

論文

堤体 PS アンカーによる千本ダムの耐震補強に関する静的解析

川崎 秀明¹ 岩田 直樹² 菅 輝夫³ 福本 英生⁴

Static Analysis on Senbon Dam Seismic Reinforcement by Post-tensioned Anchor

Hideaki KAWASAKI Naoki IWATA Teruo SUGA Hideo FUKUMOTO

千本ダムでは、河川管理施設等構造令に基づく耐震安定性を満足するために PS アンカー補強が実施された。本研究では、FEM 解析による千本ダムの PS アンカー補強検討事例をもとに、岩盤剛性、アンカー定着位置やアンカータイプ、ダム高等の違いによりダムに発生する応力がどのように異なるかを解析的に検討した。この結果、ダム底面の垂直応力は、岩盤剛性が大きいと上流端に引張が発生しやすくなるが、定着位置やアンカータイプの影響はほとんどない。また、ダム高が大きくなると引張が発生しづらいことなども確認した。

キーワード: PS アンカー, ダム, 耐震補強, 静的 FEM 解析, フルボンド型アンカー

1. はじめに

わが国の重力式コンクリートダムの耐震設計では、河川管理施設等構造令（以下、構造令と呼ぶ）に基づき、設計震度による地震力を静的な水平荷重として考慮する震度法により安定性が評価されている。この安定性評価では、剛体の安定計算により、堤体上流面に引張応力が生じない構造とすることが求められる。震度法で用いる設計震度は 0.1~0.2 程度であり、兵庫県南部地震等の観測記録よりも小さいものの、この設計思想に基づくダムは過去の大地震によって重大な被害を受けていないことから、その耐震設計法に基づくダムは十分な耐震性を有していると考えられている。しかしながら、戦前に建設されたダムには堤体断面が小さく、地震時の安定性に問題を有しているものも存在しており、耐震補強が求められている。

千本ダムは、1918 年に完成した重力式粗石コンクリートダムであり、登録有形文化財に登録されている。設計が古いため堤体断面が小さく、地震時の堤体の安定性に問題を有していることから、耐震対策のための補強工事が計画されている。工法選定に当たっては、

貯水池運用と経済性を主に検討した結果、施工性がよく、工期も短い PS アンカー工法が選定された。また、PS アンカーは堤体天端からの鉛直削孔と孔内へのアンカー設置だけであるため、外観上の改変がほとんどないことも登録有形文化財に指定されているこのダムでは選定の重要な要因となった。しかしながら、国内で施工実績のない PS アンカー工法の採用に当たっては、PS アンカーの維持管理や技術的な問題¹⁾のほか、ダム底面へのプレストレスの導入や、堤体に発生する応力などが課題として挙げられた。そこで、2次元 FEM 解析による PS アンカーの補強効果の確認を行っている²⁾。

本研究では、2次元 FEM 解析を用いて行った千本ダムの PS アンカーによる耐震補強検討事例をもとに、岩盤剛性やアンカーの定着方法の違いによりダム底面に発生する応力がどのように変化するのかを解析的に検討した。また、アンカーの定着部の位置やダム高の違いによる影響についても併せて評価を行った。

¹ダム技術センター 研究第一部 主席研究員

²中電技術コンサルタント株式会社 原子力プロジェクト室 室長

³中電技術コンサルタント株式会社 水力水工部 グループ長

⁴松江市上下水道局 工務部 建設課 主任

2. 補強対策の概要

2.1 千本ダムの概要

千本ダムは、1918年に松江市の上水道の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、堤長109mである。左岸側が越流部、右岸側に取水塔がある(図-1参照)。取水塔は、ダム上流面に半円筒状の構造物が突き出た形となっており、取水塔部の断面が最も大きくなっている。

図-2はダム軸方向の岩級区分図および最終的なアンカー配置を示す。ダム付近の基礎岩盤は、古第三紀の花崗岩を主体としており、部分的に変質帯が認められる。基礎岩盤中には、傾斜が急な変質帯が8条認められ、変質帯は粘土、礫状部、あるいは脆弱な岩を伴い、上下流方向の傾斜はいずれも60~80°程度と急である。

岩級は、C_M級とC_L級を主体とし、中央~左岸側の



図-1 千本ダムの外観(下流面図)

基礎地盤は、C_L~C_M級が主体であり、中央部付近の変質帯の密集部でD~C_L級が広く分布している。右岸側の基礎の岩級はC_M級が主体であり、左岸よりも岩級は良い。堤体コンクリートは、建設後約100年を経過しており、一軸圧縮強度が16~30N/mm²、単位体積重量が20.3~23.2kN/m³であり、一般的な無筋コンクリートの一軸圧縮強度に比べるとやや小さい箇所がある。

2.2 ダムの安定性と補強対策の概要

越流部、非越流部、取水塔部の3断面について構造令に基づく安定検討を実施した。この結果、滑動に対しては、いずれの断面も安全率4以上を確保したものの、転倒に対しては、堤体上流端において非越流部で最大0.104N/mm²、越流部で最大0.108N/mm²、取水塔部で最大0.112N/mm²の引張応力が生じる結果となり、構造令による条件を満足しない結果となった²⁾。

安定性を満足するため、堤体PSアンカーによる補強の検討を行った。アンカーは、堤体の安定上、堤趾部に近いほど有利となることから上流側にできるだけ寄せる位置とし、非越流部、取水塔部は堤体上流面であるダム軸より0.8m下流、越流部はダム軸より0.7m下流に設定した。堤体上流端に引張応力が発生しないような単位幅1m当たりの必要設計アンカー力をモーメントの釣り合いをもとに算定した。この結果、単位幅1m当たりの必要設計アンカー力は、越流部が439.6kN/m、非越流部のうち最大断面の取水塔部が460.0kN/m、その他の非越流部は基礎高に応じて392.4kN/mと255.0kN/m

