

4.3 ダム用アンカーの設計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：ダム用アンカーの設計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・施工が必要となる。ダム用アンカーは、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アンカーによる堤体耐震補強が始まったばかりである。

当センターは、ダム用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⁾によって設計試案を提案したが、本稿は更なる標準化に向けて基本事項改定を検討したものである。

【キーワード】

アンカー、堤体 PS アンカー、防食、フルボンド、安全率、許容応力

【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補強する事例が増えている。特に、米国においてそ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）のダム用アンカー各年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ロックアンカーに対する設計法は確立されておらず、堤体に関わる国内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、ダム用アンカーの設計法の確立は急務である。

ダム用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。それに伴い、防食・防錆、削孔精度、水密性、緊張・定着方法、試験などに対してより高度な技術が要求される。少数精鋭の大容量・長尺アンカーでもある。

(1) アンカーに関する技術基準類

ダム用アンカーにおける設計法を整理するにあたって、国内外で関係する技術基準類を以下に記す。

日本においては、「グラウンドアンカーの設計・施工

基準」と「建築地盤アンカー設計施工指針」がある。その他、維持管理に特化して、日本アンカー協会「グラウンドアンカーの維持管理マニュアル(案)」（2008年発行）がある。これらはいずれも非岩盤のソイルアンカーを主対象としている。

海外においては、ロックアンカーも含む米国 PTI 勧告、ソイルアンカー主体の欧州基準、コンクリート系の FIP 勧告の3つが代表的な基準類である。

ダム用アンカーは構造物固定・基礎補強用のロックアンカーであるが、これに合う国内基準類が無いため、現在は、ダム用アンカーの世界基準と言える米国 PTI 勧告の必要項目を国内基準に取り込んで作成された「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」（ダム技術センター、2010年9月）で提案された試設計法が堤体や基礎岩盤用のアンカーに暫定的に適用されている。

表-1 国内・海外の主要な技術基準類

技術基準類の名称	発行者・年	概要
グラウンドアンカー設計・施工基準	地盤工学会 2012 改定	国内の斜面安定用のアンカーが主体
建築地盤アンカー設計施工指針・同解説	日本建築学会 2001 改定	国内の建築地盤アンカーが対象
PTI 勧告 プレストレストロックアンカー・ソイルアンカー Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors	米国ポストテンション協会 2014 改定	堤体アンカーを含む、材料・設計・施工の世界基準となっている組織名 Post-Tensioning Institute (略称 PTI)
FIP 勧告 プレストレストグラウンドアンカー設計・施工 FIP Recommendation Design and construction of prestressed ground anchorages	現 fib (国際コンクリート協会) 1996 改訂	プレストレストコンクリートの観点からグラウンドアンカーを記述 Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP)
特殊地盤工事ーグラウンドアンカー施工 Execution of special geotechnical work -Ground anchors	欧州基準 (英国版) 2013 改訂	EU 技術基準の英国版、グラウンドアンカーについて記述 British Standard BSEN 1537

(2) アンカーの目的・種類別の分類

表-2は、アンカー全般の区分と名称を整理し、ダム用アンカーの位置づけを行ったものである。

ダム用アンカーは、堤体用の堤体 PS アンカーと基礎岩盤用の岩盤 PS アンカーの2種類のアンカーから成る。他に、ゲート固定用と斜面安定用のアンカーがあるが、各々、ダム堰施設、グラウンドアンカーの基準に従って設計されているので、ダム用アンカーの設計標準化対象から除く。

また、アンカーは、定着先の地盤によってソイルアンカーとロックアンカーに分類できるが、ダム用アンカーはロックアンカーである。

以下に、堤体と岩盤のアンカーの特徴を記す。

1) 堤体 PS アンカー

堤体アンカーは、ダムの持つ規模の巨大性や機能の重要性を反映して、構造物アンカーの中でも最も大荷重への対応性、施工の確実性、長期の耐久性等を必要とするものとして位置づけられる。以下に既往の実績からダム用アンカーの目的を分類する。

