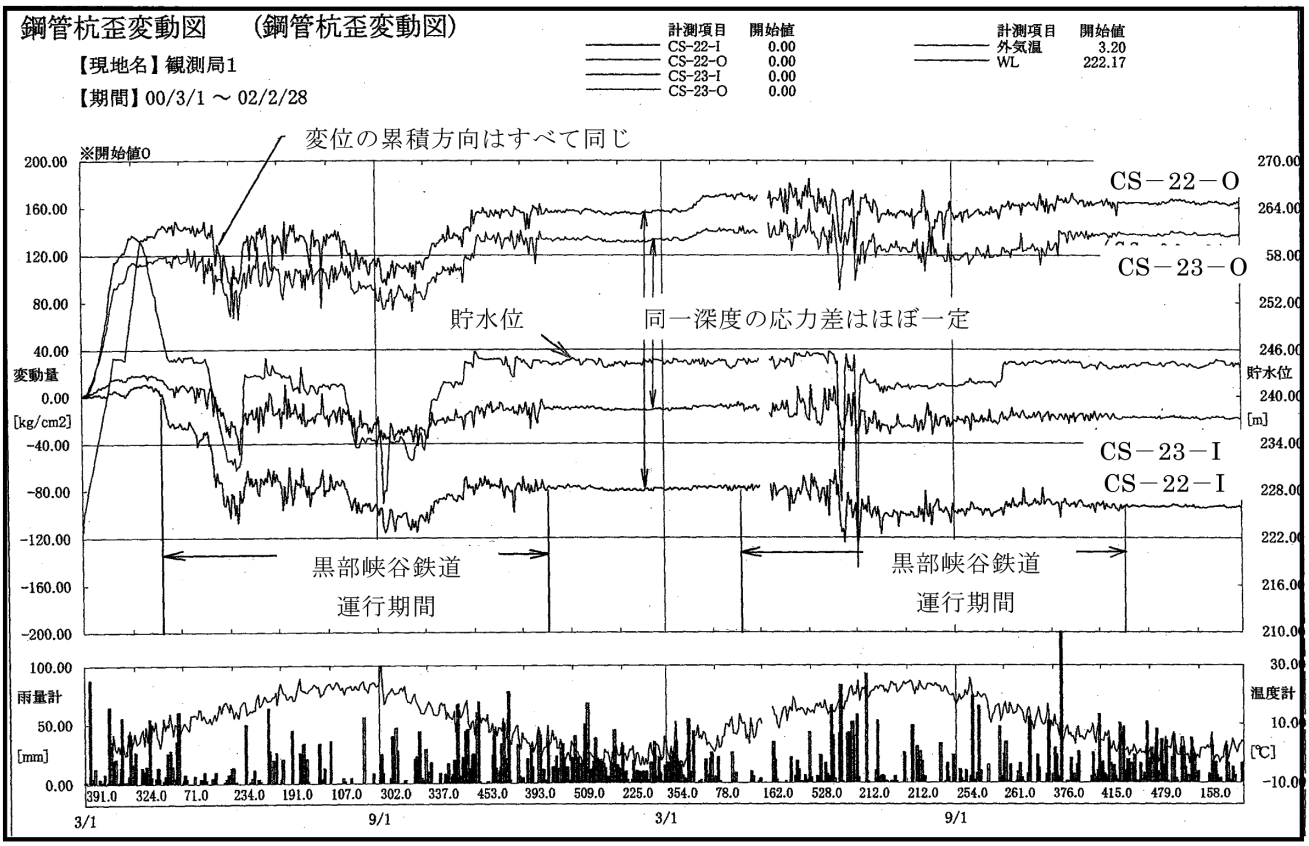
図ー7　貯水位変動と連動した孔内傾斜計の変動事例（E地区）



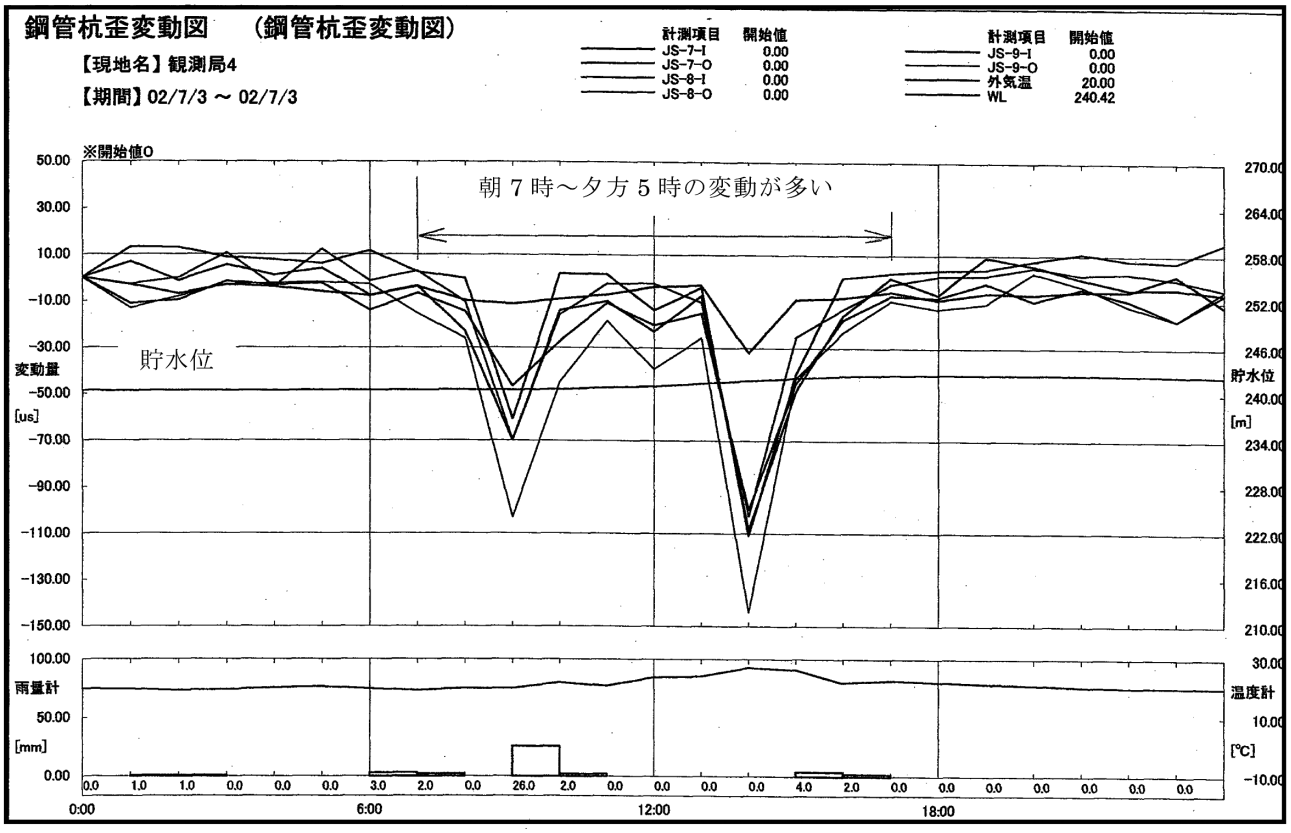
図ー8　垂直伸縮計の圧縮変動事例（C地区）



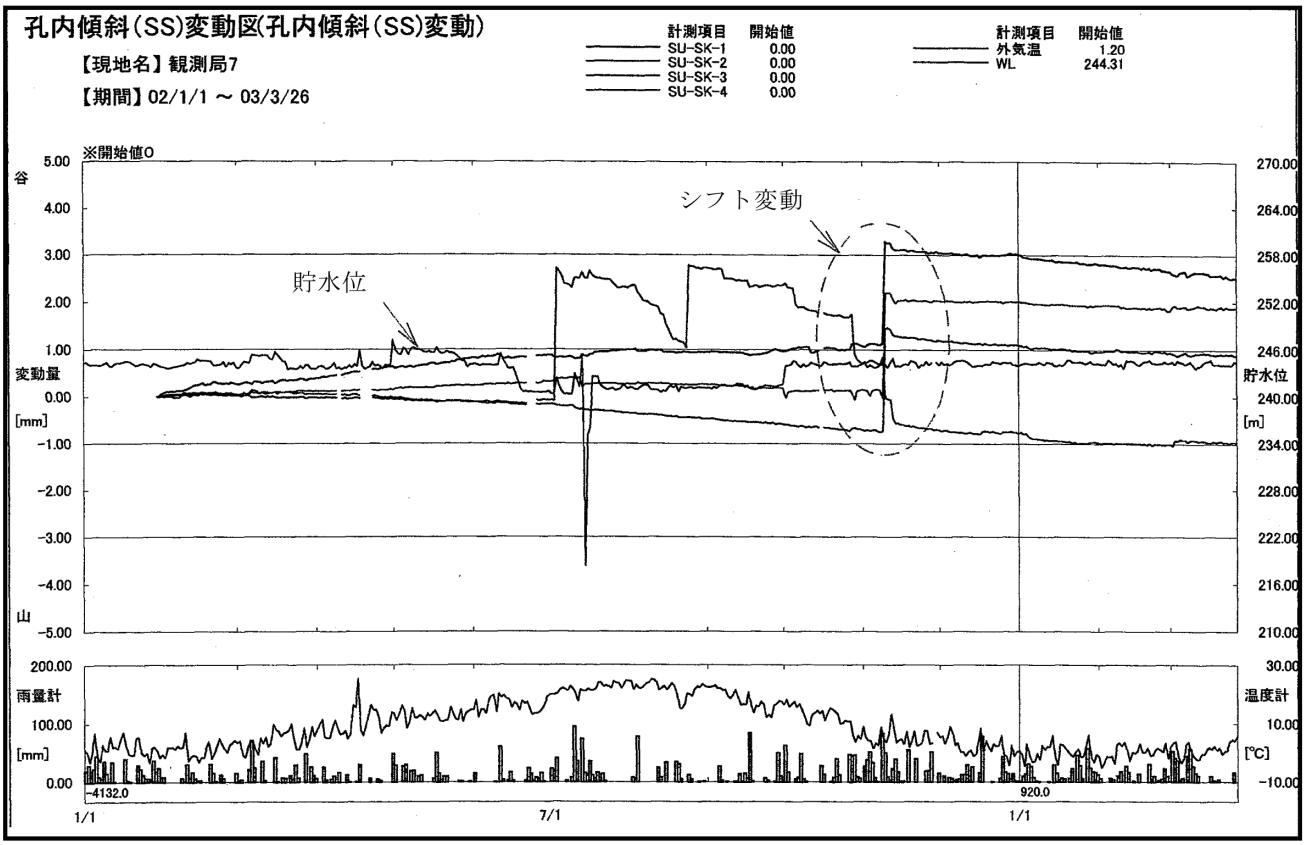
図－9　アンカー荷重計の変動事例（C地区）



図－10　鋼管杭歪計変動事例（C地区）



図－11　電気ノイズによるとみられる鋼管杭歪計の変動事例（J地区）



図－12　落雷によるとみられる孔内傾斜計のシフト変動の事例（SD・SU地区）

6. 運用管理段階に向けての対応方針

計測結果を踏まえ、今後の運用管理段階における実用的な管理基準値および管理体制を検討した。その際、試験湛水終了時点で斜面の安定性が確認されたことを前提として、以下の目的で検討した。

① 計測結果を踏まえ、現行の管理基準値の問題点を明確にする。
② 管理基準対象とする計器を選定する。
③ 運用段階に向けた管理基準値を設定する。
④ 運用段階における監視体制を構築する。

①については、これまで述べてきたとおりである。また、③・④については、②の検討結果を基に設定・構築する必要がある。

次の7章以降では、②の管理基準対象とする計器を選定するにあたり、外的要因による影響度を評価するために統計的手法を試みた。その結果について報告する。

7. 重回帰分析による変動要因分析

外的要因が計測値に及ぼす影響を明らかにして、いわゆる“データのぶれ”を考慮した基準を設定することによって、実際の斜面変動の有無やその大きさを正確に把握することが可能となり、効率的かつ実用的な斜面管理を行うことができる。そのためには、各センサーがどの外的要因にどの程度影響を受けているかを統計的手法によって明らかとすることが有効と考えられる。そこで、計測値と、これに影響を及ぼすと考えられる複数の因子との関係について重回帰分析を実施した。

分析対象とする計測データは、試験湛水開始後の平成12年3月16日から平成15年6月30日までの3年4ヶ月間のものとし、斜面変動を示す計測データ（目的変数）は地盤傾斜計、アンカー荷重計、鋼管杭歪計、孔内傾斜計など、計43基234センサーである。

斜面計測値に影響を及ぼす外的要因の項目（説明変数）としては、宇奈月ダムにおけるこれまでの計測結果などから以下の4項目を抽出した。

① 外気温
② 貯水位
③ 時間降水量
④ 地下水位（地下水位計の存在する斜面）

重回帰分析による理論値と外的要因（説明変数）との関係は、（7.1）式で示される。

