

4.1 ロックアンカーのプレストレス特性に関する研究

研究年度：令和4年度～

研究分野：PS アンカーに関する研究

調査研究名：ロックアンカーのプレストレス特性に関する研究

研究者：川崎秀明

【要約】

堤体、基礎岩盤の安定のために用いられるダム用 PS アンカーの最大の特徴は、堤体や基礎岩盤の硬いものを対象とするロックアンカーであることである。これに対して、従来、国内で用いられている斜面安定用や建築地盤用のアンカーは、岩盤以外を対象とするソイルアンカーが主体であり、アンカー対象物の違いによってアンカーの設計方法に多くの違いが生じる。

本論文では、硬いアンカー対象物にプレストレスを積極的に導入するロックアンカーとソイルアンカーの設計法の違い、一般土木で多用される挿し筋との違い、フルボンドとアンボンドの違い、緊張方法の違い等について、従来工法と比較しながら述べる。

なお、ダム用 PS アンカーは、2021 年 9 月の「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」の発刊以降、技術普及を鋭意進めているところである（参考：本書巻末の 2023 年 1 月ダム技術センター研究発表会の特別講演におけるパワーポイント資料）。ちなみに、千本ダムの堤体 PS アンカーと川俣ダムの岩盤 PS アンカーにおける施工実績が土木学会技術賞等の著名な賞を立て続けに受賞し、その合理性や経済性から注目の技術となっている。

【キーワード】

PS アンカー、緊張力、定着、軸力計測、フルボンド

【背景・目的】

ダム用 PS アンカーについては、ダム技術センターにおける 10 余年の研究と川俣ダムと千本ダムの設計・施工実績を基に、2021 年 9 月に「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」¹⁾を刊行した。

ダム用 PS アンカーは、堤体、基礎岩盤などの硬い対象物を大緊張力でもって岩盤に緊結・固定するもので、施工時に貯水位の低下や大規模な仮設もなく対象物の安定性を大きく向上させ得ることから、今後のダム再生や補修・補強に大いに期待される技術である。メカニズム上は、所定の緊張力を長期的に保持することが前提となる。

図 1 に設計体系から見た PS アンカーの分類を示すが、岩盤等の硬いものを対象とするロックアンカー（ダム用 PS アンカー等）と土砂等の岩盤以外を対象とするソイルアンカー（グラウ

ンドアンカー等）の二つに大きく区分できる。両者は対象物が異なることから、設計や緊張力管理において異なる対応となる場合が多い。むしろロックアンカーは、プレストレス技術という点で PC 橋梁に近く、両者は共通部分の多い類似技術である。

