

2.2 ダム用 PS アンカーの耐震性能に関する研究

研究年度：平成 28 年度～令和 3 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：ダム用 PS アンカーの耐震性能に関する研究

研究者：川崎秀明、梅園拓磨*、和泉征良

【要約】

ダム用 PS アンカーとは、堤体、基礎岩盤の安定のために用いられる構造物と基礎岩盤の補強用のアンカーを指すものであり、堤体や基礎岩盤を長期安定的に支える材料、設計・施工・計測・点検管理が必要となる。

ダム用 PS アンカーは、海外では既に多くのダムで堤体補強目的での実績を有しており、国内でもダム再生（特に堤体補強、嵩上げ）への利用が期待されるが、本格的な施工として千本ダムでダム用 PS アンカーによる堤体耐震補強が行われたばかりである。

ダム技術センターは、ダム用 PS アンカーの国内適用のための研究を行っており、「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」¹⁾を作成した。本稿はその一環で FEM 解析による応力照査について継続して研究を行った内容について報告するものである。

【キーワード】

アンカー、堤体 PS アンカー、L2 地震動、FEM 解析、アンカー緊張力

【背景・目的】

海外のダムにおいては、耐震性能や設計対象流量等のダム安全基準の見直しやリスクと挙動の評価に伴い、ダム堤体や周辺基礎岩盤を PS アンカーで補強する事例が増えている。特に、米国においてダム用 PS アンカーの採用数は非常に多く、アンカー防錆の二重化が始まった 1989 年頃から急速に増えており、1990 年～2012 年までの北米（米国、カナダ）のダム用 PS アンカー施工ダム数は 470 にもなる²⁾。

一方、我が国のアンカー施工は斜面安定用や法面保持用が主であり、ダムのような大型構造物用いるアンカーの設計・施工・計測・点検管理手法は確立されておらず、ダム堤体への導入実績は限られている。今後、国内のダムにおいては、耐震補強の必要性や老朽化の必要が増大すると考えられることから、ダム用 PS アンカーの設計・施工・計測・点検管理手法の確立は急務である。

【研究経緯】

ダム用 PS アンカーの施工目的は、堤体補強だけでなく、堤体を支える基礎岩盤の補強などを含む。斜面安定用アンカーが待ち受けを想定して許容緊張力にかなり余裕を持たせた定着時荷重を与えるのに対して、ダム用 PS アンカーは堤体を常時安定的に支えるものとして、斜面安定用アンカーよりも一層高い緊張力と耐久性が必要となる。

ダム技術センターは、ダム用 PS アンカーの日本国内への適用のための研究を 10 年前に行い、技術

資料³⁾によって設計・施工・維持管理の試案を提案し、令和 3 年に「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」¹⁾を策定した。

本研究では、平成 28 年度からダム用 PS アンカーによるダムの安定性の向上効果に関する検討を FEM 解析等の応力照査を用いて進めてきた。

令和 2 年度の研究では、静的 FEM 解析による千本ダムの PS アンカー補強検討事例を基に、ダムに発生する応力について検討を行い、結果を報告した。

【令和 3 年度の研究内容】

令和 3 年度の本研究では、昨年度と同じ千本ダムの PS アンカー補強事例を基に、L2 地震動による動的 FEM 解析を実施し、ダムに発生する加速度、変位、応力について検討を行った。

（1）千本ダムの概要

千本ダムは、1918 年に松江市の上水道水源として築造された重力式粗石コンクリートダムで、堤高 16m、堤頂長 109m、堤体積約 7,000m³である。左岸側が越流部、右岸側に取水塔がある（写真-1 参照）。

ダム用 PS アンカー施工前にダム堤体に漏水が確認されたことから、水平打継面（不連続面）が存在するものと推定された。

ダム用 PS アンカー施工後に施工前に確認された漏水が止まったが、この水平打継面の影響とダム用 PS アンカーの効果に対する評価が行えていない。このことから、本年度検討では、図-1 に示す非