- ① 大規模地震の発生に対する補強（耐震補強、引張応力発生箇所の締付け）
- ② 河川洪水量増に対する安定性確保（転倒・滑動防止、堤体と岩盤の締付け）
- ③ 高標高部のアンカー緊結による堤体嵩上げ（貯水容量増）
- ④ 堤体真下の基礎岩盤の補強（岩盤間の締付け）
- ⑤ 堤体水平打ち継目の締付けによる止水

2) 岩盤 PS アンカー

堤体周辺の基礎岩盤または地山を補強するアンカーに対しては、構造物補強用として堤体補強用アンカーと同様の安全度の高い設計を行うべきである。

アーチダムのアバットメント補強のための岩盤 PS アンカーもこの分類に入る。

- ① 堤体周辺の基礎岩盤や地山の補強（断層間の締付け、人工岩盤の締付け）
- ② 岩盤斜面表層の補強（岩すべりの安定化）

3) 海外・国内におけるダム用アンカーの歴史

世界最初のプレストレス構造物はダムであり、国内におけるアンカー技術の初適用は、1950年代のダムであった。国内では1960年代後半から斜面安定用のグラウンドアンカーが普及し、1990年頃からは2重以上防錆化した現仕様のアンカーとなり、一層多くの現場に用いられるようになった。同時期に、堤体用や基礎岩盤用のアンカーは、国内では稀になったが、欧米では堤体 PS アンカーが普及した。

表-3に海外・国内の主要な経緯を記す⁵⁾。

表-3 海外・国内のアンカーに関する年表

西暦年	アンカーに関する主要な出来事 <u>下線は国内</u>
1928年	仏人フレシネによるプレストレス技術の実用化
1934年	世界最初のアンカー、シェファードダム（アルジェリア）での堤体補強アンカーの施工
1956年	世界最初のプレストレスダム、アルツナライリジダム（英国）の堤体 PS アンカーの完成
1957年	国内最初のプレストレスダム、藤原ダム・副ダムでの堤体 PS アンカーの施工
1964年	国内最初の基礎補強用アンカー、川俣ダム（栃木県）左右岸での岩盤 PS 工の完成
1963年	国内最初のゲート固定用アンカー、菌原ダム（群馬県）の高圧ラジアルゲートに PC アンカーを施
1968年	国内最初の本格的貯水池すべりアンカー、大迫ダム（奈良県）での大規模法面アンカーの施工
1972年	世界最初のアンカー技術基準、ドイツ DIN でのアンカー基準の制定
70年代	海外でダウンザホールハンマーの実用化が進む
1977年	国内最初のアンカー技術基準、アースアンカーの設計・施工基準（土質工学会）の制定
1986年	国際プレストレスコンクリート学会からアンカーの防錆対策報告の公表、以降2重防食が急増
1990年	国内最大級の岩盤 PS アンカー施工、宇奈月ダム左岸の大規模補強の施工
1998年	拡孔型法面アンカーの開発、金城ダム貯水池左岸におけるアンカー施工
2010年	「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」（ダム技術センター）の発刊
2012年	カタグーニャダム（豪州）で堤体 PS アンカーとして世界最大のアンカーを施工
2017年	川俣ダム岩盤 PS 工の大規模更新の開始
2019年	千本ダム堤体 PS アンカーの施工

表-2 アンカーの機能と手法による分類と名称 (ダム用アンカーは下線部)

