

5.2 既設ダムへの3次元プラムラインの設置に関する研究開発

研究年度：平成29年度～

研究分野：ダム計測機器に関する調査研究

調査研究名：既設ダムへの3次元プラムラインの設置に関する研究開発

研究者：川崎秀明

【要約】

プラムラインは、コンクリートダムの変位を簡便かつ高精度で測ることのできる標準的な計測方法であるが、後付け設置については、堤体削孔費の高さや良好な設置空間の確保の難しさ等のために、事例はごく少ない。本研究は、耐久性に優れた計測機を開発する目的で、米国メーカーとの技術提携によって実施してきたが、本稿では、令和2年に補強工事の終了した千本ダムでの狭小かつ湿潤な取水塔内への3次元プラムライン設置について故障対応も含めて記す。

【キーワード】

計測、プラムライン、3次元、たわみ検出計、既設ダム

【背景・目的】

河川管理施設等構造令において、フィルダム、アーチ式コンクリートダム、堤高50m以上の重力式コンクリートダムは、変形の計測が義務づけられている。このため、堤高50m以上の重力式コンクリートダムのほとんどにおいて、堤体の変形の計測にプラムラインが使われている。

プラムライン (Plumb Line) とは、地球の中心点に向かう鉛直線のことであり、計測機器はペンジュラム (pendulum、振り子の意味) であるが、全体システムとしてプラムラインと呼ばれることが多い。

その構造は、図-1に示すように、堤体天端に固定点を取って鉛直に垂らしたワイヤつき重錘をオイルタンク内に浮かべて無抵抗かつ自由に動けるようにしていることから振り子の動きによく似ている。変位の値はワイヤの水平面での動きをその直上に設置したたわみ検出計で計測することで微妙な精度 (1/10mm) まで計測できるようになっている。

プラムラインが重力式コンクリートダムで標準的に使われる理由は、堤体が剛性の高いコンクリートであるので、水圧や温度変化によって生じる堤体の変位を天端と堤体下部の変位の差 (内部変位) だけで簡単に測ることができ、測量と比べても高精度であることにある。この点、フィルダムの場合は堤体が剛体でないので、非常に多数の表面変位 (外部変位) を計測または測量する必要があり、しかもプラムラインと比べると誤差が多く精度も低い。

このようにプラムラインは簡便かつ精度の高い計測機器であるため、ダムの安全管理意識の高まった近年においては、プラムライン普及前

の昭和30年代半ばまでに建設された古いダムや堤高50m未満のコンクリートダムにおいて、プラムラインを後付設置したいとのダム管理者からの要望は結構多い。しかし、プラムラインの後付設置するとなると、堤体に削孔して鉛直の筒を通す費用が高く、計測本体を設置する通廊内に室を設ける空間確保と乾燥環境確保が難しいという問題があり、その事例はごく少ない。

本研究では、最新機種種の米国メーカーと技術提携して既設ダム取水塔内に3次元かつ小型プラムラインを設置した事例について述べる。

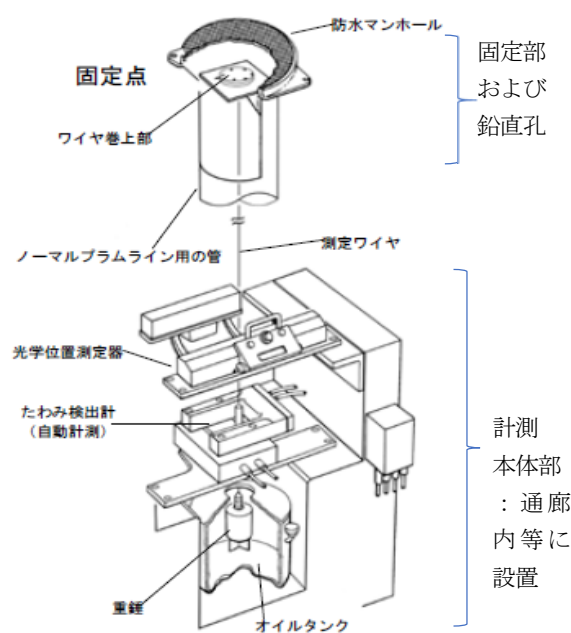


図-1 プラムラインの構造

(図：改訂3版コンクリートダムの細部技術 p562)