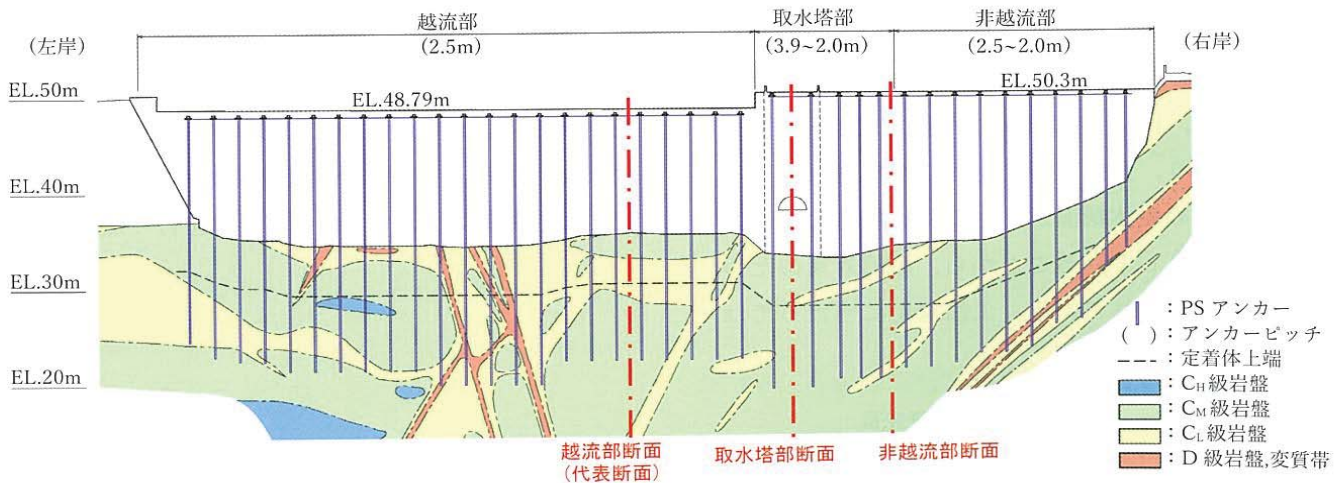


図-2 ダム軸断面の岩級区分図とアンカー配置

(右岸端部)とした。アンカーピッチは、定着体長が10 m 以下³⁾となるように2.5 mを基本とし、取水塔の監査廊や非越流部の一部は3.9~2.0 mとした。これにより1本当たりの設計アンカー力は、越流部1,099 kN/本、取水塔部1,702 kN/本、非越流部1,104~756 kN/本となった。

3. 解析内容

アンカー力は堤体内に分散して伝わるため、ダム底面に発生する応力は、アンカーの位置やダムと地盤の相対的な剛性の違いにより分布が異なる。そこで、アンカーによる圧縮力(プレストレス)が、ダム底面や堤体へ適切に導入されているか2次元静的FEM解析により確認を行った。

検討に当たっては、静的に地震力を作用させた場合のダム底面に発生する応力を対象として、以下の項目について比較および影響検討を行った。

- ① 構造令とFEM解析との比較
- ② 基礎岩盤の岩級(剛性)の影響
- ③ アンカー自由長部の二次グラウトの影響
- ④ 検討断面の違いによる比較
- ⑤ アンカーの定着位置(定着深さ)の影響
- ⑥ ダム高の違いによる影響

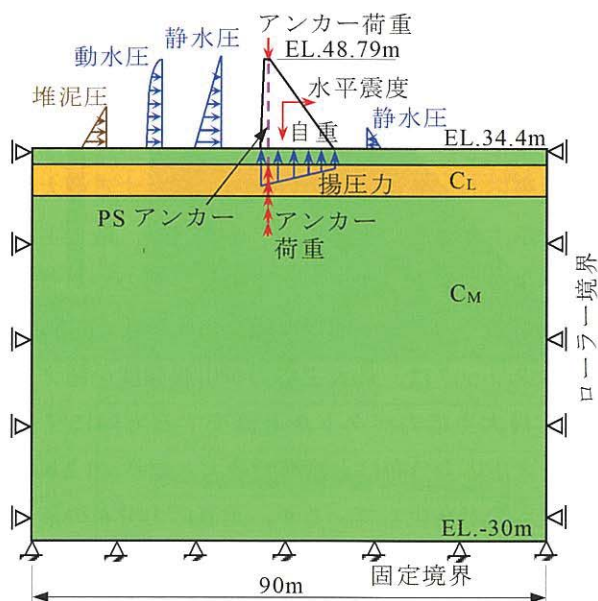


図-3 解析モデルおよび荷重条件(越流部)

4. 解析条件

4.1 解析モデル

補強前に発生する引張応力が大きく、設計アンカー力が大きい図-2に示すダム中央付近の越流部を代表断面として検討を行った。図-3に越流部の解析モデルおよび荷重条件を示す。解析領域は、上下流方向にはダム高の2倍程度、下方にはアンカー定着部先端より越流頂までの長さの2倍程度を確保した。モデルの境界条件は、底面を固定し、側方には自重計算時および常時は鉛直ローラー、地震時は水平ローラーとした。基礎岩盤は、ダム底面にC_M級岩盤が分布するが、層厚5mのC_L級岩盤を挟んでいるため、C_M級とC_L級岩盤が互層となったモデルを基本として検討を行った。ただし、場所によっては底面付近に広範囲にC_M級岩盤が分布する箇所や、C_L級岩盤が分布する箇所があることから、C_L級やC_M級岩盤が一樣に分布する場合についても検討を行い、岩盤剛性の違いによる影響を比較した。また、C_H級岩盤は当ダムの基礎地盤にほとんど存在しないが、極端に基礎岩盤の剛性が大きくなった場合として、C_H級岩盤が一樣に分布する場合についても比較を行った。

