

# 鉄筋補強土工法の斜面安定への適用と設計法に 関する考え方について

SOME CONSIDERATIONS ON THE APPLICATION AND THE DESIGN OF  
THE STEEL BAR REINFORCEMENT SLOPE STABILIZATION METHOD

北村 照喜\*・長尾 哲\*\*・奥原 正由\*\*\*・斎藤 孝夫\*\*\*\*  
By Teruki KITAMURA, Akira NAGAO, Tadayoshi OKUHARA  
and Takao SAITO

In cutting earth works in the slope areas, it is considered that one of the design principles is to minimize the cutting volume of soil mass. It is possible, the steel bar reinforcement slope stabilization method described in this paper, is to be able to keep the stability of a steep cut slope by using the least reinforcement steel bars. The authors collected and analyzed 23 execution examples and the fundamental thoughts on the application and the design method were summarized. In this paper, the application slopes are classified into 6 types, and the reinforcement steel bar effects for each slope type are described.

*Keywords : slope stability, steel bar, reinforcement, design*

## 1. はじめに

自然環境との調和をはかりながら建設工事を推進するために山腹斜面の切土工においては、安全性を確保したうえで土工量を最小限にする設計上の配慮が求められる。

山腹斜面の切土量を少なくするには、のり勾配を急にすることが最も効果的である。各機関は地山の種類と切土勾配に関する一般的な指標を定めているが、実際の設計においては斜面地盤の構成が複雑であることや経済上の観点から特別なり面工を必要としない比較的緩いのり勾配が採用されることが多い。しかしながら、土地利用上の制約から、最近では地山のままでは安定性を確保し得ないのり勾配が設計施工されるケースが増加しており、切土斜面の安定化工法にも多様性が求められてきている。

鉄筋を切土のり面に設置して斜面の安定化を計ろうとする工法には、ルートパイル<sup>1)</sup>、ネイリング<sup>2)</sup>、縫地RCボルト工<sup>3)</sup>、SW工法<sup>4)</sup>、ロックボルト工などがあるが、ここで述べる鉄筋補強土工は、切土によって生ずる崩壊の危険を比較的小規模な鉄筋の設置によって防止しようとするものである。鉄筋挿入土の強度特性に関する基本的な室内実験<sup>5)~7)</sup>、龍岡らによる鉄筋補強砂斜面に関する一連の模型実験<sup>8)</sup>、北村らによる切土のり面を用いた実物大野外実験<sup>9)</sup>、林らによる鉄筋補強効果に対するアンカープレートの影響に関する模型実験<sup>10)</sup>などによつて、この工法の実用性に関する基本的研究成果はかなり蓄積されてきている。

本論文では、収集した23の施工例から本工法の技術的特徴を把握し、あわせて工法の適用に関する地山条件の分類と設計法の基本的考え方について論ずることにした。

## 2. 鉄筋補強土工の基本構造と補強効果

図-1は、鉄筋補強土工の基本構造である。補強鉄筋、グラウト、補強鉄筋頭部固定板、吹付けコンクリートなどからなる。このうち、吹付けコンクリートは他ののり面工と変えることもできるし、地山条件によってはのり面工を必要としない場合もあり得る。

表-1は、これまで実施された23例の鉄筋による斜

\* 日本道路公団理事  
(〒100 千代田区霞ヶ関 3-3-2 新霞ヶ関ビル)  
\*\* 正会員 工博 日本道路公団東京第一建設局松田工事事務所技師  
(〒258 神奈川県足柄上郡松田町惣領 1634)  
\*\*\* 日本道路公団試験所主任  
(〒194-01 町田市忠生 1-4-1)  
\*\*\*\* 正会員 工博 (株) 地盤技術リサーチ代表取締役  
(〒167 杉並区荻窪 5-16-2-202)