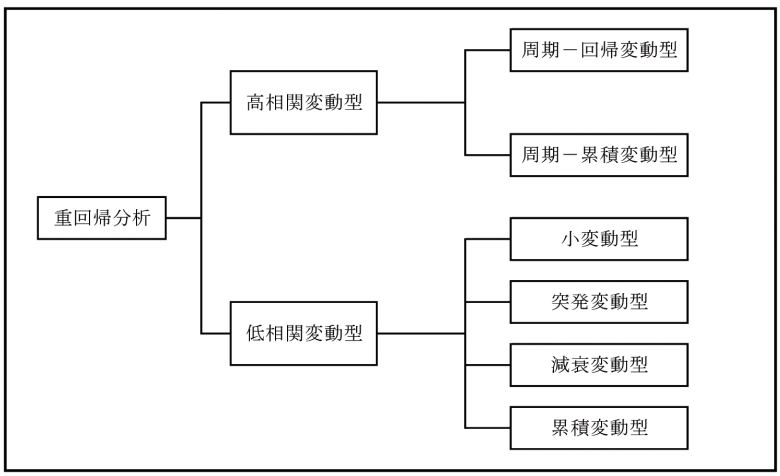
$$X = a0 + a1x1 + a2x2 + a3x3 + a4x4 \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7.1)$$

X　：理論値
a0　：定数
a1　：外気温の係数
x1　：外気温の実測値
a2　：貯水位の係数
x2　：貯水位の実測値
a3　：降水量の係数
x3　：降水量の実測値
a4　：地下水位の係数
x4　：地下水位の実測値

（※同一ブロック内に地下水位計が複数存在する場合は、その計器数だけ右辺の項が増える。）

重回帰分析の結果から、変位や圧力といった計測値の変動形態はおおむね図－13ような6種類のモデルに分類される。

計測値の変動形態が外的要因の変動形態と高い相関を有するものは「高相関変動型」に分類されるが、特に地表部に設置された地盤傾斜計の計測値に対して、外気温が大きな変動要因となっている事例が多い。また、ダムの常時満水位より下位標高となる地中に設置されている孔内傾斜計や鋼管杭歪計の計測値に対しては、貯水位が大きな変動要



図－13　変動形態の分類図

因となっている事例が多い。
それぞれの変動形態モデルの特徴と、今後の斜面管理への適用性は以下の通りである。

(1) 高相関変動型

計測値の経年的な累積の有無から、さらに1)「周期－回帰型」と2)「周期－累積型」の2つの型に分類できる。

1) 「周期－回帰型」(図－14,15、表－4,5)

通常の時系列グラフ上で周期的かつ回帰性の変動を示すものである。

表－4は、外気温と相関性の高い変動を示す地盤傾斜計の例である。

重相関分析では、外気温の相関係数が0.9369と非常に高い値を示し、他の外的要因に比して変動に対し、高い影響を与えていることが分かる。表－5は、貯水位と相関性が高い変動を示す鋼管杭歪計の例である。排砂時の貯水位の急変動に連動した変動を示す計器群がこれに相当する。ここでは、外気温も0.5346とやや高い値を示しており、貯水位が定水位時の周期変動を示すものと推測される。

重回帰分析グラフ（散布図）では、計算結果がグラフ上で特定の範囲に集中する結果となる。このタイプのものは、理論値と計測値の照合（残差解析）により、理論値とのズレ度合いに基づく変動量管理を行うことが可能である。

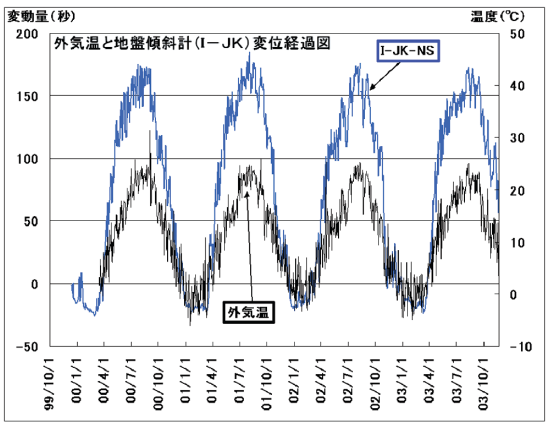
表－4 地盤傾斜計（I－JK－NS）の計測値に対する外的要因の相関係数（地下水位計無し）