写真-1 千本ダム(下流から望む)

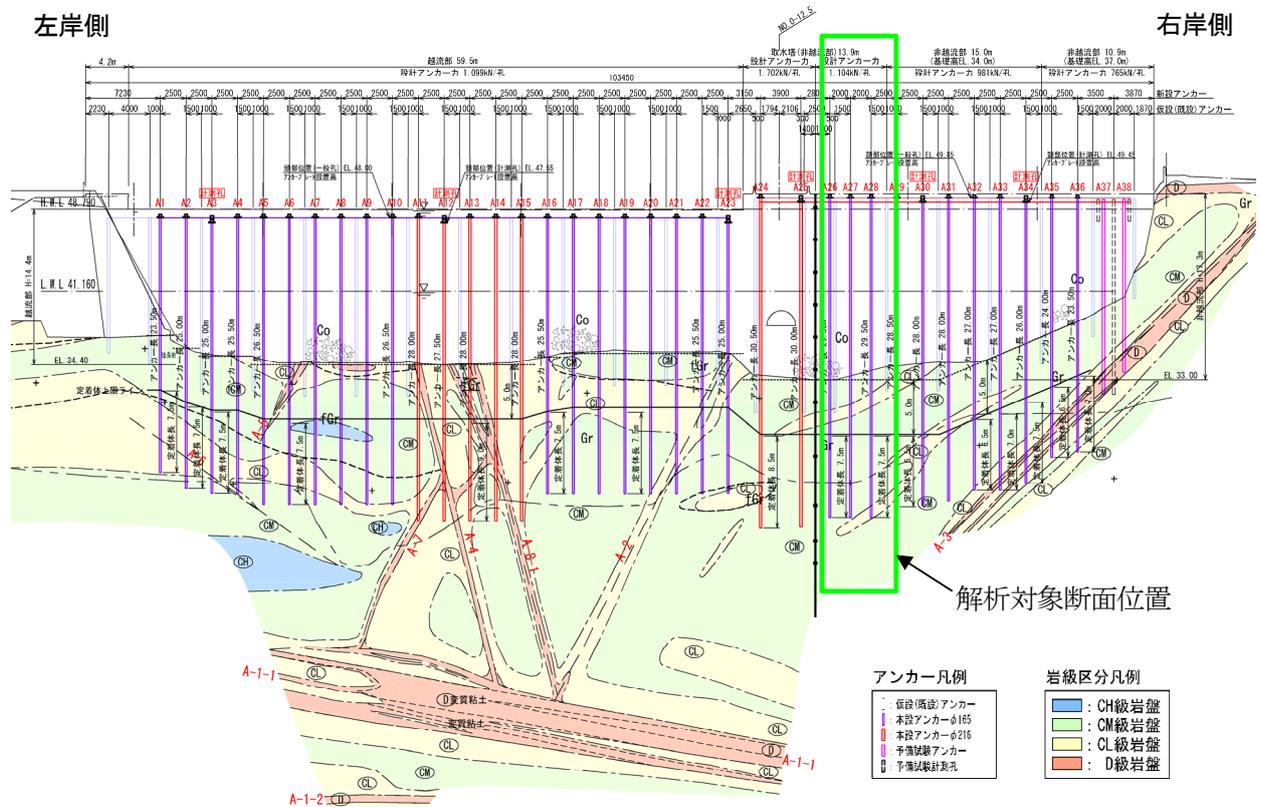


図-1 解析対象断面位置

越流部を対象として、L2地震動に対する水平不連続面の影響を2次元動的FEM解析により評価した。

(2) 解析内容

(2)-1 解析条件

ダム用PSアンカーを打設したケースの解析内容および条件について以下に列記する。図-2に非越流部の解析モデルを示す。

- ①水平打継面およびダム用PSアンカーの有無の違いを、2次元動的FEM解析(解析ソフト: DIANA)によりダムの加速度応答、ダムに発生

する応力分布、ダム底面のすべり安全率などを評価する。

- ②入力地震動は、賀祥ダム観測波を原種波形とし2次元モデルによる引き戻し計算より算定する。
- ③現場の漏水状況や、堤体コア観察結果(A32孔)から、右岸非越流部の天端下7mにおいて水平打継面に弱層を設定する(写真-2参照)。
- ④ダムは線形材料とし、破壊は考慮しない。水平打継面はすべり・剥離を考慮できるジョイント要素でモデル化する。

