報文

グラウンドアンカーの新しい定着方法と施工管理

川崎　廣貴*　河田　雅也**

1 はじめに

グラウンドアンカー（以下，アンカー）には，緊張・除荷過程で自由長摩擦の影響挙動が存在するが，これを考慮したアンカー定着方法と施工管理が未だに確立しておらず，解決すべき課題となっている。ここでは，アンカー自由長摩擦考慮のアンカー力設計モデルと緊張除荷挙動解析式を構築し，長尺アンカー施工の現場データ[1)]をもとにパラメータ実測式を求めて，アンカー定着方法と施工管理方法を新たに考案したので報告する。

2 アンカー挙動の現場実態と構造物補強

2.1 自由長摩擦のアンカー挙動

アンカーは，テンドン（PC鋼より線束）・頭部・自由長・アンカー体の部位からなり，頭部のテンドンは定着具で受圧体に定着し，頭部との正対側はテンドンをアンカー体で地盤固着している。その間の自由長は，テンドンがシース被覆で伸縮可能状態であり，頭部でテンドンを緊張・定着することで，定着具とアンカー体間にアンカー力（プレストレス）が作用する。アンカー体は，テンドンがグラウトを介して地盤に固着し，アンカー力をせん断伝達する機能を有する。

自由長摩擦は，自由長内グラウト拘束に伴うテンドン・シース間摩擦である。この因子は，表-1に示す自由長部長さ，アンカー削孔曲り，削孔内シースたわみ，削孔内シース回転の４種類である。本摩擦により，アンカー緊張は伸び変位が小さくなる。一方，図-1のようにアンカー除荷は，反転摩擦のループ挙動が現場実態である。したがって，除荷側の地盤クリープ変位などによるプレストレス低下量はやや急勾配の非線形での減少挙動であり，この現場挙動を考慮することが重要になる。

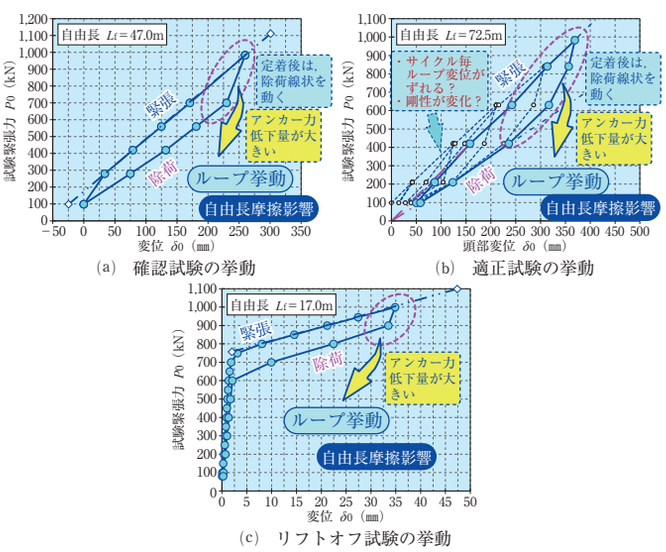
2.2 地盤クリープと純リラクセーションの挙動

図-2に，アンカー定着直後から２ヵ月程度のアンカープレストレスP_eの残存比βの変化を示す。本プレストレス低下挙動の地盤条件は，アンカー頭部からアンカー体までの全体が換算N値100以上のDH～CL級の風化岩である。同図の個別データは荷重計付アンカーの各経時挙動，データ平均は同一経過日数が得られたアンカーデータのみを平均化したもの，中央推定はデータ平均の回帰式であり，相関係数rは$r=0.884$である。なお，下限推定は，中央推定をもとにして設定している。

プレストレスP_eの経時挙動は，同図に見られるように，定着後の10日程度で急激に低下し，その後緩慢であるが徐々に低下する。本現場でのプレストレス低下挙動は，大規模岩盤地すべりのアンカー対策で，主にアンカー頭部地盤から深部地盤の応力伝播分布によるクリープ影響が主要因であり，テンドン純リラクセーション影響も含むと考えられる。本事例のように，風化岩地盤でも地盤クリープ影響が存在し，アンカーのプレストレス低下を