*: 締まった砂礫層、風化岩、土丹等を示す、**: 軟岩以上の岩盤を示す

目的	対象物	定着先	アンカー力の設定法	緊張管理	海外名称	日本名称
斜面安定・法面保持用	土砂	ソイル*	円弧すべり面の挙動に対抗できるアンカー力を設定する。	長期的に設計アンカー力以下となるように監視する。	欧州では Ground Anchor と呼ぶことが大半。	グラウンドアンカーと呼ぶ。(1988年まではアースアンカーの呼称)
	岩盤	ロック**	弱層面の挙動に対抗できるアンカー力を設定する。			建築用のアンカーは地盤アンカーと呼ぶ。
構造物固定・基礎補強用	建築物、岸壁等	ソイル	構造物の不安定化(転倒、滑動、浮き等)に対抗できるアンカー力を設定する。	長期的に設計アンカー力以上に監視する。(理由:有害変位を許さない設計思想)	様々な呼称が混在 Post Tensioned Anchor or Post Tensioning Anchor と呼ぶことが大半。	堤体基礎岩盤の補強用は岩盤 PS アンカーと呼ぶ。
	ダム堤体、基礎岩盤、ゲート固定部、橋台・橋脚等	ロックまたはコンクリート	地震時等の局所応力や変位は FEM 解析で確認する。			堤体の固定用は堤体 PS アンカーと呼ぶ。

(3) アンカーの技術用語の標準化

現在の国内アンカー用語は、以下の点で混乱を生じる恐れがある。

- ① 地盤工学会と建築学会間で異なる用語がある。アンカー体、アンカー頭部等
- ② 両学会用語はソイルアンカーが主対象のため、ロックアンカーとして不適当な用語がある。摩擦抵抗等
- ③ 荷重と応力の単位関係が明確でない。摩擦抵抗、許容引張り力等

④ PTI の原語と違った意味になっている用語がある。アンカー体、摩擦抵抗等

このため、最小限変更な用語に限って変更することを提案する。即ち、「地盤工学会と建築学会の用語が同じ用語は変えない、両学会の用語が異なる場合はPTIの用語に近い意味の用語とする、両学会の用語にない場合はPTIの用語を採用する」等が良いと考えられる。

表-4 に変更すべき用語案一覧を記す。

表-4 主要なアンカー用語 (terminology) の比較と最小限名称変更すべき用語案一覧

(下線部は地盤工学会用語と異なるもの)

地盤工学会・グラウンドアンカー基準	日本建築学会・地盤アンカー指針	PTI・ロック/ソイルアンカー	ダム用アンカーの用語案	備考
<i>材料・部材関係</i>				
アンカー体	定着体	Bond length	<u>定着長</u>	グラウトとテンドン、グラウトと岩盤の付着長の長い方
アンカー頭部	緊張端	Anchorage	アンカー頭部	
アンカー長	アンカー長	Anchor length	アンカー長	定着長と自由長の合計
アンカー自由長	自由長部	Free stressing length	自由長	自由長をグラウトで固化したものはボンド自由長
ボンド	—	Fully bond	<u>フルボンド</u>	
<i>荷重・応力度関係</i>				
設計アンカー力 Td	設計アンカー力 Pd	Design load	設計アンカー力 Td	<u>設計荷重</u> と呼んでも良い
アンカーの極限引抜き力	極限引抜き抵抗力	Ultimate/Acceptable Ground-grout bond	極限引抜き抵抗	岩盤とグラウト間、抵抗力
アンカーの許容引抜き力	許容引抜き抵抗力		許容引抜き抵抗	
極限周面摩擦抵抗 τ_u	極限摩擦応力度 τ_u	Ultimate/Acceptable Bond strength	極限引抜き 応力 τ_u	〃、摩擦ではない、引抜きで統一
許容周面摩擦抵抗	許容摩擦応力度		許容 引抜き 応力 τ_w	
テンダンの極限拘束力	極限付着抵抗力	Ultimate/Acceptable Steel-grout bond	極限付着抵抗	テンダンのグラウト間、抵抗力
テンダンの許容拘束力	許容付着抵抗力		許容付着抵抗	
極限付着応力度 τ_{bu}	極限付着応力度	Ultimate/Acceptable Steel-grout Bond strength	極限付着応力 τ_{bu}	〃、強度、 τ_{ba} の b は bond のこと
許容付着応力度 τ_{ba}	許容付着応力度 τ_{ba}		許容付着応力 τ_{ba}	
テンダンの極限引張り力	極限引張り力	Ultimate/Acceptable Tensile strength	極限引張り力	PC 鋼材の安全性指標、破断荷重
テンダンの許容引張り力	許容引張り力		許容引張り力	
(鋼材) 引張り強度 or 許容引張り応力			<u>引張強さ</u>	鋼材の JIS 用語
規格引張り荷重 Pu	規格引張り荷重 Tsu	Specified minimum tensile strength	<u>規格引張荷重 Pu</u>	PTI の Fpu のこと、鋼材 JIS は規格引張荷重
許容引張り力 or 0.6Pu	許容引張り力	—	<u>許容引張荷重</u>	名付けの必要がある
初期緊張力 Pi	初期緊張力 Pi	Maximum test load	初期緊張力 Pi	試験時の最大荷重
定着時緊張力 Pt	導入緊張力 Pt	Lock-off load	定着時緊張力 Pt	最後に開放した時の荷重
残存引張り力 Pe	有効緊張力 Pe	Effective load	<u>有効緊張力 Pe</u>	設計荷重の保持が大事
<i>試験関係</i>				
確認試験	1 サイクル引張り試験	Proof tests	確認試験	全アンカー、1 サイクル
適性試験	多サイクル引張り試験	Performance test	適性試験	5 サイクルテスト
基本調査試験	—	Preproduction test	<u>基本調査試験</u>	引抜き試験、グラウト配合試験等
長期試験	長期引張り試験	Creep test	<u>長期引張り試験</u>	明確化
水密性試験	—	Water pressure test	<u>水圧試験</u>	明確化
英語との対比・・・荷重; Load、外力; External force、応力; Stress、抵抗・耐力; Resistance、強度; Strength per unit、安全率=極限值 Ultimate value/許容値 Acceptable value				