ダムおよび岩盤は平面ひずみ要素、アンカー体はトラス要素でモデル化した。アンカーヘッド部と定着部では平面ひずみ要素とトラス要素の節点を共有することで、ダムおよび岩盤とアンカー体が一体となって挙動する。本検討では、アンカー自由長部の二次グラウトの有無による影響を検討するために、二次グラウトを行わないアンボンド型と二次グラウトを行うフルボンド型について比較した。アンボンド型は、自由長部のダムおよび岩盤の節点とアンカー体の節点を独立して設けることで、別々に挙動する。一方、フルボンド型は、両節点を一体化することで、定着部と同様に一体となって挙動する。

設計アンカー力は図-3に示すようにアンカーヘッドおよび定着部に集中荷重および分布荷重として作用させた。アンカーヘッド部(堤頂部)には下向きに集中荷重させ、定着部には上向きに分布荷重を作用させることで、アンカーヘッドと定着部の間に圧縮応力が発生する。

4.2 解析用物性値

ダムおよび基礎岩盤の解析用物性値を表-1に示す。解析用物性値は、千本ダムの試験値や地質が類似している近傍の他ダムの設定値などをもとに設定した。基礎岩盤の剛性の違いによる影響検討の際に用いるC_H級岩盤の弾性係数は、ダム基礎岩盤の一般値のほぼ下限に当たる6,000 N/mm²とするが、単位体積重量やポアソン比などのその他の物性値はC_M級岩盤と同一とした。

4.3 解析ステップと荷重条件

解析は、①初期（自重計算）、②常時（静水圧および堆泥圧作用）、③アンカー緊張時（アンカー荷重作用）、④地震時（水平震度および動水圧作用）の各ステップを追って行う。

水位条件は、ダム上流側は常時満水位 EL.48.79 m、下流側は副ダム天端高 EL.37.9 mとして静水圧および揚圧力を作用させた。堆泥圧は堆泥高を EL.41.16 mとして作用させた。地震時の水平震度は0.12とし、ダム上流面には地震時水位 EL.49.33 mとしてWestergaard式による動水圧を作用させた。

表-1 解析用物性値

| | ダム | C _M 級 | C _L 級 |
|-----------------------------|--------|------------------|------------------|
| 一軸圧縮強度 (N/mm ²) | 22.1 | 126.5 | 24.6 |
| 粘着力 (N/mm ²) | 0.82 | 1.52 | 0.66 |
| 内部摩擦角 (°) | 33 | 40 | 40 |
| 弾性係数 (N/mm ²) | 18,000 | 2,000 | 600 |
| ポアソン比 | 0.26 | 0.23 | 0.26 |
| 単位体積重量 (N/mm ²) | 21.87 | 25.70 | 23.54 |

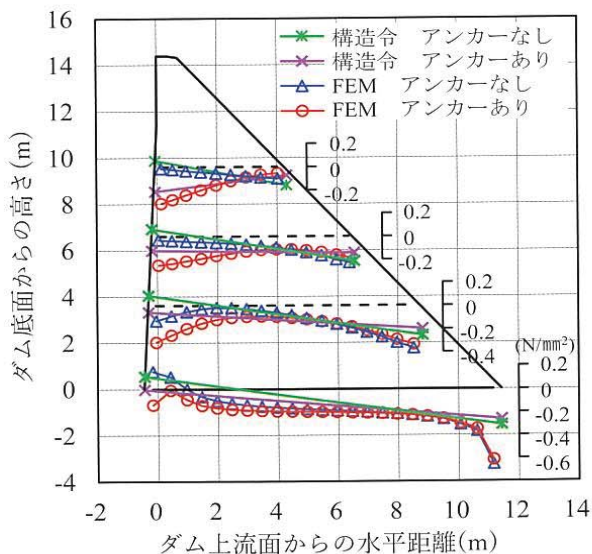


図-4 ダムの特定高さにおける垂直応力分布の比較

アンカー荷重は、設計アンカー力 1,099 kN/本をアンカーピッチ 2.5 m で割った単位幅 1 m 当たりのアンカー力 440 kN/m を、アンカーヘッドには集中荷重として、定着部には分布荷重として作用させた。なお、当該アンカーのような引張型アンカーでは、定着部の付着力が自由長部に近い側で紡錘状に分布することが知られている³⁾。そのため定着部には、上端付近に紡錘状の分布荷重を上向きに作用させた。

5. 解析結果

5.1 構造令と FEM 解析の違い

図-4は、ダム上、中、下段およびダム底面における地震時の構造令による垂直応力分布と FEM 解析による垂直応力分布の比較を示す。ここで、応力は引張を正、圧縮を負としている。FEM 解析による応力分布は、上段ではアンカーの有無によらず構造令に近い直線的な分布となるが、中段以下では直線的な分布とはならない。中段と下段のアンカーを考慮しない FEM 解析の応力分布は、上流端で圧縮力が大きくなり上に凸の分布形状となる。しかしダム底面では、周辺岩盤の影響や応力集中等により下段に比べてダム上流端の圧縮力が大きく低下する。アンカーを考慮した FEM 解析による応力分布は、アンカーを考慮しない場合に比べてダム上流部の圧縮力が大きくなるが、分布形状は考慮しない場合と同様である。

図-5は、ダム底面付近の主応力ベクトル図と最大主応力分布図に、ダム底面の垂直応力と主応力の分布図を並べて示す。ここで、最大主応力は要素に発生する最大引張応力、最小主応力は要素に発生する最大圧縮応力を示す。また、主応力ベクトル図は、最大主応力と最小主応力を直交する矢印で示したものであり、赤矢印は引張応力、青矢印は圧縮応力を示す。堤体に発生するクラックは、最大主応力が引張強度を超えた場合に、最大主応力ベクトルと直交する方向に発生する。最大主応力分布は上流端で最大となり、1.2 N/mm²の引張応力が発生しているが、垂直応力分布の最大値は-0.01 N/mm²で引張となっておらず、上流端部よりも1要素内側で発生している。自重およびアンカー荷重により堤体が沈下する際に、堤体端部で基礎岩盤の連れ込み沈下が生じ、堤体端部や周辺岩盤に引張応力が生