	外気温	貯水位	降水量
相関係数	0.9369	0.4326	0.0564

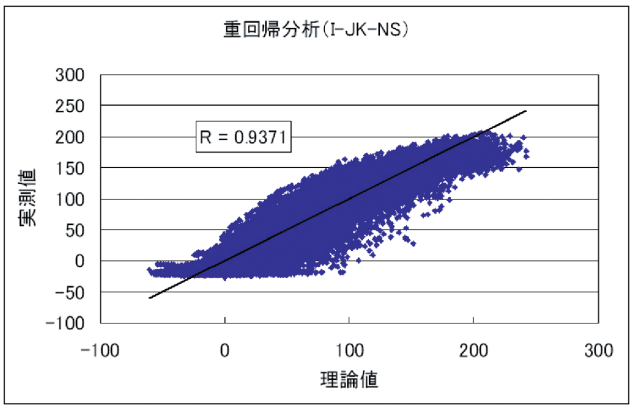
表－5 鋼管杭歪計（CS－8－1）の計測値に対する外的要因の相関係数

	外気温	貯水位	降水量	地下水位計 C-W-1※	地下水位計 C-W-2
相関係数	0.5346	0.7009	0.0564	0.7213	0.5857

※）貯水位にほぼ連動した地下水位となっているため、相関係数が高くなっている。

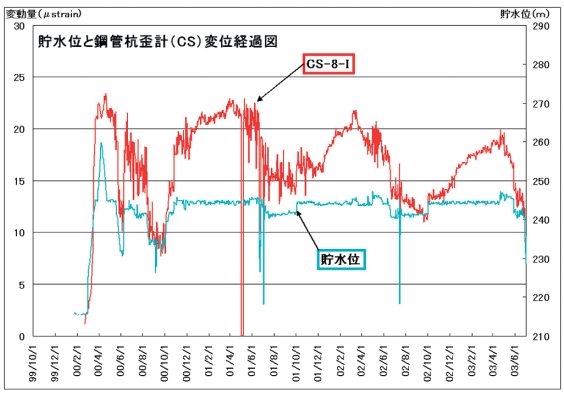


変動グラフ

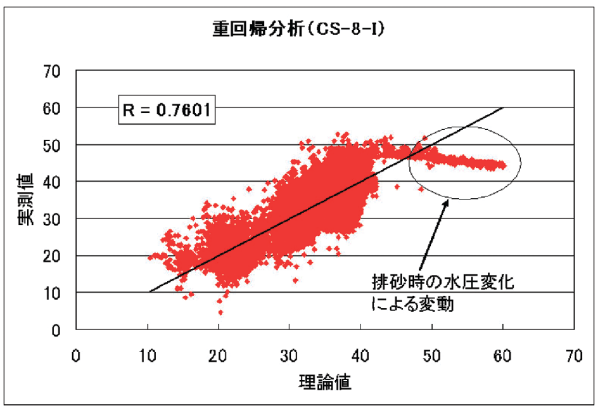


重回帰分析結果グラフ

図－14 高相関・周期－回帰変動型の事例（地盤傾斜計 IJK－NS；外気温と高相関を示す）



変動グラフ



重回帰分析結果グラフ

図－15 高相関・周期－回帰変動型の事例（鋼管杭歪計 CS－8－I；貯水位と高相関を示す）

2）「周期ー累積型」（図ー16, 17）

時系列グラフ上で周期的変動を呈しつつ、一定方向へ累積する変動を示すものである。重回帰分析グラフでは、年次単位などの比較的短期間でみれば、計測値と外的要因との相関性が比較的高いが、解析期間が長くなるに従い、計算結果の分布範囲がグラフ上で徐々にずれる結果となる。このため、解析時点における全データから設定した重回帰式を、そのままその後の変動に当てはめることは困難である。ただし、変動（累積）パターンの傾向が一定、すなわち複数年における平均変動速度が同じであれば特定のデータ区間単位での計測値の分布範囲を予測することは可能であることから、「変動パターンの変化」に着目した速度管理を行うことが可能と考えられる。

（2） 低相関変動

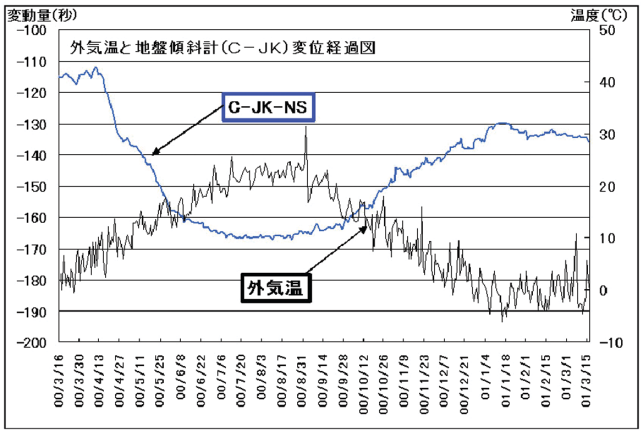
いずれの外的要因とも相関性が低い、すなわち計測値が外的要因の影響をあまり受けていないものである。変動パターンの違いから、1）「小変動型」、2）「突発変動型」、3）「減衰変動型」、および4）「累積変動型」の4つに分類される。

1） 「小変動型」（図ー18）

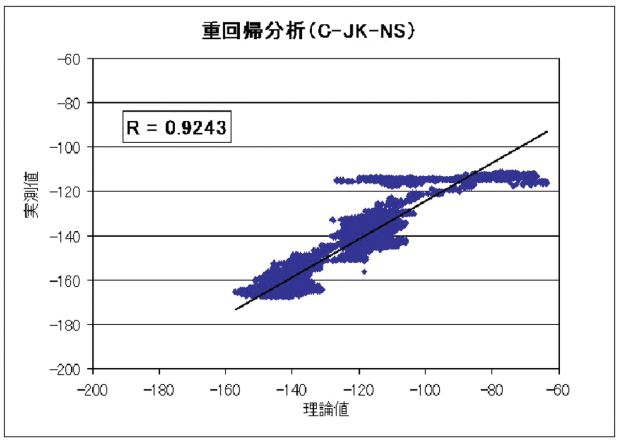
年間を通じて計測値にほとんど変動が見られない、すなわち変動量の絶対値が微小であるため、重相関係数が低く評価されるものである。このタイプのものは計測値が斜面の定常的な挙動を示すと言えるが、これらは変動値の幅（上限・下限）をこれまでの実績から予測することが可能であるため、重相関係数が低くとも、後述する斜面管理への適用が可能であると考えられる。

