

2.4 ダム用 PS アンカーに関する研究

研究年度：令和元年度～

研究分野：ダムの改造・再開発に関する調査研究

調査研究名：アンカー緊張力に関する設定法と計測管理法に関する研究

研究者：川崎秀明、梅園拓磨

【要約】

ダム用 PS アンカーは、貯水位低下や大規模仮設の必要もなく既設のダム構造物を大緊張力をもって岩盤に緊結・固定することで安定性を大きく向上させ得ることから、今後ダム再生や補修・補強に大いに活用が期待される技術である。メカニズム上は、所定の緊張力を長期的に保持することが前提となる。

本研究では、PS アンカー緊張力の導入と緊張力の長期保持の方法について検討し、定着時緊張力が設計アンカー力に長期ロスを加えた値以上で、かつテンドンの許容引張力以下となるように設定することが最も有効な方法であると結論づけて、昨年発刊の「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」に反映させている。また、ダム用 PS アンカーに多い全長固着のフルボンドアンカー用に開発された緊張力監視装置を千本ダム現地に適用し、計測結果を分析することでその有効性を確認した。加えて、本研究では 3 次元プラムラインの変位計測値と比較して、緊張力が堤体変位と高い相関性を有することを確認した。

【キーワード】

PS アンカー、緊張力、定着、軸力計測、フルボンド

【背景・目的】

ダム用 PS アンカーとは、ダム堤体、基礎岩盤の安定性向上のために用いられる構造物固定用と基礎補強用の PS アンカーを指すものであり、供用期間において所要の緊張力を長期間保持することが前提となる。

ただし、従来の国内アンカーは、斜面用では待ち受けが多いため緊張力を抑えて設計アンカー力以下にすることが多く、建築用では再緊張が前提であるため経済性重視の緊張力を高くして設計アンカー力以上にすることが多い。両者の考え方が異なるが、「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル（2021 年 9 月発刊）」の検討委員会においては、最後まで修正を重ねて、従来の緊張力管理方法と整合させながら、設計アンカー力以上の緊張力の保持を長期において担保する方法を少し複雑ながら見出した。

一方、ダム用 PS アンカーは、防食やリスク管理に優れるという理由で全長固着のフルボンドタイプとすることが多いが、この場合、アンカー設置後の緊張力の計測が難しいという問題点がある。そこで、本設テンドン内にホース入りの PC 鋼より線を通し、アンカー頭部に軸力計を設置する軸力計測ストラ

ンドがダム技術センターによって開発され、川俣ダムと千本ダムの緊張力測定に採用されている（図-1）。現在まで故障も少なく安定的に計測が継続されているが、本稿では、堤体固定用に採用された千本ダム堤体 PS アンカーに取り付けられた軸力計測ストランドの計測値の分析結果を記す。また、千本ダムで後付け設置している 3 次元プラムラインの計測値と軸力計測値について比較した結果、緊張力が堤体変位と密接な関係にあり、緊張力でもって堤体の挙動管理が容易に行えることがうかがえる。



図-1 千本ダム PS アンカー（孔径 165mm）における 2 深度の軸力計測ストランドの設置状況

(1) ダム用 PS アンカーの緊張力の設定法

ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル p.57 においては、「定着時緊張力は、有効緊張力が経年的に適切な範囲にあるように設定し、施工時の導入緊張力の目安とするものとする。」としている。

これは、施工時の導入緊張力で有効緊張力（経年変化後の緊張力）は決まるが、定着時緊張力で緊張力を管理すれば、その後はばらつきが少ない長期ロスだけであるので、設計アンカー力以上の有効緊張力をより確実に保持できることを意味し、図-2 は、この緊張力管理の概念を図示したものである。

従来の緊張力導入の方法は、初期緊張力で荷重をセットするだけであるので、セットロス（ジャッキ除荷直後のウェッジめり込み等のロス）のばらつきのため、定着時緊張力が一定でなく設計アンカー力以上の緊張力を保持できないことも多かった。