表-1　自由長摩擦の因子と原因

摩擦因子	摩擦原因
①自由長部長さ	・自由長部長さに応じて，漸増的に摩擦増加
②アンカー削孔曲り	・削孔長に応じて，アンカー削孔曲りが増大するため，摩擦増加
③削孔内シースたわみ	・テンドン挿入時の自重でたわみ状態になり，グラウト充填により拘束のため，摩擦発生
④削孔内シース回転	・ケーシング引抜き回転時に，回転状態になり，グラウト充填により拘束のため，摩擦発生



(a)　確認試験の挙動　(b)　適正試験の挙動　(c)　リフトオフ試験の挙動

図-1　自由長摩擦のアンカー挙動

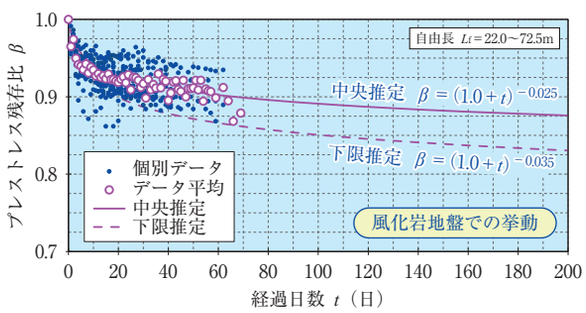


図-2　定着後のアンカー力挙動

＊KAWASAKI Hirotaka　弘和産業㈱ 技術顧問，技術士（総合技術管理部門 建設部門）　東京都青梅市今井３－３－12
＊＊KAWATA Masaya　清水建設㈱ 名古屋支店土 木技術部 部長，技術士（総合技術管理部門 建設部門）　愛知県名古屋市中区丸の内１－16－15

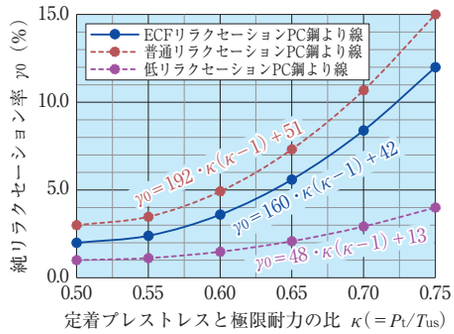


図-3　PC鋼より線の純リラクセーション

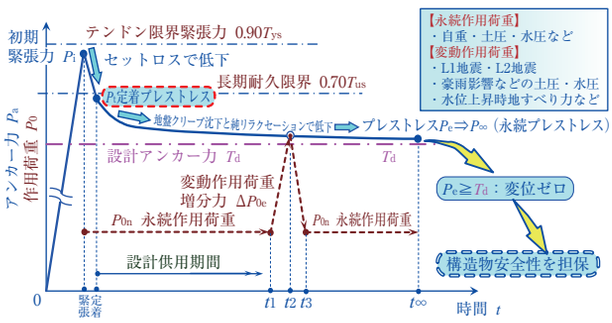


図-4　プレストレス経時変化と作用荷重

誘発することから，これに留意して定着プレストレスを設定することが必要になる。

図-3に，コンクリート標準示方書設計編によるPC鋼より線の純リラクセーションを示す。設計供用期間の純リラクセーションは，定着プレストレスと極限耐力の比 κ で表されるので，これを考慮する必要がある。

なお，見掛けのリラクセーションは，純リラクセーションをもとにコンクリート構造のクリープと収縮を考慮して定めたもので，アンカー適用には不適正となる。

2.3　構造物補強のプレストレス

プレストレス P_e は，図-4のように経時変化する。定着プレストレス P_t は，テンドンがジャッキ緊張の初期緊張力 P_i から，ジャッキ除荷で定着具のアンカーヘッドにくさび嵌合固定された時点のアンカー力をいう。これにより，土工構造物や一般構造物はプレストレスが付与されて，外部からの作用荷重に対して変位ゼロの抵抗が可能になる。アンカーヘッドへのくさび嵌入長をセット量 S_t といい，これに伴うアンカー伸び低下とともに，アンカー力は，初期緊張力 P_i からセットロス ΔP_{st} の減少が生じる。定着プレストレス P_t の設計は，これを考慮する。