2） 「突発変動型」（図ー19）

突発的、シフト的に変動するもので、雷や雪崩など自然現

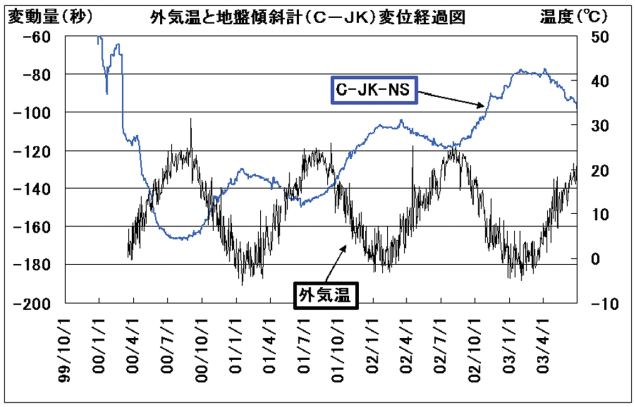


変動グラフ

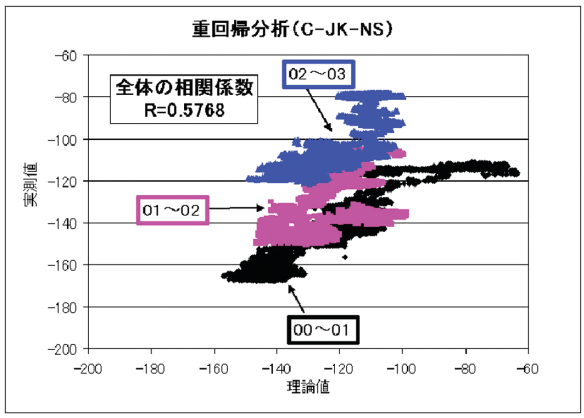


重回帰分析結果グラフ

図ー16　高相関・周期ー累積変動型の事例（単年度データ：00/03/16～01/03/16）
（地盤傾斜計　C－JK－NS；単年度では外気温と高い相関を示す）



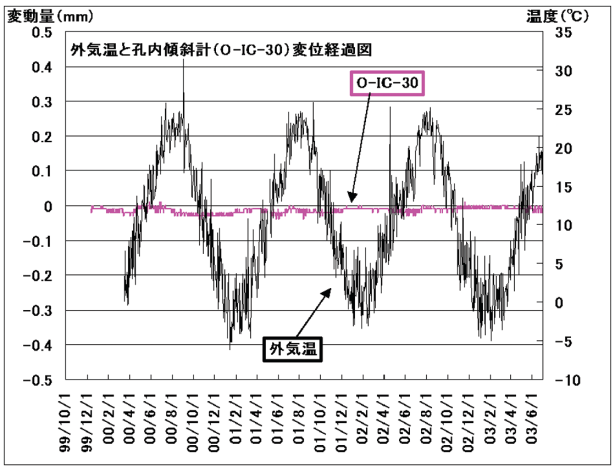
変動グラフ



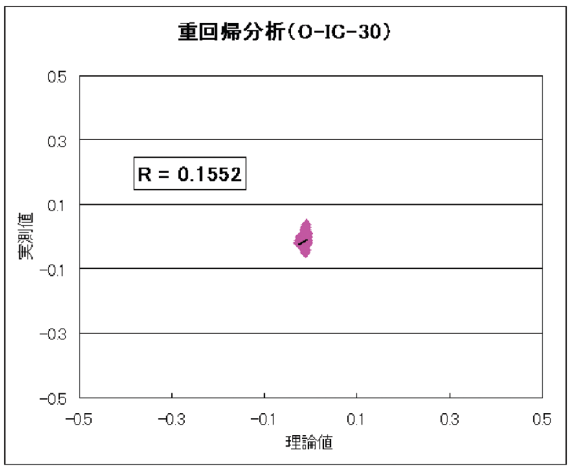
重回帰分析結果グラフ

図ー17　高相関・周期ー累積変動型の事例（図ー16にその後2年分のデータを追加）

※全期間データを対象とした場合は、相関が低い結果となる。ただし、データのズレは後述する回帰式のＹ切片のズレに相当し、その分布勾配は前年度とほぼ同様であることから、変動速度に変化は認められない（累積傾向が急激に変化する兆候には無い）。

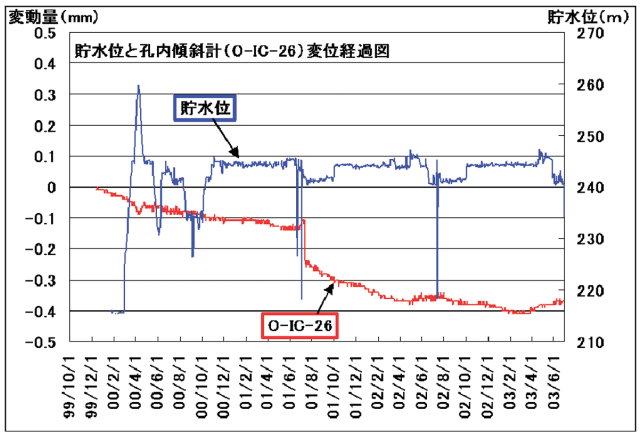


変動グラフ

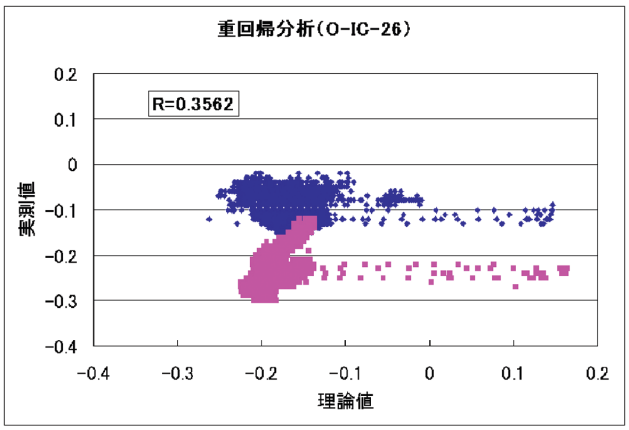


重回帰分析結果グラフ

図―18　低相関・小変動型の事例（孔内傾斜計；O―IC―30）
（ほとんど変動を示さないため、いずれの外的要因との相関も見られない）



変動グラフ



重回帰分析結果グラフ

図―19　低相関・突発変動型の事例（孔内傾斜計；O―ＩC―26）
（01/07/16にデータがシフトしている）

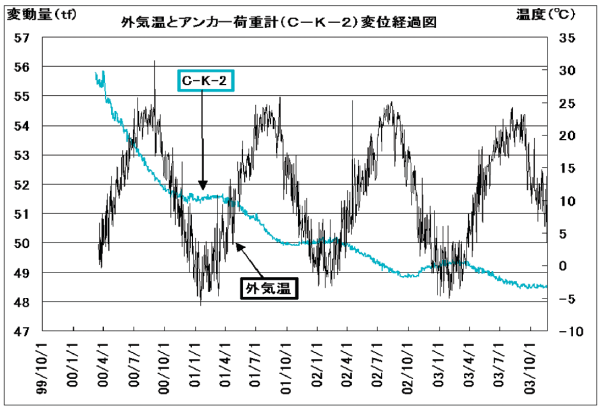
象に起因するものや、貯水池右岸沿いを走る黒部峡谷鉄道による電気ノイズや工事、計器の調整などの人為的な要因により生ずるものなどが考えられる。このタイプのものはシフトの前後でデータの累積性などに変化はみられないことから、変動要因が確認されていれば、データを補正（シフトデータのオフセット）することで、前述の高相関型あるいは低相関型の「小変動型」になるものが多い。したがって、後述する斜面管理への適用が可能であると考えられる。

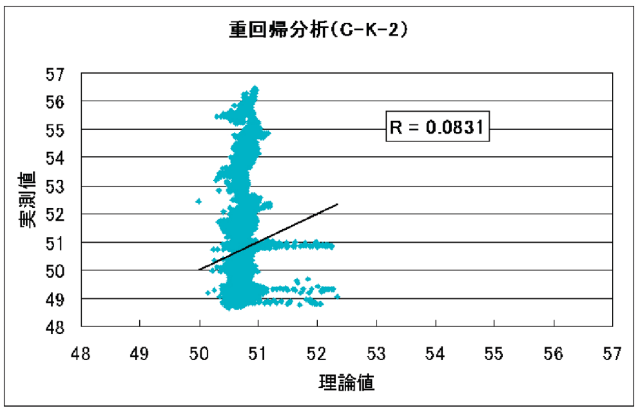
3）「減衰変動型」（図―20）

観測期間において変動量の速度が減少するもので、宇奈月ダムではアンカー荷重計の計測結果に顕著にみられ、アンカー鋼材のリラクゼーションが表れているものと判断される。このタイプのものは、既往の計測データから、変動が収束したと判断される時点をあらためて初期値として解析を行えば、前述の「高相関・周期－回帰型」ないしは「小変動型」に区分される変動形態となるため、今後の斜面管理への適用が可能であると考えられる。なお、減衰変動の収束時点を判断する手法については、「9.（3）減衰変動型変動の収束判断手法」に記す。

4）「累積変動型」（図―21）

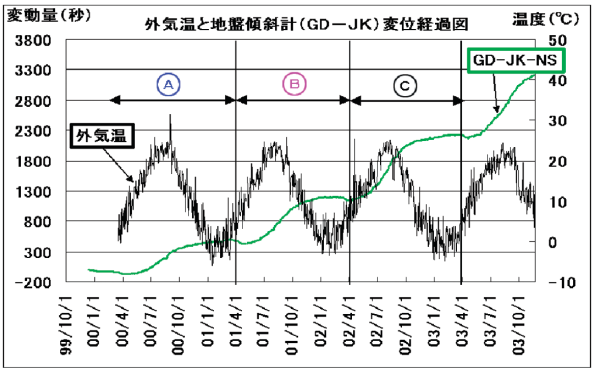
ある方向への変動量の累積が認められるもので、累積傾向には、ほぼ一様であるものと、断続的、あるいは周期的に増加するものが見られる。このうち、累積傾向がほぼ一様で等速度なものについては、「高相関型変動」の2）「周期－累積変動型」と同様にパターン変化に着目した速度管理が可能と考えられる。

