

4.1 堤体 PS アンカーの体系化に関する研究

研究年度：平成30年度

研究分野：補強工法に関する調査研究

調査研究名：堤体 PS アンカーの体系化に関する研究

研究者：川崎秀明

【要約】

当センターでは、海外で事例の多い堤体 PS アンカーの国内ダムへの適用のための研究を10年前から行っており、これまで、海外事例の研究や設計法の国内適用に関する提案を「アンカー工法によるダム堤体の補強方法に関する研究」（平成22年9月、ダム技術研究所報告第201001号）を通じて行うとともに、ダム堤体や基礎岩盤におけるポストテンションアンカー（通称：PS アンカー）の国内適用について先進的に検討してきた。それらの成果は「各年度のダム技術研究所調査研究活動」の年報において公表してきた。

近年は、M市からの受託を受けてSダム堤体補強工への国内初となるPSアンカー（通称：堤体PSアンカー）の実適用検討を進めており、当年報には、平成28年度にSダム堤体補強工へのPSアンカー実適用をモデルに設計に関する研究成果を投稿し、平成29年度にはSダムのアンカー工事モデルの施工計画の研究成果を投稿した。平成30年度においては、Sダムの堤体PSアンカーの実施設計と施工計画の具現化を進めたが、本論文では堤体PSアンカーについて工学的な体系化を図るための整理を行うこととし、従来アンカーとの違いを要求性能、仕様、設計、施工等の面から区分するとともに、国内の類似事例と海外の同種事例について収集整理を行った。

国内のダムにおいても耐震対策や旧基準ダムの安定化対策の必要性から堤体補強の需要が増すと予想されるが、本論文が取り扱う堤体PSアンカーが、それらの対策工検討時の参考になれば幸甚である。

【背景（内外情勢）】

欧米豪のダムにおいては、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評価に伴い、ダム堤体や周辺岩盤を補強する事例が増えている。それらのコンクリートダム補強の大半を占めるのが堤体PSアンカーであり、1989年頃から採用数が急速に増えている。米国・カナダの採用例だが、1990年以降、2012年までの北米（米国+カナダ）のダム用アンカー工事の総数は470にもなる（文献¹⁾）。海外の堤体PSアンカーの多くは、設計荷重2,000kN以上、長さ40m以上に達する大容量で長尺アンカーである。（海外ではPSアンカーやポストテンションアンカーの呼称が多い。）

一方、国内においては、ダムにおけるPSアンカーの適用は古く、藤原ダム・副ダム（1957年施工）や川俣ダム・左岸基礎（1965年完成）、安波ダム・右岸基礎（1978年完成）において、経済性向上や地山の安定確保の目的でPSアンカーが用いられた。しかし、ダム堤体に対するアンカー適用事例は無く、堤体PSアンカーの国内適用は大きく遅れている。その理由としては、耐久性（錆腐食）への懸念があげられるが、その他に、大口径・大容量ゆえに削孔精度や緊張力保持への懸念があったと考えられる。

同様の懸念は、欧米のダムでもあったが、1988年頃からアンカー防錆の2重化が始まり、防錆性能が格段に向上するとともに、高精度削孔技術、緊張力

計測や再緊張の技術が急速に発展したことでほぼ克服され、90年代以降の堤体PSアンカーの適用例は大きく増えている。

このような新展開となったアンカー補強工法の先進例となったのがドイツのエダーダム（補強工事1990年完成）である（**図-1**参照）。

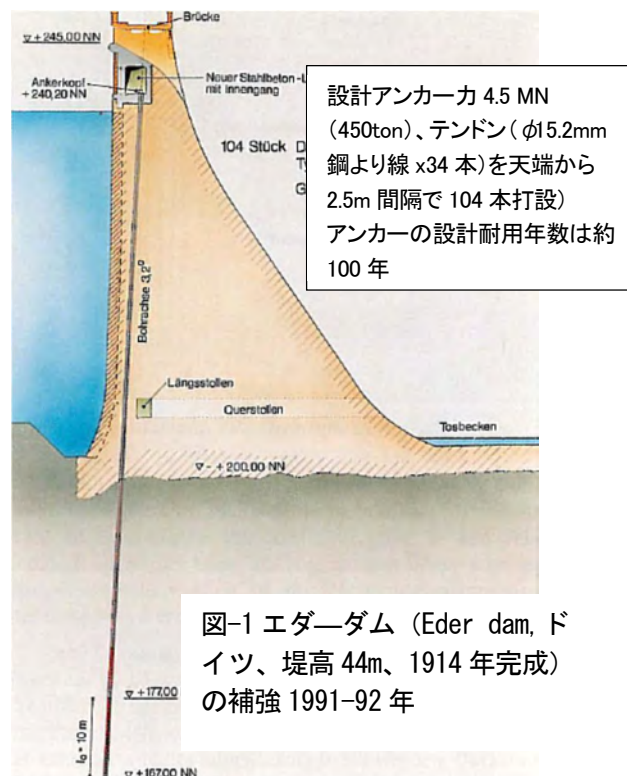


図-1 エダーダム (Eder dam, ドイツ、堤高44m、1914年完成)の補強1991-92年

ダム用アンカーの全体像

本稿は、ダム用アンカーの容易な全体理解のために、アンカーの種類、用途(斜面安定用、構造物固定用)、各タイプの特徴、長期信頼性等について、国内外の対比や事例を交えて述べ、アンカー技術の体系化を図ったものである。



川俣ダム：50年前に国内最初の大規模アンカーである岩盤PS工を実施。2018年から更新工事を実施。写真左手に工事用足場が見える。



Sダム：堤体耐震補強用として2019年から国内初の堤体PSアンカーを実施予定。越流部が長いのが特徴的(越流頂の柱は光波測量用のミラー)

