

斜面安定解析法に関する諸問題

(株)第一コンサルタンツ ○ 右城 猛
 (株)第一コンサルタンツ 松本洋一
 (株)高南テック 筒井秀樹

1. まえがき

斜面安定解析に関する技術基準類には、河川砂防技術基準¹⁾、道路土工指針²⁾、日本道路公団設計要領³⁾など関係各機関で作成されたものが多数ある^{4)~7)}。いずれも Fellenius 法による円弧すべり計算がベースになっているが、その適用法が基準類によって、あるいは同一の基準類の中でも章毎に異なった記述になっており、設計実務の現場で混乱を生じている。

本論文では、現行の設計基準類に記述されている斜面安定解析法についての問題点を指摘する。その上で、より合理的かつ実用的な解析法を提案する。

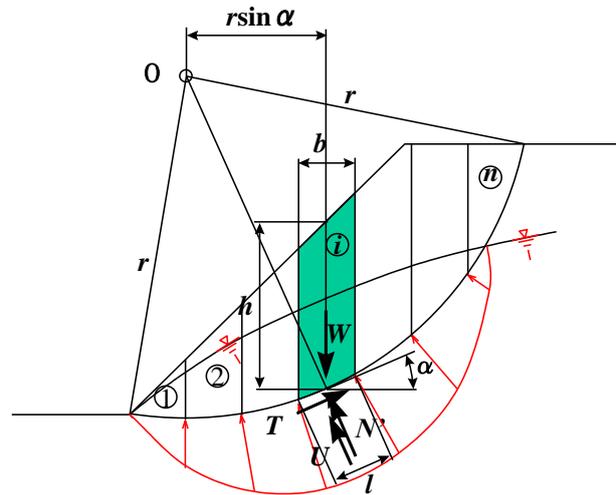
2. 円弧すべり計算法

(1) 間隙水圧を考慮した安定解析

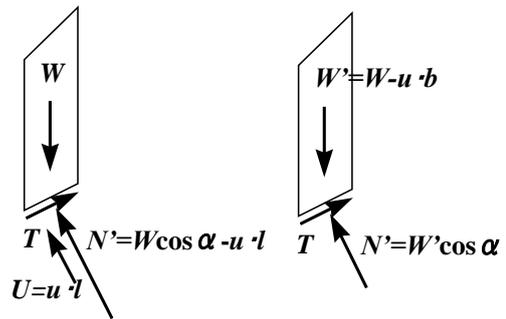
円弧すべり計算は、一部の基準類の解説⁴⁾の中で Bishop 法が紹介されているものの、いずれの基準類も Fellenius 法が採用されている。しかし、間隙水圧の取り扱いには Fellenius 法 ((1)式) と修正 Fellenius 法 ((2)式) の2種類があり、例えば、道路土工指針²⁾では盛土と切土のり面の安定解析には(2)式を、地すべりの安定解析には(1)式を適用することになっている。他の基準類でも、盛土の安定解析には(2)式が、地すべり関係では(1)式が採用されている。

$$F = \frac{\sum \{c \cdot l + (W \cos \alpha - u \cdot l) \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (1)$$

$$F = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (2)$$



(a) フェレニウス法による円弧すべり解析



(b) Fellenius法

(c) 修正Fellenius法

図-1 間隙水圧を考慮した安定解析

(1)式と(2)式の違いは、すべり土塊の分割片の重量の考え方に相違がある。(1)式では図-1(b)のように分割片の底面に間隙水圧 $U = u \cdot l$ が作用すると仮定している。したがって、底面の垂直力は $N = W \cos \alpha - u \cdot l$ となる。これに対して、(2)式は(c)図のように有効重量 $W' = W - u \cdot b$ の考えに基づいている。このため底面の垂直力は $N = (W - u \cdot b) \cos \alpha$ となる。(1)式と(2)式で全く同じ作用力を考慮しているに