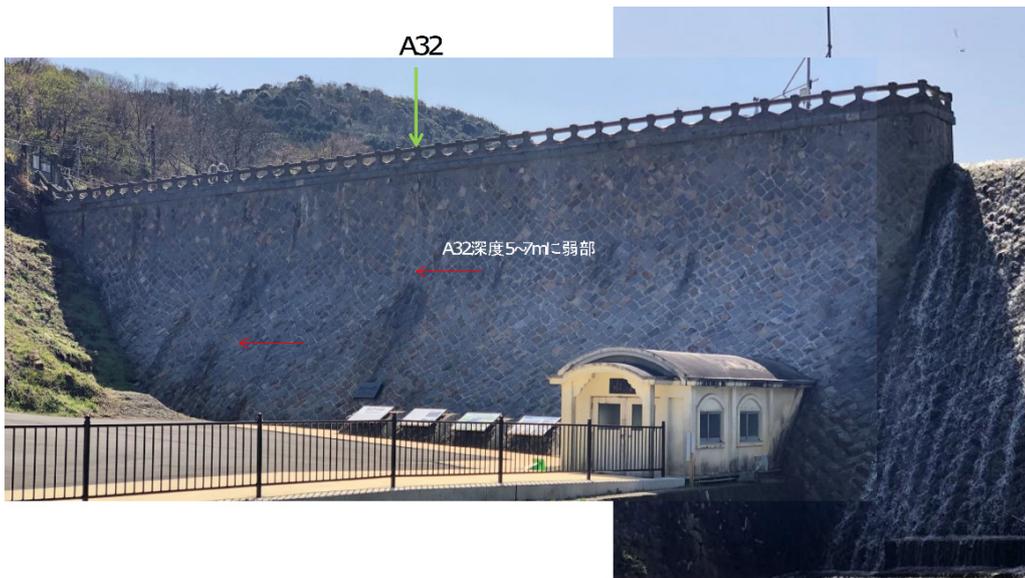


写真-2 アンカー施工前の右岸非越流部の下流面状況

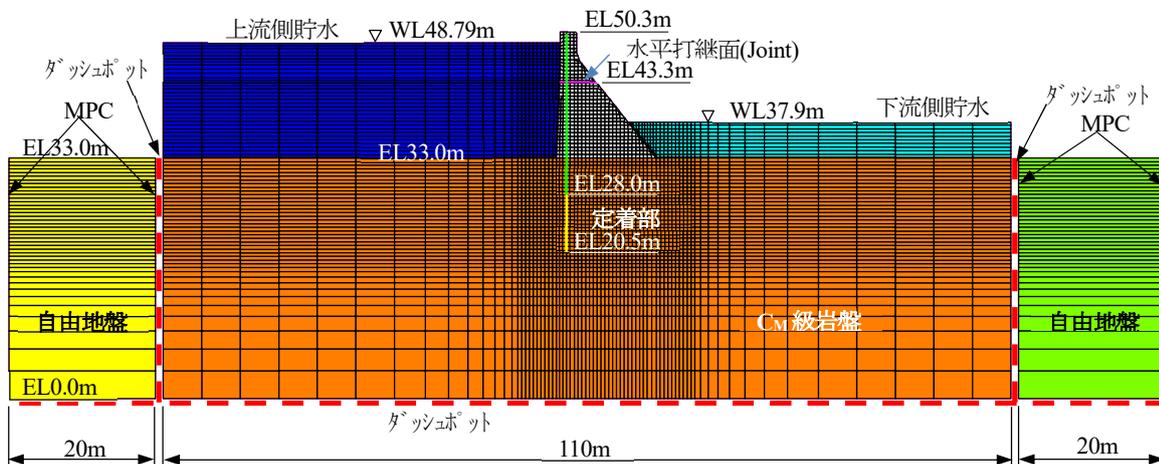


図-2 2次元動的FEM解析モデル

- ⑤ 定着地盤支持方式は引張型、アンカーヘッド部から定着体までの構造を全面接着(フルボンド)とし、アンカーヘッド、定着部に節点荷重として作用させ、アンカーはトラス要素でモデル化する。
- ⑥ 基礎岩盤は、CM級岩盤が一様に分布していると仮定する。

(2)-2 解析物性値

堤体コンクリート及び岩盤(CM級)の解析物性値を表-1に示す。また、ダム用PSアンカーの諸元を表-2に示す。

ダム用PSアンカーの打設ピッチは2.5mであることから、FEM解析モデルへの入力に当たっては、断面積と緊張力は打設ピッチ2mで割った数値を入力する。

表-1 堤体および岩盤の解析用物性値

	堤体	CM級
単位体積重量 (t/m ³)	2.23	2.62
ポアソン比	0.26	0.33
動弾性係数 (MPa)	18,000	15,700
P波速度 (m/s)	3,600	3,000
S波速度 (m/s)	1,800	1,500
減衰定数 (%)	5.0%	5.0%
せん断強度 (kN/m ²)	-	656.6