緊張・定着後の定着プレストレス P_t は，設計供用期間で地盤クリープの時間経過の漸増沈下による低下力 ΔP_c と，テンドンの純リラクセーションによる低下力 ΔP_r の影響を受けて，徐々に低下する傾向を示すが最終的にある程度の値に収束する。ここで，収束後の設計プレストレスを永続プレストレス P_∞ と称し，設計アンカー力 T_d 以上で丸めたものとする。

3　自由長摩擦考慮のアンカー力設計モデル

図-5は，アンカー緊張除荷挙動の事例として，緊張

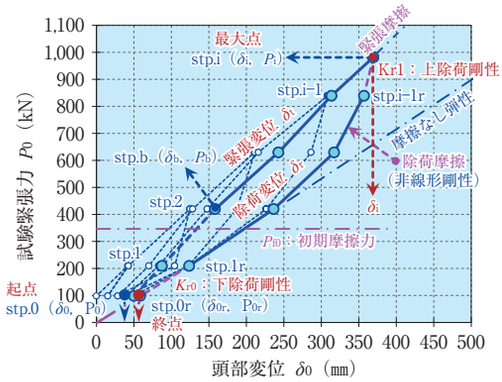


図-5　アンカー緊張除荷挙動（適正試験）

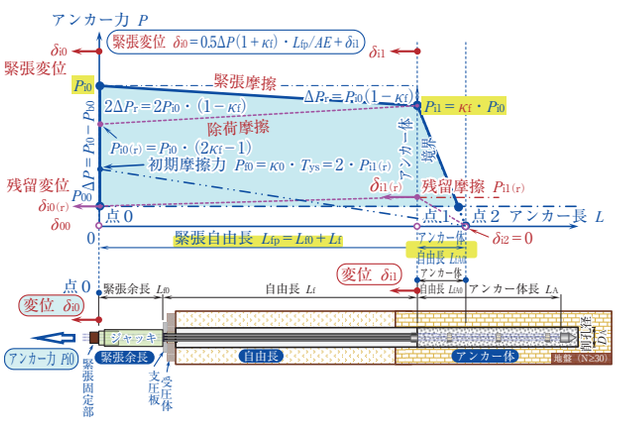


図-6　自由長摩擦考慮のアンカー力設計モデル

力の多段サイクル載荷の適正試験結果を示したものである。同図の最終サイクルの緊張除荷挙動に着目すると，起点stp.0（δ_0, P_0）⇒最大点stp.i（δ_i, P_i）⇒終点stp.0r（δ_{0r}, P_{0r}）に見られるように，摩擦影響は緊張除荷でループ挙動になることが分かる。特に最大点から除荷側の緊張力低下は大きな剛性勾配になり，アンカー定着時のセットロスと，定着以降のプレストレス低下量が大きくなるので，設計供用期間で適正なプレストレスを永続的に保持するためには，この影響を考慮することが重要になる。

図-6に，自由長摩擦考慮のアンカー力設計モデルを示す。ここで，自由長摩擦がアンカー長方向に一定と考えると，アンカー体側のアンカー力 P_{il} は頭部アンカー力 P_{i0} から低下した，$P_{il}=\kappa_f \cdot P_{i0}$ と表せる。κ_f は，アンカー力伝達係数と定義する，1.0以下の係数である。

