

4.1 ダム用 PS アンカーの計測・点検管理手法の標準化に関する研究

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：ダム用 PS アンカーの計測・点検管理手法の標準化に関する研究

研究者：川崎秀明、梅園拓磨*

【要約】

ダム用 PS アンカーとは、堤体、基礎岩盤の安定のために用いられる構造物固定用と基礎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ものとして、高い品質の材料、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、海外では既に非常に多くの堤体補強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）に大いに期待されるが、本格的な施工としては昨年初めてダム用 PS アンカーによる堤体耐震補強が始まったばかりである。

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継続しており、「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」¹⁾を作成中であるが、本稿はその一環で維持管理について研究を行い、標準案として提案するものである。

【キーワード】

アンカー、堤体 PS アンカー、アンカー緊張力、健全度評価、見かけ剛性

【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2重化が始まった1989年頃から急速に増えており、1990年以降、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の総数は470にもなる²⁾。

一方国内では、アンカー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のアンカーに対する設計・施工・計測・点検管理手法は確立されておらず、堤体に関わる導入実績は限られている。この点、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 アンカーの機能としては、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 アンカーは堤体構造物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 アンカーの国内適用のための研究を10年前に行い、技術資料¹⁾によって設計・施工・維持管理試案を提案した。

令和元年度からの本研究では、設計手法に関して検討を進めてきた。

【令和2年度の研究内容】

ダム用 PS アンカーは、緊張力によって堤体や基礎岩盤のアンカー対象物の安定性を確保するものである。このため、ダム用 PS アンカーの緊張力と耐久性が長期的に有効であることを確認することが要求される。

令和2年度の本研究では、ダム用 PS アンカーの計測・点検管理手法に関して検討を行った。

《提案1》ダム用 PS アンカーの計測・点検管理 (1) 維持管理の対象期間

ダム用 PS アンカーの計測監視と点検をアンカー施工時だけでなくアンカー対象物（堤体、基礎岩盤）の供用期間に対応して長期的に行うことで、ダム用 PS アンカーの健全性を確認するものとする。

①施工時の計測・点検

アンカー施工時においては、施工中の各種試験結果（コア採取、削孔データ、基本調査試験、品質確認試験、水圧試験等）も参考に緊張力等の計測を行う。また、漏水、ひび割れ、ずれ・変形等の表面に現れる異常については、目視主体の点検によって確認する。さらに、アンカー対象物である堤体や基礎岩盤の計測結果（漏水、揚圧力、変形、変位、地下水位等）も参考にする