(1) 変形計測の種類

変形計測には、堤体相対変位を測る内部変位と表面絶対変位を測る外部変位がある。

① 内部変位の計測方法（表-1参照）

後付け機器としては今回対象のプラムライン以外に、チルトメーターがある。チルトメーターの国内使用は稀だが、近年の海外ではプラムラインよりも多く使われている。表-1に両者を比較するがプラムラインの方が設置数の少ない分、管理しやすいという面はある。

さらに、埋込みが必要だがそれ自体がセンサとなり、点ではなく線上でシームレスにセンシングできるという利点を持つ光センシングケーブルがある。

表-1 堤体内部変位計測用の後付け機器

計測機	プラムライン	チルトメーター
特性	全体変位を計測	局部変位を計測
設置工事	通常30から50cmΦの垂直の孔が必要で設置費は高い	長さ10～50cmで壁面に固定するだけで設置費は安価
計器の費用	高価：3～10百万円／台	安価：数十万円／個
設置数実績	1ダム当たり1～5台	1ダム当たり数個～300個
耐用年数実績	部品交換で50年以上（原理は機械式）	他の電気式計測機器と同じ
写真（計測部）		

② 外部変位（表面変位）の計測方法

フィルダムでは、表面変位が多数点で計測されるが、アーチダムや重力式ダムでも主要点で計測される。その計測方法は、従来、地上測量が主であったが、最近では光波測距（自動追尾のトータルステーション）やGNSS（GPS等の衛星測量）等の採用によって自動化や精度向上が著しい。

前述の光ファイバー、上述の光波測距、GNSSの技術は日進月歩であるので別の機会に記述する。

(2) プラムラインの種類と歴史

プラムラインには、堤体内の相対変位を測るノーマル型（以下、単にプラムライン）と、堤体と地盤との間の変位を測るリバース型がある。

国内のプラムラインは中空重力式の大森川ダムやアーチ式の綾北ダムで1960年頃に設置され始めて、

現在は堤高50m以上の大半のコンクリートダムで採用されている。

リバースプラムラインは国内開発され、1965年に鶴田ダムで初めて設置された。その後、弱層や基礎グラウト注入等によって地盤変位が懸念される場合に設置されている。リバースプラムラインでは固定点が地中になるが、基本的な仕組みはノーマルと同じである。

また、従前のプラムラインは2次元計測のみであったが、海外では3次元計測の製品も出ている。

(3) プラムラインの設置事例

① 新設ダム設置事例

新設ダムの場合、良好な変位計測のために通廊脇に湿気を断った室を設けてプラムライン本体部が設置される。鉛直管も施工時に設置される。新設ダムへの最新の設置状況を写真-1に示す。



写真-1 横瀬川ダムの新設の計測本体部

② 後設置の事例

藤原ダム建設時（1957年完成）はプラムラインは普及前であり設置はされなかった。しかし、近年の安全管理の一環で変位計測の必要性が増したことから、10年ほど前に天端から鉛直削孔した上で通廊内にプラムライン本体部が設置された。写真-2に計測室を示すが、周囲を囲って極力温度変化が小さく、ほこり等の付着が少ない環境にしている。また、通廊を塞ぐが通り抜けは可能である。



写真-2 藤原ダムの後設置の計測本体部

写真-2に計測室を示すが、周囲を囲って極力温度変化が小さく、ほこり等の付着が少ない環境にしている。また、通廊を塞ぐが通り抜けは可能である。

③ 工事中の仮設事例

笠堀ダムでは、嵩上げ工事における堤体の傾きを監視するために堤体中央部の旧エレベーターシャフト内に仮設プラムラインが設置され、工事中のH28年2月から平成29年11月下旬まで堤体変位が計測された。設置の理由は簡便性と高い計測精度である。結果、ダム軸方向、上下流方向ともに異常な堤体挙動につながる変位は無く、安全施工に役立った。

(4) 千本ダムにおけるプラムラインの配置検討

PSアンカーによる耐震補強を行うにあたり、施工時と将来の安全管理のために、以下の条件下に変形計測用の設備を設置することにした。

- ① 仮設（2014年設置）の光波測距設備をより経済的な永久設備に切り替える。
- ② 微小変位を明確に捉える精度を有する。
- ③ アンカー荷重方向である鉛直方向についても計測する（即ち3次元計測）。

外部変位方式も含めての比較の結果、最も経済的かつ高い精度を確保できる「取水塔内へのプラムライン設置案（写真-3）」を採用した。たわみ検出計は、鉛直方向変位も計測できる3次元新型機種の子国Geokon社製品を採用した。外部変位との整合は、計測基準点として左右岸の定期測量用の標点を用いることとした。