同図から，頭部の緊張過程のアンカー緊張変位 δ_t は緊張摩擦剛性 K_f を用いて式(1)で表せる。

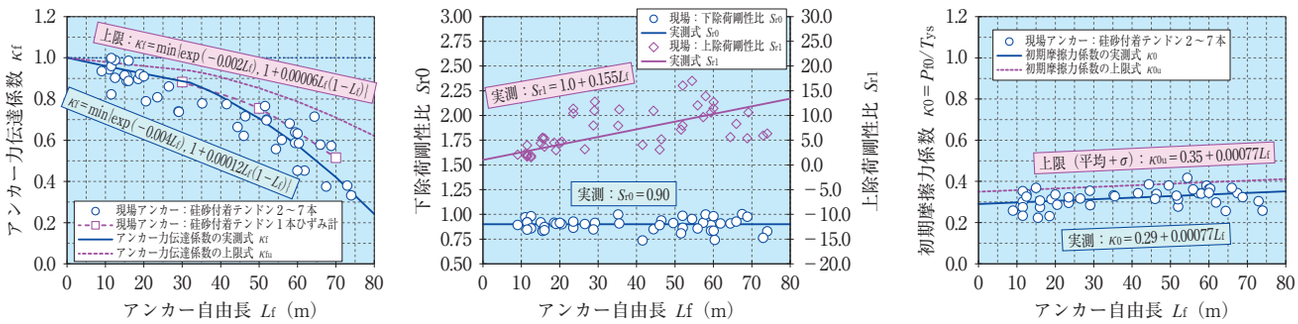
除荷過程は，図-5の最大点から終点までをアンカー力 P の３次曲線で表し，除荷変位 δ_r は式(2)で表す。同式の未定係数 A_1～A_3 は，上除荷剛性 K_{r1}・下除荷剛性 K_{r0}・終点（δ_{0r}, P_{0r}）が既知なので，式(5)～(10)で求まる。図-7の現場データの近似から，κ_f・S_{r1}・S_{r0}・δ_{0r} のパラメータ実測式が式(11)～(14)で求められる。

以上より，設計モデルの緊張除荷挙動解析式の式(1), (2)が確定できる。

〈アンカー力Pの緊張除荷挙動の解析式〉

$$\delta_t = \delta_0 + (P - P_0)/K_f \quad \cdots\cdots(1)$$

$$\delta_r = P/K_r(P) = \delta_i + A_1 \cdot (P - P_i) + A_2 \cdot (P - P_i)^2$$



(a) アンカー力伝達係数 κ_f　(b) 除荷剛性比 S_{r1}, S_{r0}　(c) 初期摩擦力係数 κ_0

図-7 現場データとパラメータ実測式

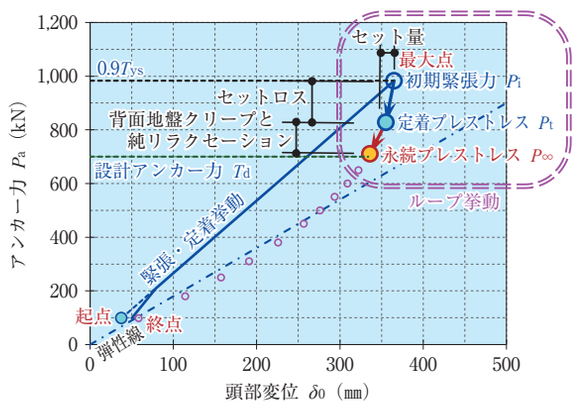


図-8 除荷過程でのアンカー力低下概念

表-2 多重収束解析のP_t, P_i求解結果の事例

項　　目	単位	変位 δ	アンカー力 P
①永続プレストレス P_∞点	mm, kN	144.81	*710.0*
②リラクセーション考慮 $P_\infty+\Delta P_r$点	mm, kN	147.37	730.4
・純リラクセーション率 γ_0	—	—	0.028
・収束判定	—	0.00	730.36
・受圧体地盤のN値	—	*30*	—
・受圧体面積 A_c	m²	*4.30*	—
・クリープ変位係数 α_c	—	*2.00*	—
・地盤クリープ変位 δ_c	mm	5.52	—
・収束判定	—	0.00	780.18
③定着プレストレス P_t点	mm, kN	152.89	780.18
・セット量 S_t	mm	*10.0*	—
・収束判定	—	0.00	946.22
④初期緊張力 P_i点	mm, kN	162.96	950.00
⑤0.9×降伏耐力T_{ys}の照査	—	OK	≦982.8