じる。このとき最大主応力ベクトルは、堤体端部付近で水平方向に大きく傾くことから垂直応力は引張とならない。また、垂直応力の最大が堤体上流端より内側で発生していることは、最大主応力の大きさと傾きの関係から結果的に生じたもので、FEM 解析に特有のものである。

構造令では垂直応力が引張とならないことが求められており、本ケースは構造令を満足する結果となっているが、FEM 解析では、最大主応力の傾きから垂直に近いクラックが発生する可能性が考えられたため、最大主応力の評価を行った。本ケースでは、ダム上流端の最大主応力は 1.2 N/mm^2 で、千本ダムの堤体コンクリートの一軸圧縮強度の $1/22$ であり、一般的に圧縮強度の $1/10 \sim 1/13$ である引張強度よりも小さいことからクラックは発生しないものと判断した。

図-6 は、解析ステップ③（アンカー作用時）の垂直応力から解析ステップ②（常時）の垂直応力を差し引いたアンカー荷重のみによる垂直応力分布を示す。FEM 解析による垂直応力分布は、ダム底部付近を除き、おおむね構造令と同様の直線分布となるが、ダム底部の上流端で急激に大きくなっている。これは、剛性基礎の地盤反力が端部で急激に大きくなること⁴⁾と同様である。また、上流側の垂直応力の値は、FEM 解析結果が構造令よりもやや大きな圧縮応力となっていることから、上流端の引張応力に対する評価においては、構

造令がやや保守的に小さく評価される結果となっている。

図-4 に示したアンカーを考慮した場合の構造令と FEM 解析の垂直応力の違いは $0.1 \sim 0.2 \text{ N/mm}^2$ 程度であり、図-6 のアンカー荷重のみによるものよりかなり大きい。図-4 の結果は、常時や地震時の荷重を含んだものであることから、図-4 の構造令と FEM 解析の違いはアンカー荷重以外の影響が大きいことが分かる。また、FEM 解析による垂直応力が端部で大きくなることは、FEM 解析に特有のものであり、基礎岩盤とダム連成させて解析した影響によるものである。

5.2 基礎岩盤の剛性の違いによる影響

ダム中央付近の C_L 級と C_M 級岩盤が互層となっている断面を代表断面に選定したが、中央の左岸寄りでは C_L 級岩盤が分布し、左右岸付近では C_M 級が分布している。そこで、一様な岩級が分布しているものとして、基礎岩盤の岩級（剛性）の違いによりダム底面に発生する応力を比較した。また、現地には分布していないが、岩盤剛性がさらに大きい場合として C_H 級のケースも合わせて検討した。

図-7 は、アンカー設置後の地震時における C_H 級岩盤の主応力ベクトル図と最大主応力分布図に、岩級の違いによるダム底面の垂直応力および最大主応力分布を並べて示す。上流端の最大主応力は、岩盤剛性が大き

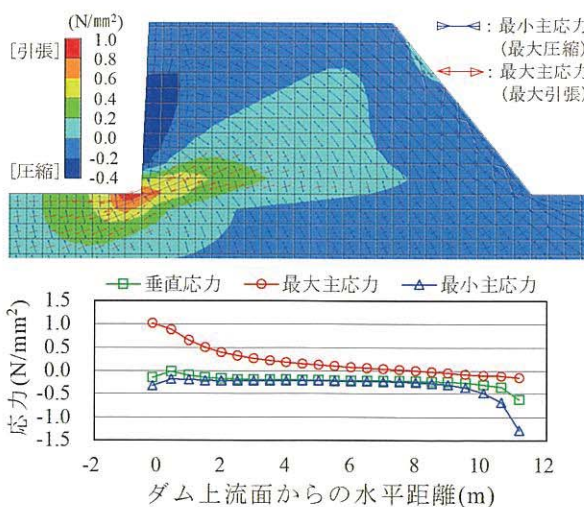


図-5 ダム底面付近の主応力ベクトル図とダム底面の垂直応力と主応力の分布図

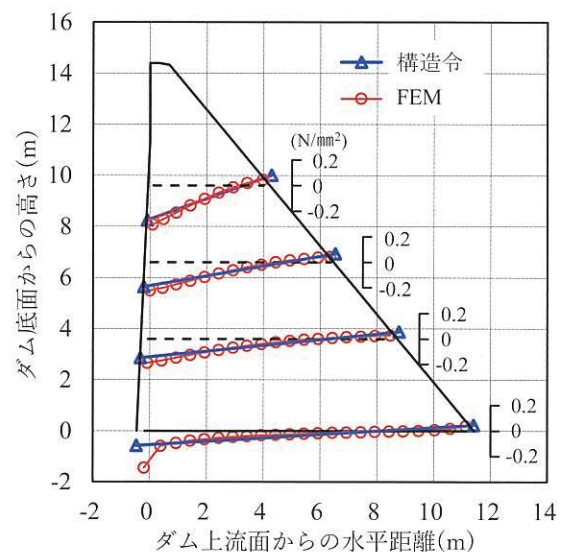


図-6 アンカー荷重のみによりダムに生じる垂直応力の構造令と FEM 解析の比較

いほど小さくなる（引張応力が減少する）傾向がみられる。これは、ダムが沈下する際に、岩盤の連れ込み沈下に伴って堤体を引き留める力が生じるが、岩盤剛性が大きい（岩盤とダムの相対的な剛性差が小さい）ほど撓み性基礎のように挙動するため、堤体端部の最大主応力が小さくなると考えられる。この関係は、撓み性基礎の設置圧分布において、基礎と地盤の剛性差が小さいほど基礎端部の反力が小さくなる現象⁴⁾と同様である。