1. アンカーとは、アンカー工法とは

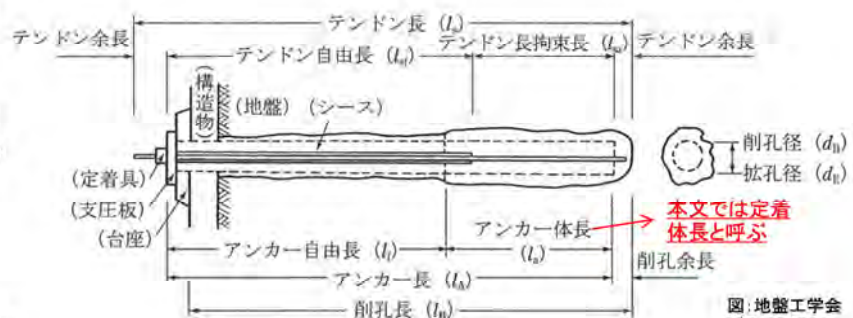
アンカーとは、世界的には「岩盤や土砂に削孔後に孔内に設置され、深部をグラウトを定着された後に緊張されたテンドン」である。

テンドンとはPC鋼材(鋼より線、鋼棒)を束ねた引張り材で、様々な機材が組み込まれた「アンカーシステム」として現地に設置される。アンカー工法とは、アンカーシステムに緊張力を与えて対象物を緊結することで安定化させる技術である。

アンカーの定義は、国内標準規格の地盤工学会グラウンドアンカー設計・施工基準(p21)によると、「グラウンドアンカーとは、作用する引張り力を地盤に伝達するためのシステムで、グラウトの注入によって造成されるアンカー体、引張り部、アンカー頭部によって構成されるものである。」である。その概念が下図に示されているが、テンドン以外に様々な部材と器具がシステムとして組み込まれる。

一方、世界標準規格のPTI技術報告(PTI: 米国ポストテンション学会、p2)によると、Anchor: A tendon installed in a drilled and grouted hole in the ground (soil or rock) that is stressed after installation.”である。

上枠内のアンカー、アンカー工法の定義は、上記の2つの基準類を組み合わせた。



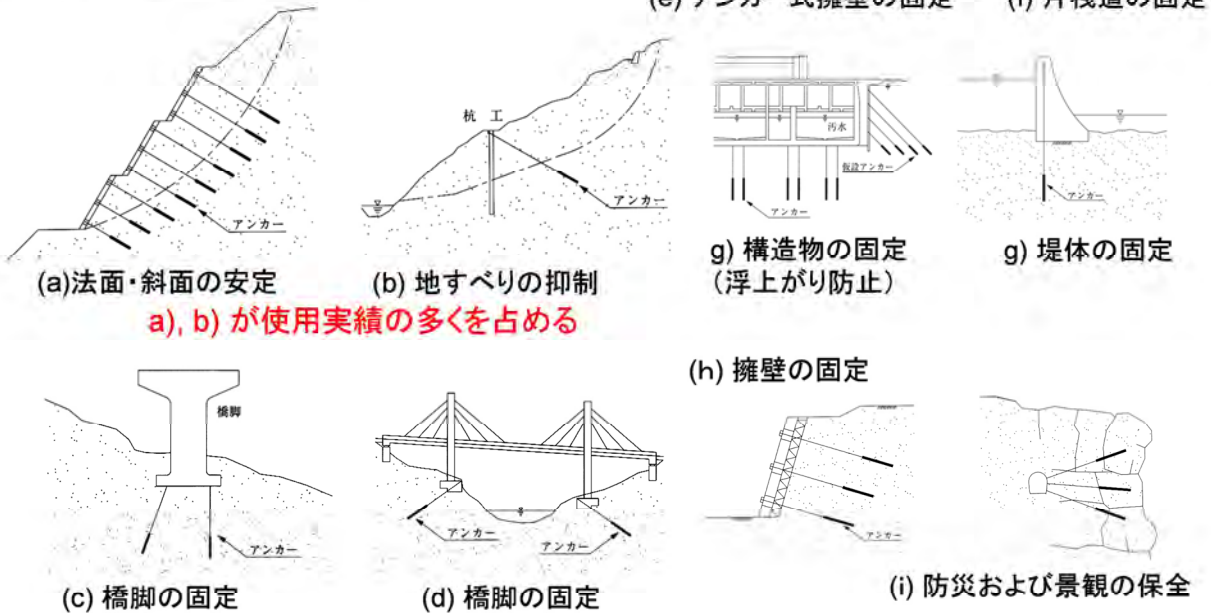
アンカーおよびテンダンの長さや径を示す用語

アンカー長は原則的に自由長4m以上+定着体長(アンカー体長)3m以上(計7m以上)

図：地盤工学会
グラウンドアン
カー設計・施工
基準(p21)

アンカーの用途

アンカーは、その緊張力によって、経済的に斜面の安定や構造物の固定を図ることができる。その目的や用途に今や多くにわたるが、アンカーの主な使用例を図に示す。



(a) 法面・斜面の安定

(b) 地すべりの抑制

a), b) が使用実績の多くを占める

(c) 橋脚の固定

(d) 橋脚の固定

(e) アンカー式擁壁の固定

(f) 片棧道の固定

g) 構造物の固定
(浮上がり防止)

