

III-427 掘削底面の安定に関する信頼性解析

東京電力(株) 正員 岡田 仁
同上 正員 下川 洋司
東電設計(株) 正員 栗原美津雄
大日本土木(株) 正員 畑 一民

1. はじめに

土留構造物の設計において、土留壁や切ばりの安全と同様、掘削底面の安定が重要であるが、中でも特に問題なのはヒービングと根入れ不足による掘削底面の破壊である。掘削底面の安定性は不確実な地盤物性値や誤差を含んだ解析式を用いて評価されるため、当然その結果も不確実なものとなる。本報ではヒービングと根入れの安定検討に信頼性設計法を適用する上での、起動、抵抗モーメントの不確実性評価、解析法の選定と解析誤差の評価、既往設計例のキャリブレーションにもとづく目標信頼度の設定について考察を加えた。

2. ヒービング解析法の評価

ヒービングに関し現在提案されている検討式は各種あり（表-1）、その評価も確定していない。そこで、各検討式の精度比較と式の選定を行う。各検討式に過去の破壊事例（表-2）の掘削寸法、地盤物性値（実現値）を与え安全率 F_c を算定する。破壊時の安全率は1と考えてよいから F_c は検討式の誤差を与えることになる。 F_c の平均が1に近く、ばらつきが小さいほど精度が良いと評価し、式を選定する。表-3の算定結果によれば修正式が最適と判断される。なお、各検討式のすべり円半径の設定条件を以下に示す。

- ・Terzaghi & Peck, Tshebotarioff ; 参考文献1)。
- ・Bjerrum & Eide, 旧基準式；破壊状況図より推定。状況図が得られない場合は、 l_b (根入れ深さ) と B (根切り幅) のうち小さい方をとる。
- ・修正式；基本的には旧基準式と同様。状況図が得られない場合は $l_b + l'$ (根切り底面から最下段切りまでの長さ) と B のうち小さい方をとる。

表-1 ヒービング検討式一覧

検討式名	検 討 式	記 号
Terzaghi & Peck	$F_c = \frac{5.7C'}{\gamma tH - \frac{\sqrt{2}CH}{B} + q}$	C' ; 根切り面下の地盤の粘着力
Tshebotarioff	$L \leq 2B \text{ の場合}$ $F_c = \frac{5.14C' (1 + 0.44 \frac{2B-L}{L})}{H(\gamma t - 2C(\frac{1}{2B} + \frac{2B-L}{BL})) + q}$ $L > 2B \text{ の場合}$ $F_c = \frac{5.14C'}{H(\gamma t - \frac{C}{B}) + q}$	γt ; 単位体積重量 H ; 掘削高さ C ; 背面地盤粘着力 B ; 掘削幅 q ; 上載荷重
Bjerrum & Eide	$F_c = N_c \frac{S_u}{\gamma tH + q}$	L ; 掘削奥行き N_c ; Skemptonの支持力係数
建築学会旧基準式	$F_c = \frac{x \int_0^x S_u(xd\theta)}{W \cdot \frac{x}{2}} = \frac{2\pi S_u}{\gamma tH + q}$	S_u ; 非排水せん断強度
建築学会修正式	$F_c = \frac{x' \int_0^{x'} S_u(x'd\theta)}{W \cdot \frac{x}{2}} = \frac{(\pi + 2\alpha) S_u}{\gamma tH + q}$	x ; すべり円半径 (旧基準式) x' ; すべり円半径 (修正式) α ; $\cos^{-1}(x'/l')$

表-2 ヒービング破壊事例

破壊事例 No	掘 削 寸 法 (m)			土 留 め 形 式	切 築	単 重 γt (t/m^2)	地 盤 強 度 (t/m^2)			N_c	l' (m)	x' (m)
	H	B	L				C'	C	S_u			
1	6.7		7.5	鋼管矢板	2段	1.7	2.7	2.7	2.7		1.5	4.8
2	7.3	11.05	15.8	鋼矢板	2段	1.67	2.3	1.9	2.7	7.1	3.55	6.25
3	10.2	21.5	∞	鋼矢板	2段	1.7	3.5	0.41	3.5	5.8	3.2	8.5
4	14.0	42.0	40.0	鋼管矢板	5段	1.72	4.5	2.17	4.5	6.7	4.0	22.0
5	9.0	10.0	30.0	親杭横矢板	6段	1.47	2.49	1.56	2.1	7.4	1.0	5.0
6	12.0	14.0	∞	鋼管矢板	4段	1.52	3.22	2.19	3.22	6.2	2.9	14.9
7	7.2	17.5	83.0	鋼矢板	3段	1.42	1.53	0.95	1.53	6.9	2.1	6.6
8	8.02	3.2	∞	鋼矢板	3段	1.59	1.4	2.09	1.4	7.2	2.7	6.0
9	5.6	6.0	33.0	鋼矢板	3段	1.63	2.07	2.62	2.07	7.4	1.6	16.0
10	16.5	9.5		二重鋼管矢板	3段	1.65	5.95	4.45	5.95	8.2	0.5	9.5

表-3 F_c 算定結果

破壊事例	Terzaghi & Peck	Tshebotarioff	Bjerrum & Eide	旧基準式	修正式
1	1.530	1.300	1.450	1.402	1.261
2	1.260	1.400	1.498	1.392	1.125
3	1.104	0.991	1.107	1.198	1.050
4	1.110	1.432	1.259	1.171	1.129
5	1.265	1.149	1.052	1.000	0.819
6	1.178	1.012	1.094	1.109	1.039
7	0.898	0.797	0.899	0.937	0.840
8	1.495	0.959	0.792	0.691	0.588
9	1.594	1.265	1.221	1.192	1.086
10	2.083	1.570	1.545	1.373	1.350
平均	1.352	1.188	1.192	1.147	1.039
標準偏差	0.319	0.234	0.239	0.214	0.205