図中の青線が通常のダム用 PS アンカーの場合であり、長期 T_{as} （長期目標荷重）を $0.60 T_{us}$ に設定し（ T_{us} ：テンドンの強度に相当）、緊張力の長期ロス率を定着時緊張力の 10% とすると、定着時緊張力は、 $0.60 T_{us}$ を $0.90 (=1.00 - 0.10)$ で除した $0.667 T_{us}$ 以上であり、かつ PS アンカーの強度（ $0.70 T_{us}$ ）以下で

あればよい。

なお、斜面安定用のグラウンドアンカーの場合は長期 T_{as} をテンドン強度に対してより低い緊張力にし、待ち受けるようにしている。一方、建築地盤アンカーのように再緊張によって荷重調整できる場合や、堅岩内のフルボンドタイプのように長期ロスが明らかに少ない場合は、長期 T_{as} を高めに設定してもよい。

定着時緊張力は、以下の手順で設定する。

- ① 長期引張試験によって定着時緊張力に対する長期ロス率を設定する。
- ② 長期ロスや将来の荷重増を考慮して PC 鋼より線の長期 P_a を設定する。特に考慮事項がなければ標準の $0.6 P_u$ に設定する。
- ③ 設計アンカー力/荷重状態別 P_a によって PC 鋼より線の本数を算定する（最大値を採用）。
- ④ PC 鋼より線の本数×長期 P_a によって長期 T_{as} を算定する（標準値は $0.6 T_{us}$ ）。
- ⑤ 長期 T_{as} を、 $(1.00 - \text{長期ロス率})$ で除して定着時緊張力を決定する。施工時はこの定着時緊張力を目安に緊張力を導入する。同時に強度上限値の $0.70 T_{us}$ 以下を確認する。