Problems on Slope Stability Analysis

も関わらず異なった結果が得られる。この原因として、Fellenius 法ではすべり面に垂直な方向の力のつり合い条件は満たされているものの、平行な方向のつり合い条件が考慮されていないことが指摘されている⁹⁾。

図-2 は間隙水圧が $u=0.2h$ と $u=0.5h$ の 2 ケースについて、 α とすべり面の有効垂直力 N の関係を調べたものである。ただし、分割片の高さ $h=5\text{m}$ 、土の単位重量は $\gamma=1.8\text{tf/m}^3$ として計算している。この図より、摩擦によるせん断抵抗力の値は、(1)式と(2)式とで大きく異なることが明らかである。また、(1)式を適用すれば α の値が 90 度に近くなると N' が負の値を示すという極めて不合理な結果を与える。

Fellenius 法そのものが力学的に不合理であるといえそれまでであるが、(1)式と(2)式のいずれかを使用するとすれば修正 Fellenius 法に統一すべきと考える。

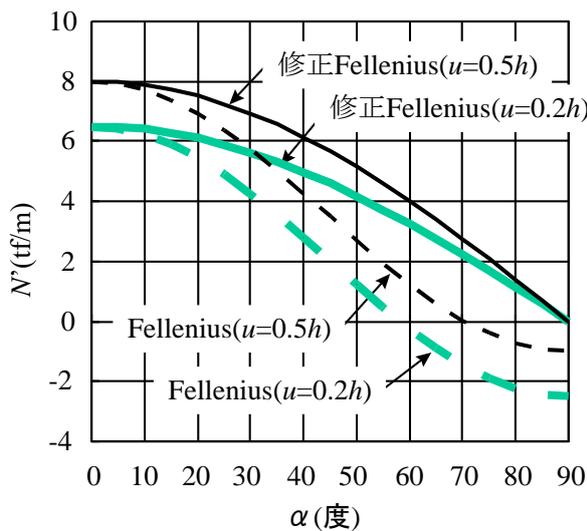


図-2 すべり面の有効垂直力

(2) 地震時の慣性力を考慮した安定解析

地震時の安定解析では、(3)式と(4)式が提案されている。(3)式ではすべり面の垂直力とせん断力の両方に地震の影響が考慮されている。これに対し、(4)式では垂直力に地震の影響が考慮されていない。道路土工指針では、「のり面工・斜面安定工指針」で(3)式が、「軟弱地盤対策工指針」で(4)式が採用されている。また、「港湾の施設の技術上の基準」では(4)式が採用されている。いずれの式が正しいのか、以下検討してみる。

$$F = \frac{\sum [c'l + \{(W - u \cdot b) \cos \alpha - k_H \cdot W \sin \alpha\} \tan \phi']}{\sum \left(W \sin \alpha + \frac{y}{r} k_H \cdot W \right)} \quad (3)$$

$$F = \frac{\sum \{c'l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi'\}}{\sum \left(W \sin \alpha + \frac{y}{r} k_H \cdot W \right)} \quad (4)$$

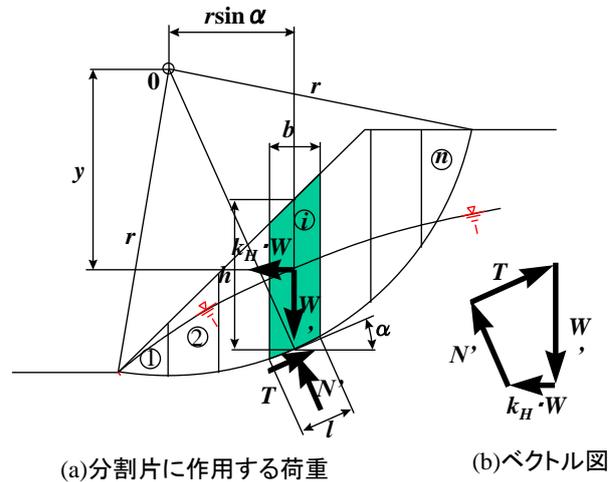


図-3 地震時の慣性力を考慮した安定解析

各分割片の重心位置に地震時慣性力 $k_H \cdot W$ が作用すると考えれば、すべり円弧の中心 O に関するモーメント M_o は(5)式で表される。

$$M_o = \sum r \cdot T - \sum r \cdot W \sin \alpha - k_H \sum W \cdot y = 0 \quad (5)$$