一方、垂直応力は岩盤剛性が大きいほど大きくなる（圧縮応力が減少する）傾向となり、最大主応力と逆の傾向となる。これは岩盤剛性が大きいほど端部の主応力が立ってくるのが原因であり、主応力の傾きと最大主応力の関係からこのような結果となっている。また、C_H級の垂直応力が1つ内側の要素が最大とならず、端部で最大となっているのも主応力の傾きの関係である。なお、C_H級とした場合、上流端で0.07 N/mm²の引張応力が発生する。

図-8は基礎岩盤を互層および一様にC_M級とした場合のアンカー荷重のみによる垂直応力分布図と主応力ベクトル図を示す。なお、図-6のFEM解析による分布図

は、図-8(a)の分布図を特定高さでグラフ化したものである。堤体内の垂直応力分布は、アンカーヘッドに近いほど圧縮力が大きく、下側に向かって分散し、同一標高で見ると上流側ほど大きな分布形状となる。岩級の影響についてみると、ダム底面付近の上下流端で若干増減するほかはおおむね同一であり、岩級の影響はほとんどない。基礎岩盤では、定着部周辺に引張応力が発生しており、互層の場合には剛性の大きいC_M級に応力が集中し、最大引張応力は0.05 N/mm²となっている。これにアンカーピッチ2.5 mを掛けた0.13 N/mm²の引張応力がアンカー緊張により定着部周辺に発生すると考えられる。しかし、自重による応力が0.31 N/mm²であるため定着部周辺に引張応力は発生しない。一様にC_M級岩盤とした場合は応力集中がなく、最大引張応力は0.03 N/mm²程度になっており互層岩盤よりも小さい。この定着部周辺の引張応力は、岩級によらずおおむね同一である。このことは、アンカー荷重や荷重の分布形状が同一の場合、岩級が一樣であれば応力集中が生じないため、定着部周辺には同様の引張応力が発生することを示している。

5.3 地震時にアンカーに発生する軸力

国内のアンカーは、再緊張が可能なことや緊張力の計測が可能等の理由から自由長部をグラウトしないア

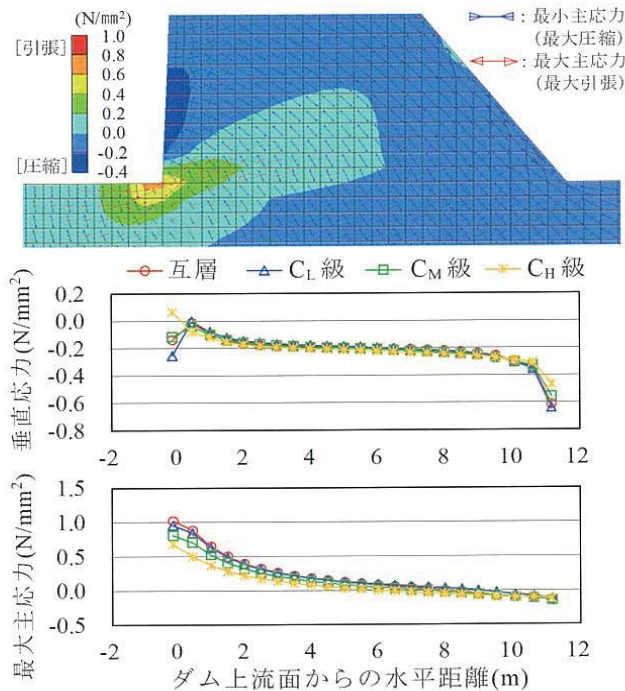


図-7 岩級の違いによる地震時のダム底面の応力分布の比較とC_H級岩盤の主応力ベクトル図

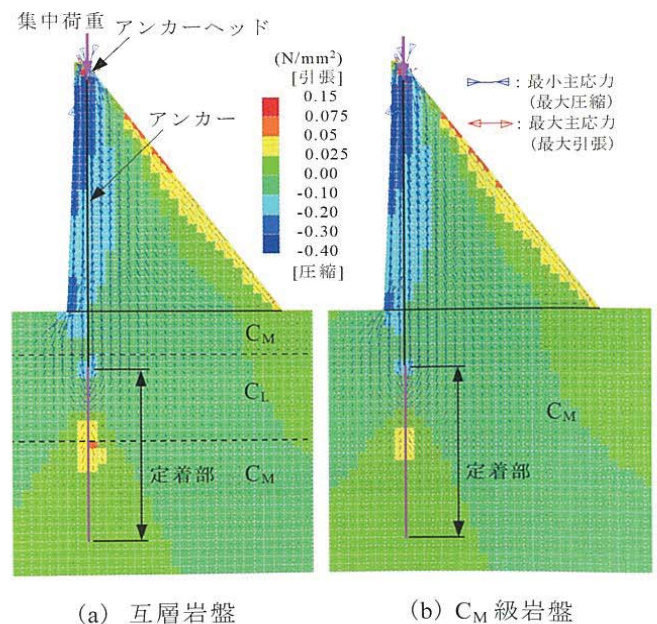


図-8 アンカー荷重のみによる垂直応力分布図と主応力ベクトル図の岩盤の違いによる比較

ンボンド型が主流である。一方、アンカー緊張後に自由長部を二次グラウトにより拘束するフルボンド型は、防錆に優れ、万が一アンカーが破断しても影響を局所的にとどめることができる等のリスク管理上の優れた面がある⁵⁾。千本ダムでは、米国の中小ダムを管轄する連邦エネルギー庁がフルボンド型を推奨⁵⁾していることや、耐震補強であるといったリスク管理の観点からフルボンド型を採用した。ここでは、地震時にアンカーに生じる軸力の常時からの増分（地震時軸力増分）について、自由長部の二次グラウトの有無や岩盤剛性の違いによる影響を比較した。