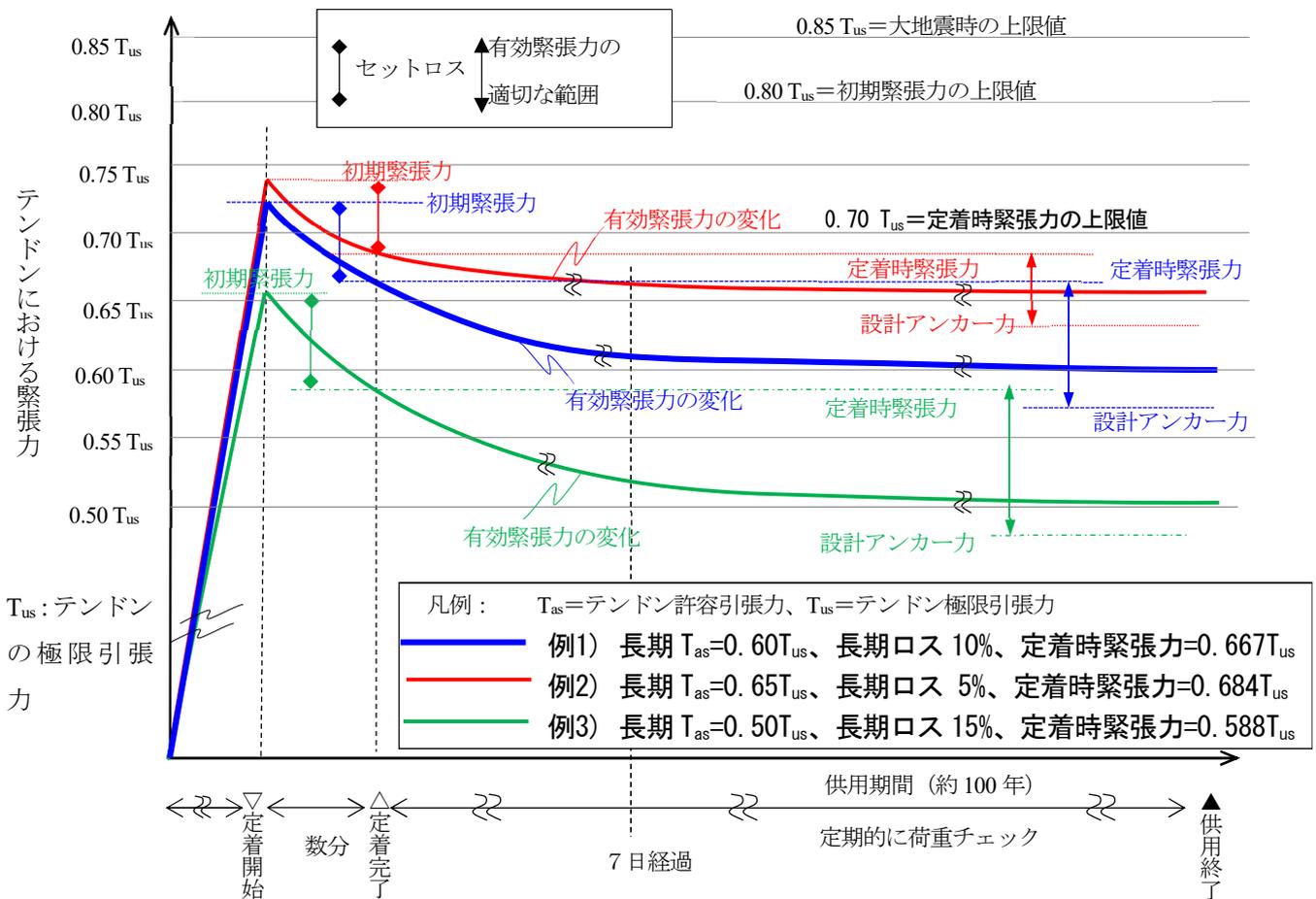


図-2 ダム用 PS アンカーにおける有効緊張力の経年的低下と許容範囲

(2) 緊張力計測の方法

ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル p.126 において、「有効緊張力の計測は、代表孔において継続し、PS アンカーの機能と安全性を長期的に監視するものとする。」としている。

これは、PS アンカーの機能を長期監視するために、緊張力の長期的な計測が必要であることを示している。長期的とはダム一般の供用期間である 100 年以上であり、これを満たすためには、長期耐用性に優れており、供用途中で交換が可能な計測機器の採用が必要である。

計測方法の種類を表-1 に示すが、アンボンドタイプの緊張力計測の実績は多くある。計測機器は、アンカー設置時に設置する必要があるが、基本的にアンカー頭部に軸力計測部（軸力計、荷重計、ロードセル等と呼ばれる）を搭載したものが主体となる。また、リフトオフ試験は、アンカー設置後の維持管理段階で緊張力確認のために用いられ、大容量の場合は簡易な試験方法も近年用いられている。

表-1 緊張力の計測方法の種類

ボンドタイプ	計測方法	注意点
アンボンドタイプ	軸力計：アンカー頭部に設置してテンドン荷重を計測する（最も直接的な方法）	荷重が大きい場合は軸力計も大きくなり空間と費用の面で非現実的となる。
	リフトオフ試験：テンドンごとジャッキで載荷してアンカー孔ごとの有効緊張力を測る	大容量の場合は足場が必要となる。テンドンを痛めやすいので何度も行えない。
	簡易リフトオフ試験：有効緊張力の計測（PC 鋼より線の数本を 1 本毎に測り平均）	可搬式器材の持込み可能で、計測する PC 鋼より線の偏りが無い場合に限られる。
フルボンドタイプ	軸力計測ストランド：テンドン内に自由長を持たせた PC 鋼より線（シースに収納）を入れて、アンカー頭部に設置の小型軸力計で計測する。	初期校正することで有効緊張力に換算できる。2～3 の深度区間別に緊張力を計測できる（2 深度で計測するタイプが主流）。
	光ファイバー：テンドン内に光ファイバーを入れて、アンカー頭部に設置の計測機で計測	光ファイバーは安価だが、データロガー等の計測器や情報処理費が高価となる。

緊張力計測を行うべき箇所数は、ダム用 PS アンカー設計施工マニュアルにおいて、全アンカー数の約 15% を目安にしているが、これは「ダムにおけるアンカー点検マニュアル（2017 年、国総研河川研究部）」に依っている。

アンカー全長をグラウトで固化するフルボンドタイプの場合、アンカー設置後の緊張力計測が困難であったが、近年 PC 鋼より線をテンドン断面内にシースに入れて自由長を確保することで緊張力計測を可能とした軸力計測ストランドが開発された（図-3）。ダム関係の実績として、川俣ダム岩盤 PS 工更新工事や千本ダム耐震補強工事がある。