②供用期間の計測・点検

供用期間においては、計測と点検と補修によってアンカー対象物を含む適切な安全管理を行う。

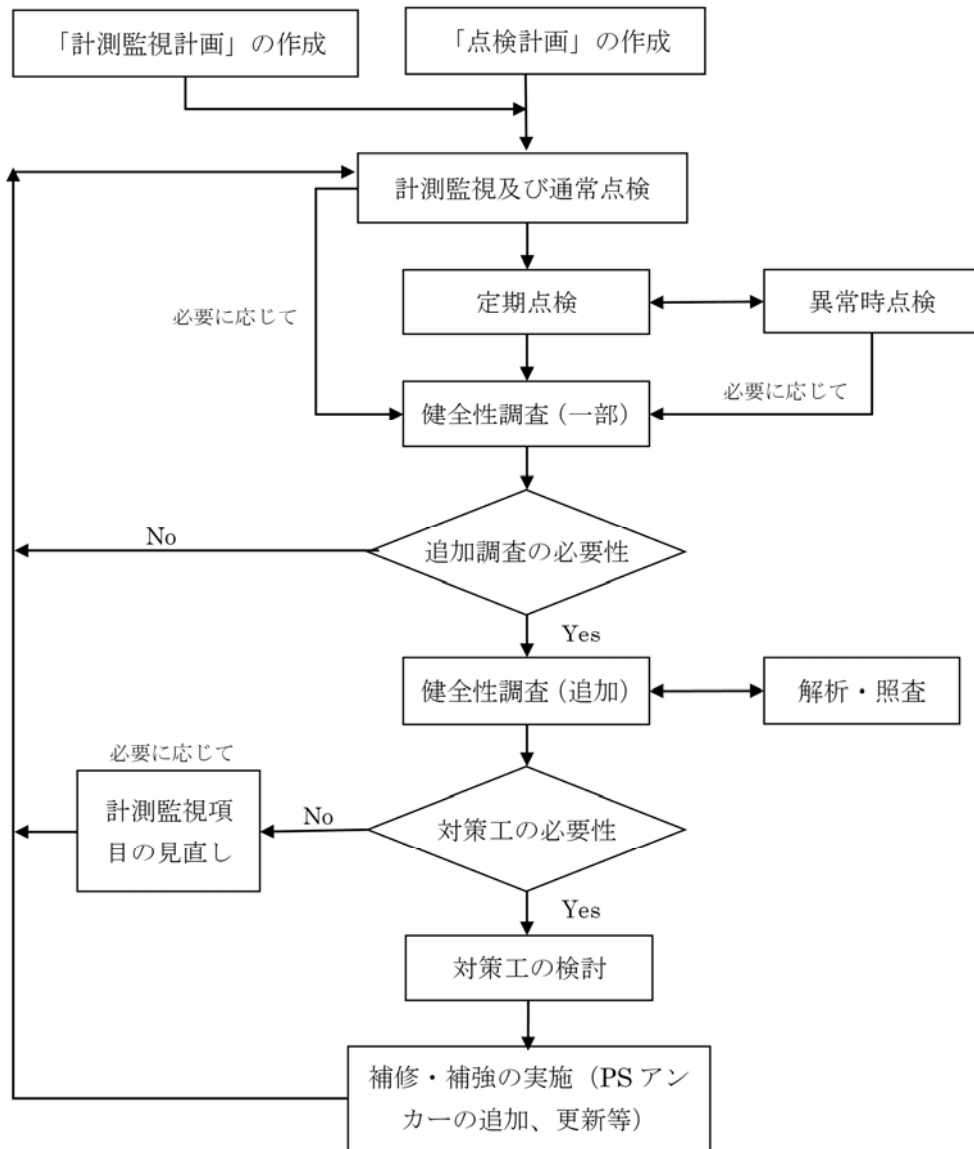


図-1 ダム用 PS アンカーの維持管理フロー

即ち、計測や点検の結果からアンカー健全性を評価し、その結果、異常のある場合は速やかに対応策を検討し、観測機器設置、追加アンカー等の迅速な措置を行う。

点検は、日常ならびにアンカーの状況把握のための巡視・点検、アンカーの機能を保全するための整備や、これらの維持管理の記録を行う。

点検については、基本的に「ダムにおけるアンカーに関する点検マニュアル（案）」³⁾に従って行う。

(2) ダム用 PS アンカーの計測・点検管理

ダム用 PS アンカーの健全性とアンカー対象物である堤体の基礎岩盤に与える緊張力の影響を長期的に把握するため、計測と点検によって施工時から状態を確認しておく。また、リスク管理対応も含めた補修方針を定めておく。そのため、計測監視計画、点検計画、補修方針からなる維持管理計画を作成し

ておくことが望ましい。維持管理フローを図-1 に示す。計測と点検によって健全性を評価し、その結果に応じて補修（場合によっては補強）を行うことが基本である。

(3) 計測監視計画

ダム用 PS アンカーの施工による堤体や基礎岩盤への影響の確認、アンカー自体の健全性確認等のため、施工期間及び供用期間の計測監視計画を作成する。監視期間は、計測の必要性、施工期間、アンカー対象物（堤体、基礎岩盤等）の供用期間に応じて設定する。

① 計測項目

ダム用 PS アンカーに関する計測項目として、以下のものがある。この中で、アンカー緊張力の計測は基本的に必須であるが、その他については、必要に応じて実施すべき計測項目である。

- a) アンカー緊張力
 - 施工時：適切なアンカー緊張力の導入確認
 - 供用時：適切な緊張状態の保持確認
- b) アンカー対象物(堤体、基礎岩盤等)の間隙水圧
 - 施工時：アンカー孔周辺の間隙水圧、揚圧力、逸水性、止水等への影響確認
 - 供用時：アンカーの設計条件の保持確認
- c) アンカー対象物の変位・変形
 - 施工時：アンカー設置による堤体や基礎岩盤の変位への影響確認
 - 供用時：地震や貯水変動による影響確認
- d) アンカー対象物内部のひずみ
 - 施工時：アンカー孔周辺の堤体や基礎岩盤における内部応力への影響確認
 - 供用時：地震や貯水変動による影響確認

②計測機器の配置

計測機器は、計測の重要度、アンカー配置とのバランス、地下水位、止水ライン、アンカー力の変化部、堤体形状、地形・地質等の状況を踏まえて、適切に配置する。

緊張力を計測する機器の配置は、表-1の「ダムにおけるアンカーに関する点検マニュアル(案)」³⁾、「グラウンドアンカー維持管理マニュアル」⁴⁾に示されているリフトオフ試験、残存引張力モニタリングなどを参考に計画するのが望ましい。