(4) PC 鋼材の規格引張荷重

現在のアンカー国内基準の二つとも、**Pu (JIS 規格引張荷重)**と **Py (JIS 規格降伏荷重)**に各々係数を乗じた値を比較して低い方を PC 鋼材の許容値に採用している。**Pu**は、載荷試験時の極限荷重(破断荷重)であり、工場での製品管理上の最重要な値である。一方、**Py**は、破断までの載荷試験時の0.2%永久伸びに対する荷重であり、この値までは弾性挙動を示すというみなし値である。なお、両者に係数を乗じた算出値はいずれもほぼ同じ程度となるように係数設定されている。

PTI 勧告など海外においては、PC 鋼材の許容値の対象は規格は **Pu (規格引張荷重)**のみである。海外と同様に **Pu** に統一すべきである。

《提案》

PC 鋼材の強度は、JIS の規格引張荷重(Pu)を用いて定めるものとする。

【解説】

PC 鋼材の製造上の品質規定は規格引張荷重が基本である。従って、品質保証された高品質の PC 鋼材使用の場合、Pu のみを PC 鋼材強度の対象として、基本的に規格降伏荷重 Py は使用しない为好い。

なお、使用頻度の最も高い PC 鋼より線 (ECF ストランド φ15.2mm SWPR7B) の場合、規格引張荷重 Pu は 261 kN である。

PTI など海外規格も降伏強度を用いていないので、規格引張荷重への一本化は国際化の面で好ましい。



表-5 PC 鋼より線(付着型 ECF ストランド

φ15.2mm SWPR7B) の JIS 規格値

断面積	規格引張荷重 (Pu)
138.7 mm ²	261 kN

(5) 緊張材 (PC 鋼より線) の許容引張り力

設計アンカー力を許容引張り力で除することによって鋼より線の数が決まる。2010 年試設計では許容引張り力を下記としている。

- ① 長期荷重作用時 (常時) の許容値は「Min(0.70Pu, 0.80Py) 以下」としている。
(Pu: 規格引張荷重、Py: 規格降伏荷重)・・・
- ② 緊張力導入時は「Min(0.75Pu, 0.85Py) 以下」としている