g) 堤体の固定

(h) 擁壁の固定

(i) 防災および景観の保全

図：グラウンドアンカー維持管理マニュアル2008年、編集 土木研究所・日本アンカー協会

3

2. 海外と国内のアンカーの考え方の違い

欧米豪と国内でプレストレスの意識が違っており、技術分野上の位置づけも異なる。

海外： 構造物補強を用途としたロックアンカーが多く、プレストレスの意識が高い。PC橋梁とアンカーは類似技術として、同一の技術部門が取り扱うことが多い。

国内： 斜面安定を用途としたソイルアンカーが大半を占めるため、プレストレスの意識が少ない。PC橋梁技術とは別系統であり、両者の技術部門も基本的に異なる。

上記の位置づけの違いは、主にポストテンションやプレストレスへの意識の違いから来ている。その違いを海外、国内で記すと以下の感じとなる。

- 海外（欧米豪）： 構造物固定用のアンカーは、Post Tensioned Anchor (or Post Tensioning Anchor) と呼ばれ、ダム用アンカーはこれに属する。その基本的な設計思想は、アンカーのプレストレスで対象物を締めつけて構造体としての安定を図るという考え方である。一方、斜面安定用アンカーも含めてアンカーは、プレストレスロックアンカー／プレストレスソイルアンカー（PTI、米国ポストテンション学会）、プレストレスグラウンドアンカー（fib：国際コンクリート学会）と呼ばれ、プレストレスの意識が高い。欧州基準（EN）では、グラウンドアンカーと呼ばれるが、ソイルアンカーが主対象である。
- 国内： グラウンドアンカー（地盤工学会）または地盤アンカー（建築学会）と呼ばれ、主対象は斜面安定用のソイルアンカーである。ポストテンションやプレストレスを付けることは無いが、その理由として「主な対象物が土砂などの塑性体であることから、常時の締め付けはあまり高くせず、地すべり時に待ち受けるようにアンカーを機能させたほうが効果的である」とことがある。

4

3. アンカーの機能分類

アンカーの用途と定着地盤によってアンカーの設計は違ってくる。

- ・アンカーの用途は斜面安定用と構造物固定用に大きく区分すべきである。
- ・定着地盤によってロックアンカーとソイルアンカーに分けるべきである。

以下に設計アンカー力(=必要な緊張力)等の基本的な設計方法の違いを示す。

1. 斜面安定用のアンカーの設計 (現行:地盤工学会のグラウンドアンカー基準に準拠)
道路、地すべり、貯水池等の斜面の安定に使用され、国内アンカーの大半を占める。各アンカーは群アンカーとして補完し合うように地盤表面に配置される。
 - a. 定着地盤が土砂の場合(ソイルアンカー): 円弧すべりに対抗できるアンカー力を設定する。すべり発生時の荷重増大(待ち受け)に対応して設計アンカー力以下で管理する。
 - b. 定着地盤が岩盤の場合(ロックアンカー): 弱層面の挙動に対抗できるアンカー力を設定する。ダム・貯水池周辺の法面アンカーは斜面安定用であるのでソイルアンカーの設計法を用いている。
2. 構造物固定用アンカーの設計 (現行:建築用は建築学会の地盤アンカー指針に準拠)
ダム堤体、堤体周辺岩盤、港湾の岸壁、長大橋の橋台、建築物の本設・仮設、浮上がり防止等の用途がある。各アンカーは独立して対象物に荷重を伝えるように配置される。
 - a. 定着地盤が土砂の場合(ソイルアンカー): 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。地盤内は必要に応じて円弧すべり面を想定する。
 - b. 定着地盤が岩盤・コンクリートの場合(ロックアンカー): 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。地盤内は必要に応じて弱層面を想定する。

5

用途・定着地盤・設計法・管理・名称による区分

アンカー全般を用途や設計法別に整理し、ダム用アンカーの位置を下表に示した。(ダム用アンカーは青字に該当する)

目的	用途	定着地盤*	設計法	緊張管理	海外名称	日本名称
斜面安定用	土砂	ソイル**	円弧すべり面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。	グラウンドアンカーと呼ぶことが大半。	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。			
構造物固定用	建築物、岸壁、擁壁等	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となるように監視する。 (理由として、変位を許さない設計思想がある)	混在。	建築用のアンカーは地盤アンカーと呼ぶ。
	堤体、堤体周辺岩盤、ゲート固定部、橋台・橋脚等	ロック または コンクリート	土砂部は円弧すべり、岩盤部は弱層面の挙動を想定する。 地震時等の局所応力や変位はFEM解析で確認する。			

*: 定着させる地盤によってソイルアンカーとロックアンカーに区分する。

** : 締まった砂層・礫層、風化岩、土丹等を示す。

***: 一般的な岩盤を示す。ロックアンカーと類似のものとして、差し筋、ロックボルト、ロックケーブル等があるが、これらは長さ7m未満であるという点でアンカーと区別される。

6

4. ダム用アンカーとは何か？

ダム用アンカーとは、ダム堤体、周辺基礎岩盤、ゲート固定部の補強や固定に用いられるアンカーを総称したものである。共通点として、「構造物固定用、かつロックアンカー（岩盤やコンクリートを対象）であること」がある。多くは大容量かつ長尺であり、より高い品質管理と耐久性が要求される。

ダム用アンカーの目的としては、堤体補強だけでなく、岩盤基礎を支える地山の補強、ダムの関連構造物（取水・放流設備、洪水吐き、門柱等）の補強などを含む。

ダム用アンカーは、用途によって「堤体補強、周辺岩盤補強、ゲート固定」の3つに区分できる。その特徴は、海外の堤体アンカーに見られるように、設計荷重 2,000kN 以上、長さ 50m 以上にも達する大容量で長尺アンカーが主流を占めることです。一方、国内の法面用アンカーの大半は、設計荷重 1,000kN 以下、長さ 25m 以下でアンカー群として設置される。

緊張管理上の違いで言うと、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対して少なめの荷重を与えるのに対して、構造物固定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用アンカーよりも高い緊張力で管理する必要がある。つまり、設計アンカー力より上か下かで両者の長期的な緊張管理方法が違う。