また、テンドン内に光ファイバーを入れたものがあるが、最近では PC 鋼より線（ECF ストランド内）に光ファイバーを組み込んだタイプが開発され、施工時のセッティングを容易にしている（図-4）。ダム関係の実績としては、千本ダム耐震補強工事等がある。

軸力計測ストランド搭載の小型ロードセル
長期使用に優る振動弦式を採用

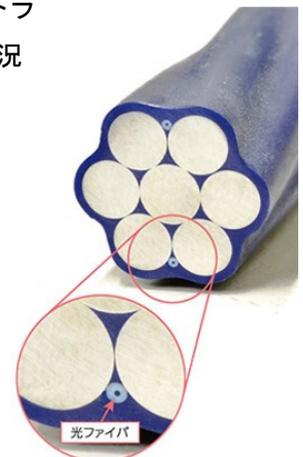


ロードセル、支圧版 2 個、ケーブルの状況

小型ジャッキによる頭部の緊張作業

図-3 軸力計測ストランド 150kN の設置状況

図-4 光ファイバー組込み式 ECF ストランド



(3) フルボンドアンカーの軸力計測上の留意点

フルボンドタイプの PS アンカーの緊張力計測用として開発された軸力計測ストランドだが、使用時は、以下の特徴に留意する必要がある。光ファイバー使用の場合もほぼ同様である。

① 軸力計測における荷重値調整

軸力計測の計測イメージを図-5 に示す。赤線はダム用 PS アンカーの緊張力の経時変化、青線は軸力計の緊張力の経時変化を表わす。軸力計の緊張力開始は若干遅れるため、両者には時間的なずれがある。このため、両者の荷重値調整(キャリブレーション)が必要となるが、これは両者の定着時緊張力を対比させることで可能である。

なお、ダム用 PS アンカーのテンドン緊張力の計測は、この荷重値調整時まで行うべきである。川俣ダムと千本ダムで採用されたような緊張力を連続的に自動計測できる緊張力管理制御システムを用いれば、上記の荷重値調整への対応は容易である。

② 軸力計測における上限管理値

ダム用 PS アンカー緊張力の上限値はテンドンの許容引張力となるが、軸力計測ストランドの上限管理値は初期緊張力値としてもよい。理由は、この値を超えたとしても、ダム用 PS アンカーの定着時緊張力以下であることによる。ただし、緊張力が上昇していることを示している場合は、注意体制の目安にするのが妥当である。

③ 軸力計設置と計測の手順

フルボンドアンカーにおける軸力計の設置と計測の手順は以下となる。

- a. ダム用 PS アンカーに緊張力を与えて安定化した後に軸力計を設置し載荷する。なお、軸力計載荷は、ダム用 PS アンカー定着が安定した後(グラウトの硬化する日数で一般に2日以上)において行う。
- b. 軸力計の緊張力が安定した後に再緊張して計測を開始し、この時の荷重値を初期値としてテンドン荷重との調整を行う。なお、軸力計は、極限引張力に十分な余裕をもった初期緊張力でセットし、セットロス、リラクゼーション等の初期ロスが抜けた後(一般に2日以上)において計測開始とする。

④ 軸力計測による早期の異常検知

軸力計は、テンドンの破断や岩盤内の荷重再配分などによる荷重変化を計測できる。このため、軸力計を用いて監視することにより、変位計測よりも早期に地盤や堤体内異常の発生を検知が可能になると考えられる。

また、複数深度で設置された場合、緊張力変化が堤敷より下位の岩盤内か堤体部であるか等の箇所の区別が容易となる等の長所がある。複数深度の場合の軸力値と変位値に変換して緊張力管理を行う方法については、ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル(p.174,175)に記している。