図-9 は岩盤剛性と自由長部の定着の違いによるアンカーの地震時軸力増分の比較を示す。アンボンド型もフルボンド型も定着部の軸力増分はおおむね同様であるが、自由長部は大きく異なる。アンボンド型の自由長部の軸力増分は、堤頂部のアンカーヘッドと定着部との相対変位により生じるため、定着部よりも小さくなる。ここで、互層モデルの相対変位は、水平方向に2.40 mm、鉛直方向に0.19 mmで、軸力増分は2.4 kNである。一方、フルボンド型は、剛性が小さく、大きなひずみが発生する岩盤部で地震時軸力増分が大きくなり、岩盤剛性が均一な場合にはダム底面付近の岩盤部

で最大となり、岩盤剛性が小さいほど大きな軸力が発生する。しかし、最も剛性が小さい C_L 級岩盤でも最大軸力増分は 21 kN であり、これは設計アンカー力 1,099 kN の 2% と僅かである。また、フルボンド型とした場合、堤体部の軸力増分は上部に向かって小さくなっており、グラウトされた自由長部で分散して荷重を負担していることが分かる。このようにフルボンド型は頭部定着部で全荷重を受け持たないことから、アンカーの破断等に対しても被害を局所的にとどめることができ、安全性が高くなると考えられる。

5.4 検討断面の違いによる発生応力の比較

構造令に基づく安定性検討では、非越流部は自重が大きいため地震時に発生する引張応力は越流部よりも小さくなっていった。しかしながら FEM 解析では、岩盤の影響により構造令とは異なる応力分布となることから、非越流部について発生する応力の確認を行った。非越流部は、図-2 に示す底面高の低い取水塔右岸側を代表断面とする。越流部はダム高 14.39 m であるが、非越流部はダム高 17.3 m で堤頂に幅 2.1 m の通路がある。また、基礎にはおおむね C_M 級岩盤が分布しているため、C_M 級岩盤が一様に分布しているものとしてモデル化を行った。

図-10 は越流部および非越流部の地震時における主応力ベクトル図と垂直応力分布図を示す。ダム底面付近では、圧縮応力が小さいオレンジ色の領域が、底面上流端から斜め前方 45° 方向に伸びていることから、地

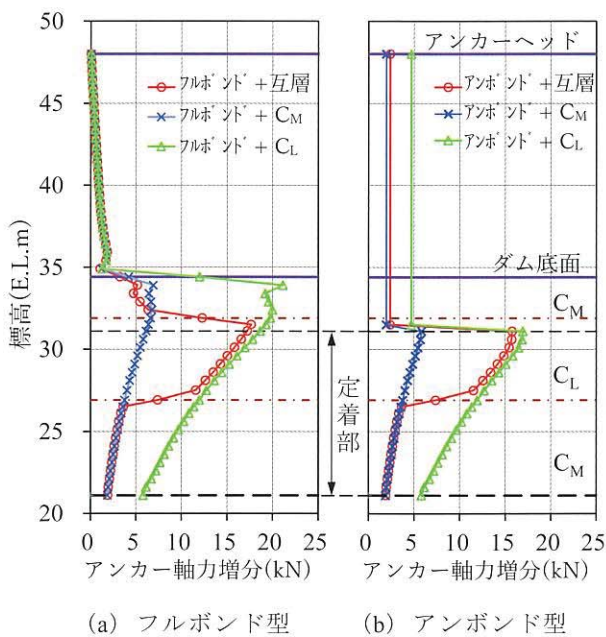


図-9 岩盤剛性と自由長部の定着の違いによるアンカーの地震時軸力増分の比較（岩級区分線は互層地盤のものを示す）

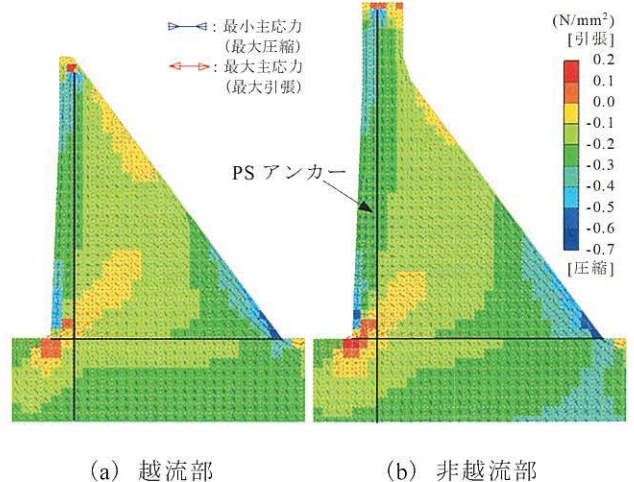


図-10 検討断面の違いによる地震時の主応力ベクトル図と垂直応力分布図の比較

震力の影響によりこの方向に応力低下が発生していることが分かる。このため、図-4 に示した FEM 解析による垂直応力が上に凸となっている。この領域は越流部の方が長く伸びているが、ダム上流端付近の引張領域および最大引張応力は非越流部の方が大きく、構造令と異なる結果となっている。また、非越流部の垂直応力は、ダム底面で 0.02 N/mm^2 の僅かな引張応力が発生する。

6. アンカーの締め付け効果に関する考察

FEM 解析によるダム底面の垂直応力分布は、構造令の安定計算で仮定している三角形もしくは台形分布とやや異なることや、基礎地盤の剛性が小さいほど上流端の引張応力は小さくなることを示した。しかし、地震時の応力は、常時と地震時荷重の影響を加味したものとなっており、アンカー荷重のみによる影響を評価したものではない。そこで、図-6 ではアンカー荷重のみによる垂直応力分布を取り出して構造令と FEM 解析を比較し、図-8 では岩盤の剛性の違いによる堤体内の応力の広がりや定着部の応力集中等を比較した。ここでは、本研究の目的であるアンカー荷重による影響を検討するために、最も引張応力が大きくなるダム底面に着目して、岩盤の剛性、定着位置、およびダム高の違いにより、アンカー荷重のみによる応力分布がどのように異なるかを比較した。