以上のような、大容量・長尺、緊張力管理等の面で、ダム用アンカーは防食・防錆、削孔精度、水密性、緊張・定着方法、試験などにおいてより高度な技術が要求される。

なお、ダムにおいて最も多く使われているアンカーとして、堤体や貯水池の周辺における斜面安定用アンカーがあり、大半は岩盤対象です。ただし、構造物固定用ではないのでグラウンドアンカーとしての現状の設計法で良いと考えられる。

次ページ以降にこれらダム用アンカーの種類別に概要を記す。

7

5. 堤体PSアンカー

堤体PSアンカーは、鉛直方向への岩盤定着によって堤体を固定する補強工法である。ダムの持つ巨大性や重要性を反映して、大荷重・長尺、高度施工管理、長期耐久性等が求められる。

以下は具体的用途である。

- 堤体補強（事前対策または事後復旧）：地震による荷重増や大洪水時の貯水位増に対する堤体の固定（堤体と岩盤の締付けによる転倒・滑動の防止、引張応力発生箇所の締付け）
- 地盤補強：堤体に近接する基礎岩盤の補強（弱層を含む締付けによる岩盤の一体化）
- 嵩上げ：嵩上げ部躯体のアンカー緊結による堤体の貯水容量増
- 止水：開いた水平打継目を鉛直に締付けることによる止水
- 採用事例：国内では本格的実績はまだないが、藤原ダム副ダムはPSダムとして新設、千本ダムは止水工事前のリーク止め用仮設アンカーとして施工された。海外では補強工法として普及している。

藤原ダムの副ダム
（1957年にPSダム
として建設）

写真：筆者



千本ダム
（1990年に仮
設アンカーを
施工）

[2019年に国内
初の堤体PSア
ンカーを施工](#)

写真：筆者



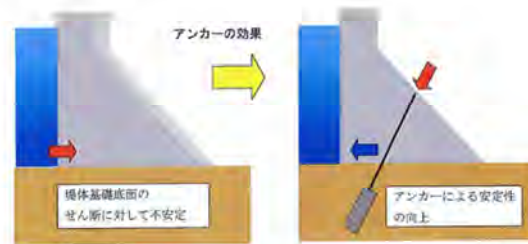
アーケレットダム（イギリス、2014-15年にア
ンカーによる耐洪水補強を実施） 写真：筆者

8

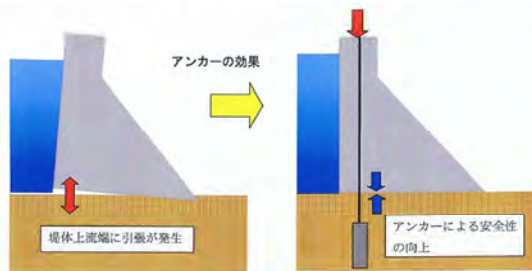
堤体補強におけるアンカーの役割

重力式ダム安定条件に対するアンカー補強の主な効果は、以下の3点である(図参照)。

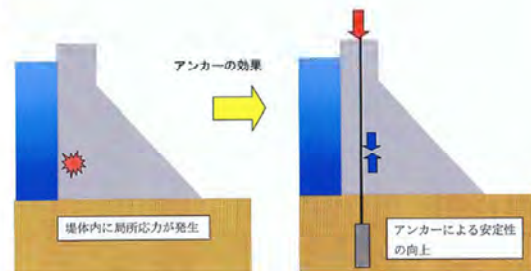
- ①ダム堤体上流面に鉛直方向の引張応力を生じる状態の改善効果
- ②ダム堤体と基礎岩盤の接触面および基礎岩盤内の弱点と考えられる面において、せん断に対する安全性の改善効果
- ③ダム堤体内の応力をコンクリートの許容応力を超えない状態に改善する効果