注）：斜字は数値の初期入力部，太字は求解結果である。

$$+A_3\cdot(P-P_i)^3 \quad \cdots\cdots(2)$$

$$K_f=2.0\cdot A\cdot E/\{L_{fp}\cdot(1+\kappa_f)+\kappa_f{}^2\cdot L_{fA0}\} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$L_{fA0}=P_{mh}/\min(\tau_{by}\cdot U,\ \tau_g\cdot\pi\cdot D_A) \quad \cdots\cdots(4)$$

$$A_1=1.0/(\alpha_1\cdot K_{r1}) \quad \cdots\cdots(5)$$

$$A_2=0.5\cdot\{(1.0/(\alpha_0\cdot K_{r0})-1.0/(\alpha_1\cdot K_{r1}))/(P_{0r}-P_i)-3.0\cdot A_3(P_{0r}-P_i)\} \quad \cdots\cdots(6)$$

$$A_3=\{(P_{0r}-P_i)\cdot(1.0/(\alpha_0\cdot K_{r0})+1.0/(\alpha_1\cdot K_{r1}))-2.0\cdot(\delta_{0r}-\delta_i)\}/(P_{0r}-P_i)^3 \quad \cdots\cdots(7)$$

$$K_{r1}=S_{r1}\cdot K_e \quad \cdots\cdots(8)$$

$$K_{r0}=S_{r0}\cdot K_e \quad \cdots\cdots(9)$$

$$K_e=A\cdot E/(L_{fp}+0.5\cdot L_{fA0}) \quad \cdots\cdots(10)$$

$$\kappa_f=\min\{\exp(-0.004\cdot L_{fp}),\ 1.0+0.00012\cdot L_{fp}\cdot(1.0-L_{fp})\} \quad \cdots\cdots(11)$$

$$S_{r1}=1.0+0.155\cdot L_{fp} \quad \cdots\cdots(12)$$

$$S_{r0}=0.9 \quad \cdots\cdots(13)$$

$$\delta_{0r}=\delta_0+0.5\cdot(L_{fp}+\kappa_f\cdot L_{fA0})/(A\cdot E)\times\{0.5\cdot T_{ys}\cdot(0.29+0.00077\cdot L_{fp})-P_{0r}\} \quad \cdots\cdots(14)$$

ここに，δ_t：緊張変位，δ_r：除荷変位，δ_0：起点変位，P_0：起点アンカー力，δ_i：最大点変位，P_i：最大点アンカー力，δ_{0r}：終点変位，P_{0r}：終点アンカー力，K_f：緊張摩擦剛性（kN/mm），A：アンカー断面積（mm²），E：アンカー弾性係数（0.195MN/mm²），κ_f：アンカー力伝達係数，L_{fp}：緊張自由長$L_{f0}+L_f$，L_{f0}：緊張余長，L_f：自由長，L_{fA0}：基本アンカー体自由長，P_{mh}：アンカー履歴最大力，τ_{by}：テンドングラウト降伏付着強度（N/mm²），τ_g：グラウト地盤摩擦強度（N/mm²），U：テンドン見掛け周長（mm），D_A：アンカー体径（mm），K_{r1}：上除荷剛性（kN/mm），K_{r0}：下除荷剛性（kN/mm），α_1：上剛性補正係数（2.0～5.0），α_0：下剛性補正係数（0.7～1.0），S_{r1}：上除荷剛性比，S_{r0}：下除荷剛性比，K_e：弾性剛性（kN/mm）。

