せん断力考慮の待受けアンカーのアンカー力設計方法

グラウンドアンカー　設計方法　せん断力
弘和産業㈱　正会員　○川崎 廣貴
清水建設㈱　正会員　　河田 雅也

1. はじめに

待受けアンカーは、設計供用期間のアンカー力(=プレストレス P_e)が、プレストレス P_e<設計アンカー力 T_d 状態のものをいう。本アンカー力が、待受け状態から豪雨影響すべり力や地震力の所要荷重作用で、設計アンカー力状態になった場合に、アンカー補強構造物の剛体変位が伴うことから、これに応じて、短自由長側アンカーの増加アンカー力が大きくなる。一方、待受けアンカーは、補強構造物の剛体変位方向とアンカー力増加の発揮可能な方向が異なることから、アンカー軸直角方向に合成角 β の $\sin\beta$ 分力のせん断力がアンカーテンドンに加わる。当該設計法は未だに明らかになっていない。能登半島地震(2024 年)では、せん断破断が生じたアンカーテンドンが数多く見られたのもこれが一因と考えられる。

ここでは、アンカーの限界プレストレス P_p を設定し、待受けアンカーのせん断考慮の合成力がこれを超過しない短自由長側アンカーの待受けアンカーの待受け比 R_p の設計方法を新たに考案したので、その内容を報告する。アンカーせん断力を考慮した合成アンカー力 P_c の算定式は、Von Mises 降伏条件式を準用した。

2. アンカー力挙動と待受けアンカーの解決課題

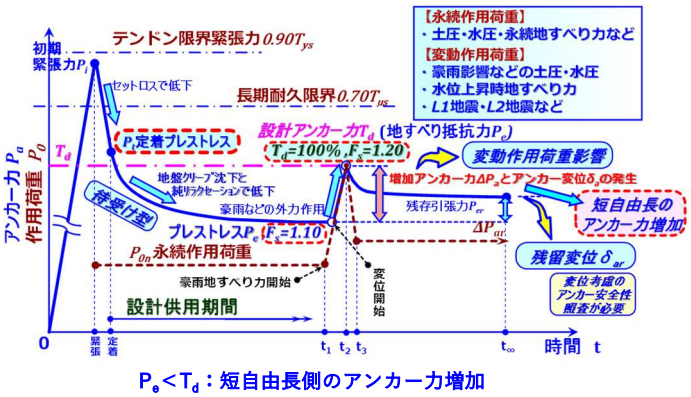
アンカーは、プレストレス P_e≧設計アンカー力 T_d であれば、アンカー補強構造物の変位をゼロにできる。一方、アンカー力は、施工段階から設計供用期間にわたって低下する挙動を示す。施工の緊張作業の初期緊張力 P_i から、定着作業のくさび嵌合に伴うセットロスで、アンカー力が低下して定着プレストレス P_t に至る。その後、設計供用期間の地盤クリープやテンドン純リラクセーションでさらに低下するが、数年後には低下量がある程度小さくなって、永続的なプレストレス P_e(永続プレストレス P_∞)に至る。したがって、設計供用期間の当該低下分を、あらかじめ割増設計することで、アンカー補強構造物は設計荷重作用に対して変位ゼロを保持できる。

筆者らは、前報 [1)]で式(3)の変位依存の待受け比 R_{p1} を提案したが、これに加えて、本報告では式(5)のアンカーせん断力を考慮した合成力依存の待受け比 R_{p2} を提案する。

図-1 に、待受けアンカーのアンカー力挙動を示す。待受けアンカーは、プレストレス P_e<設計アンカー力 T_d 状態である。ここで、設計通りの設計アンカー力 T_d が作用すると、増加アンカー力 ΔP が生じるが、アンカー補強構造物の剛体変位に伴い、短自由長側アンカーの増加アンカー力 ΔP_0 がより大きくなり、同時にアンカーにはせん断力 ΔS_0 も作用する。この作用力を合成アンカー力 P_c として考慮する必要があるので、留意点である。

従来アンカー設計や維持管理のリフトオフ力調査では、待受けアンカーの待受け比 $R_p=P_e/T_d$ に、実務上で何らかの留意がなく、現場の待受けアンカーに地震力などで地盤変形が生じた場合に、アンカーがせん断破断する現象が見られる。

こうした観点から、設計段階では適正な待受けアンカー力を照査すること、維持管理のリフトオフ力調査段階では待受けアンカーの設計アンカー力作用に対して、アンカー安全性を照査することが、必要な解決課題と考える。



$P_e<T_d$：短自由長側のアンカー力増加

図-1 待受けアンカーのアンカー力挙動

■せん断力考慮の合成アンカー力 P_c の照査

$P_c = ((P_e+\Delta P_0)^2 + 3\Delta S_0^2)^{0.5} \leqq P_p=\beta\cdot T_{us}$ ・・・(1)

$\Delta S_0 = \Delta P_0 \cdot \tan\beta_0$ ・・・(2)

■変位依存の待受け比 R_{p1}

$R_{p1} = (A_0 - P_p / T_d) / (A_0 - 1.0)$ ・・・(3)