表-1 鉄筋による斜面補強土工の施工諸元

施工 No.	斜面条件		のり面		補強鉄筋				のり面 保護工	用途	
	土工	地質	高さ(m)	勾配	鉄筋種類	径(mm)	長さ(m)	打設間隔(m)			
1	切土	軟岩	42	0.8~1.0	異形、RB	25, 27	1.2	1.5	斜下	吹付 永久	
2	切土	軟岩・崖錐	11	0.5	異形	32	2, 3, 4	1.5	斜下	吹付 仮設	
3	切土	軟岩・崖錐	10	0.5~0.6	RB	24	3	1.5	斜下	吹付 永久	
4	切土	崖錐	8	0.8	異形	32	2.5, 3	3.0	斜下	吹付、植生 仮設	
5	自然斜面	軟岩	25	1.0	異形	32	2~5	3.0	斜下	吹付 永久	
6	切土	軟岩・砂質土	13	0.5	中空	42.8	3~7	1.0	水平	吹付 仮設	
7	切土	軟岩・崖錐	14	0.3~0.6	中空	42.8	3	1.41	水平	吹付 永久	
8	切土	軟岩	7.8	0.3	異形	25	2	1.22	水平	吹付 永久	
9	切土	砂質土	4.5	0.5	中空	40	2.75	1.2	水平	吹付のり枠 永久	
10	盛土	砂質土	6.7	0.3~0.5	異形	25	3	1.0	水平	吹付 永久	
11	切土	崖錐	13	0.3	ラム	25	3	1.41	斜上	吹付 永久	
12	切土	崖錐	7	0.18	ラム	25	3	1.41	斜上	吹付 永久	
13	盛土	砂質土	5	0.3~0.5	異形	25	3	1.0	水平	吹付 永久	
14	切土	軟岩	16	0.3	異形	25	2, 3	1.22	斜下	吹付 永久	
15	切土	軟岩	6	垂直	異形	25	2	1.5	水平	吹付 永久	
16	切土	軟岩	20	0.5~0.8	異形	25	3	1.5	水平	吹付 永久	
17	切土	軟岩	7	0.6	異形	25	3	2.12	水平	吹付 永久	
18	盛土	砂質土	5	0.1	異形	25	3	0.89	水平、斜下	吹付 永久	
19	切土	軟岩	13	垂直	RB	22	2, 2.5, 4.5	1.0	斜下	吹付 永久	
20	切土	軟岩	10	0.5	ゲビ	23	3~6	1.34	水平	のり枠 永久	
21	切土	粘性土	7	0.3	異形	25	2, 3	1.41	水平	なし 永久	
22	切土	軟岩	30	0.2	異形	29	2.3, 4	1.0	水平	吹付 永久	
23	切土	軟岩	8	0.3	異形	29	3	2.12	水平	のり枠 永久	
備考	切土(19) 盛土(3) 自然斜面(1)	軟岩(15) 崖錐(6) 砂質土(5) 粘性土(1)	5m未満(1) 5~10m(10) 10~20m(8) 20m以上(4)	0~0.3(5) 0.3~0.6(13) 0.6以上(6)	異形(15), RB (ワックボルト3), 中空ボルト(3), ラムインジケシ ョンボルト(2), ゲ ビングアーム(1)	$\phi 25\text{mm}$ 未満 (3), $\phi 25\sim$ 35mm(17), $\phi 35\text{mm}$ 以上 (3)	2m以下(8), 2~4m(18), 4m以上(6)	1m以下(6), 1~2m(13), 2m以上(4)	水平(14), 斜下(8), 斜上(2)	なし(1), 吹 付(20), の り枠(3), 植 生(1)	永久(20), 仮設(3),

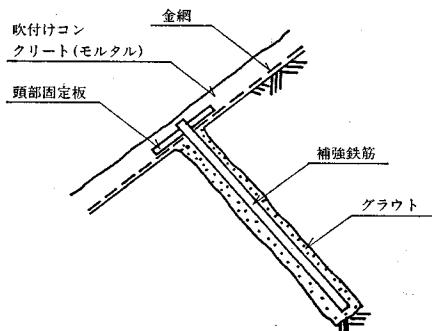


図-1 鉄筋補強土工の基本構造

面補強土工の施工諸元である。鉄筋の諸元としては、異形の  $\phi 25\text{mm}$  が最も多く使われている。鉄筋長は 3m が多いが、2m や 3m 以上のものもみられる。平均打設間隔は 1~2m のものが多いが、1m や 2m 以上の場合もある。のり面工は、吹付けコンクリートを実施することが多い。吹付け厚さは、7~10cm である。永久構造物と仮設構造物の両者について使用されている。

補強鉄筋の設置による基本的な補強効果は、すべり面に沿う鉄筋自体のせん断抵抗、すべりに対する抵抗モーメントの増加として作用する鉄筋の引抜き抵抗、およびすべり面の土塊の増加せん断力の 3つである。このうち、すべり面の土塊の増加せん断力は、鉄筋に発生する引張力の反力としてすべり面に発生する垂直力成分によ