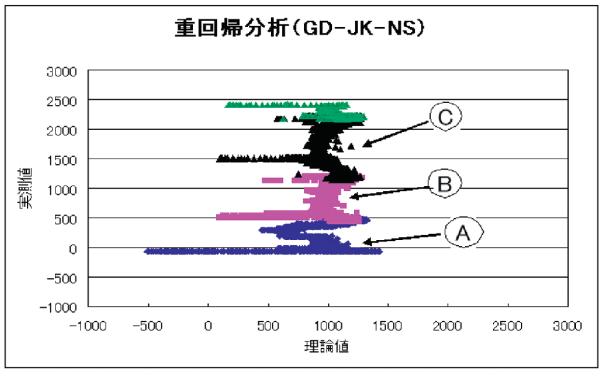




変動グラフ　　重回帰分析結果グラフ

図－20　低相関・減衰変動型の事例（アンカー荷重計；C－K－2）





変動グラフ　　重回帰分析結果グラフ

図－21　低相関・累積変動型の事例（地盤傾斜計；GD－JK－NS）

8. 分析結果の検証

重回帰分析の手法を今後の計測管理に適用するためには、実測期間の計測結果から、地盤変動以外の要因を削除したデータをベースとして、予測性に妥当性があるかどうかを検証する必要がある。そこで、前述の重回帰分析モデルを用いて、その後の期間（平成15年7月1日～平成16年1月31日）を検証期間として解析を行った。具体的には、実測期間の重回帰分析モデル（散布図上でのデータの分布範囲）から予測範囲を設定し、検証期間中の重回帰分析結果がこの予測範囲内に収まるか否かで検証した（図－22）。

検証の結果は、大別すれば図－23に示す通りとなる。検証事例①では、検証期間のデータが予測分布範囲内に収まっており、重回帰分析モデルがその後の変動範囲の予測が可能であることを示している。

一方、検証事例②では、検証期間データの一部が予測範囲外に有り、重回帰分析モデルが、その後の変動範囲の予測が困難であることを示している。

以上の解析結果から、貯水池内計器は、図－24および表－6に示すように分類できる。

タイプA：重相関が高く、重回帰分析による変動予測が可能なもの。

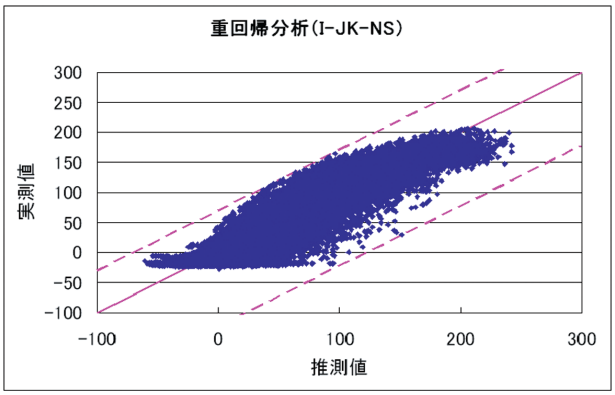
タイプB：重相関が低いが、重回帰分析による変動予測が可能なもの。

タイプC：年次単位の重相関は高いが、重回帰分析による変動予測が困難あるいは不可能なもの（高相関・周期－累積変動型に相当するもの）

タイプD：重相関が低く、重回帰分析による変動予測が困難あるいは不可能なもの（低相関・累積変動型に相当するもの）。

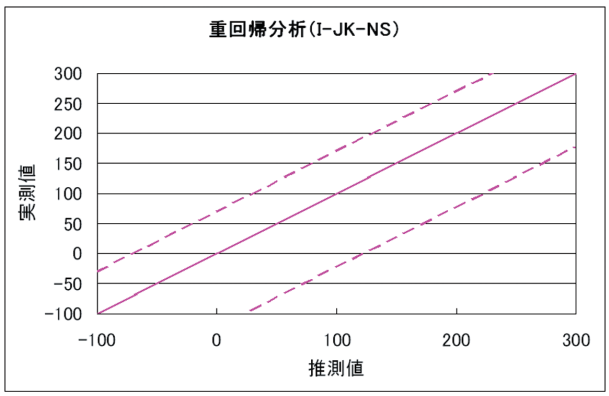
表－6　宇奈月ダム貯水池周辺斜面における計器の分類

タイプ	該当計器数	構成比率	重回帰分析による変動予測
A	45	201 基/234 基（86%）	変動予測可能
B	156		
C	1	33 基/234 基（14%）	変動予測困難 or 不可能
D	32		



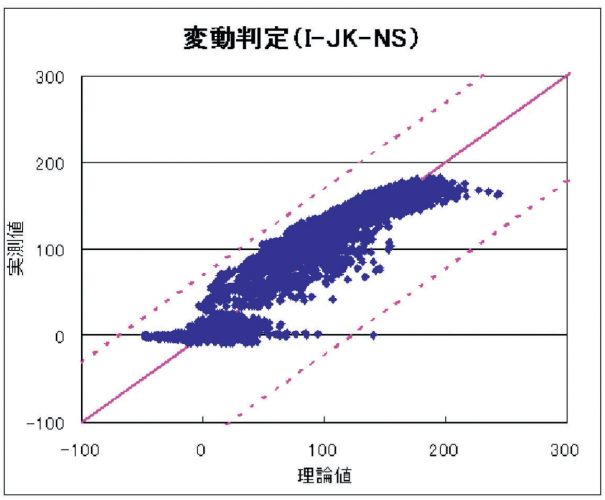
検証過程その1

実測期間の計測データに基づいて重回帰分析を行い、実測値と理論値の分布範囲を設定する。



検証過程その2

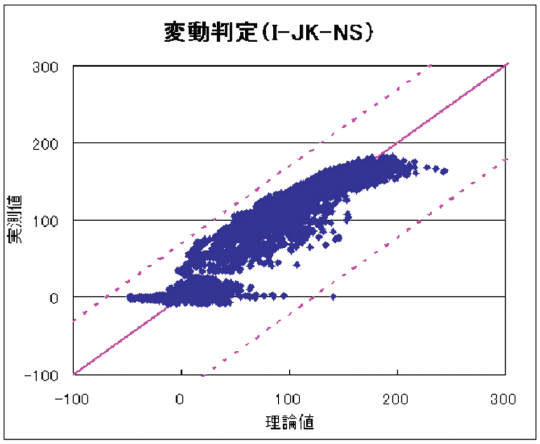
検証観測期間で予測されるデータの散布範囲（予測範囲）を設定する。



検証過程その3

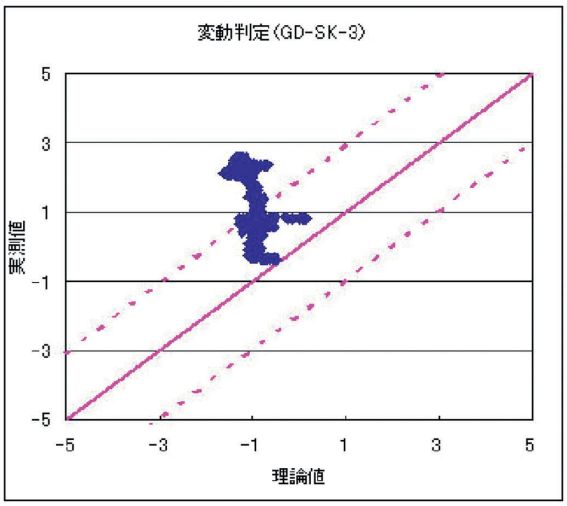
検証期間の計測データに基づいて重回帰分析を行い、その結果を検証過程②の散布図上に重ねる。