$A_0 = N \cdot \cos\beta_0 / L_{f0} / \Sigma(\cos\beta_i / L_{fi})$ ・・・(4)

■合成力依存の待受け比 R_{p2}

$R_{p2} = 1 - \Delta P_0 \cdot L_{f0} \cdot \Sigma(\cos\beta_i/L_{fi})/T_d/N/\cos\beta_0$ ・・・(5)

$\Delta P_0 = (-P_e + (P_e^2 - (1+3\tan\beta_0^2)\cdot(P_e^2 - P_p^2))^{0.5})/(1+3\tan\beta_0^2)$ ・・・(6)

■アンカー力 P_{ei} と合成アンカー力 P_{ci} の照査

$P_{ei} = P_e + \Delta P_i$ ・・・(7)

$\Delta P_i = T_d \cdot (1.0 - R_{p2}) \cdot N \cdot \cos\beta_i / L_{fi} / \Sigma(\cos\beta_i/L_{fi})$ ・・・(8)

$P_{ci} = ((P_e+\Delta P_i)^2 + 3(\Delta P_i \cdot \tan\beta_i)^2)^{0.5} \leqq P_p=\beta\cdot T_{us}$ ・・・(9)

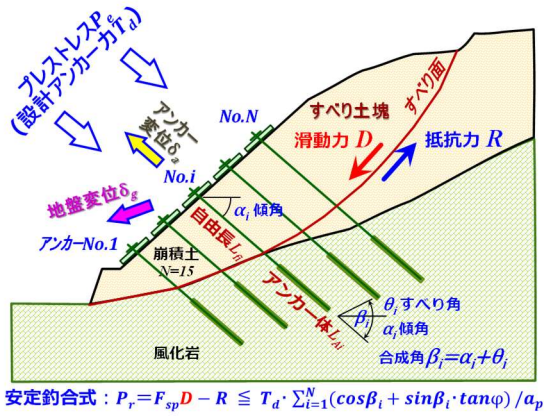
ここに、

- P_c ： 合成アンカー力（kN/本）
- P_e ： プレストレス（$=R_{p1}\cdot T_d$：kN/本）
- R_{p1} ： 変位依存待受け比
- R_{p2} ： 合成力依存待受け比
- T_d ： 設計アンカー力（kN/本）
- ΔP_0 ： 最短自由長アンカー増加力（kN/本）
- ΔS_0 ： 最短自由長アンカー増加せん断力（kN/本）
- P_p ： 限界プレストレス（$=\beta\cdot T_{us}$：kN/本）
- β ： 極限耐力比（$=0.60\sim0.70$）
- T_{us} ： アンカー極限耐力（kN/本）
- N ： アンカー段数（段）
- β_0 ： 最短自由長アンカー合成角（$=\alpha_0+\theta_0$：°）
- α_0 ： 最短自由長アンカー傾角（°）
- θ_0 ： 最短自由長アンカーすべり角（°）
- L_{f0} ： 最短自由長アンカー自由長（m）
- β_i ： i 段アンカー合成角（$=\alpha_i+\theta_i$：°）
- α_i ： i 段アンカー傾角（°）
- θ_i ： i 段アンカーすべり角（°）
- L_{fi} ： i 段アンカー自由長（m）
- ΔP_i ： i 段アンカー増加力（kN/本）

Anchor force design method for standby anchors considering shear force

KAWASAKI Hirotaka Kowa Sangyo Corp.
KAWATA Masaya Shimizu Corp.

© 公益社団法人 地盤工学会



安定釣合式：$P_r=F_{sp}D-R \leqq T_d\cdot\sum_{i=1}^{N}(\cos\beta_i+\sin\beta_i\cdot\tan\varphi)/a_p$

図-2 検討モデル

表-1 設計条件とアンカー仕様

	項　目	単位	諸元
設計条件	必要抑止力 P_r	kN/m	450.0
	すべり面内部摩擦角 ϕ	°	25.0
	アンカー水平間隔 a_p	m	2.5
	アンカー段数 N	段	5
	設計アンカー力 T_d	kN/本	315.3 (Fsp=1.20)
アンカー仕様	アンカー規格	——	EHD5-3H
	断面積 A	mm²	296.1
	アンカー弾性係数 E	MN/mm²	0.195
	許容耐力 $T_{as}=0.6T_{us}$	kN/本	329.4
	0.9×降伏耐力($0.9T_{ys}$)	kN/本	421.2

表-2 アンカー配置条件

項　目	単位	アンカー段 No.				
		No.01	No.02	No.03	No.04	No.05
自由長 L_{fi}	m	4.5	5.5	6.5	8.0	9.0
すべり角 θ_i	°	17.50	23.71	29.65	35.43	41.11
アンカー傾角 α_i	°	44.70	44.70	44.70	44.70	44.70
合成角 β_i	°	62.20	68.41	74.35	80.13	85.81