③計測機器の計測期間

緊張力等の維持管理上も重要な項目に対しては、施工期間だけでなく、長期の供用期間に対応して計測する必要がある。計測期間に対して、計測機器の耐用年数が短い場合は、交換が可能な構造とするか再設置前提の計画とするのが望ましい。なお、アンカー周辺の計測については、アンカー施工前のある一定期間から計測することが望ましい。

④計測結果の整理及び分析

アンカーの計測結果は、逐次収集するとともに、点検時に合せて定期的に整理し、アンカーの健全性とアンカー対象物(堤体、基礎岩盤等)の安定性について分析を行い、評価する必要がある。また、アンカー対象物の安全管理の計測データ(堤体漏水量、

揚圧力、変位、地下水位等)と合わせて整理する必要がある。

《提案2》各種計測・点検

(1) アンカー緊張力の計測

施工時のアンカー緊張力の適切な導入及びその後の緊張力の状態をアンカー対象物の供用期間において把握することは、アンカーの緊張力管理の基本である。

計測の代表孔は表-1で定めた孔とする。計測機器の異常またはアンカー対象物の変位が見られた時には、それらの近傍において観測用アンカーまたは追加アンカーを設置して緊張力を計測するのが望ましい。

①有効緊張力の定義

クリープやその他長期ロス等を考慮して、長期的な有効緊張力が設計アンカー力以上となるような有効緊張力を設定する。

①-1 アンボンド方式のアンカー

ダム用PSアンカーのうち、アンボンド方式のアンカー緊張力は、堤体や岩盤などのクリープ、その他長期ロス等によって時間の経過とともに低下する。この定着後に経時変化をしたアンカー荷重を有効緊張力と呼ぶ。ダム用PSアンカーでは上記の要因および定着時のセットロスによる緊張力の低下を考慮して、常時の有効緊張力が設計アンカー力より高くなるように緊張力を設定する。

有効緊張力は定着時緊張力を初期値とする経時変化で与えられるが、供用期間中に有効緊張力が設計アンカー力 P_d を下回らないように下記2点に留意して決定する。

- ・初期緊張力 P_i で緊張したアンカーは、定着具のセットロス(滑り、戻り)によって定着時には、定着時緊張力 P_t に減少し、供用期間中も有効緊張力 P_e は増減する。
- ・初期緊張力 P_i は、許容荷重を上回ってはならない。

表-1 リフトオフ試験数の目安³⁾⁴⁾

マニュアル	機能	補強対象物	アンカーの本数
ダムにおけるアンカーに関する点検マニュアル(案)	堤体 PS アンカー	堤体	全アンカー数の 15%以上
	岩盤 PS アンカー	堤体周辺岩盤	
	PC アンカー	ゲート固定部	
グラウンドアンカー維持管理マニュアル	グラウンドアンカー	貯水池土質斜面 (地すべり対策等)	全アンカー数が 50 孔 以下の場合 10%以上