4 アンカー定着方法

4.1 定着プレストレスの求解方法

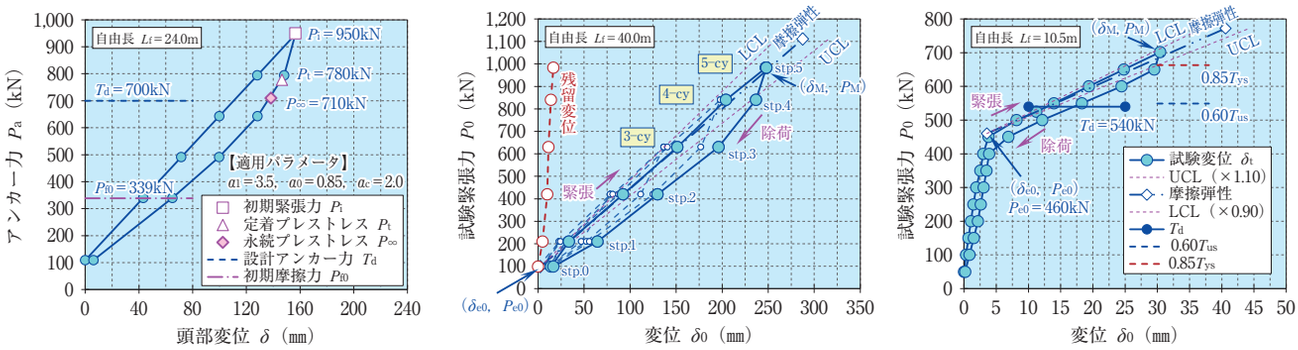
アンカー緊張・定着による定着プレストレスP_tは，図-8に示すように，設計アンカー力T_d以上の永続プレストレスP_∞をもとに，地盤クリープ低下力ΔP_cとリラクセーション低下力ΔP_rを割増した式(15)で求める。くさび定着の場合の初期緊張力P_iは，セットロスΔP_{st}を割増して式(19)で求める。

上記のP_∞・P_t・P_iは，同図の起点・終点が既知，最大点で式(1)，(2)が一致という制約条件のもとで，緊張除荷挙動曲線上に存在する解として求めることに帰着する。これらは，式(1)，(2)，式(15)～(20)により数値的に一意に定まらない。

このため，永続プレストレスP_∞を開始点，起点・終点が既知点とした緊張除荷挙動曲線上での多重収束解析にて，定着プレストレスP_tと初期緊張力P_iを求解する。

4.2 定着プレストレス求解とアンカー定着方法

表-2に，多重収束解析のP_t，P_i求解結果の事例を示す。入力は，永続プレストレスP_∞・受圧体地盤のN値・受圧体面積A_c・クリープ変位係数α_c・セット量S_tである。結果は，定着プレストレスP_t=780kN，および初期緊張力P_i=950kNが求まっている。図-9 は求解した緊張除荷挙動曲線とP_t，P_iを示す。起点・終点・P_∞を既知として，緊張・除荷ループ挙動とP_t，P_iの状況が分かる。



(a) 適正試験　　(b) リフトオフ試験

図-9　求解した緊張除荷挙動曲線とP_t，P_i

図-10　自由長摩擦考慮の施工管理方法

〈定着プレストレス力P_tの設計式〉

$$P_t = P_\infty + \Delta P_c + \Delta P_r 【P_\infty \geqq T_d】 \cdots\cdots (15)$$

$$\Delta P_c = K_r(P) \cdot P_t \cdot \alpha_c / \{A_c \cdot 2.8 \cdot N / 0.3 \cdot (N/0.3 \cdot (A_c^{0.5}/0.3)^{-3/4}\} \cdots\cdots (16)$$

$$\Delta P_r = P_{t0} \cdot \gamma_0 \cdots\cdots (17)$$

$$\gamma_0 = r_1 \cdot P_{t0}/T_{us} \cdot (P_{t0}/T_{us} - 1.0) + r_2 【P_{t0}/T_{us} \geqq 0.5, P_{t0}/T_{us} < 0.5 : = 0.5】 \cdots\cdots (18)$$

$$P_i = P_t + \Delta P_{st} 【P_i \leqq P_M (= \min(0.9 \cdot T_{ys}, L_A \cdot \min(\tau_{by} \cdot U, \tau_g \cdot \pi \cdot D_A)/1.25】 \cdots\cdots (19)$$

$$\Delta P_{st} = K_r(P) \cdot S_t \cdots\cdots (20)$$

ここに，P_t：定着プレストレス，P_∞：永続プレストレス，ΔP_c：地盤クリープ低下力，ΔP_r：リラクセーション低下力，P_i：初期緊張力，ΔP_{st}：セットロス，T_d：設計アンカー力，α_c：クリープ変位係数（1.0～3.0），A_c：受圧体面積（m²），N：受圧体支持地盤N値，P_{t0}：リラクセーション用プレストレス，γ_0：純リラクセーション率，T_{us}：テンドン極限耐力，T_{ys}：テンドン降伏耐力，L_A：アンカー体長，r_1，r_2：PC鋼より線の純リラクセーション係数（下表）。