上記①②は、構造物アンカーである建築学会指針の長期荷重作用時の上限許容値 **0.70Pu** (安全率換算で **1.43**) を採用したが、これで鋼より線の本数を設定すると、「大規模地震時の PC 鋼材の強度余裕が少なく、初期荷重を大きく出来ない」ので長期的に設計

アンカー力保持が難しい」という問題が生じる。

このため、S ダムでは、耐震補強という目的を考慮して、PC 鋼より線の引張強度に対する余裕を多く取ることとし、長期の許容値の安全係数を **0.70 Pu** から **0.60 Pu** へ下げた。

《提案》

PC 鋼材の許容引張荷重は、規格引張荷重に引張り材の安全性、緊張力管理の容易さ等を考慮した所定の安全係数を乗じた値を用いるものとする。

【解説】

PC 鋼材の許容引張荷重は、安全係数を用いて下記とする。(Pu: 規格引張荷重)

- ① 長期作用時の許容値は「**0.60Pu** 以下」とする。・・・地盤工学会及び PTI 規定と同じ
- ② 初期緊張力時の許容値は「**0.80Pu** 以下」とする。・・・PTI 規定と同じ
- ③ 大地震時の許容値は「**0.85Pu** 以下」とする。・・・建築学会規定と同じ

設計アンカー力を PC 鋼材の許容引張力によって除することで tendon 内の PC 鋼材数が決定される。上記①から③で算出される必要本数のうち最大数が採用値となる。各値の設定理由を以下に挙げる。

①の **0.60Pu** は、安全率換算で **1.67** となるが、地盤工学会や PTI の規定値と同じである。当値が低いほど、大地震など不測の外力増大や長期的な強度低下に対する余裕を持つことになる。

②は、国内アンカーの現地作業において初期緊張時の荷重は **0.90Py** または **0.80Pu** 以下で行われているという実態を踏まえた。①と②の差が大きいほど、設計アンカー力以上を保持しやすくなる。

③は、レベル 2 地震動等の大地震時において降伏荷重まで許容するという意味である。

(6) tendon とグラウト間の許容付着応力 τ ba

当値は、PC 鋼より線の配置によって周長や付着力への影響が大きいことから、本来は事前の付着強度試験において確認すべきことである。PTI 技術勧告でも「tendon とグラウトとの付着は、鋼より線製造業者の鋼より線付着試験によって評価される。」とあり、τ ba も周長も数値は示されていない。

ただし、2010 年試設計では地盤工学会の値よりも 1 割程度高めの建築学会の値を採用し、「グラウチングの許容付着応力 τ ba は、長期(常時)で **1.0N/mm²**、短期(地震時)で **1.5N/mm²** とする」とした。

K ダムや S ダムでの場合、水セメント比の低い品質の高いグラウトを使ったことから、グラウトの一軸圧縮応力が **40N/mm²** 以上あった。従って、引張強度は、その 1/10 だとしても **4N/mm²** 程度はあり、長期の τ ba = **1.0N/mm²** の設定は妥当である。

《提案》

テンドンとグラウトの境界における許容付着応力 (τ_{ba}) は、試験による極限付着応力 (τ_{ub}) をテンドンとグラウトの仕様を考慮した所定の安全率で除した値を用いるか、同様の条件における実績値を用いるものとする。

極限付着応力 τ_{ub} を引抜き試験によって設定する場合の許容付着応力度 τ_{ba} は、 $\tau_{ub}/3$ (安全率3) とする。安全率3は、経験的な値であり、前述の建築地盤アンカーの指針 (P94) と日本アンカー協会の「グラウンドアンカー設計施工マニュアル p94」に拠っている。

引抜き試験に拠らない場合、許容付着応力 τ_{ba} は、長期 (常時) で $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ 、短期 (地震時) で $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ とするが、これらの値はグラウトの品質管理が十分に行われるという前提である。