これよりすべり面のせん断力は(6)式で求めることができる。

$$\sum T = r \sum \left(W \sin \alpha + \frac{y}{r} k_H W \right) \quad (6)$$

次に、図-3(b)を参照し、鉛直方向力のつり合いを考える。

$$\frac{N}{\cos \alpha} + k_H \cdot W \tan \alpha - (W - u \cdot b) \cos \alpha = 0 \quad (7)$$

(7)式より

$$N = (W - u \cdot b) \cos \alpha - k_H \cdot W \sin \alpha \quad (8)$$

したがって、せん断抵抗力による O 点に関するモーメント M_r は、

$$M_r = \sum r [c'l + \{(W - u \cdot b) \cos \alpha - k_H \cdot W \sin \alpha\} \tan \phi'] \quad (9)$$

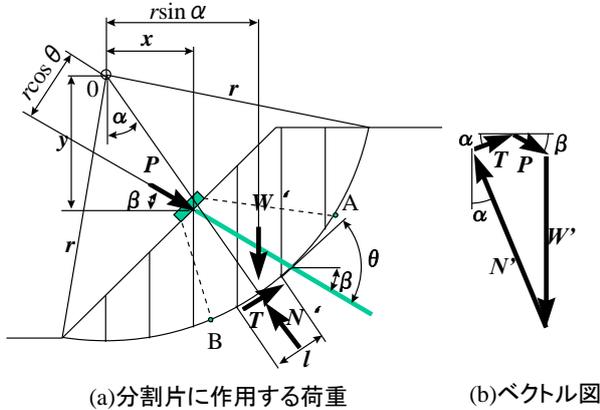
となり、(9)式を(6)式で割れば(3)式と一致する。

以上より、(3)式が正しいといえる。(3)式と(4)式を比較すれば明らかであるが、(4)式を採用した場合、 k_H が大きいほど、 α が大きいほど安全率を

過大に算定することになる。

3. 抑止アンカー工

(1) アンカー工を設置した場合の安全率



(a)分割片に作用する荷重 (b)ベクトル図

図-4 抑止アンカー工

アンカー工を設置した場合の安全率算定式として、(10)式と(11)式が実務に用いられている。例えば、道路土工指針のり面工・斜面安定工対策指針では、切土のり面对策においては(10)式が、地すべり対策では(11)式が採用されている。他の技術基準類においても地すべり対策では(11)式が一般に用いられている。

$$F = \frac{\sum (c'l + W' \cos \alpha \tan \phi') + \sum P \sin \theta \tan \phi'}{\sum W \sin \alpha - \sum P \cos \theta} \quad (10)$$

$$F = \frac{\sum (c'l + W' \cos \alpha \tan \phi') + \sum P (\cos \theta + \sin \theta \tan \phi')}{\sum W \sin \alpha} \quad (11)$$

ここに、 $W' = W \cos \alpha - u \cdot l$ である。

図-4(a)のようにアンカーを設置するものとすれば、すべり面のせん断力は円弧中心 0 に関するモーメントのつり合いより(12)式のように求められる。

$$\sum T = \sum (W \sin \alpha - P \cos \theta) \quad (12)$$

また、すべり土塊の分割片底面の垂直力は、図-4(b)より

$$N' = W' \cos \alpha + P \sin \theta \quad (13)$$

となる。したがって、アンカーを設置した場合の安全率は(10)式となる。

(10)式が力学的に正しいことは、図-5 のような斜面上に置かれたブロックの力のつり合いからも

容易に説明できる。

斜面方向のすべり力 T は

$$T = W \sin \alpha - P \cos \theta \quad (14)$$

である。一方、垂直力は

$$N = W \cos \alpha + P \sin \theta \quad (15)$$

である。

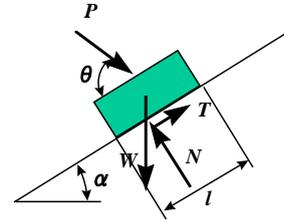


図-5 斜面上のブロックの安定

従って、すべりに対する安全率は

$$F = \frac{c'l + (W \cos \alpha + P \sin \theta) \tan \phi'}{W \sin \alpha - P \cos \theta} \quad (16)$$