※ No 1については、Bのデータが得られないため、 F_c の値は参考文献 2) によった。

3. ヒービングの信頼度解析法

ヒービングに対する安定性を評価するための性能関数は、次式によって与える。

$$Z = M_r - N \cdot M_d \quad (Z \geq 0 : \text{安定}, Z < 0 : \text{破壊}) \quad (1)$$

ここに、 M_r : 抵抗モーメント、 M_d : 起動モーメント、 N : 2で選定した建築学会修正式の補正係数 ($\bar{N} = 1.039$, $\sigma_N = 0.205$) である。 M_r , M_d は図-1のモデルから計算されるが、そのばらつきは地盤物性値 (s_u , γ) のばらつきより評価される。このうち、非排水せん断強度 s_u のばらつきについては、粘着力 c の特性に準じ自己相関性を考慮して評価した。対象土層厚 X' 内の定常性を考慮した s_u のばらつきは、データのばらつき σ_{su} と、低下係数 $\Gamma(X')$ から次式で表される。⁴⁾

$$\sigma_{su}(X') = \Gamma'(X') \cdot \sigma_{su} = \left(\frac{\delta}{X'} \right)^2 \left\{ \frac{X'}{\delta} - 1 + \exp\left(-\frac{X'}{\delta} \right) \right\} \cdot \sigma_{su} \quad (2)$$

ここに、 δ は相関距離である。

安全性指標 (信頼度) β は式(1)の各変数の平均、分散と、2次モーメント手法によって次式より求められる。

$$\beta = \bar{Z} / \sigma_Z$$

ここに、 $\bar{Z}$, σ_Z は、式(1)の Z の平均と標準偏差である。

4. 根入れ安定の信頼度解析

根入れ安定の解析は、通常図-2のモデルが用いられており、手法として確定していると考えてよい。³⁾ また、土圧はランキン土圧を用いるのが普通である。そこで、通常の解析式によって根入れ安定の信頼度解析を行うことにした。性能関数は式(1)と同様であるが補正係数 N の評価が困難なため、 $N = 1.0$, $\sigma_N = 0.0$ とした。 M_r , M_d はそれぞれ $\ell_p \cdot P_p$, $\ell_a \cdot P_a$ で計算され、ばらつきは c , ϕ , γ のばらつきと c の自己相関より評価できる。

5. 設計信頼度 β_d

キャリブレーションを行った事例はいずれも連続地中壁であり、ヒービング・根入れ安定に関して問題のなかった安定例である。

ヒービングについて中央安全率 $\theta (= M_r / (N \cdot M_d))$ と実績 β の関係を図-3に示す。現行設計の安全率 ($= \theta$) は一般に1.2であるが、これに相当する β は0.48と低い。表3よれば $\theta \div F_c \geq 1.2$ でも破壊が生じているため、設計安全率を $F_d = F_c + 2\sigma F_c \div 1.4$ と見直し、それに対応する信頼度を求めると $\beta_d = 1.0$ 程度となる。

根入れ安定の現行設計では $M_r = M_d$ となる根入れ長 D_o の1.2倍をとるのが一般的である ($D = 1.2D_o$)。³⁾ 図4はこの D を設計根入れ長として β を算定したものである。キャリブレーション事例はいずれも安定性に問題がないので、設計信頼度として $\beta_d = 1.25$ が妥当と思われる。

<参考文献>

- 1) 建築基礎構造設計基準・同解説 (建築学会)
- 2) 井上、ヒービングの破壊例と修正式の適用性 (清水建設研究所報、昭和49年10月)
- 3) 例えば、開削トンネル指針 (土木学会)
- 4) Vanmarcke : ASCE vol.103 No GT 11

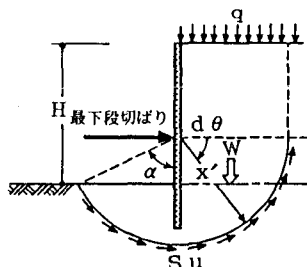


図-1 ヒービング解析モデル

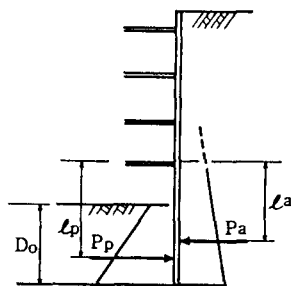


図-2 根入れ安定解析モデル

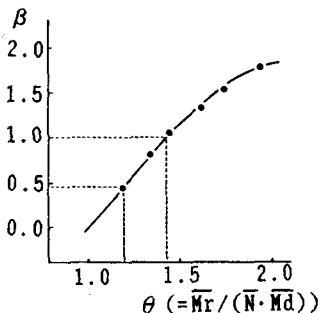


図-3 $\theta \sim \beta$ 関係

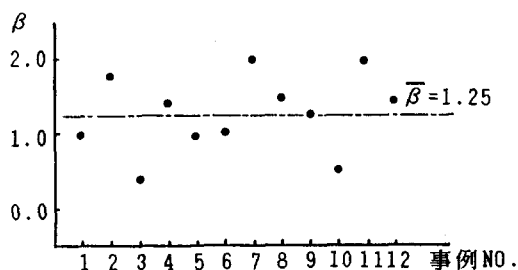


図-4 根入れ安定実績 β 算定結果