許容付着抵抗は、許容付着応力にテンドンの見掛け周長と定着長を乗じることで求める。

周長は PC 材製造者の推奨値を用いてよい。

テンドンとグラウトとの付着を表す極限付着応力 τ_{ub} は、実際のテンドン配置を模した引抜き試験に拠るべきである。

グラウトとテンドンの付着応力度には、引抜き荷重、引張り材の仕様 (種類、径・本数、付着長、組み方)、グラウトの性状 (被り厚さ、強度、縦割れ・横割れの有無)、拘束効果 (地盤、カプセルなどの補強材の有無) などの因子が複雑に関与する。

なお、PTI 技術勧告では、PC 鋼材製造者による試験によって τ_{ba} を評価するとしているが、背景に、製造者は根拠のある諸数値をあらかじめ持つておくべきという米国流の製造者責任の考え方がある。(逆に言えば、根拠のある諸数値が用意されていない製品は使用すべきでない。)

(7) 地盤とグラウト間の許容引抜き応力 τ_w

2010 年試設計では「極限引抜き応力 τ_u は引抜き試験または基準類記載の参考値による。許容引抜き応力 τ_w は、 $\tau_u/3$ (安全率3) とする。」と構造物アンカーである建築学会規定と同じとした。

ただし、建築学会規定の安全率3は、都市部の砂やシルトなどのばらつきの大きいソイル系地盤を定着対象としているので、かなり高めである。

一方、ロックアンカーを対象とする PTI 技術勧告では、「永久アンカーの場合、2.0の最小安全率が地盤とグラウトの付着に適用される。」とある。

また、地盤工学会規定は、2.5の安全率を採用しているが、「基本調査試験 (事前の試験) を実施した場合には、地盤の不均質性や施工条件を勘案したう

えで、長期に供用するアンカーについてこの値を低減してもよい。」とある。従って、ダム用アンカーの場合は、現地試験や類似の岩盤実績によって強度値を定めることを条件とすれば、安全率を下げてよいと考えられる。

なお、実際の定着長の長さは、削孔径が小さいと定着体長は地盤とグラウトとの間の付着強度 τ_u で決まるが、削孔径が大きいほど定着長はグラウトと緊張材との間の付着強度 τ_{ba} で決まるため、 τ_u の安全率の定着体長に与える影響は少なくなる。

《提案》

テンドンと岩盤の境界の付着を表す許容引抜き応力 (τ_w) は、試験による極限引抜き応力 (τ_u) を岩盤とグラウトの性状と付着を考慮した所定の安全率で除した値を用いるか、同様の条件における実績値を用いるものとする。

【解説】

テンドンと岩盤との付着を表す極限引抜き応力 τ_u は、現地引抜き試験等による試験値か、同様の条件における実績値を用いる。この場合の許容周面摩擦抵抗は、 $\tau_u/2$ (安全率2) とする。

引抜き試験の実施や同様の条件における実績値入手が困難な場合は、既往文献の参考値 (同等の岩盤におけるせん断強度、国内のアンカー基準類に掲載の地質別 τ_u 等) のうち低めの値で設定してもよい。

許容引抜き抵抗は、許容引抜き応力に削孔周長と定着長を乗じることで求める。なお、設計段階でボーリングを行い、定着体周辺の地質に岩盤強度が不足あるいは弱層が混在すると予想される場合は、削孔径を太くするか、弱層厚を適宜加味した定着体長とすることで対応する。

(8) 防食・防錆対策の標準化

供用期間が 100 年以上となるダムにおいて、防食対策による耐久性の確保は非常に重要である⁴⁾。

PTI (米国プレストレスト協会) の基準によると、アンカーの防食方法は、プロジェクトに対する供用期間、腐食環境、アンカー破断事故の重大性、経済性から判断して決定する。また、ダム等重要構造物のアンカーの防食は、腐食環境に無くとも「永久アンカー、アンカーの破断が深刻な結果を引き起こす可能性がある」ことから最高レベルの防食対策を義務付けている。地盤工学会の内容も同等であり、日本建築学会では 2 年以上使用するアンカーについては二重防食が基本である。