摩擦係数	-	0.839

表-2 アンカー諸元

	1,104kN/本	非越流部
設計アンカー力	1,104kN/本	非越流部
アンカー打設ピッチ	2.5m	
定着長	7.5m	
断面積	11.096cm ²	φ15.2 鋼 より線8本
弾性係数	1.94 × 10 ⁸ kN/m ²	

(2)-3 荷重条件

非越流部の安定計算で考慮した荷重を基に、静水圧はダム上流面垂直方向、堆泥圧は水平方向、堆泥重は鉛直方向にそれぞれ分布荷重として作用させる。アンカー緊張力は、アンカーヘッド部には下向きに設計アンカー力相当の集中荷重を作用させ、定着部には分布荷重を上向きに作用させる。動水圧は動的FEM解析時にダム上流側及び下流側の貯水池を流体要素でそれぞれモデル化していることから、地震動を入力すると自動的に考慮される。揚圧力は、FEM解析時には作用させず、ダム底面のすべりに対する安全率の算定時に考慮する。

(2)-4 入力地震動

レベル2地震動は、文献資料等の調査により想定地震候補を抽出して地震動の設定をしていくが、本研究では千本ダム近傍の賀祥ダムで観測記録された波形を入力波として設定する。図-3に、賀祥ダムの観測波の引き戻し計算により得られた入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトルを示す。