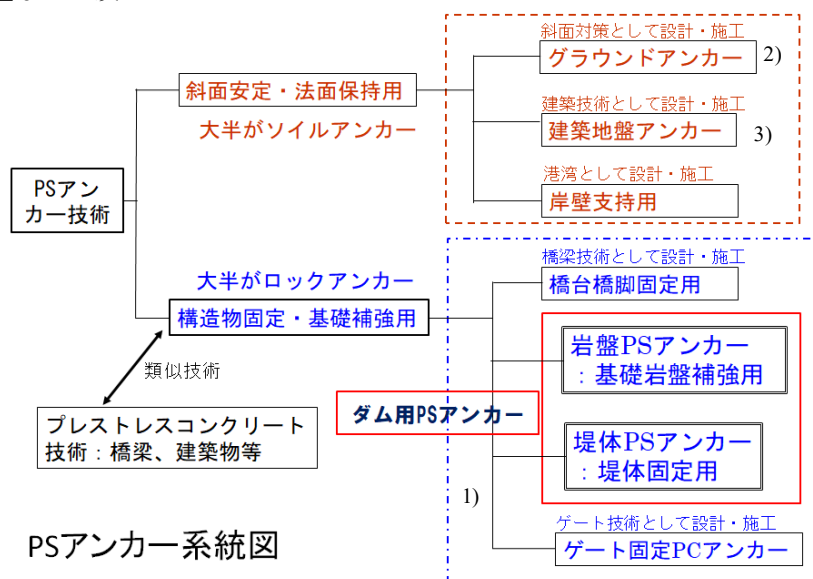


図 1 設計体系から見た PS アンカーの分類

(1) ダム用 PS アンカーとは何か

国内標準の地盤工学会グラウンドアンカー設計・施工基準²⁾(p21)によると、「グラウンドアンカーとは、作用する引張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、定着長、自由長、アンカー頭部によって構成されるもの」である。その概念図を図 2 に示す。

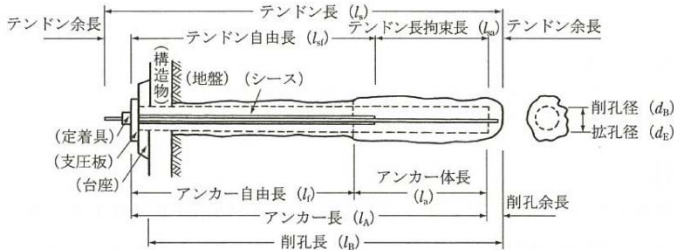


図 2 グラウンドアンカーの概念図²⁾

一方、世界標準規格といえる PTI 技術勧告 (PTI : 米国ポストテンション学会)⁴⁾によると、「岩盤や土砂に削孔後に孔内に設置され、深部がグラウト定着された後に緊張された tendon」(p2)、Anchor: A tendon installed in a drilled and grouted hole in the ground (soil or rock) that is stressed after installation.”である。

ここで、構造的には両者の違いはほぼ無いが後者はプレストレスが強調されている点が異なる。海外でのアンカーの呼び方も prestressed anchor (PS アンカー)、Post-tensioned anchor (or Post-tensioning anchor) が一般的である。ところが、国内アンカーにおいては、プレストレスの認識が希薄であるため、ロックアンカーの設計をソイルアンカーの設計法で行ってしまう事例がこれまで多かった。このため、「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」¹⁾のようなロックアンカー専用の基準類の発刊が急務であった。

(2) PC 橋梁との違い

PS アンカーの基本原理は、PC 橋梁と同じくポストテンション方式による緊張締め付けであり、対象物が地盤か橋梁桁かの違いによって区別される。

特に顕著であるのは緊張力の与え方の違いであり、PC 橋梁ではコンクリート部材の両端において tendon が緊張されるが、PS アンカーの場合、地盤側にはグラウト等により定着長を造成して地盤と一体化され、地表側だけで緊張材が緊張・定着される。

このため、PS アンカーでは、より複雑な応力条件下となり、緊張材とグラウト間の抵抗とグラウトと岩盤間の抵抗のうち低い方で安全性は規定される。

なお、欧米では PS アンカーと PC 橋梁の設計は同一の会社が行うことが多いが、これも両技術が兄弟の関係にあることに依っている。

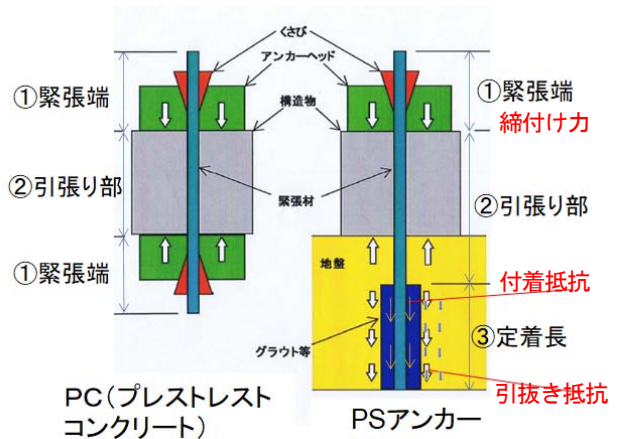


図 3 PC 橋梁と PS アンカーの違い

世界最初のプレストレス構造物は、堤体の嵩上げ補強のために実施されたアルジェリアのシェファードダム (図 4) である。PC 橋梁に 10 年ほど先立って、1931 年から 1935 年にかけて PS アンカー緊結による堤体補強と嵩上げが実施された。