以下に主要な防食対策を記す。

- 1) **PC 鋼より線の採用**： PC 鋼棒の場合は接続具としてカップラーが必要となるため、施工性と長期信頼性に劣る。また、遅れ破壊に対

しては、圧延工程で長さ方向に強度の増す鋼線の方が鋼棒よりも強いという鋼材メーカー見解がある。

- 2) **エポキシ被覆 tendon の採用**： 防食上は、tendon 外側を密実に被覆するエポキシ被覆が最も優れていると考えられる。エポキシ被覆の性能については、「エポキシ樹脂を用いた高機能 PC 鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針（案）」（土木学会，2010 年 8 月）に記載されており，プレストレスト製品化もされている³⁾。ただし，施工時に被覆部を傷つけて穴を開けやすいとの指摘もあり，取り扱いにある程度の注意が必要である。ちなみに，エポキシ樹脂被覆ストランドは，最近の国内暴露促進試験の結果から設計耐用年数 100 年間相当においても内部の鋼材が腐食することはないと報告されている。
- 3) **構成部材の材質の選定**： tendon 以外についても，下記の防食性能の高い材料を用いる。
- ① 頭部（支圧板，定着部品，グラウトキャップ等）：溶融亜鉛めっき，
 - ② 頭部背後（止水プレート，トランペットシース等）：溶融亜鉛めっき，
 - ③ 自由長部・定着部（シース，センタリング部品，スペーサー等）：HDPE（高密度ポリエチレン），境界部止水材：エポキシパテ or 発泡ウレタン
- 4) **防水構造の徹底**： 防水性を高くするため，止水パッカー・グラウト配管，緊張端（頭部）

の密閉（くさび方式），センタリング部材等について適宜改良する。頭部背面は，過去の事例では tendon 腐食が最も起こりやすい。

- (9) フルボンド仕様 Fully Bond type の採用
tendon 周辺のグラウト処理で，アンボンド型（tendon 周辺を自由長とする）とフルボンド型（tendon 周辺をグラウト材で固化する）に区分される。
アンボンド型の場合，再緊張可能であり，計測管理しやすい反面，防錆性に劣る。一方，フルボンド型は，耐久性に勝るものの，再緊張不可である。

<参考：海外におけるフルボンド型アンカー>

米国を中心に収集したダムアンカー工事の総数 100 のうち，アンボンド型が約 2/3 を占めるが（図-1），アンボンド型の多い理由として，「①再緊張と残存引張り力のモニタリングが容易，②グラウトが 1 ステージで済むので設備の移動が早く設置スペースも少なく済むのでより経済的，③対象物が変位したときアンボンド型は自由長が長いので切れにくい」等が挙げられる。

表-6 は米国におけるフルボンド型アンカーに対する各ダム関係機関の採用状況である。米国・開拓局や連邦エネルギー庁（FERC：エネルギー規制委員会，小規模水力発電ダムが多い）の管轄のダムは，ダム用アンカーでフルボンド型アンカーを基本的に採用している。その理由として，「耐久性以外に，フルボンド型アンカーの有事における安全性（一部破断しても緊張力は残る）」がある。