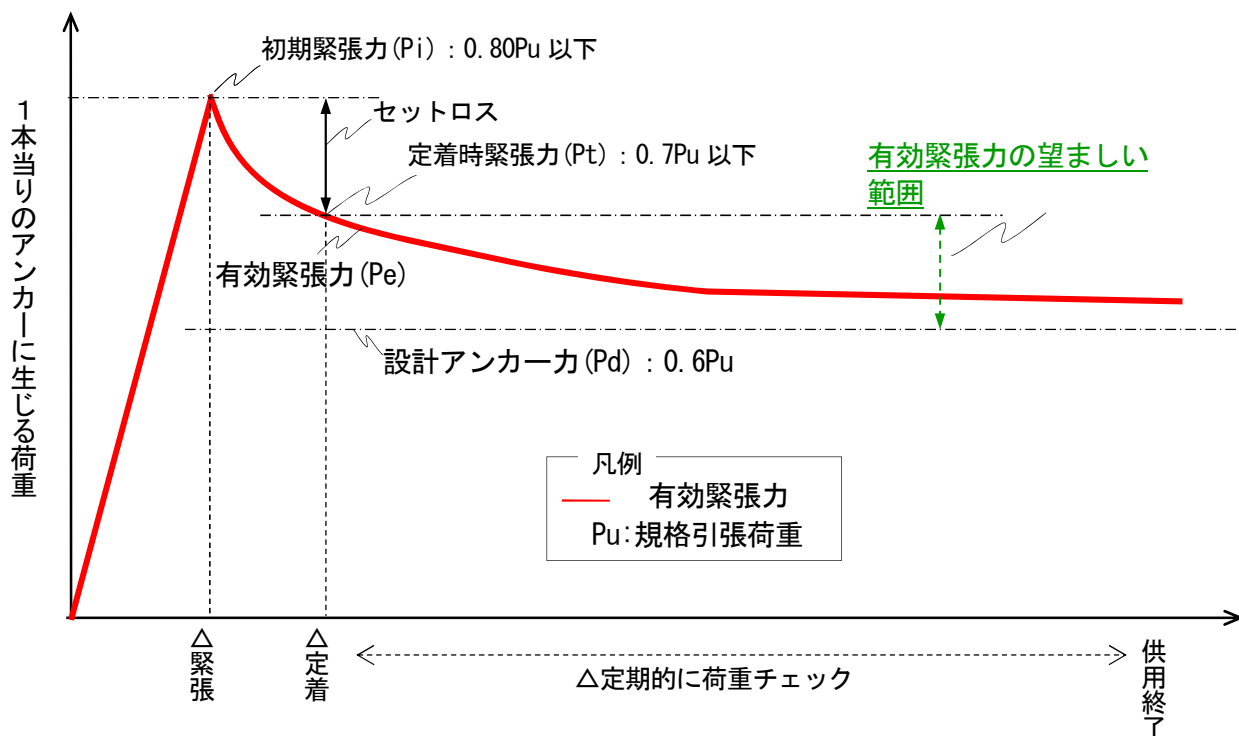


図-2 ダム用 PS アンカー1 本当りに作用する有効緊張力の経時変化

表-2 アンカータイプ別アンカー緊張力計測方法

アンカータイプ	計測方法	注意点
アンボンド アンカー	全荷重対応の軸力計による計測（最も直接的な方法だが計測荷重に限度がある）	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。
	PC 鋼より線の数本に取りつけて部分的な軸力を計測する方法。	計測する PC 鋼より線に偏りがないように注意する必要がある。
	定期的なリフトオフ試験による有効緊張力の確認（数本ずつ測る方法もある）	斜面の場合は可搬式のジャッキに限られる。PC 鋼材を痛めやすいので、何度も行うのは避けるべき。
フルボンド アンカー	シース内に鋼より線を入れたストランド設置型軸力計測装置*による計測	計器ごとに本設アンカーの緊張力に換算する必要がある。

*：このようなストランド設置型軸力計測装置を軸力計測ストランドと呼んでいる。

ダム用 PS アンカー1 本当りに生じる緊張力の概念図を図-2 に示す。数式で表すと以下となる。

- a) 初期緊張力 $P_i =$ 定着時緊張力 P_t
 $+ \text{セットロス} \leq \text{許容荷重}$
- b) 定着時緊張力 $P_t \geq$ 設計アンカー力 P_d
 $+ \text{クリープ} + \text{その他長期ロス}$
- c) 有効緊張力 $P_e \geq$ 設計アンカー力 P_d

①-2 フルボンド方式のアンカー

ダム用 PS アンカーで基本的に採用が多いフルボンドタイプの場合は、設置直後に緊張力が全長に固定されるので、有効緊張力の変動は基本的に生じにくい。長期的には劣化や岩盤クリープ等によって緊張力が増減する可能性がある。このため、長期的に計測可能にしておく。

②アンカータイプ別の緊張力計測方法

緊張力の計測方法は、表-2 のようにアンカータイプによって異なる。

アンボンドアンカーの場合は、 tendon 頭部に設置された軸力計（荷重計）によって計測を行うのが望ましい。

フルボンドアンカーの場合は、アンカー内にシースを設置し、シース内に鋼より線を入れて、自由長を持たせたストランドの頭部に軸力計（荷重計）を設置して計測を行うのが望ましい。