となり、(10)式と同じ形になる。

高速道路調査会の「斜面安定のためのアンカー工の計画・設計に関する研究(その2)」(平成2年2月)では、『初期張力を与えない場合は(11)式が導かれ、初期緊張力を設計アンカー力の100%与える場合は(10)式が導かれる。』と解説されている。しかし、この説明は明らかに間違っている。アンカーに初期張力が与えられていなければ、 P の値は土塊の変位に伴い増加し、アンカー張力とブロック底面に発揮されるせん断抵抗力との和がすべり力 T に等しくなった時点で安定を保つのに対して、初期張力が100%導入されていれば土塊は変位しなくても安定を保つことを意味するのであって、初期緊張力の大きさに関係なく(10)式は成立する。

さらに、(11)式が物理的に不合理であることは、(11)式を変形した(17)式からも明らかである。

$$\sum W \sin \alpha - \sum P \cos \theta = \sum \left(W' \cos \alpha \frac{\tan \phi'}{F} + \frac{c'l}{F} \right) + \sum P \sin \theta \frac{\tan \phi'}{F} \quad (17)$$

$$\sum W \sin \alpha - \sum \frac{P}{F} \cos \theta = \sum \left(W' \cos \alpha \frac{\tan \phi'}{F} + \frac{c'l}{F} \right) + \sum P \sin \theta \frac{\tan \phi'}{F} \quad (18)$$

(10)式を変形した(17)式は、安全率 F が地盤のせん断強度定数 ($\tan \phi', c'$) に対するものであることが明確である。しかし、(18)式の安全率は、左辺がアンカー力 P に対するものであり、右辺では地盤

のせん断強度定数に対するものになっており、安全率の物理的意味が不明確である。

一方、山上ら¹⁰⁾は、(10)式の問題点として、アンカーによる締め付け効果がすべり面全域に発揮されると仮定して導かれている点を指摘している。その上で、図-4のようにアンカーを設置すれば、締め付け効果を期待できるのは応力分散域 AB の区間のみであるとし、(19)式がより合理的であると提案している。

$$F = \frac{\sum (c'l + W' \cos \alpha \tan \phi') + \sum_{AB} P \sin \theta \tan \phi'}{\sum W \sin \alpha + \sum_{AB} P \sin \alpha \sin \beta - \sum_{AB} P \cos \beta \frac{y}{r}} \quad (19)$$

(2) アンカーの機能と初期張力

道路土工指針²⁾では(11)式の適用上の留意事項として、以下の意味の記述がなされている。

『(11)式からも明らかなように、アンカー工にはすべり面における垂直力を増加させ、せん断抵抗力を増加させる締め付け機能 ($P \sin \theta \tan \phi'$) と、すべり滑動力を減殺する引き止め機能 ($P \cos \beta$) の2つの機能がある。のり面・斜面を安定させるための永久構造物としてのアンカー工の設計においては、前述の2つの機能が同時に発揮されるかどうかは明らかではないため、現状では安全側を考えてどちらか一方の機能のみを設計に反映させることが多い。

締め付け機能を期待するアンカーでは、初期緊張力としてアンカー耐力の100%を採用することが多い。引き止め機能を期待するアンカーでは、対象すべり土塊が大きくアンカー1本当たりの引張力が大きくなり、特にアースアンカーでは定着部のクリープなどが懸念されるため、初期張力としては計画アンカー耐力の数10%を採用することが多い』。