表-3 待受け比 R_p と平均増加力 ΔP の設計結果

項　目	単位	従来設計	設計例
極限耐力比 β	——	——	0.70
限界プレストレス $P_p=\beta\cdot T_{us}$	kN/本	——	384.3
変位依存の待受け比 R_{p1}	——	——	0.809 式(3)
プレストレス $P_{e1}=R_{p1}\cdot T_d$	kN/本	——	255.0(Fs=1.152)
合成力依存の待受け比 R_{p2}		0.60 $=P_e/T_d$	0.904 式(5)
プレストレス $P_{e2}=R_{p2}\cdot T_d$		189.2(Fs=1.100)	285.2(Fs=1.176)
平均増加力 $\Delta P=T_d-P_{e2}$	kN/本	126.1	30.2

表-4 各段アンカーの増加力 ΔP_i と残存引張力 P_{eri} の設計結果

(a) 従来設計

項　目	単位	アンカー段 No.				
		No.01	No.02	No.03	No.04	No.05
アンカー増加力 ΔP_i	kN/本	270.5	174.6	108.3	55.9	21.2
アンカー力 P_{ei}	kN/本	459.7	363.8	297.5	245.1	210.4
合成アンカー力 P_{ci}	kN/本	1,000.5	846.5	732.8	608.3	543.3
プレストレス限界照査	——	＞Tys	＞Tys	＞Tys	＞Tys	＞Tys

※照査は、$P_{ci}\leqq T_{ys}$ =468.0kN で、「OK」とする。

(b) 設計例

項　目	単位	アンカー段 No.				
		No.01	No.02	No.03	No.04	No.05
アンカー増加力 ΔP_i	kN/本	64.8	41.9	26.0	13.4	5.1
アンカー力 P_{ei}	kN/本	319.9	296.9	281.0	268.4	260.1
合成アンカー力 P_{ci}	kN/本	384.3	348.9	323.6	299.8	286.5
プレストレス限界照査	——	＜Pp	＜Pp	＜Pp	＜Pp	＜Pp

※照査は、$P_{ci}\leqq P_p=0.7T_{us}$ =384.3kN で、「OK」とする。

3. 待受けアンカーのアンカー力設計方法と事例

せん断力考慮の合成アンカー力 P_c は、式(1)で求め、最短自由長側アンカーの P_c を限界プレストレス P_p 以下にする必要がある。

初めに、式(3)により、最短自由長アンカーの変位依存の待受け比 R_{p1} を求め、プレストレス $P_e=R_{p1}\cdot T_d$ を算定する。次に、式(5)により、最短自由長アンカーのせん断力を考慮して合成力依存の待受け比 R_{p2} を求める。ここで、最短自由長アンカーの限界プレストレス $P_p=\beta\cdot T_{us}$ は、極限耐力比 β =0.6～0.7 をパラメータに設定する。$0.6T_{us}$ は、アンカー許容耐力(=PC 鋼より線の交通荷重疲労耐久性能限界)、$0.7T_{us}$ は、PC 鋼より線の交通荷重がない使用性と防食耐久性能限界である。最後に、式(7)により、各段アンカーのアンカー力 P_{ei} を照査する。式(8)は、同増加力 ΔP_i の算定式である。式(9)で求めた最短自由長アンカーの P_{c0} は、限界プレストレス P_p に一致する。

設計事例の検討モデルを図-2、設計条件とアンカー仕様を表-1、アンカー配置条件を表-2 に示す。設計結果の待受け比 R_{p2} と平均増加力 ΔP を表-3 に示す。同表には、従来設計で R_{p2}=0.6 にした事例、および設計例で式(2)の待受け比 R_{p1} を $P_p=0.7T_{us}\Rightarrow R_{p1}=0.809$ と求め、式(5)の待受け比 R_{p2} を R_{p2}=0.904 と求めたものを示す。

表-4 に、各段アンカーの式(8)の増加力 ΔP_i と式(9)の合成アンカー力 P_{ci} の設計結果を示す。同表(a)の従来設計のせん断力考慮の合成アンカー力 P_{ci} は、降伏耐力を著しく超過しており、60%待受けを想定したアンカーは破断の危険性を有する。一方、同表(b)のせん断力考慮の合成力依存の待受け比 R_{p2} を用いた場合、表-3 で設定した限界プレストレス P_p=384.3kN に対して、短自由長 No.01 アンカーの合成アンカー力 P_{ci} は、P_{ci}=384.3kN と算定できた。これにより、待受けアンカーにせん断力が作用した場合は、式(5)により適正な待受け比 R_{p2} が求められることが分かる。

以上に示した設計方法により、適正な待受けアンカー設計が合理的に実施できるようになった。

4. おわりに

待受けアンカーのせん断力考慮の合成アンカー力 P_c は、待受け比 R_{p2} と合成角 β に依存するが、R_{p2}=0.95 以上で合成角 β の影響を受け難くなるので、現場管理では、当該値以上を考慮した永続プレストレス P_∞ の設定が推奨される。

【参考文献】

1) 川崎、河田：待受けアンカーの適正なアンカー力設計方法、第 59 回地盤工学研究発表会，25-10-3-05，2024
2) 川崎、河田：グラウンドアンカーの新しい定着設計方法、第 58 回地盤工学研究発表会，13-2-4-05，2023

© 公益社団法人 地盤工学会