③設置時の留意点

軸力計測機器の設置にあたっては、機械的衝撃を与えないことに注意するとともに設置後のアンカー頭部を早期にキャップで保護をするといったことに留意する。

表-3 ダム用 PS アンカーの点検区分、頻度と点検方法

区分	頻度	対象	方法
基礎調査	点検計画作成時	アンカー維持管理に必要なデータ(PS アンカー、アンカー対象物等の設計図書、変状履歴、施工記録、維持管理に関する記録、施工時からの計測記録、周辺地形に関する資料など)	・収集した左記情報の整理・確認(できる限り電子データで保存) ・計測データ整理・確認
通常点検	施工時は1日に1回程度 管理以降は1,2週間に1回程度	・巡視等日常的な管理において、確認できる範囲にあるアンカー ・必要と判断された場合は健全性調査の一部を実施	・目視点検(近接が難しい場合には、遠方より状況確認) ・計測データの確認
定期点検	施工完了後3年までは1年に1回程度、3年以後ダムの定期点検3~5年に1回程度	「通常点検」において確認が困難なアンカーに対し重点的に実施 ・健全性調査の一部組み込み	・目視点検(基本的に全数を近接確認) ・計測データの経時的変化の確認
異常時点検	豪雨または地震等の発生時の都度	既設の点検ルートにて確認できる範囲にあるアンカー ・必要と判断された場合は健全性調査の一部を実施	・目視点検(近接が難しい場合には、遠方より状況確認) ・計測データの確認
健全性調査	何らかの異常が認められ、より詳細な調査が必要な場合	健全性調査が必要と判断された全アンカーとその隣接アンカー、代表的なアンカー	ダムにおけるアンカーに関する点検マニュアル(案) ³⁾ 、グラウンドアンカー維持管理マニュアル ⁴⁾ を参照

(2) 間隙水圧、変形、ひずみ等の計測

変位、ひずみ、間隙水圧等については、各施工現場の計測監視計画に従って、計測を行う必要がある。堤体観測の項目と重複する場合は、それを参考にすることが望ましい。

(3) ダム用 PS アンカーの点検・調査

ダム用 PS アンカーの施工による堤体や基礎岩盤への影響の確認、アンカー自体の健全性の確認等のため、施工時及び供用時の点検計画を作成する(表-3 参照)。

点検にあたっては、「基礎調査」をもとに「通常点検、定期点検、異常時点検」について点検計画を作成したうえで各点検を実施する。

点検により詳細な調査が必要と判断された場合には、対象となるアンカーおよびその周囲において「健全性調査」を実施し、詳細にアンカーの状態の確認を行うものとする。

基礎調査、各種点検、健全性調査の詳細については、『ダムにおけるアンカーに関する点検マニュアル(案)³⁾』及び『グラウンドアンカー維持管理マニュアル⁴⁾』が参考となる。

なお、ダム用 PS アンカーは周辺地盤や堤体内に埋設されているが、不可視部においても適切な頻度で点検を実施し、状態を把握しておくことが望ましい。

《提案 3》ダム用 PS アンカーの健全度評価

グラウンドアンカーの点検時における健全度評価は、『グラウンドアンカー維持管理マニュアル⁴⁾』等において、有効緊張力(残存引張力)による判断を基本

にして、参考的に「設計 $\tan \theta$ 」(荷重変位線の傾きである EA/Lt =弾性係数×断面積/長さ/テンドンの引張長さ)による判断が記されている。

ダム用 PS アンカーの健全度評価においても、基本的に有効緊張力と設計 $\tan \theta$ を採用するが、ソイルアンカー主体のグラウンドアンカーとは異なるロックアンカーとしての特性を考慮して、設計 $\tan \theta$ を重要な指標と考えて「見かけ剛性」と読み替えて取り扱うこととする。

(1) 有効緊張力による健全度評価

アンボンドアンカーの場合は、リフトオフ試験時で得られるリフトオフ荷重を有効緊張力とするが、PC 鋼材の劣化が進むと再緊張によってアンカーに損傷を与えることがあるので再緊張の回数には限度がある。

フルボンドアンカーの場合は、リフトオフ試験が実施出来ないので、軸力計測ストランド等による計測値を有効緊張力に換算して用いる。

ダム用 PS アンカーでは、令和元年度研究で提案した規格引張荷重 P_u を用いて T_{Pu} (P_u 相当のアンカー力、 $T_{Pu}=P_u \times PC$ 鋼材の本数) に対する有効緊張力の残存比で PC 鋼材の健全性を判定する。各段階の目安値はグラウンドアンカーの目安値を置き換えた図-3、表-4 で評価することとする。