しかし、この記述は全く理解に苦しむ。締め付け機能と引き止め機能はアンカー力の分力によって発揮される機能である。一方の機能を見捨てるということは、力の分力の一つを見捨てることを意味するもので、力学的にナンセンスである。

アンカーには、すべりを発生させないだけの張力を初期に与えておくべきである。初期張力が十分与えられておれば、アンカー張力は変化しない。しかし、初期張力が不十分であれば土塊のすべり運動に伴い変動する。しかも、アンカーが複数設

置されておればアンカーに発生する張力は一定にならず、それぞれ異なる。このため、各アンカー張力を予測することが極めて難しくなる。

地盤のクリープについては設計段階で当然考慮すべきで、クリープ変形による緊張力の低下を見込んで初期張力を決定すべきである。しかし、実際にはクリープ変形を的確に予測することは難しいので、安全率を高め設定するといった対応が現実的かも知れない。

4. 抑止杭工

杭工を設置した場合の安全率は、杭工によってすべり面のせん断抵抗力が増加するという立場から導かれた(20)式が実務の設計で一般的に使用されている。

$$F = \frac{\sum \{c'l + W' \cos \alpha \tan \phi'\} + P}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (20)$$

これに対して、中村¹¹⁾は、「杭工は、地すべり土塊の変位の増加と共に力を発揮していくもので、すべり面でのせん断力を地すべりの移動と共に減少していく工法である」という考えに基づいて(21)式を提案している。

$$F (= F_0 + \Delta F) = \frac{\sum \{c'l + W' \cos \alpha \tan \phi'\}}{\sum W \cdot \sin \alpha - P} \quad (21)$$

ここで、両式の妥当性を議論するため、まず、地すべり抑止工としての杭工の設計法について考えてみる。通常、杭工の設計は以下の手順で行われている。

- ①現状の安全率 F_0 を 1.0 と仮定して、 c', ϕ' を逆算で決定。
- ②計画安全率 $F_p = F_0 + \Delta F$ を設定し、付加させるべき安全率 ΔF に対応する抑止力 P を算定。
- ③杭に抑止力 P を荷重として作用させ、杭体に発生する断面力および応力度を算定。
- ④杭の材料安全率を考慮し、許容応力度を決定。
- ⑤作用応力度が許容応力度以下であることを照査。

杭工では、地盤のせん断強度定数 ($c', \tan \phi'$) と杭材のそれぞれに安全率を見込んだ設計がなされていることになる。

(20)式の F は、すべり面のせん断強度と抑止力の両方に掛かっており、安全率の意味が曖昧になっている。さらに、この式を適用して設計すれば、

杭に対しては抑止力 P を算定する際と断面算定する際と二重に安全率がかけられることになる。

一方、(21)式の F はすべり面のせん断強度に対するものであることが明確である。すなわち、(21)式を適用すれば、地盤に対する安全率と杭材に対する安全率がハッキリ区分された設計が行われることを意味する。

また、すべり土塊は杭工を設置することにより、**図-6**のような荷重状態で力の平衡状態を保っていると考えられることができるが、これは土圧問題と同じであり、(21)式が力学的にも合理性があるといえよう。

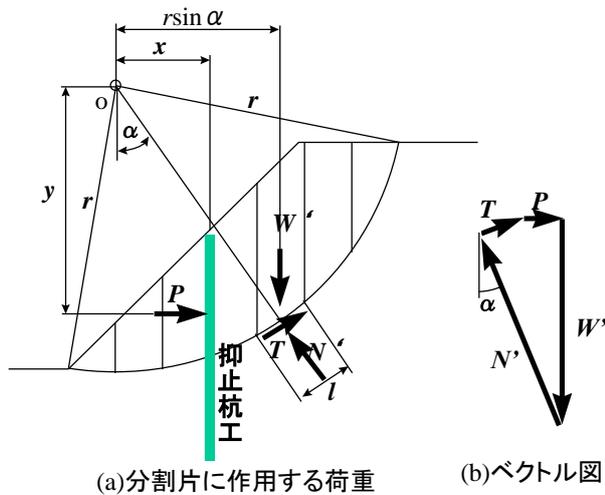


図-6 抑止杭工

ところで、(20)式及び(21)式は、共に抑止力 P がすべり面上に作用するものと見なしていることになる。これに対して杭の断面力算定の際には、すべり面より上部の移動土塊が杭に及ぼす荷重分布として一般に三角形分布を仮定している。すなわち、抑止力 P はすべり面の位置より移動土塊厚さの $1/3$ だけ上方に作用すると仮定しており、(20)式及び(21)式と明らかに矛盾する。