②ダム堤体と基礎岩盤の接触面および基礎岩盤内の弱点と考えられる面において、せん断に対する安全性の改善効果



①ダム堤体上流面に鉛直方向の引張応力を生じる状態の改善効果



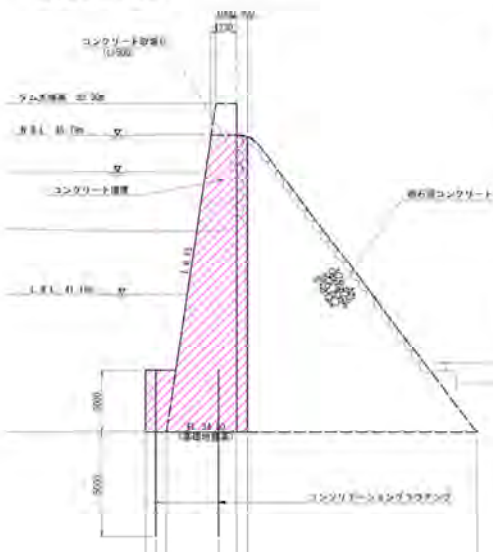
③ダム堤体内の応力をコンクリートの許容応力を超えない状態に改善する効果

図：ダム技術研究所報告第201001号「アンカー工法によるダム堤体の補強方法に関する研究」、ダム技術センター、2010年9月

9

堤体PSアンカー案と腹付け案との比較

堤高20m弱のモデルダムにおいて、堤体PSアンカーに替わる工法として、下図形状の上流堤体腹付けを検討した。



図：ダム技術センター

概略レベルでの比較を行った結果、経済性等の以下項目で有利な堤体PSアンカー案を補強工法として選定した。

1. 運用：堤体PSアンカー案は、貯水位を下げないで施工できるため、貯水池運用(用水供給、洪水調節等)をあまり変えずに施工できる。
2. 経済性：堤体PSアンカー案に対して、上流面腹付け案は約2.5倍以上のコスト高となる。後者がコスト高となるのは、貯水池を運用しながらの施工となるため、大規模な仮締切工が必要となるためである。
3. 工期：堤体PSアンカー案が約16ヶ月に対して、上流面腹付け案が約65ヶ月と4倍長い。後者の工期が長いのは、左岸と右岸を交互に締め切って施工するために大規模な仮締切が必要となるためである。
4. 既設堤体への影響：堤体PSアンカー案は、天端からの削孔だけである、既設堤体への影響は小さい。上流面腹付け案は、既設堤体上流面を0.5m程度を研るため、既設堤体に対する影響も大きい。
5. 止水性：堤体PSアンカー案は、既設堤体を締め上げるため水平打継目が閉じる。孔内グラウトを行うので水みちを塞ぐ効果もある。
6. 施工安全性：堤体PSアンカー案は、仮締切の必要がなく、比較的短期間で施工を完了することが可能であるため、施工安全性が高い。
7. 維持管理：耐用年数は百年とほぼ同等である。ただし、堤体PSアンカー案は緊張力を監視する必要がある。

10

6. 岩盤PS工

ゆるみや弱層の多い岩盤を堤体基礎とするために、表層を抑えながら、岩盤内を締め上げる補強工法である。

巨大なアーチダムの土台基礎の補強のために50年前に川俣ダムで開発された。

- 堤体周辺基礎岩盤の補強(断層を含む岩盤内締め付け=プレストレス付加)
- 堤体周辺の表層ゆるみの防止

採用事例: 川俣ダム、奈川渡ダム、真名川ダム、川治ダム、温井ダム、奥三面ダム等のアーチダム基礎、宇奈月ダム等の重力式ダム基礎

川俣ダム
(1960-65年本体施工、国内既往最大級の荷重)

[現在更新アンカーを施工中](#)

写真: 筆者



奈川渡ダム (1961-69年本体施工、堤高155m) 写真: 筆者131030



奥三面ダム (2001年完成、堤高116m) 写真: 筆者020906

真名川ダム1977年完成、堤高127.5m

写真: 筆者160411

11

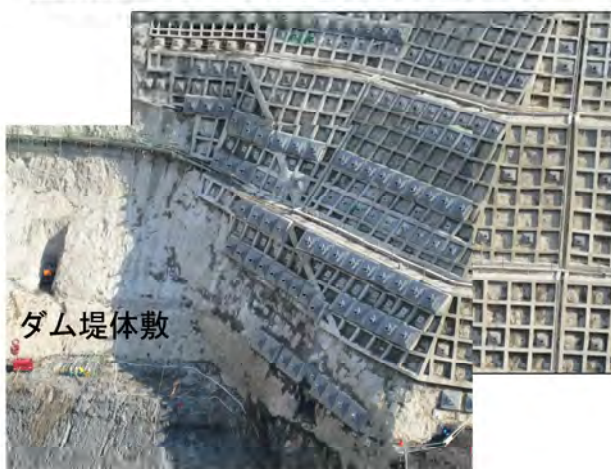
重力式ダムにおける岩盤PS工 (堤体周辺岩盤補強)

重力式ダムである宇奈月ダムや太田川ダムはアーチダムの岩盤PS工と同様の「堤体周辺表層の緩み防止と岩盤内の締め上げ」の機能を持っている。

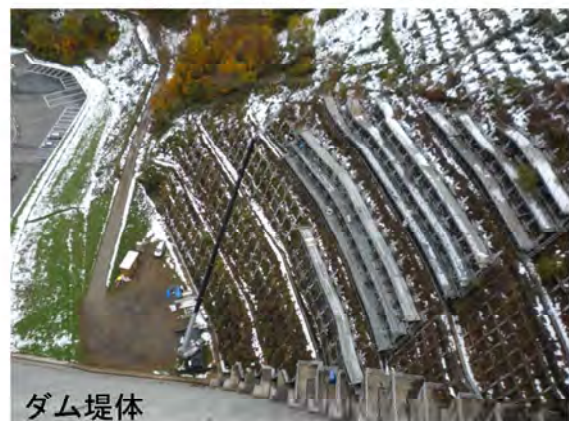
大規模な斜面安定工と外観での区別が付きにくい、特徴として「大容量、大口径」以外に、長尺による岩盤深部への荷重伝達を特徴としている。



宇奈月ダム (1990-91年施工、堤高97m)
: 大規模補強アンカー(155tf×480本)が岩盤PS工として設計された 写真: 国土交通省



太田川ダム左岸基礎 写真: 筆者060208



長井ダム右岸(補修時) 写真: 筆者1312

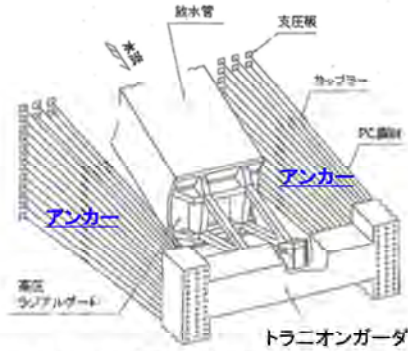
12

7. ゲート固定用アンカー

ゲートの固定部に集中する全水圧荷重をアンカーによって、ダム本体コンクリートに極力分散かつ確実に伝達させることを目的とする。ゲートを支えるという点でダム機能に関わる重要な役目を持っている。PCアンカーと呼ばれることが多い。

ラジアルゲートの軸部やローラーゲート枠部には水圧からの荷重が集中してかかるため、強固な固定が必要となる。ゲートの固定用にはテンションビームが用いられることもあるが、「受圧荷重の堤体内への分散が可能であること、後施工が可能である、経済性に優れる、足場によって良好な施工性が確保される」等の理由で、大規模なものになるほどアンカー工が採用される傾向にある。

右写真のように堤体内にゲート室がある場合は狭小のためアンカーの再緊張や増打ちが難しい。このため、ゲート固定用アンカーは、設計時の許容応力を低く抑えることで、荷重の変動に対しての安全性を高める設計をしている。