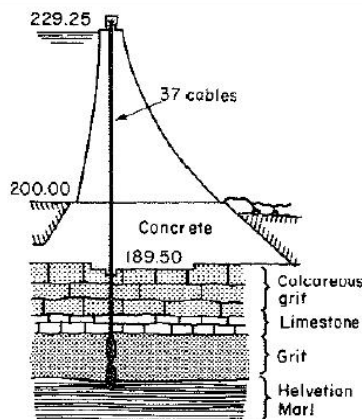


図 4 Cheufas Dam シェファードダム、アルジェリア

堤高 30m、堤体施工 1880-1882 年、アンカー補強 1934 年、1,500ton x 37 孔 (4m 間隔)、アンカー一長 60m

(3) ロックボルトとの違い

近年、トンネル等地下構造物の工事においてロックボルトが用いられ、これにプレストレスが導入される例も多い。この場合、PS アンカーとの区別は、アンカー長が原則的に自由長 4m 以上+定着長 (PS 定着長) 3m 以上 (計 7m 以上) であるか否かでもって判断される。即ち、PS アンカーは引抜け事故がないように十分な長さの定着長を確保することが義務付けられており、安全性はより高い。一方、ロックボルトは地山の状況を見ながら設置数を多くすることで、より合理的に安全性を担保している。

(4) 挿し筋との違い

一般土木工事で多く使用される挿し筋であるが、PS アンカーとの違いはプレストレスの有無である。ただし、力学上は「PS アンカーはプレストレス荷重までは変位を許さない」に対し、「挿し筋は荷重作用直後から変位が生じる」の違いがある。両者の違いをイメージとして表すと以下になる。

① 引張力に対する挙動

★PS アンカーの場合： PS 荷重に達した後に変位が生じるので、予想される引張力を打ち消すだけのプレストレスを与えておけば PS 荷重まで変位は生じない（図 5 の上図参照）。