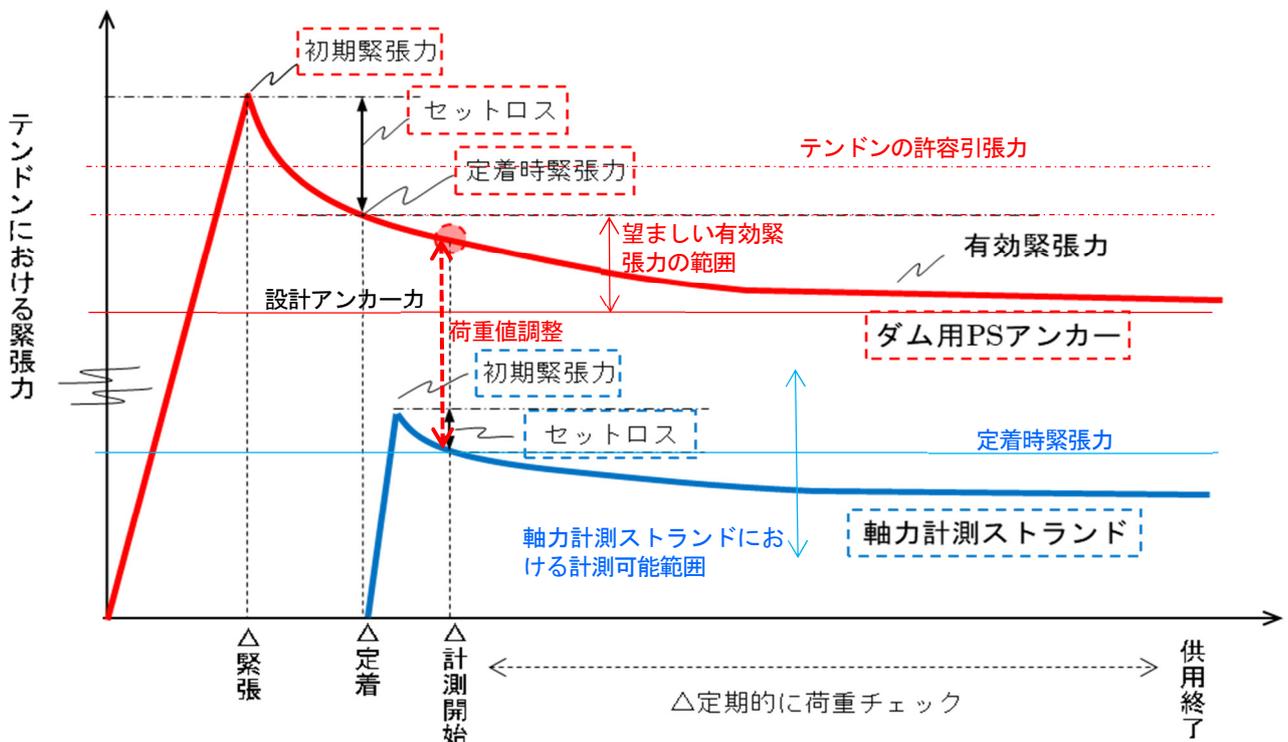


図-5 ダム用 PS アンカーと軸力計測ストランドの緊張力の経時変化図

(4) 千本ダム工事後の軸力計測の結果

千本ダムにおける軸力計測ストランドの設置位置は、図-6に示すように「A3, 12, 23, 25, 30, 34」の6孔で各2深度の計12台である。6孔は全アンカー数の約15%を目安にし、配置バランスを考慮して設置された。2深度は、全長用と堤高用であり、緊張力変化があった場合、堤敷より下位の岩盤内か堤体部であるかを区別できる。

図-7に堤体PSアンカー工事完成後2年間の計測値を示すが、一般的に冬期では、基礎岩盤や堤体は収縮側に挙動する。そのため、軸力計の値は外気温の影響により、夏期に向かって荷重増側(膨張側)に向かい、冬期には荷重減側(収縮側)に向かう。

また、貯水位の影響については、一般的に貯水位が高いと荷重増加(引張側)に向かい、貯水位が低いと荷重減少(圧縮側)に向かう傾向がある。

さらに、工事により貯水位を下げていることや、2019年は降水量が少ないことから、地下水位が例年よりも下がっていたことが考えられる。地下水位が例年どおりとなるまでは、岩盤内に定着した荷重計の計測データの値は増加することが考えられる。