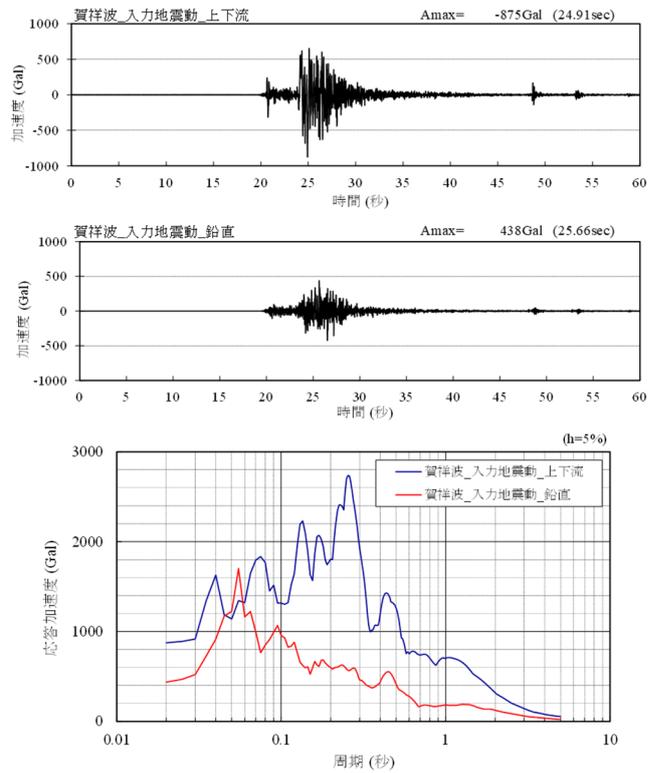


図-3 入力地震動の加速度波形と応答スペクトル

表-3 非越流部でのダム用PSアンカー施工対策前後の比較

	対策なし		対策あり	
	水平	鉛直	水平	鉛直
最大加速度分布				
天端最大加速度	2、613 Gal	2、122 Gal	2、131 Gal	755 Gal
天端最大変位	65.1 mm (残留：65.1 mm)	—	8.0 mm (残留：0.2 mm)	—
	最大主応力(引張側)	最小主応力(圧縮側)	最大主応力(引張側)	最小主応力(圧縮側)
主応力分布				
上流端主応力	1、264 kN/m ²	-1、821 kN/m ²	1、089 kN/m ²	-2、217 kN/m ²
堤敷すべり安全率	2.289		3.058	

(3) 解析結果

地震応答解析結果を表-3に示す。

ダム用 PS アンカー施工対策前のケースでは、水平打継面より上部がロッキング運動することによりダム天端の水平および鉛直加速度は非常に大きい結果となった。天端最大変位は、6.5cm の残留変位が生じたが、これはジョイント要素（水平打継面）のズレの影響である。水平打継面のズレは水平打継面の強度が低いことによる滑りではなく、水平打継面が剥離した際に地震力や動水圧によって押されてズレたことが考えられる。

ダム用 PS アンカー施工後のケースでは、アンカーを打設することで水平打継面に引張が発生しづらくなり水平変位のズレもほとんど発生しない結果となった。これによりアンカー施工前に水平打継面上部に発生していた大きな水平加速度はほとんどなくなり、水平打継面上部の鉛直加速度も小さくなった。

また応力は、アンカー打設により堤体や基礎岩盤の圧縮力が大きくなり、堤敷すべり安全率も大きい結果となった。

【令和3年度の研究成果】

本年度の研究の結果、以下の成果が得られた。

- ① 水平打継面の弱部をジョイント要素、ダム用 PS アンカーをトラス要素にてモデル化した FEM 解析により、ダム用 PS アンカーの効果を評価する手法を整理し、提案した。
- ② 水平打継面が弱部であるコンクリートダムでダム用 PS アンカーによる対策工を施工すると地震動の影響による水平変位や、鉛直加速度を抑える効果があることを確認した。

【今後の課題】

ダム用 PS アンカーの設計法の標準化に向けての研究成果のうち、河川管理施設等構造令に基づく堤体安定性の検討、2次元静的 FEM 解析による応力照査については、「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」³⁾に掲載されているので参照していただきたい。

今後、更なるダム用 PS アンカーの設計法の標準化に向けてデータを収集し、整理を行うこととしている。

【参考文献】

- 1) 一般財団法人ダム技術センター：ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル、2021年
- 2) D.A.Bruce、"Rock Anchors for Dam Remediation in North America"、International Ground Anchor Forum 2006、Tokyo、Japan

- 3) 財団法人ダム技術センター：アンカー工法によるダム堤体の補強方法に関する研究、ダム技術研究所報告 第201001号、2010年