PCアンカーに用いた高圧ラジアルゲート図
(図：ダム・環施設技術基準(案) 369ページ)



13

8. 斜面安定用アンカー

堤体及び貯水池周辺の斜面安定用のロックアンカーは、グラウンドアンカーの手法で設計・施工される。

堤体と貯水池周辺の地山変状を抑える目的でのアンカーは、構造物用アンカーでないのでダム用アンカーの対象外とする。ただし、以下2点に注意。

- ・ 貯水池周辺に設置される場合は、貯水位降下時の斜面不安定化対策となる。
- ・ 斜面安定用は、すべりに対してある程度変位を許す必要から荷重変動に柔軟なアンボンド型が前提となる。

藤波ダム左岸051124
増しアンカー+抑止杭



大保ダム: 2010年
完成、堤高77.5m

写真:筆者

14



宮ヶ瀬ダム
写真:筆者



寒河江ダム
写真:筆者

9. アンカーの長期信頼性は？

国内ダムにおいてアンカーを使う提案をした場合、有識者でも「長期信頼性に問題あり」と反対する人が度々居る。長期信頼性指摘の主な疑問は「耐用年数が短い、将来に緊張荷重が下がる」の2点である。以下にそれに対する回答を述べる。

「耐用年数が短い」は、過去にアンカー鋼材の腐食による事故が何度も起きていることに拠っている。確かに、これらの大半は防食仕様が不十分であったことに原因があるが、1990年以降に2重防食が義務付けられるようになって以降、防食仕様は各段に進歩し、PC鋼材の腐食の問題はよほどの酸性環境でない限りほぼ解決されている。また、PC鋼材の遅れ破壊に対しては、圧延工程で長さ方向に強度の増すPC鋼より線の方がPC鋼棒よりも強いこともあり、現在はPC鋼より線が使われている。

「将来に緊張荷重が下がる」は、上述の防食仕様の徹底に伴って将来にPC鋼材が痩せ細るということはほぼ無くなっている。また、定着体のグラウト品質の向上、定着・緊張器具の改良によって緊張力は長期的に保持される。さらに、計測技術の進歩によって長期的な緊張力監視が可能となっている。

ただし、油断禁物で、「品質保証された鋼材や周辺機材を使う、グラウト品質を確実に保つ、丁寧な施工を行う、計測監視を確実にを行う」等が必要である。ダムは事故があれば甚大な被害につながり得る重要構造物であるので、より安全な設計・施工を行うために、早急に適切な技術指針を作成し、知識周知を徹底する必要がある。

上記の至近30年の防錆防食技術や計測技術の進歩によって、近年のアンカーの長期信頼性は各段に高まっている。アンカーに疑問を呈する人たちには、「アンカーは仮設物でなく、長期耐久性を有している」ことを、アンカー技術進歩の周知を通じて、理解してもらう努力が必要である。

15

10. 欧米豪ではなぜダム補強が多いのか？」

ダムは長期的にダムを使用することが原則であるが、欧米豪ではリスク評価によるアセットマネジメント計画に基づき補修・補強を進めている。日本も近年、長寿命化計画やダム再生ビジョン等で既設ダム補修・補強の重要性を強調しているものの、予算制度が立ち遅れている。

以下に欧米豪の状況を紺色で示し、日本の状況を赤字で示す。

- **古いダムの多さ：** 建設後50年～100年以上経過の古いダムが多いが、これらのダムは現行の安全基準をみたしていない。**日本も同様の状態にある。**
- **設計外力の増大：** 近年の設計では、洪水と地震に対する設計上の外力設定値が大きくなっている。**日本も同様の状態にある。**
- **安全管理の制度：** リスク評価に基づくダム安全管理の法令を制定し、安全性向上を目指しての補修・補強を根拠づけている。安全にかかわる課題に聖域は無いと考えられている。
日本は、既存不適格の理由で安全管理が義務付けられていない。また、リスク明示に対してタブー視する傾向がある。このため、既設ダムの補強は、貯水容量増や放流能力増等の治水利水機能増大の中で進め、表に出さないことが多い。
- **現実的な補強策：** 堤体PSアンカー工のような適用幅の広い補強手段を持っているので、補修・補強に容易に踏み切れる。アンカー施工法への信頼性も高い。
日本では、堤体腹付けが堤体補強の主な対策であるが、大規模な工事となるため、補強単独での事業化は難しかった。堤体PSアンカーを導入すれば、貯水池運用を続けながらの短期かつ廉価での補強が可能となる。

16

現地調査を行った2事例からアンカー補強の経緯を記す。

クルニーダムの計画例 Clunie Dam

英国スコットランド、1951年完成、堤高23.8m、堤頂長141m、貯水容量36,400,000m³、発電:61,200kw、2007年補強:緊張1,400~2,500kN x 23孔(左岸12孔+右岸11孔)

点検報告書において、PMF(可能最大洪水量)、および地震時の荷重下のダムの挙動をチェックした結果、以下が結論付けられた。リスク評価による決定事項を以下に示す。

1. PMFでは、貯水池上昇によって、パラペットを2.9m越える越流が6日間にわたって発生し、越流量は単位幅16m³/sと予想される。
2. ダム非越流部は、PMF荷重下で転倒に対する十分な安全率を有していない。
3. 追加の損壊モード解析は、基礎岩盤上層の滑動が、転倒より重大であることを示した。
4. この状況下、水位増は安全率の急な減少をもたらし、クラックに沿った揚圧力の増加、およびcがゼロになるにつれてのクラック沿いせん断強度の減少の両方につながり、堤踵部におけるクラック発生によって損壊に至る。
5. 年当り損壊確率は、元の約5000年に1回が今回のアンカー設置によって約50000年に1回に減る。
6. 点検報告書は、低い下流水位時のPMFにおいて1.05以上の安全係数を要求し、870kN/mのアンカー荷重を持って、ポストテンション・アンカーの設置を勧めた。