★挿し筋の場合： 鋼棒の軸方向に引張力がかかると、鋼棒とその周りのグラウトに軸方向変位が即発生する（図 5 の下図参照）。

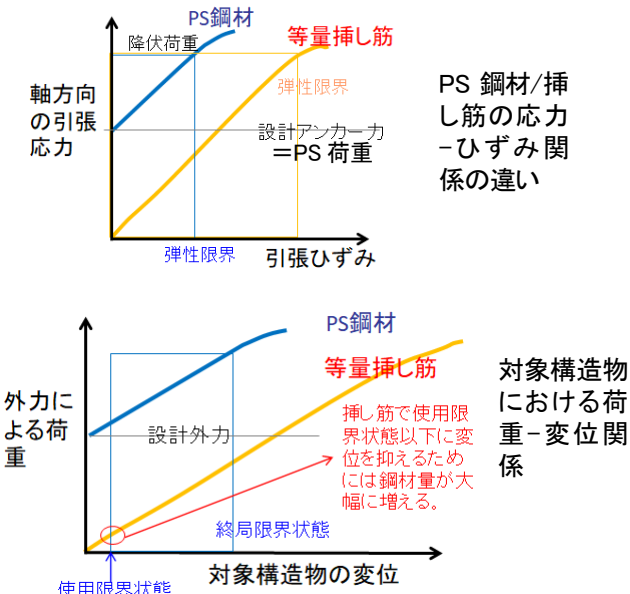


図 5 PS 鋼材と挿し筋の引張力に対する挙動の違い（同じ鋼材量として考えた場合）

② せん断力に対する挙動

■PS アンカーの場合： 締め付けによる摩擦抵抗でせん断力に対抗できるプレストレスを与えておけば、PS 荷重まで変位は生じない。

■挿し筋の場合： せん断力がかかると、鋼棒とその周りのグラウトにせん断変位が即発生する。

③ 総括

構造物の安定性は変位によって決まる。PS アンカーの方が、PS 荷重までの対象構造物の変位を抑えることで、鋼材使用量を大きく減らすことができる。

ちなみに、挿し筋の方が変位増や荷重増に対する余裕があるという見方があるが、待ち受けでない限り、構造物の変位を抑えることが優先する。

(5) フルボンドタイプとアンボンドタイプの違い

PS アンカーには、テンドンをシース（さや管）内に入れて周囲にグリースを詰めることで自由長を保つアンボンドとテンドン周囲をグラウトで固化してメンテナンスフリーとするフルボンドの 2 タイプがある。世界的にも、防食性能やテンドン拘束に対する見解が異なっており、米国内でも陸軍工兵隊がアンボンド推奨、開拓局がフルボンド推奨と、どちらが良いか議論の分かれるところである。

ただし、防食性能については、建設後 50 年経過した川俣ダム既設アンカー健全性調査により、フルボンドタイプの方が、アンボンドタイプに比べて腐食が格段に少なく耐久性において優れることが判った。このため、100 年耐久性能を旨とする川俣ダムや千本ダムの PS アンカーでは、防食性能に優れた内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線（略称：ECF ストランド）をテンドンに用いて、その周囲を高流動性と無収縮を両立させた無収縮グラウトで充填する高品質のフルボンドタイプを採用した。

テンドンの拘束については、フルボンドタイプの方が剛性は高くなるのでアンカー対象物の変位をより低く抑えることができる。なお、米国で最も管轄ダム数が多くその大半は中小ダムである連邦エネルギー庁は、荷重の経年劣化に対してメンテナンスフリーであるフルボンドタイプを推奨している。

ただし、フルボンドタイプの短所は、再緊張や緊張力計測が困難ということであり、国内の従来 PS アンカーはダム用を除いて基本的にアンボンドタイプを採用している。この点、川俣ダムや千本ダムでは、軸力計測ストランドを新たに開発して、フルボンドタイプであっても荷重計測を可能としている。

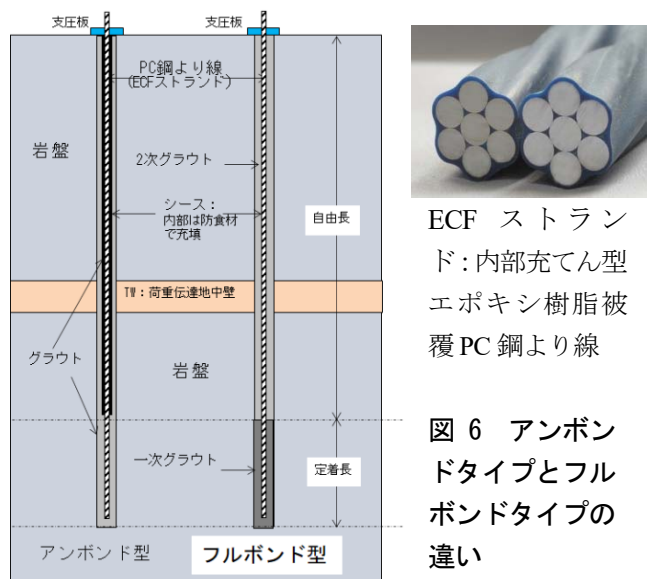


図 6 アンボンドタイプとフルボンドタイプの違い

(6) ソイルアンカーとロックアンカーの違い

アンカーによるすべり抵抗は「引止め抵抗（すべり面接線方向の分力）と締付け抵抗（すべり面直角分力による摩擦力）」によって構成される。すべり出すまでは締付け分力が卓越し、滑動後は引止め分力が卓越する。