目安値自体は、アンカー対象物の重要性、定着時緊張力、腐食環境等の違いによって若干見直しをしてもよい。

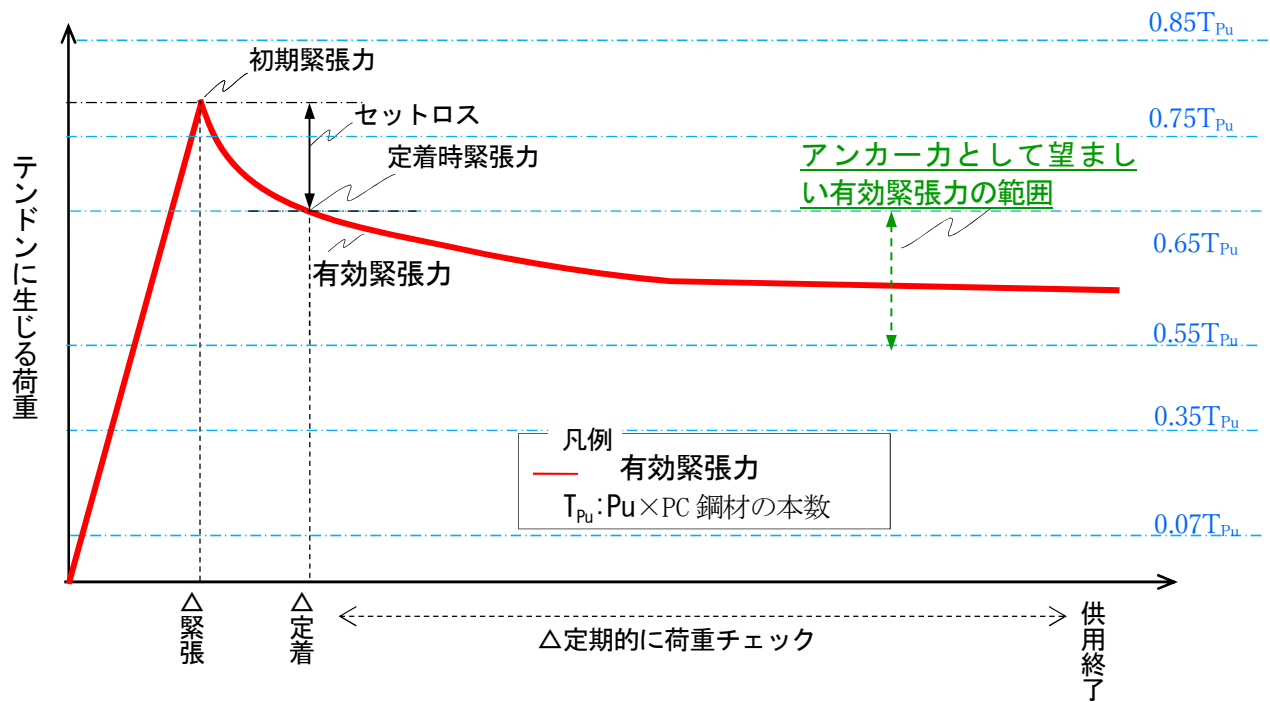


図-3 ダム用PSアンカーに作用する有効緊張力の経時変化と健全度評価

表-4 有効緊張力によるダム用PSアンカーの健全度評価の目安

ダム用PSアンカー				グラウンドアンカー ⁴⁾	
有効緊張力の範囲	健全度	状態	対処方針	有効緊張力の範囲	健全度
0.85 T_{Pu} 以上	D	破断の恐れあり	緊急対策を検討	0.9 P_y	E
0.85 T_{Pu} 未満 0.75 T_{Pu} 以上	C	危険な状態になる 恐れあり	追加調査実施、 対策を検討	0.9 P_y 未満 1.1 T_a 以上	D
0.75 T_{Pu} 未満 0.65 T_{Pu} 以上	B	注意	経過観察により対策の 必要性を検討	1.1 T_a 未満 許容アンカー力(T_a) 以上	C
0.65 T_{Pu} 未満 0.55 T_{Pu} 以上	A	健全	T_d は0.55 T_{Pu} 程度とな る	T_a 未満 設計アンカー力(T_d) 以上	B
0.55 T_{Pu} 未満 0.35 T_{Pu} 以上	B	注意	経過観察により対策の 必要性を検討	T_d 未満 0.8 P_t 以上	A
0.35 T_{Pu} 未満 0.07 T_{Pu} 以上	C	機能が大きく低下 している	追加調査実施、 対策を検討	0.8 P_t 未満 0.5 P_t 以上	B
				0.5 P_t 未満 0.1 P_t 以上	C
0.07 T_{Pu} 未満	D	ほぼ破断している	緊急的に対策を検討	0.1 P_t 未満	D

(P_t : 定着時緊張力、 T_d : 設計アンカー力、 T_a : 許容アンカー力、 P_y : PC鋼材の降伏強度、 T_{Pu} : 規格引張荷重相当のアンカー力)