いま、杭工に作用する荷重状態を**図-6**のように考えれば、安全率は(22)式で算定すべきである。

$$F = \frac{\sum \{c' \cdot l + W' \cos \alpha \tan \phi'\}}{\sum W' \cdot \sin \alpha - \frac{y}{r} P} \quad (22)$$

ここに、 $W' = W - u \cdot b$ である。

5. 抑止鋼矢板工

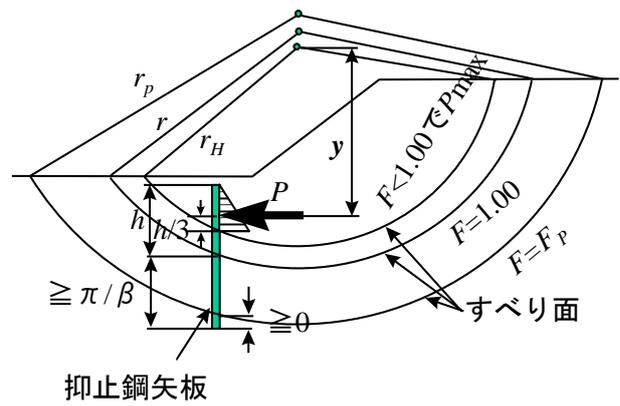


図-7 抑止鋼矢板工

堤防掘削工事などの切土工において、円弧すべりの安全率 F が計画安全率 F_p を下回る場合、地盤中に鋼矢板を打設することによって円弧すべりを防止することがある。基本的には、地すべり対策としての抑止杭工と同じである。しかし、地すべりの場合は基岩盤中の弱面、あるいは基盤と表層の境界面がすべり面となるため、すべり面が特定される。これに対して、例えば軟弱地盤などでは、原地盤の状態と鋼矢板を打設した状態では、発生するすべり面の位置が異なるため、すべり面を特定することが難しい。したがって、軟弱地盤の円弧すべり対策としての抑止鋼矢板工の設計は、地すべり対策としての抑止杭工の設計法を直接適用することには問題がある。

抑止鋼矢板工の設計では、外的安定問題と内的安定問題について検討する必要がある。外的安定問題とは鋼矢板の外側を通る円弧すべりに対する検討である。外的に安定であるためには、円弧すべりの安全率が計画安全率以上となる深さまで鋼矢板を根入れしておく必要がある。

内的安定問題とは、鋼矢板の内部を通るすべりに対する検討である。検討の対象となるすべり面は、原地盤での安全率が 1.0 を下回るすべり面であって、このすべり面には、最小安全率を与えるすべり面と最大抑止力を与えるすべり面が考えられる。設計にどちらのすべり面を採択するかは、鋼矢板を含めた斜面の破壊形態によって判断すべきである。すなわち、地盤が破壊ひずみに達するより先に鋼矢板が破壊するならば最大抑止力を与えるすべり面で設計すべきであるし、矢板の破壊より先に地盤が破壊するとすれば最小安全率を与えるすべり面で設計すべきである。しかし、この選択は、鋼矢板の剛性と地盤の剛性に関係する

ため極めて難しい。したがって、実務の設計では、安全側を考え下記の方法で設計するのが合理的である。

①鋼矢板の根入れ長は、 $F=1.0$ となるすべり面を基準とし、この面より下方へ π/β 以上根入れさせる。 π/β とは、矢板の根入れ長を弾性解析（Chang 式による解析）上無限長として取り扱うことのできる長さである。