ただし、取水塔内は狭小である上に、アンカー位置がごく近いため、小型計器を採用して通廊内壁の切削を極力減らす必要があった。そこで



写真-3 取水塔内の鉛直ワイヤの設置状況

置台の縦横を0.4m×0.7mに抑える等の配置の工夫によって、図-2のように通廊内壁を切削せずに計器を設置するようにした。

なお、採用計器の測定範囲は、X方向5cm、Y方向10cm、Z方向5cmと、国内製のXおよびY方向20cmに比べて狭いが、当ダムは堤高が低いので、実用上は十分な範囲と判断した。

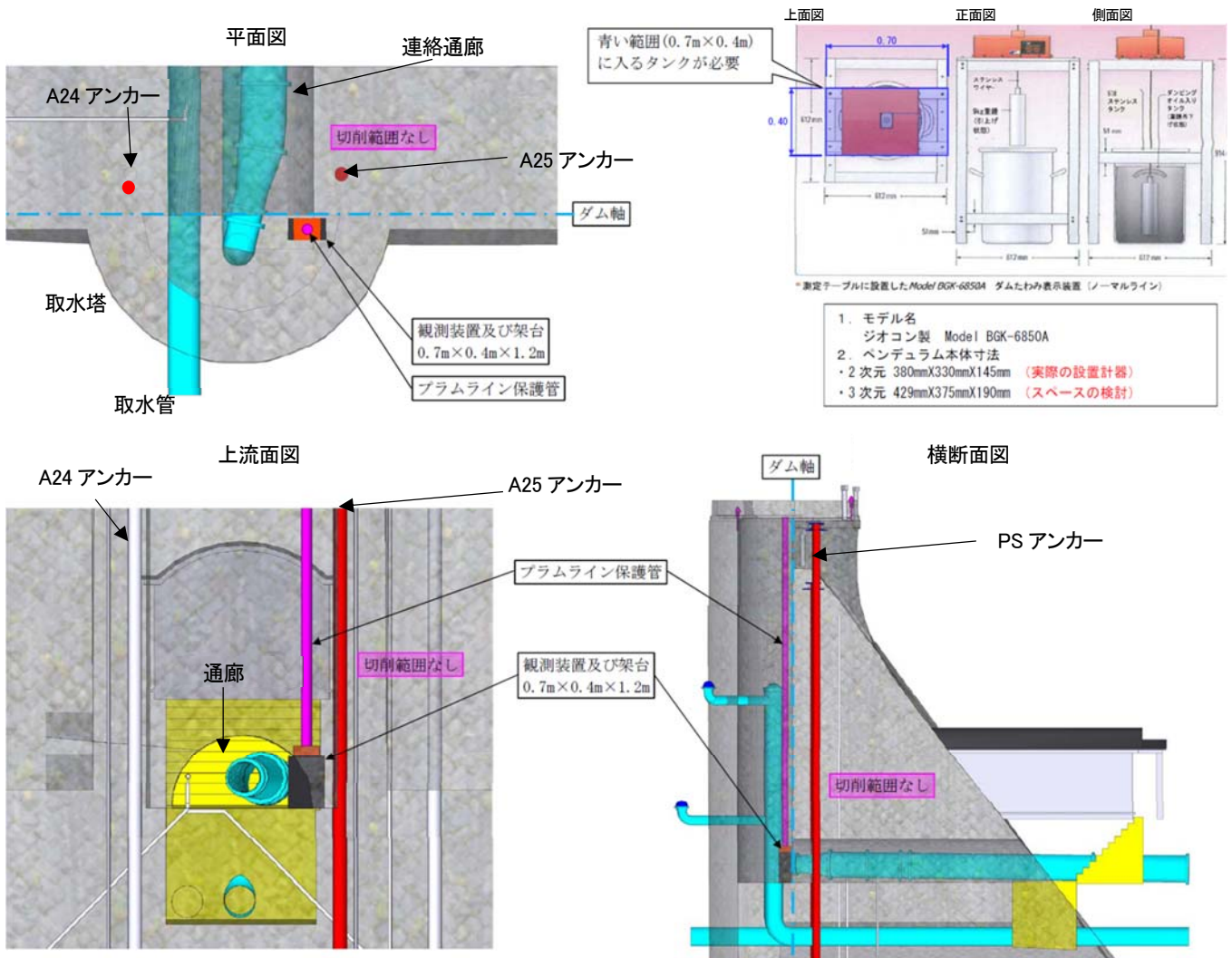


図-2 取水塔内のプラムライン設置図：設置箇所や機材幅縮小等の工夫で内壁の切削を回避した

(5) 新型3次元プラムラインの不具合と対応

プラムラインは2019年12月24日に設置された。しかし、水滴付着のため計測値が乱れたため、2020年2月に防滴カバーとキャップが追加設置された。その後、値は落ち着いていたが、6月10日にX軸方向の計測値に異常が発生したため、6月26日にたわみ検出計ごと米国のメーカーに補修のため返送した。8月4日に修理品が再設置されたが、輸送時の破損で8月11日には異常値が発生したため、メーカーより新品たわみ検出計を取り寄せて2020年10月1日に再設置がなされた。これ以降、計測値は正常化した。

写真-4に設置状況を示す。赤い機材がたわみ検出計であり、湿度100%に近い湿潤環境にあるため、透明の防滴カバーで囲われている。