PC鋼より線の種類	r_1	r_2
普通リラクPC鋼より線	1.92	0.51
ECFリラクPC鋼より線	1.60	0.42
低リラクPC鋼より線	0.48	0.13

以上のように，ここで示したアンカー定着方法を活用することにより，設計段階でアンカー自由長ごとの定着プレストレスP_tなどが設定できる。したがって，設計供用期間での適正なプレストレス保持が可能と考える。

なお，施工段階では，アンカー１本ごとの適正試験や確認試験の結果整理において，式(11)～(14)に相当するパラメータκ_f・S_{r1}・S_{r0}・δ_{0r}をアンカー個別に求め，P_t・P_iを求解して，緊張・定着を実施すれば，より推定精度の高い永続プレストレスP_∞を設計供用期間で作用できる。

5　アンカー施工管理

アンカー施工管理で従来実施の適正試験，確認試験およびリフトオフ試験での結果整理方法は，長尺アンカーや傾角が急な場合に，式(3)の自由長摩擦と基本アンカー体自由長の考慮がないため，所要の施工管理範囲から外れやすいという課題がある。

解決方法は，図-10に示すようにアンカー緊張試験結果を整理することである。本アンカー施工管理は，同図(a)，(b)の緊張除荷挙動ループの最大値（δ_M，P_M）を用いて行う。初期値は，適正試験・確認試験でstp.0の（δ_{e0}，P_{e0}），リフトオフ試験でリフトオフ点の（δ_{e0}，P_{e0}）とする。

アンカー施工管理の摩擦弾性変位δ_t・UCL（上限変位）δ_U・LCL（下限変位）δ_Lは，式(21)～式(23)に示すとおりであり，（δ_{e0}，P_{e0}）が基点である。同図から試験変位δ_Mはδ_L～δ_U範囲内となる必要がある。なお，施工管理のδ_L～δ_U範囲は，アンカー施工条件・施工状態のばらつきを考慮して，摩擦弾性変位δ_tからで従来のアンカー施工管理と同じ±10%とする。

〈アンカー摩擦弾性変位δ_t〉

$$\delta_t = \delta_{e0} + (P_M - P_{e0})/K_f \cdots\cdots (21)$$

〈施工管理指標のUCL：上限変位δ_UとLCL：下限変位δ_L〉

$$\delta_U = \delta_{e0} + 1.10 \times (P_M - P_{e0})/K_f \cdots\cdots (22)$$

$$\delta_L = \delta_{e0} + 0.90 \times (P_M - P_{e0})/K_f \cdots\cdots (23)$$

ここに，δ_t：緊張力P_Mの頭部摩擦弾性変位（mm），δ_U：施工管理の上限変位(mm)，δ_L：施工管理の下限変位(mm)。

6　おわりに

アンカー自由長摩擦を考慮したアンカー力設計モデルと緊張除荷挙動解析式を構築し，これに現場データを当てはめて，同式のパラメータ実測式を求めた。また，設計アンカー力をもとにした永続プレストレスから，設計供用期間のリラクセーションや地盤クリープ影響を考慮することで，設計段階で適切に割増した定着プレストレスの設計が可能になった。さらに，自由長摩擦考慮の施工管理方法を提案した。これら方法の適用により，アンカー設計・施工の安全性向上が期待できると考える。

ここでは，現場経験実務からの設計施工課題と解決法を取り上げた。本報文がアンカー技術者の何らかの参考になれば，幸いである。

参考文献

1)　田久，下田，川崎，田村：グラウンドアンカー自由長部における摩擦損失，地盤工学ジャーナル，Vol. 5，№2，pp. 281～291，2010.
2)　川崎，河田：グラウンドアンカーの新しい定着設計方法，13-2-4-05，第58回地盤工学研究発表会，2023.7.
3)　KJS協会：グラウンドアンカー設計・施工マニュアル　EHDアンカーHP工法，2023.10.