6.1 ダム底面の垂直応力

図-11 はアンカー荷重のみによりダム底面に発生する垂直応力分布および最大主応力の岩盤剛性の違いによる比較を示す。図-11(a) に示すように、岩盤剛性が小さいほど上流端の垂直応力は小さく（圧縮力が大きく）なる傾向があるが、最大主応力（最大引張応力）は逆の傾向となっている。最大主応力は、岩級の剛性が低いとダムの沈下に伴う連れ込み沈下が大きくなり、これにより水平方向の引張応力が大きくなるのが原因である。また、ダム上流端の垂直応力は、図-7 で示した C_H 級と C_L 級の垂直応力の差は 0.3 N/mm^2 程度であったが、アンカー荷重のみの差は図-11(a) に示すように 0.05 N/mm^2 程度と僅かである。このことから、自重や地震荷重等により発生する応力が岩盤剛性の違いにより大きく異なるが、岩級の違いによるアンカー締め付

け効果の影響は僅かであることが分かった。

6.2 定着部位置の違いによる影響

千本ダムでは、アンカーの締め付け力が荷重分散することなく、ダム底面上流部に効率的に作用するためには、定着部をできる限りダム底面に近い位置に配置したほうが良いと考え、定着長上端をダム底面から 3.5 m の位置に設定した。ここでは、この効果を確認するため、定着長の位置の違いによりダム底面に発生する垂直応力がどのように変化するかを検討した。検討に当たっては、基礎地盤は C_M 級として、定着長上端をダム底面より 3 m 、 5 m 、 7.5 m 、 10 m と変えて比較を行った。

図-12 にアンカー荷重のみによりダム底面に発生する垂直応力分布および最大主応力の定着位置の違いによる比較を示す。図-12(a) に見られるように、垂直応力はほぼ同一であり、定着位置の違いによる影響は見られない。一方、最大主応力は前述のようにおおむね水平方向に生じており、定着位置の違いにより若干変動し、定着位置が浅いほど上流側に引張応力が発生しやすくなる傾向となる。しかしながら、その差は 0.02 N/mm^2 程度であり、図-7 に示した地震時にダム上流部に発生

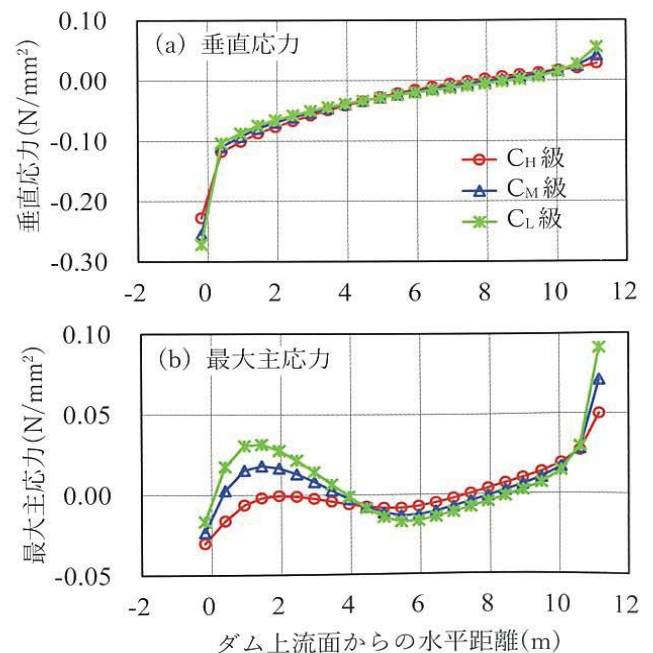


図-11 アンカー荷重のみによりダム底面に発生する垂直応力分布および最大主応力の岩級の違いによる影響

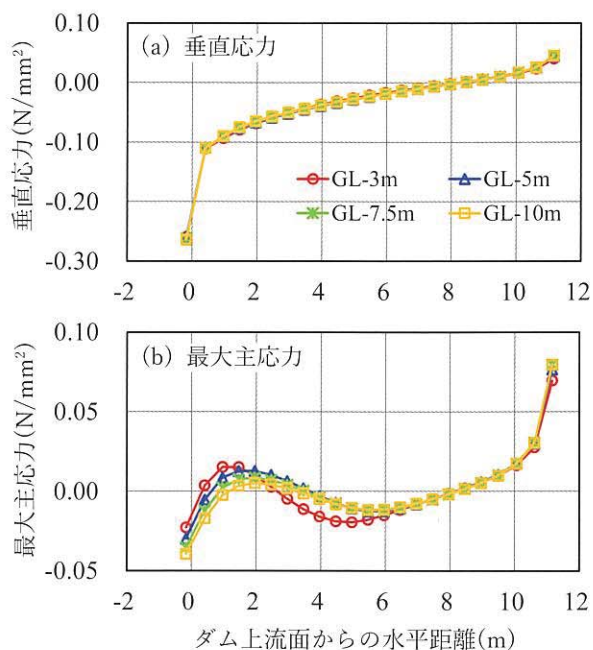


図-12 アンカー荷重のみによりダム底面に発生する垂直応力分布および最大主応力の定着部位置の違いによる影響

している最大主応力 $0.6\sim 1.0\text{ N/mm}^2$ に比べると非常に小さい。これらのことから、定着部位置の違いによる影響はほとんどないものと考えられる。