表-6 米国でのフルボンド型アンカーの採用状況（2007 年久保弘明氏収集データ）

	合衆国内務省開拓局 US Bureau Reclamation	合衆国陸軍工兵隊 US Army Corps of Engineers	連邦エネルギー庁 Federal Energy Regulatory Commission (FERC)	カリフォルニア州水資源局 California Department of W.R.
所有ダム数	479（米国内所管）	631（米国内所管）	2500（米国内監督下）	約 75（全州所管）
ダムの補修・補強目的	耐震補強，洪水対策	耐震補強，洪水対策 取水塔：耐震補強（少ないが事例あり）	耐震補強，洪水対策 取水塔：耐震補強 ゲート：耐震補強	耐震補強，洪水対策
アンカーによる補修・補強事例	10 事例	50 事例	計 148 事例：洪水対策 125 ダム，耐震補強 7 ダム，その他 16 ダム ダム型式別：重力式 120，バットレス 7，ゲート 7，その他 14	Pacoima Dam ほか
ボンド／アンボンド	全てフルボンド型を採用	アンボンド型が多い	基本的にフルボンド型を採用	アンボンド型が多い
備考	Stewart Mountain ダム：腐食防止と周辺コンクリートの付着のため，緊張・定着 90 日後にグラウトし全てボンドした。 （1991 年施工，フルボンド型アンカー 62 本，エポキシ被覆）	特になし。	再緊張を繰り返すと tendon を損傷する恐れがある。軸力計は長期信頼性に疑問があるので荷重の長期モニタリングは要求しない。 フルボンド型であれば頭部緊張端で全荷重を受け持たなくてもよいので安全性が高くなる。 耐震補強には部分定着が適する。	特になし。

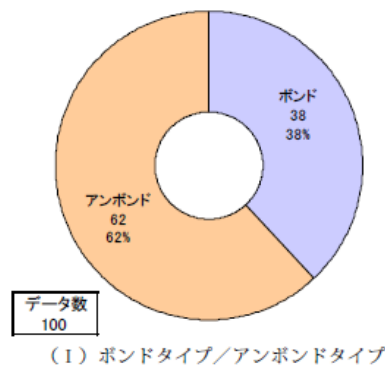


図-1 フルボンドとアンボンドの比率(全 100 ダム、1960～2010 年アンカー施工)¹⁾

国内ではKダムの50年前に施工の岩盤PS工において防錆性能に優れていることが確認されている。Kダム岩盤PSアンカーの更新アンカーとSダムの堤体PSアンカーにおいては、防錆性能の高さと耐震補強上の安全性能を考慮して、フルボンドを採用した。

【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 アンカーに関する技術基準類：国内海外のアンカー関係基準類の設計法を比較して、特徴を確認した。
- ② アンカーの目的・種類別の分類：アンカー全般の区分と名称を整理し、ダム用アンカー（堤体PSアンカーと岩盤PSアンカー）の位置づけを行った。また、ダム用アンカーの歴史を整理した。
- ③ アンカーの技術用語の標準化：国内海外のアンカー関係基準類の用語の違いを比較し、より適切な用語とする案を作成した。
- ④ PC鋼材の規格引張荷重： P_u (JIS規格引張荷重)の規定値を用いることを提案した。
- ⑤ 緊張材(PC鋼より線)の許容引張り力：長期作用時の許容値は $0.60P_u$ 以下、初期緊張力時の許容値は $0.80P_u$ 以下、大地震時の許容値は $0.85P_u$ 以下とする案を整理した。
- ⑥ テンドンとグラウト間の許容付着応力 τ_{ba} ：引抜き試験によって極限付着応力 τ_{ub} を設定することとし、この場合の許容付着応力度 τ_{ba} を、 $\tau_{ub}/3$ （安全率3）とする案を整理した。
- ⑦ 地盤とグラウト間の許容引抜き応力 τ_w ：引抜き試験によって検証することとし、この場合の許容周面摩擦抵抗を、 $\tau_u/2$ （安全率2）とする案を整理した。
- ⑧ 防食・防錆対策の標準化：主要な防食対策として、「PC鋼より線の採用、エポキシ被覆テンダンの採用、構成部材の材質の選定、防

水構造の徹底」を整理した。

- ⑨ フルボンド仕様の採用：アンボンドとフルボンドの特性と使用比率を調査した。

【今後の課題】

ダム用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、令和2年度に施工法についてもデータを収集し、標準化のための整理を行う。

【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
- 3) 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、Vol.17、No.4、pp.282-294、2007年12月
- 4) 久保弘明・G.S.リトルジョン・ジョン.サンダース、海外事故例から学ぶグラウンドアンカーの課題と対策、基礎工2010年9月号
- 5) 川崎秀明、Review on Design Method in Anchors for Big-scale Structures、日本アンカー協会：グラウンドアンカー国際研究成果報告会、2014年7月