図－22　重回帰分析の流れ



検証事例①

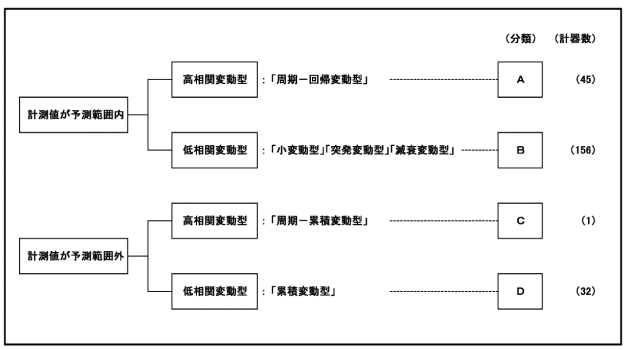
検証結果が予測範囲内に収まっている。



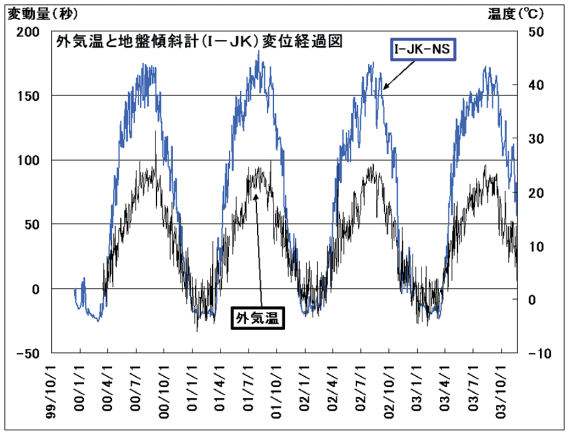
検証事例②

検証結果が予測範囲外にある。

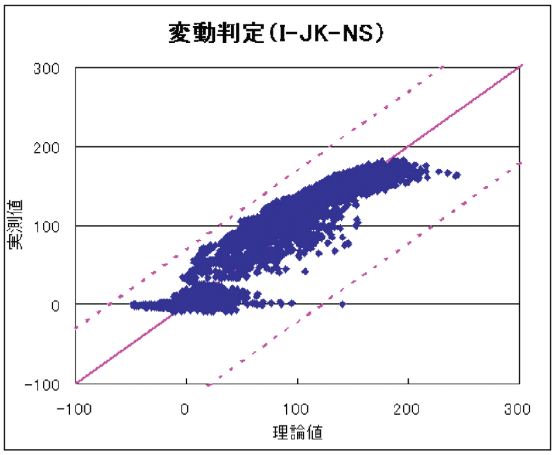
図－23　検証結果事例



図－24　重回帰分析の検証結果分類図

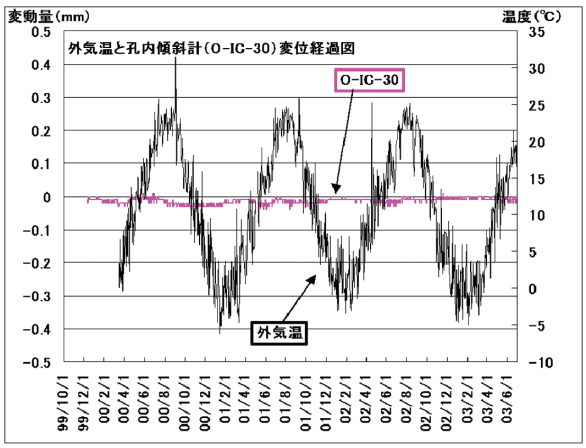


変動グラフ

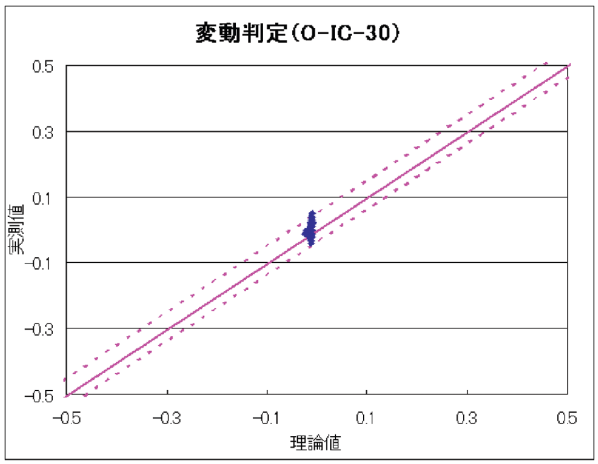


検証結果グラフ

（実測データが変動予測範囲内に収まっている）
図－25　タイプ「A」の検証事例（高相関変動型：周期一回帰変動型）

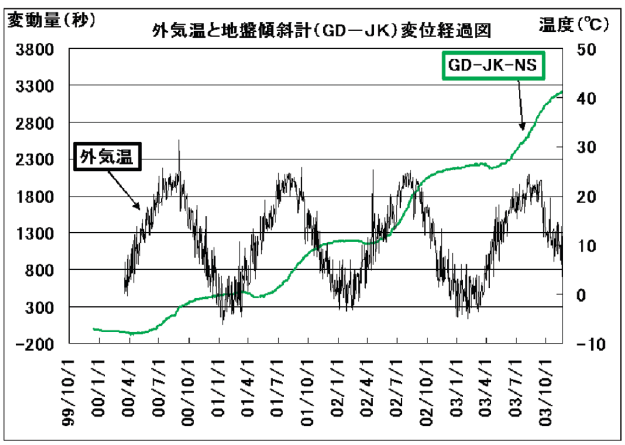


変動グラフ

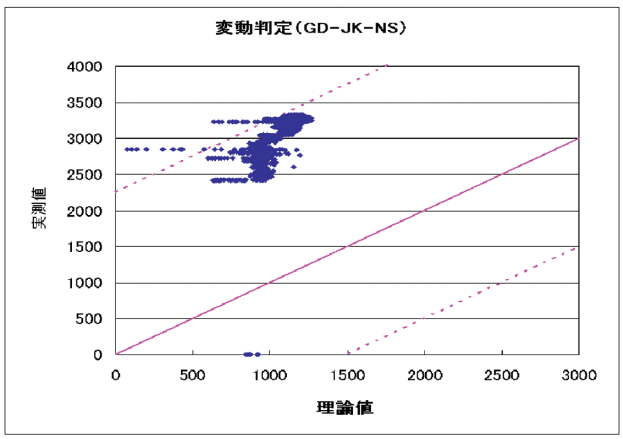


検証結果グラフ

（実測データの変動値が微小であり、変動予測範囲内に収まっている）
図－26　タイプ「B」の検証事例（低相関変動型：小変動型）



変動グラフ



検証結果グラフ

（経年の累積により検証データの一部が変動予測範囲外にある）
図－27　タイプ「C・D」の検証事例（累積変動型）

図ー23の検証事例①のように重回帰分析モデルでその後の変動を予測可能な計器は、表ー6のタイプA・Bに分類されるものであり、重回帰分析手法を斜面管理（変動量管理）へ適用することが可能であると考えられる。また、このような計器は、斜面の挙動が経年的に定常状態にあることを示していると考えられ、斜面としての安定性が改めて確認できたと判断される。

一方、検証事例②のように重回帰分析モデルでその後の変動を予測できない計器は、表ー6のタイプC・Dに分類される累積変動型のものであり、今回の重回帰分析をそのまま今後の斜面管理に適用することはできない。ただし、検証値が変動予測範囲から乖離したとしても、その傾きが実測期間と同様なものについては、これを考慮した斜面管理（速度管理）を行える可能性がある。

9. 管理手法の検討

重回帰分析モデルの検証結果によって分類された計器ごとの管理手法を以下のように確立した。

(1) タイプA・Bとなる計器について

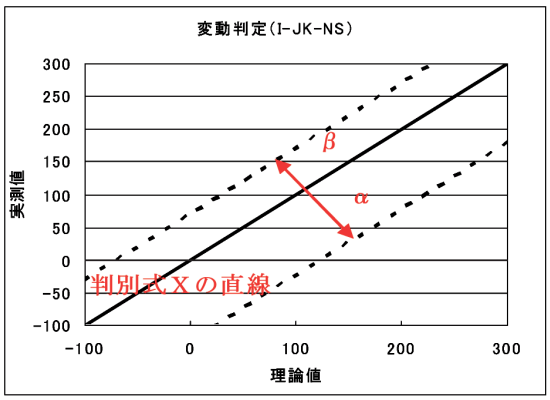
変動予測範囲の設定が可能な計器（分類A・B）については、説明変数による回帰式を用いた判別式モデルを導入し、いわば“変動許容範囲”からの実測値（Y）の逸脱を監視することによる斜面管理（変動量管理；deformation control）が可能となる。

・判別式：$X+\alpha \leqq Y \leqq X+\beta$ ..... （9.1）式

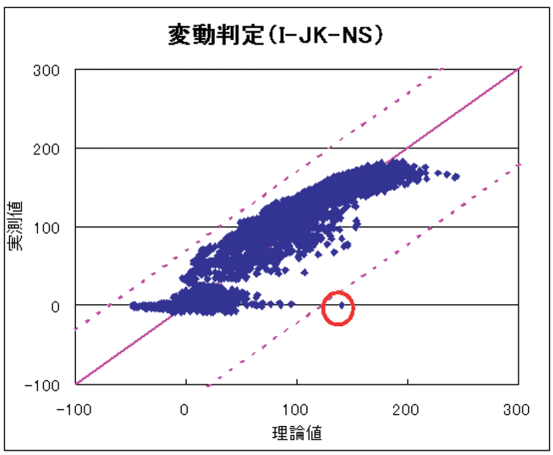
※$X=a0+a1x1+a2x2+a3x3+a4x4\cdots\cdots$ （7.1）式