写真 筆者 2015.6



アンカーは両岸の非越流部のみ

写真: Google map

17

アークレットダムの計画例 (Arklet Dam、英国スコットランド)

堤高11m、堤頂長320m、天端幅3.35m
建設の施工期間:1909-1914年、
アンカー補強:2014~15年
目的: 安定性確保



再緊張作業 写真: 筆者201506

設計荷重: 3,000~4,000kN、英国で最大級
ストランド: DYWIDAG製、より線数: 22本, 23本, 24本, 27本、計64孔、削孔径311mm
アンカー長: 36~56m うち岩盤部11~25m

アンカー補強の決定経緯

1914年に完成し、2014年(現在)も使用している。100歳のダムの未来(the long-term future)を展望して100年後の2114年にも使えるダムとすることを基本方針とした。

いくつかのオプションが、Jacobs Engineering社(世界的Engineering Construction、本社米国)の支援を受けて、検討された。

堤体天端からの高容量のPS アンカーによってダムを補修・補強することとなった。

選択理由: 文化遺産を保存でき、かつより経済的である。

アークレットダムの所有者 Scottish Waterの概要

- 沿革: 2002年設立の公社、政府監督下
- 役割: スコットランド250万戸、15.4万事業所に対する水道補給と下水道処理
- 2014年收入: 約10億ポンド(2000億円)
- 日生産量 上水130万m³/日+リサイクル水84万m³/日
- 本社: Dunfermline, Scotland
- 従業員数: 3,600人

18

11. 海外：ダム用アンカー技術の発展史

ダムへのアンカーの適用は、1930年代以降に堤体や端部の補強に適用されており、北米、欧州、豪州、アフリカ、中東、西アジアで広く実施されてきている。

- 1928年にフランスのFreyssinetがプレストレスに強度の非常に高い鋼線を用いる技術が開発された。そのプレストレス(PS)技術が1934年にアルジェリアのシェファール(Cheurfas)ダムの堤体補強に適用されたのが、アンカー使用の最初である。
- その後、アンカーはダム基礎補強工法として発展し、フランスのCastillonダム(堤高101m,1948年完成)、Chaudanneダム(堤高73.9m、1953年完成)等のアーチダムで採用された。また、新設ダム堤体にアンカー緊張を採用して経済断面としたアルツナライリジダム(英国スコットランド)が1956年に完成した。
- 1950年以降、アンカーは、道路法面、地すべり斜面、橋梁基礎、建築物基礎、土留めなどに多く適用されるようになった。橋梁では、PSコンクリート橋が多く採用されるようになった。
- 1972年にドイツDINにアンカー基準が制定された。1970年代、施工性から緊張材がPC鋼棒からPC鋼より線へ次第に変わった。削孔機の改良も進み、ダウンザホールハンマーの実用化が進んだ。
- 米国ティートンダムの1976年事故後、既設ダムの安全対策が議論されるようになり、80年代以降、欧米ではダム安全管理のための法整備が為されるようになり、堤体補強の需要が増した。
- アンカー破断の多発を受けて国際プレレストコンクリート学会が調査を行い、1986年にアンカーの防錆対策報告を公表した。翌年以降、世界中でアンカーの2重防食が義務化されるようになった。
- 1990年代以降は堤体安定性確保のためのダム用アンカーの数が急速に増えた。これは、安全管理の制度化、防錆性能の向上(2重防食義務化)によるところが大きい。この頃、削孔や計測等の施工技術も急速に発展したことの影響も大きい。
- 2000年以降：世界的に大洪水の発生が続いたため、既設ダムで洪水吐き能力を増強する事例が増え、洪水吐き越流部や嵩上げ部をアンカー補強する事例が増えた。

* : 1970年代後半からアンカーの破断事故、機能低下が欧米各地で報告された。これを受けて、国際プレレストコンクリート学会(FIP、現fib)はアンカー分科会(Littlejohn教授ほか)設置により既設アンカーの破断事例を調査して1986年に報告書「アンカーの永久使用として望ましい構造と維持管理」を公表した。