なお、現状において、アンカーA3の軸力計器の内、岩盤内定着のLC12が夏場において2期連続で荷重が増加しているが、その後、上昇した状態で安定した傾向を示している。堤体内定着のLC11は、季節変動はあるものの設置時から安定した傾向を示していたが、1月末時点の整理結果を確認すると上昇傾向が確認されるため、注視が必要である。

また、その他の荷重計器も季節変動はあるものの、設置時から安定している。

2021年7月7日に日累計176mm、12日に日累計125mmとまとまった降雨があった。この降雨の2日後の14日辺りからLC12の荷重が増加し始めている。降雨の影響により時間差で岩盤内の地下水位が上昇したことで、アンカーの岩盤部に引張が発生したと考えられる。

その後降雨はなく、8月に入り貯水位が下がり、荷重は安定した。このタイミングで、地下水位の上昇も止まったと考えられる。しかし、8月8日から断続的に降雨が続いたため、岩盤内の地下水位が再び上昇したことから、荷重も増加したと考えられる。

ここで岩盤内定着のLC12と堤体内定着のLC11の変位差を計算にて確認したところ、7/14辺りから変位差が増えて8/31時点で2.5mm程度岩盤と堤体との間に開きが発生していることを示した。

しかし、近傍の間隙水圧計WP-3の7月14日以降のトレンドは以前のトレンドと変わらず、アンカーにかかる荷重が増加したことで、堤体の安定性に影響を与えるほどの岩盤と堤体間に隙間が発生したとは考えにくいと想定されるが、今後、再び上昇傾向が確認される場合には、調査を実施し対策を検討する必要であると考ええる。

軸力の貯水位および気温との相関性については、貯水位との相関は確認されないが、気温の上昇に伴い軸力が増加する傾向が確認される。現時点では、気温変動に応じた挙動を示しており、今後、異常な挙動を示さないか継続監視する必要がある。

(5) プラムライン計測結果の経年変化図

千本ダムの3次元プラムラインは、昨年同報告書で記したように国内ダムでは初めての採用であり、鉛直方向のデータが取れるため注目される。

現在までXYZの3方向変位の毎時自動計測を実施しており、月1回データを収集している状況である(図-8)。なお、2021年夏に計測値が不安定化した。メーカーの機器調査で、湿度100%の取水塔連絡廊部に設置のプラムライン検出部の水滴付着が原因と分かった。その後、毎月検出部の水分を拭き取ることで対応し計測値は安定している。

以下に計測方向別の傾向を記す。

- a. 上下流方向(Y)： 冬季の期間に下流側へ変位し、夏季の期間に上流側へ変位する傾向がある。貯水位の影響よりも、Z方向で確認された気温変化による膨張・収縮の影響であると考えられる。
- b. 左右岸方向(X)： 水滴付着による中断はあったが、大きな変位は確認されていない。左右岸ともに地盤拘束で変位が抑制されているともいえる。
- c. 鉛直上下方向(Z)： 気温が低い期間には下方向に変位(収縮)し、夏季の気温が高い期間には上方向に変位(膨張)している。これは、夏季に堤体表面が暖められることで堤体が上下方向に膨張していることによる。アンカー軸方向と同じ上下方向の変位が明確に確認できたという点で、緊張力管理上、Z方向の変位を測る意義は高いと考えられる。