◎異常値の原因： たわみ検出器自体は防水防滴仕様であったが、2020年2月の異常原因は、検知部のワイヤへの水滴付着であった。次の6月の異常はX方向ミラーの固定ネジの緩みによる位置ずれであった。両方とも、国内代理店を通じての米国メーカーの対応は非常に早かった。

(6) 千本ダム計測値の傾向 (2021.1まで)

図-3に経緯的にプラムラインの計測値を示す。途中何度か、異常値による中断が生じたものの、高精度の計測結果が得られ、興味深い傾向が示された。本検証は1年以上のデータ蓄積で温度と貯水位の影響を把握してからになるが、以下に途中段階での主な計測結果を示す。



写真-4
プラムライン計測本体部の設置状況
2020.3.30

- a. 2020年1月：気温下降か越流頂の切削除去の影響で堤体が上流側（堤体の温度収縮？）かつ右岸側（左岸側重量減？）に動く。
- b. 同年3~5月：越流部各アンカーの緊張とともに鉛直上方に変位、また僅かに上流側に変位した。これらは緊張による越流部沈下の反作用または堤体膨張の影響と考えられる。
- c. 2020年10月以降：貯水位上昇とともに「ダム軸方向は変化なし、下流側に変位、鉛直下方に変位」の水重作用に叶った動きが見られた。従来と異なる点として、鉛直方向の動きが測れたことがあり、これはダムの安全管理上、かなり意義深いことである。

—X方向(ダム軸方向、+;右岸側)、—Y方向(上下流方向、+;下流側)、—Z方向(鉛直方向、+;上方)