グラウンドアンカーとの最大の違いは、健全な状態「A」がダム用PSアンカーでは、待ち受けを考慮しないため、高めの緊張力となることである。

(2) 見かけ剛性による健全度評価

グラウンドアンカーでは、リフトオフ試験結果は「残存引張力」と「テンダンの荷重・伸び比(設計

$\tan \theta$)」で評価されている。ただし、設計 $\tan \theta$ による評価は参考程度に止めて、定着荷重に対する残存引張力の残存率によって主に判断されている。その理由は、グラウンドアンカーはソイルアンカーが主体であり、非岩盤を定着対象とすることが多いため、定着長部のゆるみをはじめ、設計 $\tan \theta$ の減には様々な要因が関係すると考えられる。

表-5 見かけ剛性によるダム用PSアンカーの健全度評価の目安

見かけ剛性の初期剛性に対する残存比の範囲	健全度	状態	対処方針	具体例
1.25 以上	C	機能上の問題がある(孔内の接触等)	追加調査実施、対策を検討	変形、孔曲がり、固化等の有無を調査
1.25 未満 1.00 以上	B	注意:見かけの剛性が高くなっている	経過観察	実用上の問題がないかを観察
1.00 未満 0.80 以上	A	健全:テンドンは健全性を保持している。		
0.80 未満 0.50 以上	B	注意	経過観察	経過観察により対策の必要性を検討
0.50 未満 0.20 以上	C	腐食の進展大:地震等外力作用時に破断の危険がある。	追加調査実施、対策を検討	追加アンカーの実施、別対策(擁壁設置等)の実施
0.20 未満	D	ほとんど破断している。	緊急対策の実施	緊急的に追加アンカーや貯水位低下等の対策を実施

一方、定着長が堅硬な岩盤にあるロックアンカーの場合、設計 $\tan \theta$ の低下は、腐食進行による断面減少に大きく影響されている可能性が高い。そこでダム用PSアンカーのうち、アンボンドアンカーでは、設計 $\tan \theta$ を「見かけ剛性」と読み替えてPC鋼材の健全度を確認することとしている。

表-5に見かけ剛性を用いる場合の健全度評価の目安を示す。見かけ剛性は、「 EA/l_f =弾性係数×断面積 / テンドンの引張長さ」で定義する。

見かけの剛性の当初剛性に対する減少率の判定は、残存引張力の判定に合わせて、「当初剛性に対する残存率が0.80以上であれば健全、0.50以上0.80未満であれば経過観察、0.50未満であれば要対策」としている。

(3) 健全度評価の事例

図-4と図-5にロックアンカーにおけるリフトオフ試験の結果事例を示す。

有効緊張力の残存比(対規格引張荷重相当アンカー力)は、表-4の指標において、アンカーA、アンカーBともに0.63であり、健全という評価となる。

一方、見かけ剛性の残存比(対当初剛性)は、表-5の指標において、アンカーAでは0.72とBランクの「注意(経過観察)」となる。しかし、アンカーBでは0.24とCランクの「腐食の進展大(追加調査、対策検討)」であり、腐食によって見かけ剛性が大きく低下した可能性が高い。