X： 理論値
Y： 実測値
α ：変動範囲の下限を示す負の定数
β ：変動範囲の上限を示す正の定数
※ 同一ブロック内に地下水位計が複数存在する場合は、その計器数だけ右辺の項が増える。

変動量管理における変動許容範囲は式中に導入される α、β で規制され、その値は各々のセンサーに特有の数値となる（図ー28）。この管理手法を既存の自動観測システムへ適用するに当たっては、収集された各計器の実測値と各外的要因の計測値から上記判別式に基づく計算を行い、計器の実測値が変動許容範囲を逸脱した場合にこれを斜面管理者に速やかに伝達するシステムとすることが必要となる（図ー29）。この手法は、個別の計器ごとに異なる定常状態における変動幅がすでに考慮されているため、これまでの



図ー28　判別式モデル図



図ー29　変動判定例

図中の赤丸の点が、変動範囲を逸脱しており、これを「変動範囲超過」として判定する。それ以外の点は、変動範囲内にあるため、「変動無し」と判定する。

管理時に問題となってきた日周期変動などによる管理基準値超過は起こらない。

(2) タイプC・D（累積変動型）の計器について

変動予測範囲の設定を困難としている要因には、おおむね以下のものが考えられる。

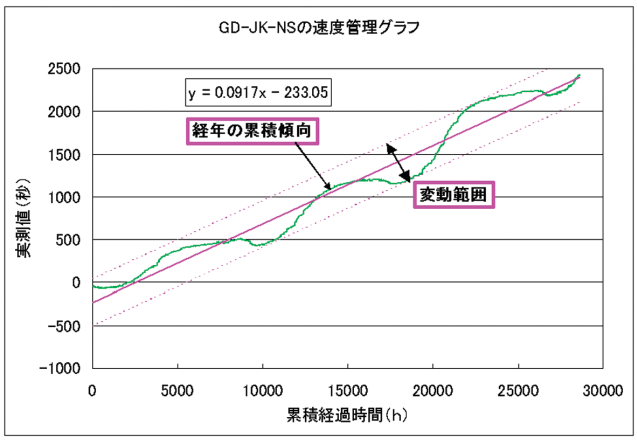
① 積雪など、自動計測以外の外的要因による変動値を計測しているもの。
② 人為的、周辺施設（黒部鉄道）のノイズを計測しているもの。
③ 変動要因は不明だが、恒常的な累積変動を計測しているもの。

これらのうち、①の要因については、計測箇所での積雪量や雪崩による衝撃はその年や事象ごとに予測が困難であり、現時点ではこれを考慮した変動予測範囲を設定することは困難と判断される。ただし、この要因による変動が生じる期間は冬期の積雪期に限られ、一般的には斜面の不安定化が生じにくい時期に当たること、事象の及ぶ範囲が局所的なもので

あることなどを考慮すれば、該当する計器を斜面の管理対象として扱う必要性は低い。②の周辺施設による電気ノイズなどについては、誘導電流などの計測を行い、この計測値を用いて再解析を実施することも考えられるが、実際の変動幅は斜面管理に支障が出るほどの大きさではないことから、そこまで実施する必要性は低いと判断される。

一方、③の恒常的な累積傾向を示す計器については、これまでの計測実績よりその累積傾向がほぼ一定であり、「加速度的」な急激な変動量の増加傾向が見られていないことが分かっている。したがって図―30に示すように、時間当たりの変動量を変動係数とし、実績値の最大・最小の幅を定数（切片）として将来的な変動範囲を設定し、この変動範囲を管理基準として用いる手法（速度管理；velocity control）を適用することが考えられる。

これは計測値の変動要因として、いわゆる斜面のクリープ的な挙動が含まれることを想定したものであり、長期的な監視を行い、斜面変動が急速に進行する（「クリープ的挙動」→「すべり変動」）場合の前兆現象を把握する意味での変動パターン（速度）の変化を捉えることに主眼をおいた管理手法である。

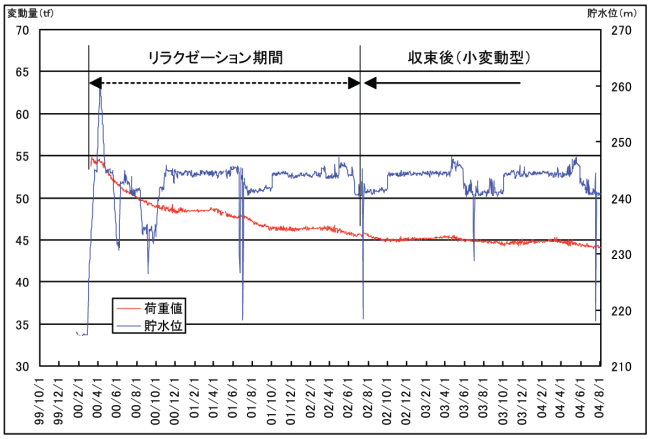


図―30　変動グラフを用いて変動範囲（速度管理）を設定する例

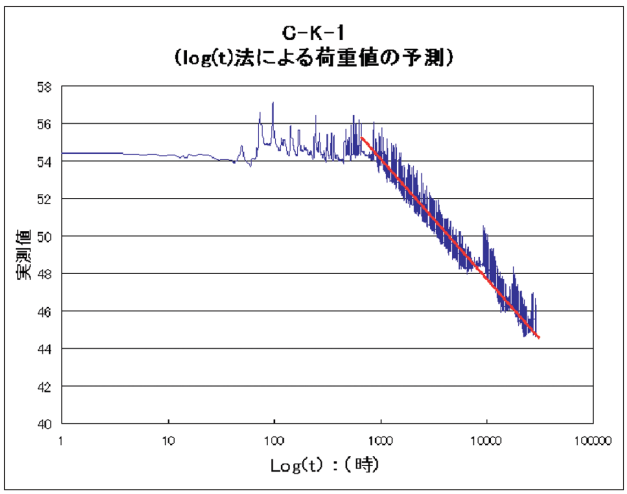
(3) 減衰変動型の計器の変動収束予測

「減衰変動型」を示す計器の内、宇奈月ダム貯水池のアンカー荷重計群は、鋼材のリラクゼーションによると考えられる。この荷重低下パターンについて、変動収束時を初期条件とした解析を行えば、「小変動型」としての変動区分となり、重回帰分析結果を用いた変動予測範囲の設定が可能になると考えられる（図―31）。この場合、変動収束時をどの時点とするかについての合理的な判断基準が求められる。

図―32にC地区のアンカー荷重計について、実測値と経過時間（t）の対数（Log（t））についてのグラフを模式例として示す。このグラフより実測値と経過時間（t）の対数



図―31　減衰変動型のグラフ（収束後は「小変動型」を呈する）



図―32　変動値（実測値）と経過時間Log(t)の関係図

（Log（t））との間には明瞭な逆比例関係が認められる事が分かる。

構造物の変位量と経過時間のLog（t）との間に比例関係の相関がある場合、これを用いて変位量を予測する手法、「Log（t）法」知られている。この手法は、軟弱地盤上の盛土や基礎杭を有さないボックスカルバートなどの施工段階における沈下管理手法として用いられる。宇奈月ダムのアンカー荷重計についても、同様の傾向がみられることから、この手法を応用することでリラクゼーションの収束判断を行なうことが可能と考えられる。

1） Log（t）法

・$S = \alpha + \beta \cdot \log(t/t_0)$

・$\beta = d\,S/d\log t'$

・$\log t' = \log t_1 - \log t_0$

ここで

St　：任意の時間tにおける沈下量（変動量）

α　：t_0における計測値

β　：係数

t_0 ：計測開始時間（時）
t_1 ：計測開始後の時間（時）
t ：任意の時間（変動量予測対象時間）

事例として、C地区のアンカー荷重計（C-K-1）について、計測開始から880時間後をt_0、20,000時間後をt_1とし、この時の計測値から28,874時間（約3年2ヶ月後；おおむね平成15年6月30日）の計測値（荷重値）をLog（t）法によって予測した結果を示す。

計測荷重値：　計測開始後t_0 =880時間、α =54.49（tf）
計測開始後t_1 =20,000時間、S= 45.51（tf）
任意の時間t =28,874時間