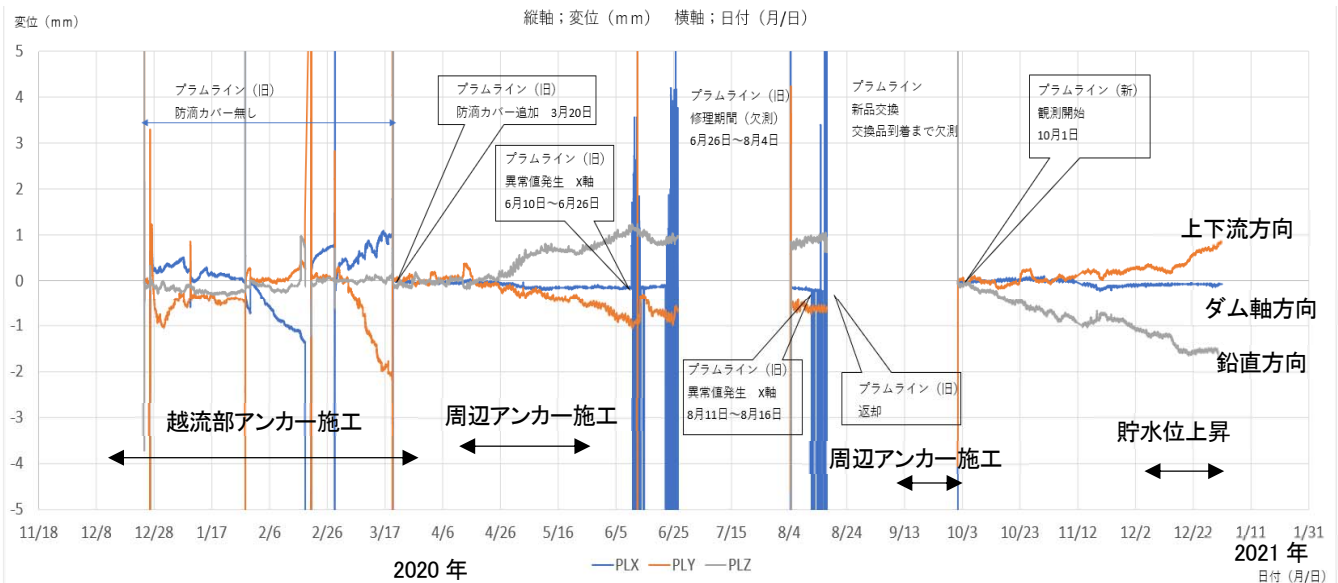


図-3 千本ダム施工中~施工直後のプラムライン計測結果 (2019.12.24~2020.12.31)

2019年12月設置→正常→2020年2月異常→防滴処理→6月異常→8月検出計修繕→10月検出計交換→正常

(7) 今回プラムライン設置費と他との比較

取水塔内設置で鉛直削孔が不要、計測本体部に当ダム堤高に適した海外製品を採用等の割安要因で、プラムライン設置費（機器費＋施工費＋諸経費）は700万円程度とかなり低額であった。国内製品の場合、大規模ダム用の製品のみのため、どうしても割高かつ大型になる。

また、千本ダム耐震補強工事（2020年完了）前の2014年から実施されていた光波測距（自動追尾のトータルステーション）は、毎年かかる計測機調整、データ情報処理等の維持管理費が高かった。これと比べると、今回プラムラインは維持管理費が格安であり、4年ほどでトータル費用は逆転する。

以上、今回の既設ダムへの小型プラムラインの設置例は、安全管理の向上と維持管理費の節減を考える上でかなり役立つと考えられる。

(8) 景観の改善

千本ダムの変形は、この数年、光波測距のトータルステーションによって計測されていたが、今回工事では経済的かつ高精度の計測方法である取水塔内プラムライン方式に切り替わった。

このことで、光波測距用の支柱が6本とも撤去され、従来の石積み堤体の美を取り戻すことが出来た。補強工事の前後を写真－5、6に示す。

(9) まとめ

今回の既設ダムへの3次元プラムライン設置の結果について、以下にまとめる。

- ① 内部変位計測である今回設置費用は、外部変位計測と比べて経済的となった。ただし、計測対象の違いもあり、内部変位計測でもって外部変位計測を代用できない面もある。
- ② 高精度の計測値を得た。特に、鉛直方向のプラムライン計測は国内初であるが、有意な堤体挙動計測になると考えられる。
- ③ 光波測距用支柱の撤去によって従前の石積み美の景観を取り戻すことができた。このことも理由の一つで、令和2年度において第27回しまね景観賞・特別賞、土木学会技術賞を受賞した。
- ④ 本事例では海外製品を採用することで、小型化、経済性、鉛直方向計測等の課題解決を図ることができた。国内に小型ダム用のプラムラインがない背景に、国内法令では堤高50m未満の重力式ダムに変形計測の義務がないこ