ソイルアンカーの対象となる地盤は、剛体でないので締付け分力にあまり期待できず内部摩擦角φも小さい。従って、すべり面滑動後に発生する引止め分力に期待してアンカー力を発揮させる方が有利であり、待ち受け的なアンカーとなる。

図7は、グラウンドアンカー設計・施工基準（地盤工学会）²⁾にある斜面用アンカー例であるが、引止め分力に期待してすべり面に緩く斜交させ、導入緊張力は設計PSアンカー力の50%程度としている。なお、待ち受けを前提として設計するので、変位に対してはある程度動くことを前提としている。

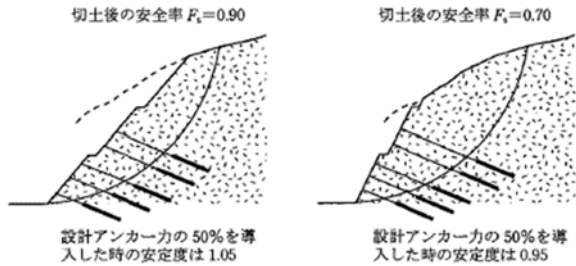


図7 斜面用グラウンドアンカーの傾角の例²⁾

ただし、斜面用アンカーでも引止め分力を主体として設計した例もある。図8は、高速道路Nexco各社による「グラウンドアンカー設計・施工要領（2007.8）」⁵⁾にある斜面用アンカーの例であるが、すべり面に対して直角に近い傾角としている。背景として、当時、高速道路の長大切土面においてアンカー破断による事故が多発したことから、斜面の安全性を高めるために、待ち受けではなくて事前補強に切り替え、その結果、高角度の傾角に変えたものと考えられる。即ち、高速道路の岩盤斜面においては、締付け分力によって分割片を斜面に固定することで、変位自体を抑制する方向になっている。

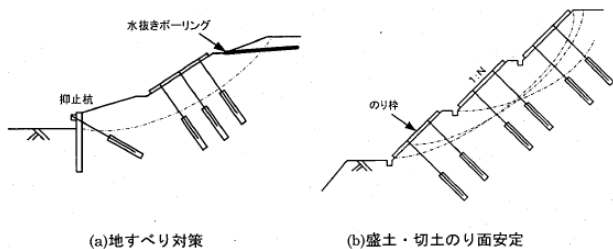


図 1.1.1 アンカーの採用例

図8 高速道路法面におけるアンカー傾角の例⁵⁾

一方、ロックアンカーは、すべり面に対してより高角度に設置することで締付け分力を高めて、設計アンカー力以上を保つことで、効果的に事前補強を行うものである。川俣ダム等のアーチダムの岩盤PSアンカーでは、重要構造物を支える上で変位を許容しないという設計思想に立っており、傾角は想定すべり面に対して高角度である。

図9は、堤体PSアンカーの例であるが、すべり（滑動）面に対してほぼ直角としている。

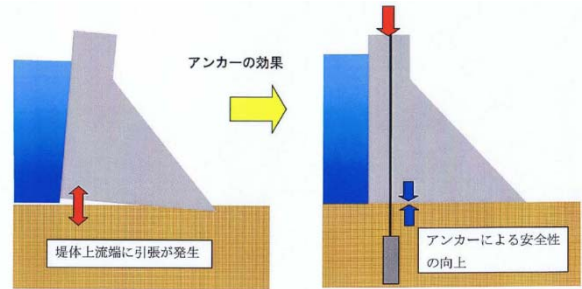


図9 ダム用アンカーの傾角の例

これらの荷重と抵抗の関係を図示したのが、図10である。ソイルアンカーはすべり面に斜交するよう設置するほど、引止め分力を大きくすることができる。このことで、非岩盤の斜面がわずかに動いた後に効果的にすべりを止めることができる。