②鋼矢板の断面力の算定は、抑止鋼矢板を無視した状態で $F \leq 1.0$ となるすべり面群の中で、最大の抑止力を与えるすべり面で設計する。

なお、抑止杭工の設計では、すべり面位置に集中荷重として抑止力が発生するものと仮定して抑止力の大きさを算定しているが、抑止鋼矢板工の場合は曲げ変形が卓越すると考えられるため、すべり面から上方に突出した部分に三角形分布荷重として作用するものと考えべきである。すなわち、抑止力の合力がすべり面から鋼矢板の突出長 h の $1/3$ の高さに作用するものと仮定した(23)式で抑止力を算定すべきであろう。

$$P = \frac{r}{y} \left\{ \sum W \sin \alpha - \frac{1}{F} \sum (c'l + W' \cos \alpha \tan \phi) \right\} \quad (23)$$

抑止鋼矢板工の断面力は、抑止鋼矢板を無視した状態で $F < 1.0$ となるすべり面群の中で最大水平抑止力を与えるすべり面を地表面とみなし、地表面に h だけ突出した弾性床上の半無限長梁としてChang式で計算することができる。

地すべり対策としての抑止杭では、杭の許容応力として一般に降伏強度が採用されている。材質SY295の鋼矢板では降伏強度が $\sigma_y = 3,000 \text{ kgf/cm}^2$ となる。地すべりを抑止する場合、抑止杭が大変形を生じて問題はない。しかし、抑止鋼矢板工の場合は変位を5cm程度に押さえるべきで、応力度も弾性限度内に押さえるべきである。従って、鋼矢板の許容応力度は $\sigma_a = 1,800 \text{ kgf/cm}^2$ とすべきである。

6. あとがき

筆者は建設コンサルタントの立場で設計の実務に携わっている。本論文では、斜面安定解析業務を遂行する中で、解析法の合理性に疑問を感じた2, 3の問題点に関して私見を述べた。

設計基準類によって、あるいは同一の基準書で

あっても章によって異なる安全率評価式が示されているのは、斜面安定問題が複雑で、発展途上にあることによるのであろうが、安全率、あるいは抑止力の定義が曖昧にされてきたことが最も大きな原因であると思われる。

今後はこれらの点を明確にし、盛土、切土、地すべりの区別なく統一した安定解析法の確立が望まれる。

公共土木事業は、会計検査の洗礼を必ず受けなければならない宿命にある。近年、検査の視点は設計法の合理性に重点が移ってきている。公共土木事業をより円滑に遂行していく上で、設計理論の統一が何よりも重要な課題といえる。

その意味で、本論文が何らかの参考になれば幸いである。

謝 辞

本論文を執筆するにあたり、鳥取大学の榎明潔教授、(株)相愛の中村和弘氏に貴重なご助言を賜った。ここに深甚なる感謝の意を表す。

参考文献

- 1)建設省河川局監修・日本河川協会編：建設省河川砂防技術基準（案）設計編〔Ⅱ〕,1985.10
- 2)日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針, 1986.11
- 3)日本道路公団：設計要領第一集, 1994.11
- 4)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 改訂版（上巻）, 1989.6
- 5)運輸省監修・鉄道総合研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説, 土構造物, 1992.10
- 6)建設省建設経済局民間宅地指導室監修・宅地防災研究会編：宅地防災マニュアルの解説, 1989.9
- 7)日本河川協会：防災調整池等技術基準（案）解説と設計実例, 1988.1
- 8)日本道路協会：道路土工―軟弱地盤対策工指針, 1986.11
- 9)小林正樹：地盤の安定計算における安全率の問題点, 土と基礎 Vol.30, No.9, 1982.9
- 10)山上拓男・山川治：斜面安定工におけるアンカー力の新しい算定法, 土と基礎, Vol.38, No.5 1990.5
- 11)中村浩之：地すべり抑止工の設計上の問題点, シンポジウム地すべり抑止工の諸問題論文集, 地すべり学会関西支部, 高知県, 1987.11