逆に、アンカー緊張力を知ることで堤体の挙動をある程度知ることができるともいえる。

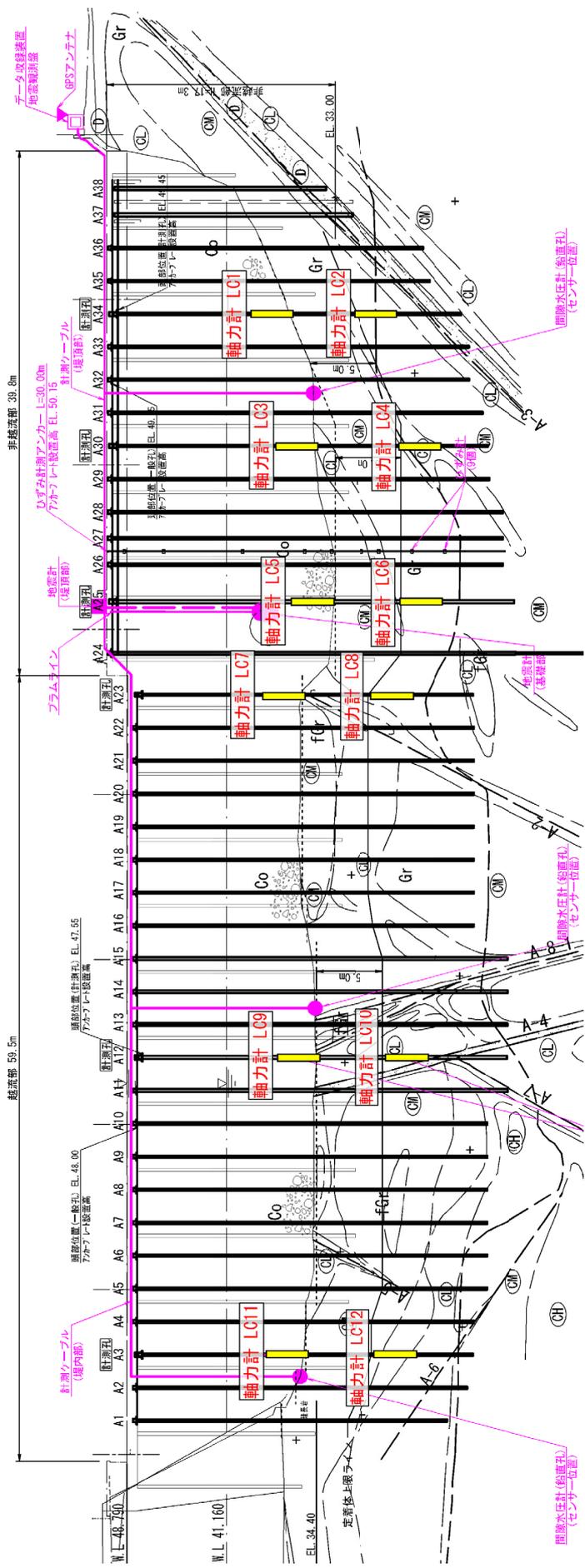


図-6 千本ダムにおける軸力計測ストランドの設置位置図

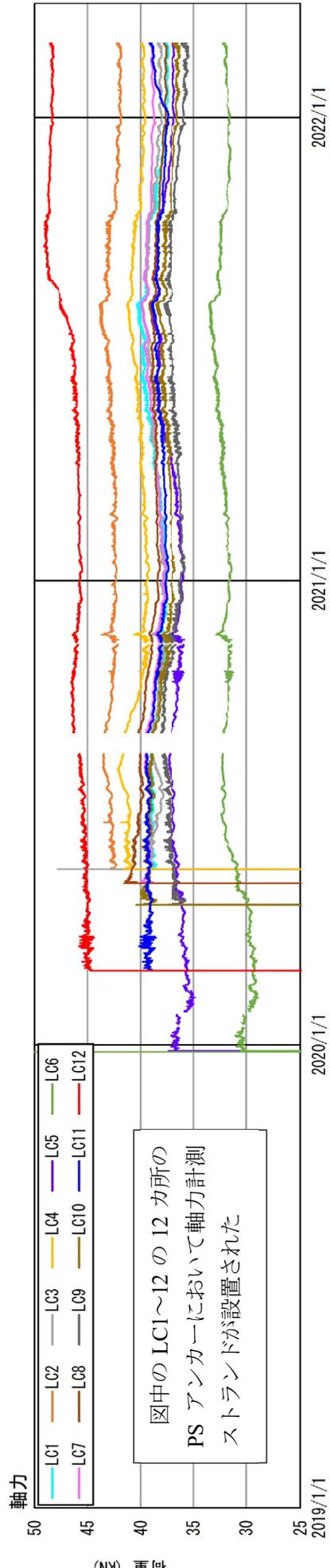