一方、ロックアンカーは、すべり面に高角度で設置することで、締付け分力を高めることができる。このことによって変位を抑制することができることから、事前補強といえる。

アンカーの設計においては、アンカー対象物の硬さ（岩盤か非岩盤か）によって、アンカー傾角と保持緊張力を変えるべきである。ダム周辺には、大規模斜面が生じやすいが、岩盤にアンカーを使用する場合は、ロックアンカーの設計とするように注意する必要がある。

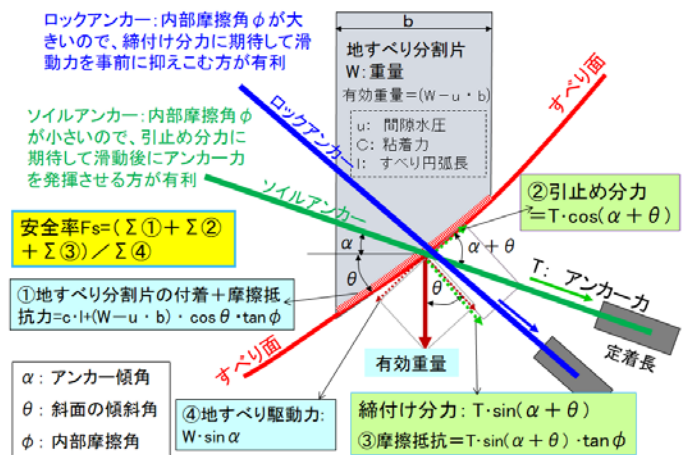


図10 斜面におけるソイルアンカー（緑線）とロックアンカー（青線）の作用の違い

(7) アンカー緊張力の考え方

アンカー緊張力の与え方と保持すべき範囲について、いくつかの考え方がある。

① グラウンドアンカーの緊張力管理

グラウンドアンカーの緊張力は、基本的に図 11 に示すように普段は設計アンカー力の半分程度に下げておき、すべり発生後に設計アンカー力に達することで効果を発現することが期待されている。いわば待ち受けアンカーの設計思想である。

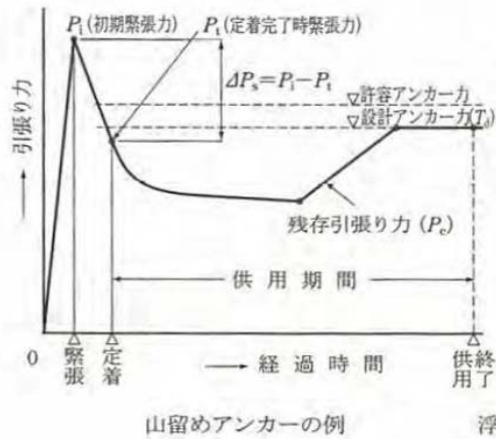


図 11 経時的な荷重の推移と設計アンカー力²⁾

② 建築地盤アンカーの緊張力管理

アンカーの緊張力は、一般に経過時間とともに図 13 に示すような経時変化を示す。初期緊張力 Pi で

緊張したアンカーは、定着具の滑りや戻りによって定着時緊張力 Pt に減少し、その後も残存緊張力 Pe は微減すると想定されている。このため、供用期間中に Pe が設計アンカー力 Pd を下回らないように定着時緊張力 Pt を決定することが重要である。