写真－5 千本ダム越流部 2019. 6. 25

合計6本の光波測距用ミラー設置の支柱が立っていた



写真－6 千本ダム越流部 2021. 3. 23

プラムライン設置で光波測距用支柱は撤去された

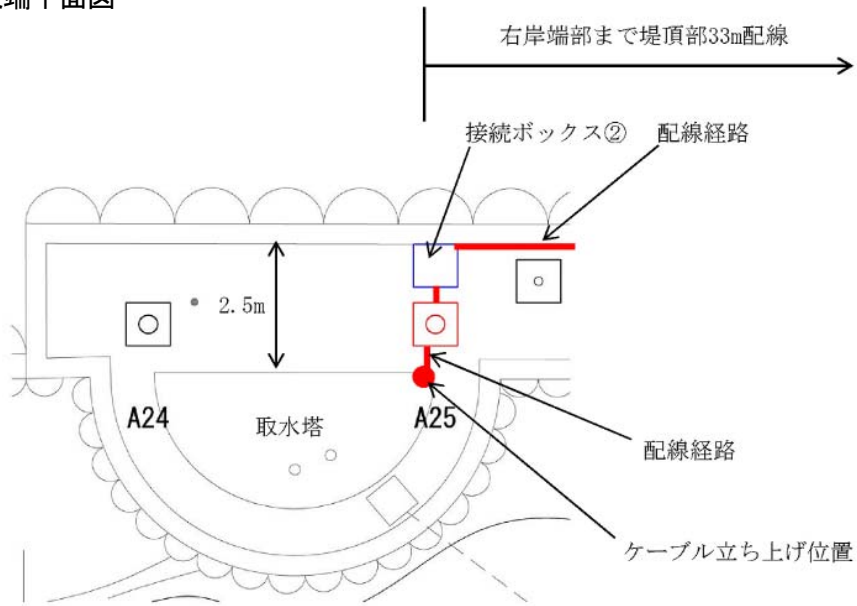
とがあるが、小型ダムであっても老朽化が進むに従い変形計測の必要性は高くなる。

- ⑤ 今回例は、湿度100%に近い劣悪な設置環境にあった。防水性、防滴性の改良によって計測値は正常化した。電気系統等の長期安定性を今後も監視する必要がある。
- ⑥ 今回の新機種採用における代理店経由の海外メーカーとの連携は、速やかな対応の点で有効であった。連携先のGeokon社は計測機器での世界シェアの高い米国企業であり、技術開発に熱心に取り組む会社である。今回の3次元プラムライン適用性については、長期安定性確認が残っているが、千本ダム実績を機に当センターとしてもダム管理者への積極支援を行っていきたいと考えている。

謝辞

計器設置と配線に悪戦苦闘して頂いた大林組の太田所長、藤井基礎の小村部長、計測リサーチの辻野部長、再度の機器交換と改良に尽力頂いたジオソニック（メーカー代理店）の真野社長の名前を挙げて感謝の意を表します。

天端平面図



横断面図

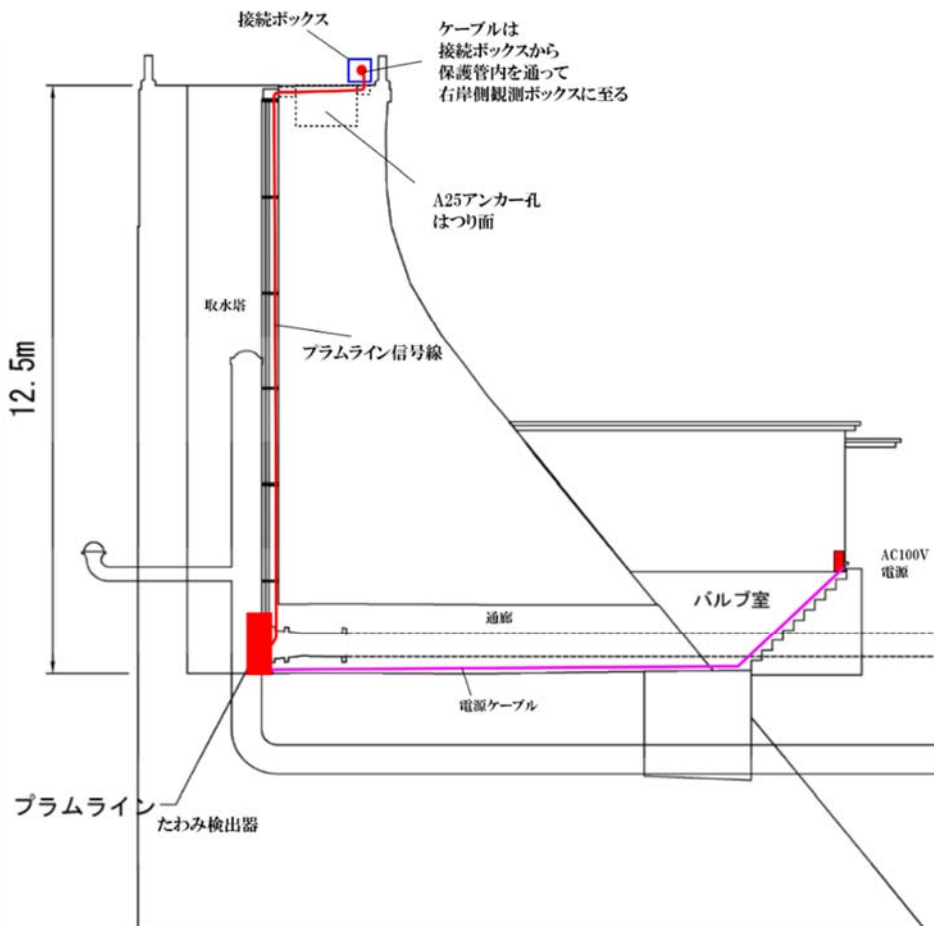


図-4 千本ダムにおける3次元プラムラインの設置および配線状況