図-7 千本ダムにおける荷重計測値の変化 (軸力計測ストランドによる値)、気温と貯水位の日変化は次ページを参照

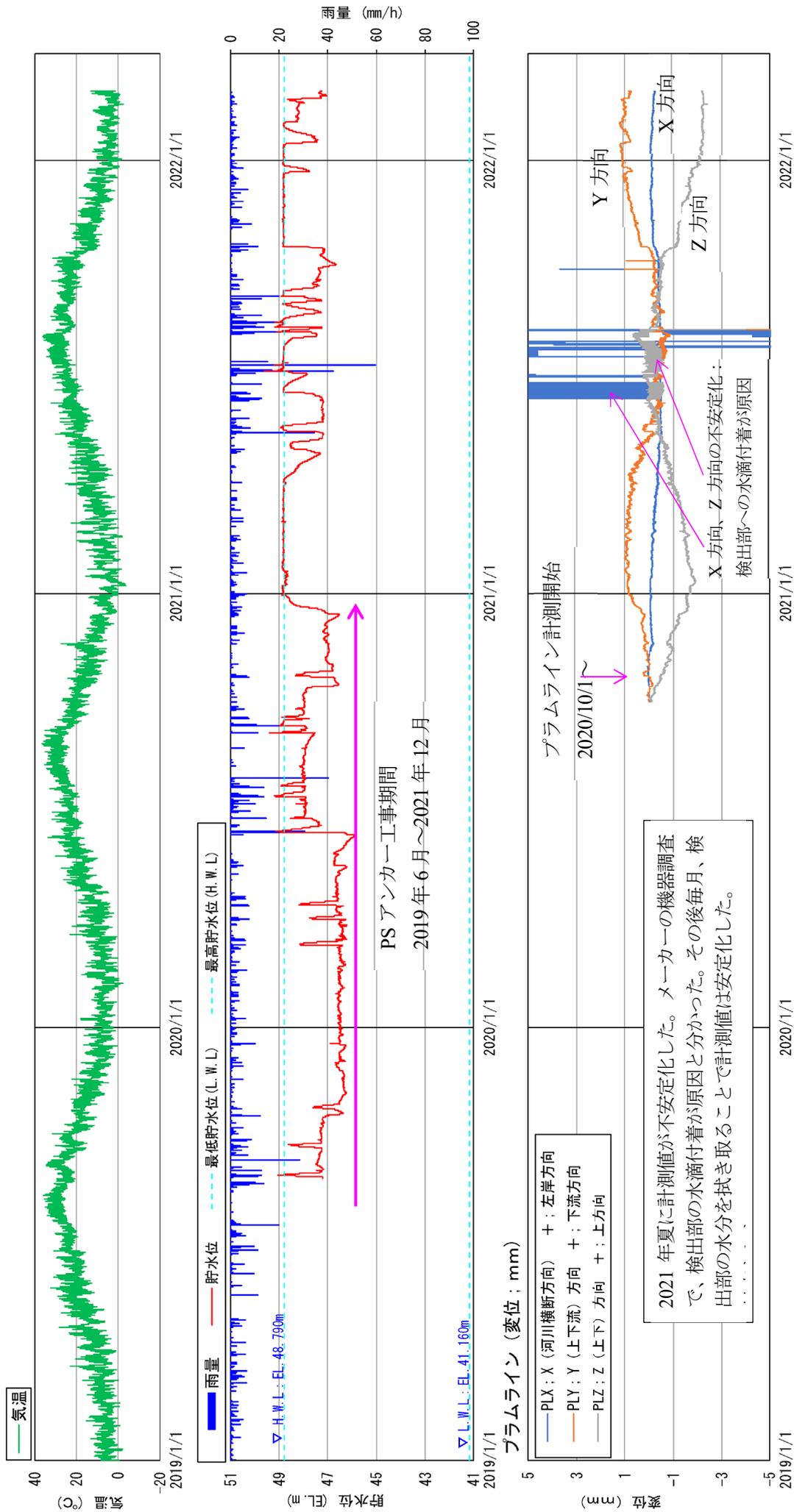


図-8 千本ダム3次元プラムラインの計測結果