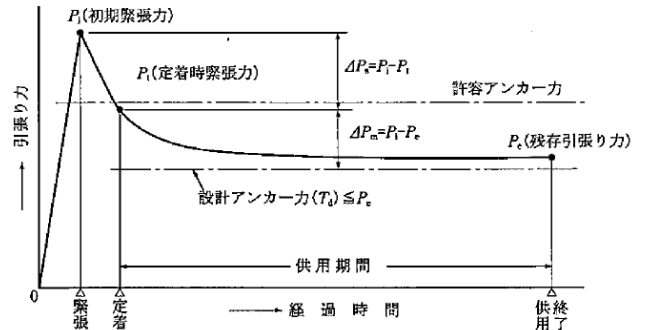


図 13 アンカーに作用する荷重の経時変化³⁾

③ ダム用 PS アンカーの緊張力管理

ダム用 PS アンカーの緊張力は、図 12 に示すように緊張力を高めに導入する建築地盤アンカーと低めに導入するグラウンドアンカーの中間域に入るように、かつ設計アンカー力以上を保持するように緊張力を管理することになっている。また、定着時緊張力でもって荷重調整することで、より精度の高い緊張力管理を行うことにしている。

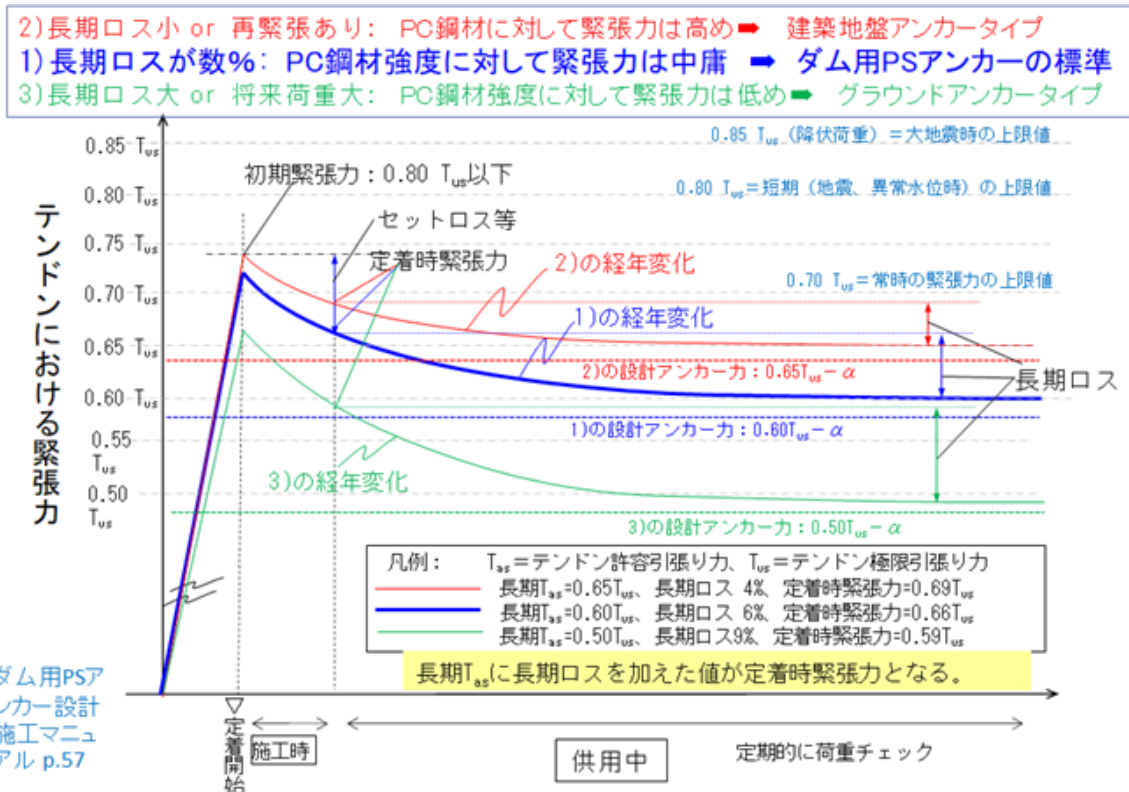


図 12 ダム用 PS アンカーに作用する緊張力¹⁾

(8) おわりに

表 1 に PS アンカーの機能と手法による分類を挙げるが、この中でソイルアンカーとロックアンカーの設計の考え方がかなり異なることがわかる。即ち、硬いものを対象とする場合はロックアンカーとして設計すべきであり、「傾角をすべり面に対して高角度化する、緊張力は設計アンカー力以上を保持する」が重要である。同時に、孔当り緊張力の増大（大孔径化）によってアンカー数を減らし、経済性を高めることも重要である。