6.3 ダム高の違いによる影響

ダム底面に発生する垂直応力や最大主応力は岩盤剛性により異なり、ダムが地盤とともに沈下する程度によって引張応力が異なると考えられる。そこで、ダムの幾何学的形状は千本ダムと同一とし、アンカーも千本ダムと相似な位置に配置して、ダム高を 30 m および 50 m とした場合に、アンカー荷重のみによりダム底面に発生する垂直応力分布および最大主応力を比較した。なお、アンカー力はダムの断面積に比例するものとして、ダム高 14.39 m の千本ダムで 440 kN/m であったものを、ダム高 30 m では $1,912\text{ kN/m}$ 、ダム高 50 m では $5,312\text{ kN/m}$ と仮定した。発生応力の比較に当たっては、ダム高が大きいほど応力は大きくなるため応力をダム底面幅で基準化したものを用いた。

図-13 にアンカー荷重のみによりダム底面に発生する基準化した垂直応力分布および最大主応力の定着位置の違いによる比較を示す。図-13(a)に見られるように、ダム高が大きくなると、ダム底面の垂直応力は上流端付近で圧縮力が大きくなる傾向がみられるが、その他

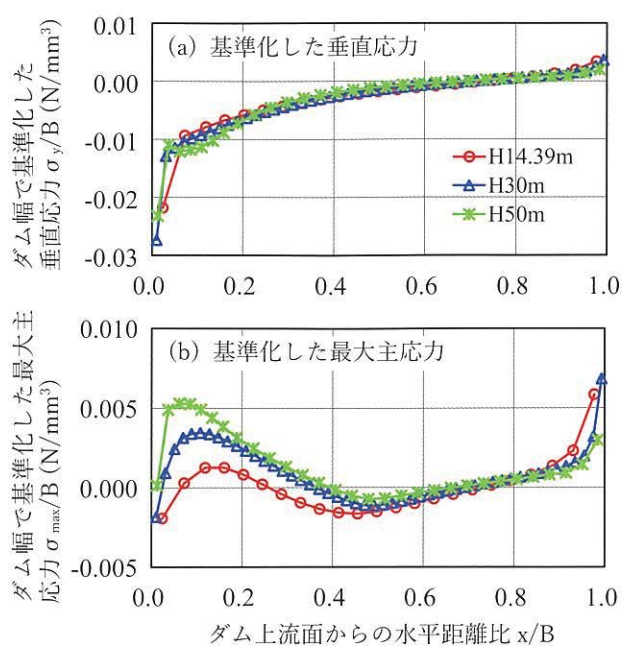


図-13 アンカー荷重のみによりダム底面に発生する垂直応力分布および最大主応力のダム高の違いによる影響

の部分では大きな違いは見られない。一方、水平方向に発生する最大主応力は、ダム高が大きくなると、図-13(b)のようにダム中央部から上流側で大きくなるが、下流端付近で逆に小さくなる。

7. おわりに

構造令に基づく地震時安定性を満足するために、千本ダムで実施されている PS アンカーによる耐震補強工法の効果を 2 次元静的 FEM 解析により評価するとともに、基礎岩盤の剛性やダム高などの条件が異なった場合の影響についても評価を行った。これにより得られた知見を以下に示す。

- 1) FEM 解析による垂直応力分布は、ダム上部では構造令の分布と同様となるが、下部では基礎岩盤の影響により上流端にやや応力が集中した結果となる。このため、ダム底部における上流端の垂直応力は、構造令よりもやや引張応力が小さくなる。
- 2) FEM 解析では、ダム底面の付近で垂直に近い角度のクラックが発生する方向の最大引張応力が発生する。
- 3) 地震時に発生するアンカー軸力増分は、設計アンカー力の数%程度と僅かであり、最大アンカー軸力増

分は定着長部の上端で発生する。

- 4) アンボンド型とフルボンド型の地震時に定着部で発生するアンカー軸力増分はほぼ同一であるが、フルボンド型は自由長部で分散して荷重を負担しており、アンカーの破断等に対しても安全性が高い。
- 5) FEM 解析では、堤体と基礎岩盤との相対的な剛性差の影響によりダム端部の応力分布が異なるため、ダム底面の垂直応力は、岩盤の剛性が大きくなると引張応力が発生しやすくなる。
- 6) アンカー締め付けにより発生するダム底面の垂直応力は、岩盤の剛性が大きくなると小さくなるが、定着位置が深くなっても変わらない。
- 7) アンカー緊張により定着長の周辺岩盤に発生する引張応力は、岩級境界があると剛性の大きい側の岩盤にやや集中するが、均一な場合には岩級によらずおむね同様である。ただし、自重があるため岩盤には引張が発生するほどの応力とはならない。

- 8) ダム高が大きくなると、ダム底面の垂直応力は圧縮側に増加するが、水平方向に発生する最大引張応力は、引張側に増加する。

参考文献

- 1) 川崎秀明, 木戸俊朗, 大町達夫: ダム用アンカー技術の現状および海外事例, *ダム工学*, 17(4), 282-294, 2007
- 2) 川崎秀明, 石藤慎吾, 福本英生: 千本ダムにおける堤体 PS アンカーによる耐震補強の設計, *大ダム*, No.248, 90-96, 2019
- 3) 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準, 同解説 (JGS4101-2000), *地盤工学会*, pp.95-121, 2000
- 4) 河野伊一郎, 八木則男, 吉国 洋: *土の力学*, 技報堂出版, pp.86-89, 1990
- 5) ダム技術センター: アンカー工法におけるダム堤体の補強方法に関する研究, No.36, 3-35, 2010

(2020年4月24日 受理)

In the Senbon Dam, the PS anchors have been reinforced to satisfy the stability of seismic resistance against static seismic forces. Based on the case study of reinforcement by PS anchors in Senbon Dam using FEM analysis, the effects of rock stiffness, anchoring method, fixing position, and dam height were analyzed on the stresses that occur in the dam. As a result, the normal stress at the bottom of the dam tends to be tensile at the upstream end if the rock stiffness is large, but there is little influence on the fixing position or anchor type. It was also confirmed that the large dam height would make it difficult to cause tension.

Key words : PS anchor, dam, seismic reinforcement, static FEM analysis, fully bonded anchor