β =（45.51－54.49）/（log20,000－log 880）=－6.62
$S_{28,874}$ =54.49－6.62×log（28,874/880）
=44.45（tf） .....（予測値）

t = 28,874時間における実測値は$S_{28,874}$ = 44.86（tf）と、予測値44.45（tf）とほぼ等しい結果が得られていることから、対象計器についてはLog（t）法による変動値の予測が可能と判断される。この手法は、荷重管理が主目的であり、アンカー再緊張の時期の目安などに適用できると考えられる。

同様の計算を、貯水池内の各アンカー荷重計について実施した結果を**表－7**に示す。これによれば、GD地区のアンカー荷重計は外気温による周期変動は計測されているが、時間経過によるリラクゼーションは終了しており、アンカー荷重値としては一定の値に収束したものと考えられる。

したがって、アンカー荷重計については変動予測範囲を設定するためのデータ期間をリラクゼーション収束後からとして改めて設定し、これに基づく管理を行うこととする。

2） 双曲線法

前述のLog（t）法とならんで、軟弱地盤の沈下管理などでよく用いられる手法として「双曲線法」がある。この手法は、地盤の沈下量と経過時間の関係を基にして時間（t）を無限大（∞）にとったときの最終沈下量を予測する手法である。

ここでは、アンカー荷重計の荷重計測値を地盤沈下量として捉え、双曲線法を用いて荷重計測値Sの最終収束値の予測を試みた[3)]。

双曲線法とは、以下の式より沈下量S（ここでは荷重計測値）を推定するものである。

表－7　Log(t)法によるアンカー荷重計検討結果

計器名	t_0	t_1	α	β	S (実測値)	S (予測値)
C-K-1	880	20000	54.49	-6.62	44.86	44.45
C-K-2	1000	20000	54.82	-4.20	48.83	48.68
D-K-1	740	22000	34.17	-5.92	25.28	24.73
D-K-2	760	20000	34.21	-4.82	27.23	27.32
F'-K-1	2100	22000	17.16	-2.63	14.18	14.16
F'-K-2	2200	22000	23.68	-3.09	20.48	20.22
GD-K-1	800	8500	16.28	-2.31	14.63	12.68
GD-K-2	800	8500	26.69	-0.94	26.92	25.23
GU-K-1	1000	14000	25.02	-3.39	20.60	20.07
GU-K-2	1200	16000	28.70	-3.45	23.96	23.93

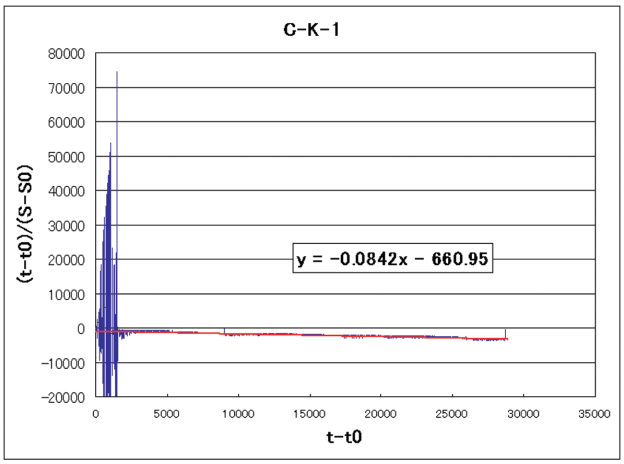
・$S=S_0+（t-t_0）/\alpha+\beta（t-t_0）=S_0+S_t$

この式において、t=∞とすると、定数αが消去され、結果として以下の式となり、最終沈下量S_fを求めることができる。

・$S_f=S_0+1/\beta$

係数βは、**図－33**のように（$t-t_0$）/Stと（$t-t_0$）の関係図の勾配として求めることができる。

双曲線法により各荷重計の最終収束値を予測し、その結果を**表－8**に示す。これによればGD地区の荷重計GD－K－1、2、GU地区の荷重計GU－K－1は、予測される最終収束値に達しており、リラクゼーションが終了したものと判断される。

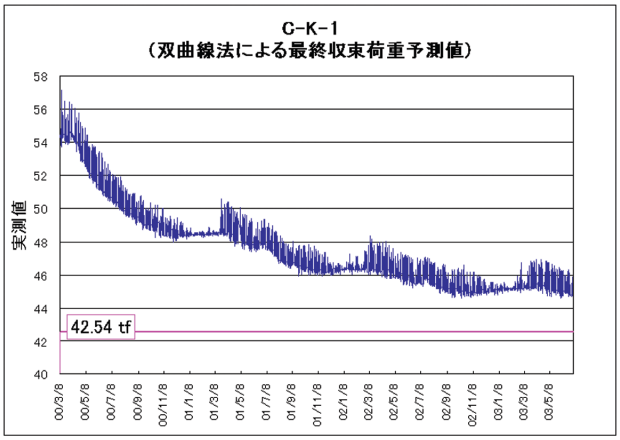


図－33　βを求める関係図（β＝－0.0842）

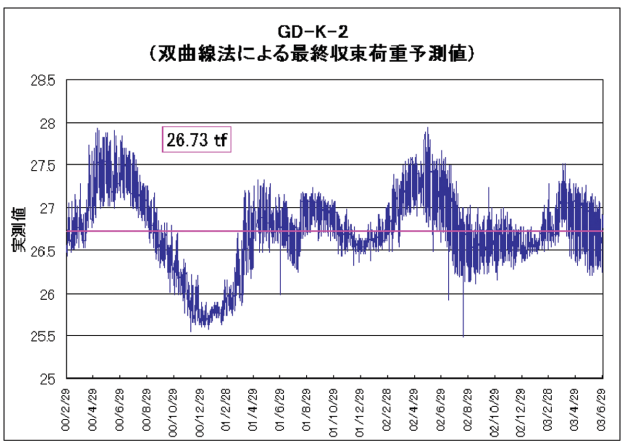
表－8　双曲線法による検討結果

計器名	β	Sf（最終収束予測値）	S（実測値）
C-K-1	-0.0842	42.54	44.86
C-K-2	-0.116	47.27	48.83
D-K-1	-0.0873	24.73	25.28
F'-K-1	-0.2416	13.16	14.18
F'-K-2	-0.3974	20.12	20.48
GD-K-1	-0.8868	15.04	14.63
GD-K-2	4.4807	26.73	26.92
GU-K-1	-0.2605	20.87	20.60
GU-K-2	-0.1319	20.84	23.96

※GD-K-1は、実測値が予測値を下回っているが、これは収束後の外気温などによる周期変動の影響と考えられる（図－35）



図－34　双曲線法による最終収束値と実測値の関係①
（最終収束値に達していないと判断される例）



図－35　双曲線法による最終収束値と実測値の関係②
（最終収束値に達し、周期変動に移行していると判断される例）

10. おわりに

宇奈月ダムの試験湛水時およびその後の斜面計測データについて、統計的処理として重回帰分析を行った。その結果、各計器における計測値と外的要因（外気温、貯水位、時間降水量、地下水位）との相関が明らかとなり、その相関から、貯水池周辺斜面に設置されている全計器の8割以上について、外的要因による計測値の変動幅を考慮した、新たな管理手法である変動量管理を適用することが可能と判断された。また、それ以外の計測値に累積傾向が認められる計器についても、変動速度がほぼ一定であれば、その変動形態に着目した管理手法の速度管理を適用することが可能と判断された。今後の宇奈月ダム法面監視は、この「変動量管理」と「速度管理」の2手法を組み合わせた斜面監視システムを運用することにより、実用的かつ効率的な貯水池周辺斜面の計測管理を実施していくことが可能である。この斜面監視システムの構築は、国内における貯水池周辺斜面管理の先駆けとして重要、かつ貴重な役割を担っていくものと考えられる。

このためにも、今後の継続監視において新たな事象や知見が得られた場合には、適宜監視システムの改善・適正化を図り、円滑な斜面管理が望まれる。

謝辞： 本分析を行うに当り、現国土交通省北陸地方整備局富山河川国道事務所の長谷川課長および独立行政法人土木研究所水工研究Gの永山グループ長、水工研究Gダム構造物チームの山口上席研究員には多大なるご指導・ご鞭撻をいただきました。この場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

1） 長谷川隆、小野愼吾、松本敏、細谷健介：宇奈月ダム貯水池周辺斜面における計測管理の問題点と今後の展望、ダム技術、No.202, pp.34-43, 2003

2） 長谷川隆、小野愼吾、松本敏、細谷健介：宇奈月ダム貯水池周辺斜面における計測管理の問題点と今後の展望（その2）、ダム技術、No.210, pp.63-74, 2004

3） 小野愼吾、松本敏、細谷健介：宇奈月ダム法面監視等業務委託報告書、日本工営、管理基準値編、2004