これまではロックアンカーに関する国内基準類が無かったために、固い岩盤の斜面についてもソイルアンカーの設計法が準用されていた。このため、変位を許容しない条件であっても、従来アンカー基準に従って待ち受け前提のアンカー設計となってしまう、アンカーが有効でなかった事例もあった。

しかし、ロックアンカー専用である「ダム用 PS アンカー設計施工マニュアル」が刊行されたことによって、今後は岩盤等の硬い対象物については、ロックアンカーとしてのより合理的な設計が為されることを切に期待する。特に、ダムの基礎や堤体は、変位を極力抑止する設計が必須となるが、そのような場合、プレストレストを積極活用したロックアンカーの専用書として当マニュアルを活用していただきたい。

ロックアンカーの設計は、若干複雑な面があるが、まずはソイルアンカーとの違いと適用範囲について認識することが、事始めとなる。

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 9 月
- 2) 公益社団法人地盤工学会、「グラウンドアンカー設計・施工基準、同解説(JGS4101-2012)」、2012 年 5 月改定
- 3) 一般社団法人日本建築学会、「建築地盤アンカー設計施工指針・同解説 第 3 版」、2018 年 1 月改定
- 4) Post-Tensioning Institute (米国ポストテンションング研究所、略称 PTI) , “Recommendations for Prestressed Rock and Soil Anchors” , Third edition 2014, printed in USA
- 5) 東日本高速道路株式会社、「グラウンドアンカー設計・施工要領」、2007 年 8 月

表 1 PS アンカーの機能と手法による分類

| 目的 | アンカー対象物 | アンカー区分 | アンカー力の設定法 | 緊張管理 | 防食・ボンドタイプ | 国内・海外名称 |
|-------------|------------|-----------|--|---|---------------------------------------|--|
| 斜面安定・法面保持用 | 非岩盤の斜面・法面等 | ソイルアンカー* | 円弧すべりに対抗できるアンカー力の設定 | 有効緊張力が長期的にほぼ設計アンカー力以下となるように監視 | 2重防食、PC鋼材防食被覆の普及、基本的にアンボンドタイプ | 国内:グラウンドアンカーまたは建築地盤アンカー)、 英国、豪州等では Ground Anchorages と呼ばれる |
| | 岩盤の斜面・法面等 | ロックアンカー** | 弱層面の挙動に対抗できるアンカー力の設定 | | | |
| 構造物固定・基礎補強用 | 建築物、岸壁等 | ソイルアンカー* | 構造物の不安定化(転倒、滑動、浮力等)に対抗できるアンカー力の設定 地震時等の局所応力や変位は FEM 解析で確認(安定上の有害な変位を許さない設計思想) | 有効緊張力が長期的に許容引張り力以下かつほぼ設計アンカー力以上となるように監視 | 2重防食、PC鋼材防食被覆の普及、アンボンドタイプとフルボンドタイプが半々 | 国内: 堤体固定用は堤体 PS アンカー、基礎補強用は岩盤 PS アンカー 海外では Prestressed anchor, Post tensioned anchor, Post tensioning anchor 等と呼ばれる |
| | 橋台・橋脚等 | ロックアンカー** | | | | |
| | ゲート固定部 | | | | | |
| | 基礎岩盤 | | | | | |
| 堤体コンクリート | | | | | | |

*: 締まった砂礫層、風化岩、土丹等を対象とする PS アンカー

** : 軟岩以上の岩盤、コンクリート等を対象とする PS アンカー