ダム用アンカーの近年概況

Source: Rock Anchors For Dams :A Five—Years Update、Donald Bruce、2013

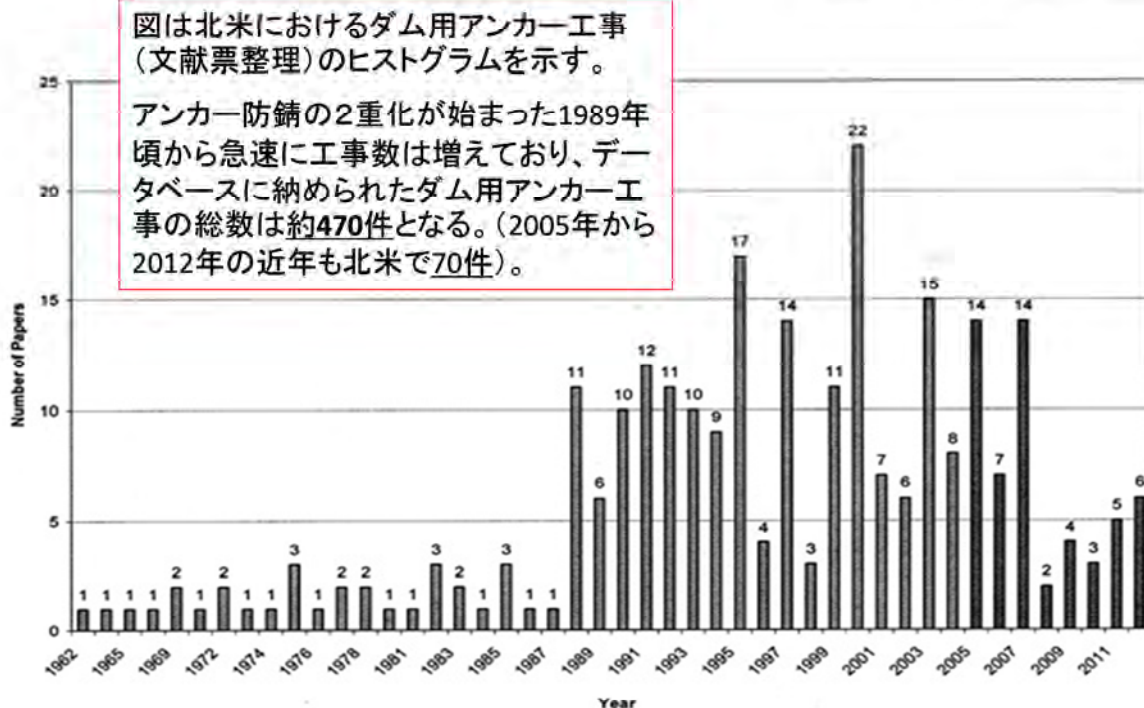


図 北米(米国+カナダ)のダムにおけるアンカー工法の採用工事数

12. 国内：ダム用アンカー技術の発展史

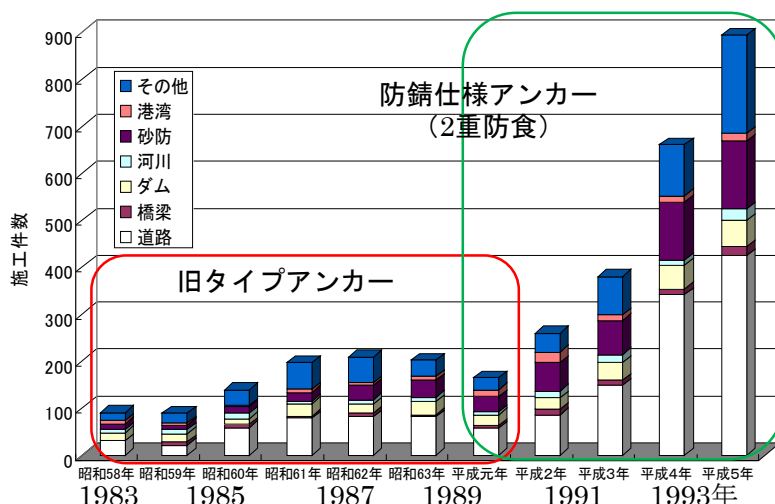
国内におけるアンカー技術の適用は、1950年代にダムから始まり、1960年代後半からは削孔機の開発とともにグラウンドアンカー施工が本格化し、1990年頃からは2重以上防錆化した現仕様のアンカーとなり一層多くの現場に用いられるようになった。

- 国内アンカー施工の最初は、藤原ダム・副ダム(1957年施工)である。この時、プレストレストダムと呼ばれる大容量アンカー構造が中央部12mの区間に適用された。
- 1962～64年において、川俣ダム左右岸においてアーチダム基礎補強用のアンカー(岩盤PS工)が施工された。その後、奈川渡ダム、真名川ダム、奥三面ダム等のアーチダム基礎において、岩盤PS工が施工された。
- 1960年代後半、ダム以外でも、道路法面、地すべり斜面、橋梁基礎、建築物基礎、土留めなどに多く適用されるようになった。また、PSコンクリート橋梁が多く作られるようになった。
- 1963年： 蘭原ダムの高圧ラジアルゲートにPCアンカーを施工(ゲート固定部アンカーとして国内最初)
- 1968年、大迫ダムにおいて大規模な貯水池法面アンカーが施工された。これは、地すべりアンカーの最初であり、以降は大渡ダムほか貯水池斜面安定用のグラウンドアンカーとして多用されるようになった。
- 1972年にロータリーパーカッション式の削孔機が初めて導入され、その後普及かつ国産化した。
- 1977年に土質工学会で「アースアンカーの設計・施工基準」が制定された。その後、法面アンカーの普及や2重防食の要求性能化を受けて、1988年に「グラウンドアンカー設計・施工基準」として改訂された。
- グラウンドアンカーとしては、1980年代にカプセル型等の防食タイプのアンカー開発が進んだ。この後、防錆仕様の改良、摩擦圧縮型(弱い地盤用)の開発等が進む。
- 1991年以降、道路法面用や砂防用を中心にアンカー設置数が急増するが、2重防錆化と深く関わっている。
- 重力式ダムにおける地盤補強用としては、1990年に宇奈月ダム左岸(国内最大級)、2005年に太田川ダム左岸(周辺基礎岩盤用)等が施工される。
- 貯水池斜面安定用として、1998年金城ダム(拡孔型仕様)、2004年大滝ダム(大規模対策)等、多くのダムでアンカーが使用される。
- 大規模なアンカー更新として、2017年に三保ダムで地山補強アンカー、2018年に川俣ダムで岩盤PS工の施工が開始された。

31

設置経過年数と旧タイプアンカーの状況

国内の全アンカーの種類別の普及経緯について図に示すが、1988年の土質工学会技術基準改定による二重防食化を受けて、1990年頃から防錆仕様アンカーが大きく伸びてきている。近年は、新設・仮設を合わせて概略、アンカー施工件数で3,000～4,000件、総延長で2,000～3,000kmで推移している。堤体PSアンカーについては、古い時代の施工による旧タイプアンカーが多いことから、その劣化対策は、今後一層重要性を増すと考えられる。



アンカーの施工実績(対象物別)
 図:グラウンドアンカー維持管理マニュアルP13に加筆

32