このように、既設アンカーでは、有効緊張力と見かけ剛性では健全度評価が大きく異なることがあるので、両値を用いての評価が望ましい。

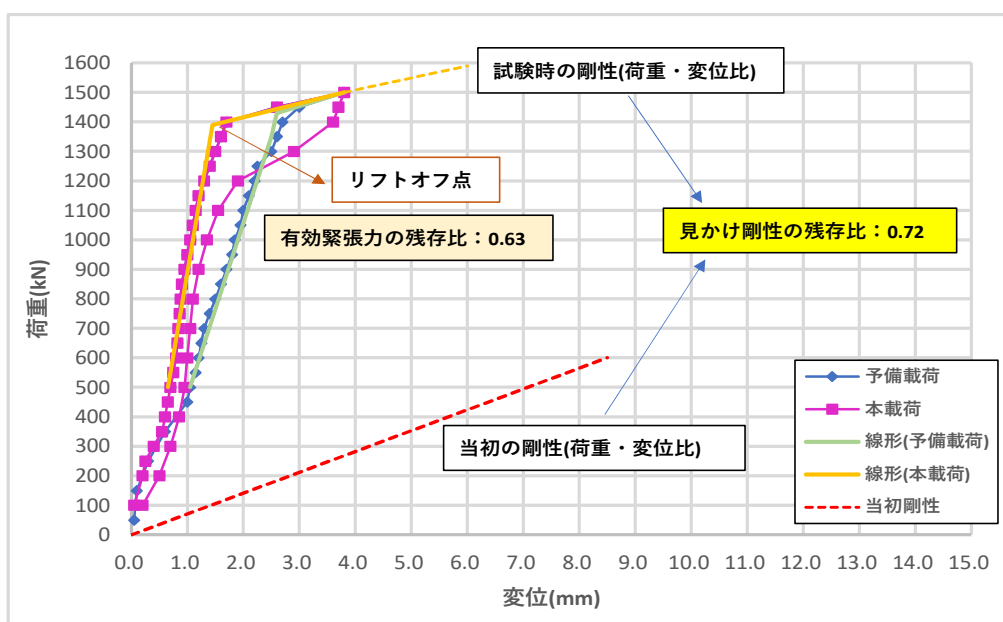


図-4 アンカーAの荷重・変位図

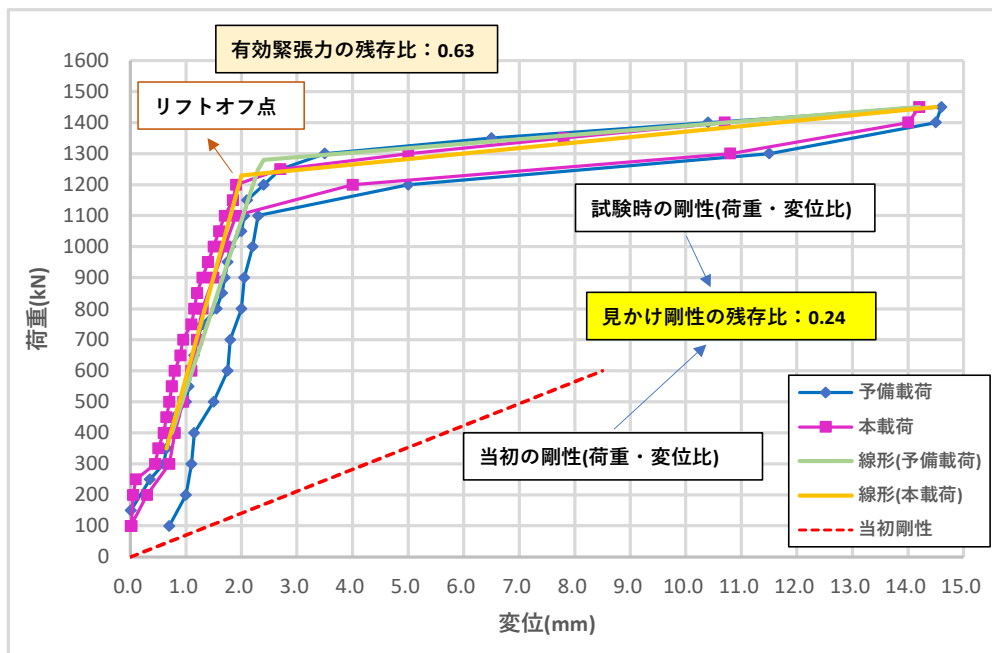


図-5 アンカーBの荷重・変位図

【結果とりまとめ】

本年度の研究の結果、以下の成果が得られた。

- ① ダム用 PS アンカーは、計測監視と点検をアンカー施工時から供用期間に至るまで長期的に行うことが重要であることを確認した。
- ② 計測監視計画の作成から対策工の検討に至るまでを維持管理フローにまとめて提案した。
- ③ ダム用 PS アンカーに作用する有効緊張力について、緊張力の概念を整理し、提案した。
- ④ ダム用 PS アンカーに作用する緊張力の計測方法について、アンボンド方式とフルボンド方式とで整理し、提案した。
- ⑤ ダム用 PS アンカーの点検について、区分、頻度、点検方法を整理し、提案した。
- ⑥ ダム用 PS アンカー健全度評価において、有効緊張力による評価目安と見かけ剛性による評価の目安について提案した。

- 3) 国土技術政策総合研究所河川研究部、「ダムにおけるアンカー点検マニュアル（案）」、2017年3月
- 4) 国土交通省独立行政法人土木研究所・社団法人日本アンカー協会、「グラウンドアンカー維持管理マニュアル」、技報堂出版、2020年9月発行
- 5) 川崎秀明、久保弘明、ダムに関する技術の系譜第2回、堤体 PS アンカー、ダム技術 2020年5月

【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を令和元年度から開始したが、更なる標準化に向けてデータを収集し、整理を行う。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) D.A.Bruce、"Rock Anchors for Dam Remediation in North America"、International Ground Anchor Forum 2006、Tokyo、Japan