って引き起こされるものである。

鉄筋の設置によって、斜面内土塊は拘束される。拘束の程度は、土塊の力学的性質、鉄筋量、のり面工などに影響される。曲げ剛性のそれほど大きくない補強鉄筋材において、材料自身のせん断抵抗が十分に発揮されるのに必要なすべり面の変位量が補強材の引張力が発揮されるものよりも大きくなる場合には、鉄筋自体のせん断抵抗はそれほど期待できない。補強鉄筋と併用される吹付けコンクリートは斜面内土塊の拘束効果を確実にするのに役立ち、すべり面のせん断抵抗力を効果的に増加させ得る。

以上のように、補強効果の定量的評価では、予想される斜面崩壊時に補強鉄筋に発生する引張力の大きさを推定することが重要となる。現時点においては、数値計算によって補強効果の定量的評価を統一的に行なうまでにはいたっていない。これまでの施工例を分析することによって、補強効果に関する考え方の基本を次章で論ずることにする。

### 3. 適用の基本と斜面定定化の分類

図-2 は、鉄筋補強土工の利用による斜面工事の例を模式的に説明したものである。(1) は、道路隣接ののり面に適用した場合である。のり肩部の補強、弱点部分の局所的補強、のり面の全面補強などによって長大切土のリ

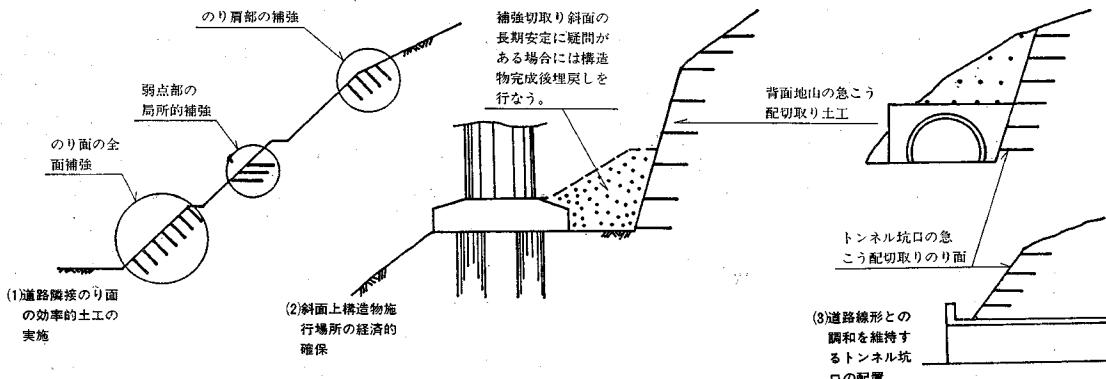


図-2 鉄筋補強土工の利用による斜面工事の例

面の安全性を経済的かつ効率的に確保することができる。施工当初から鉄筋補強土工が実施される場合には、切取りとともに補強鉄筋を設置することができるので地山を緩めることも少ない。また、鉄筋設置のために特別な足場も必要としない。施工中での予期しない地盤条件に遭遇したために当初設計ののり勾配では安定が確保できない場合や、工事完成後に生じるのり面変状の修復などにも鉄筋補強土工を効果的に適用することができる。

(2) は、斜面上における構造物施工の例である。構造物の種類にもよるが、斜面上の基礎は規模が大きくなりがちで、施工場所を確保するのが大変である。背面地山の切取りは、できる限り急勾配にして土工量を少なくする試みがなされる。鉄筋補強土工の適用は、切取り量を少なくて仮設工事費の低減を可能にする。

(3) は、トンネル坑口の切土工に適用した例である。トンネル坑口の位置選定は、地形上の制約に加えて線形の観点からも技術的検討の範囲が限定されがちである。鉄筋補強土工によるトンネル坑口の急勾配切取りのり面の安定化は、単に土工事を経済的にするのみならず道路構造全体の改善にも結び付くことが多い。

図-3 は、これまでの施工例に基づいた鉄筋補強土工の適用対象となる基本的な斜面形態の分類である。斜面の崩壊形態は、地盤構成に影響される。補強鉄筋を効果的に設置するには、崩壊形態を正確に予測することが大切となる。表層崩壊性斜面、急勾配切土の固結性斜面、薄い傾斜崖錐層の切取り斜面、傾斜基盤上崩積土斜面、土砂斜面、進行性逐次崩壊の可能性のある斜面や表層不均一斜面などのその他の斜面の6群が、鉄筋補強土工による斜面安定化の対象になり得る。鉄筋補強土工の設計を行う観点から、おののの斜面群の崩壊の特徴について論ずることにする。

図-4 は、表層崩壊性斜面に生ずる崩壊のタイプと地盤条件である。(1) 流れ盤の切取り斜面に生ずる岩塊のブロック状層すべり、(2) 亀裂の顕著な岩盤斜面での落

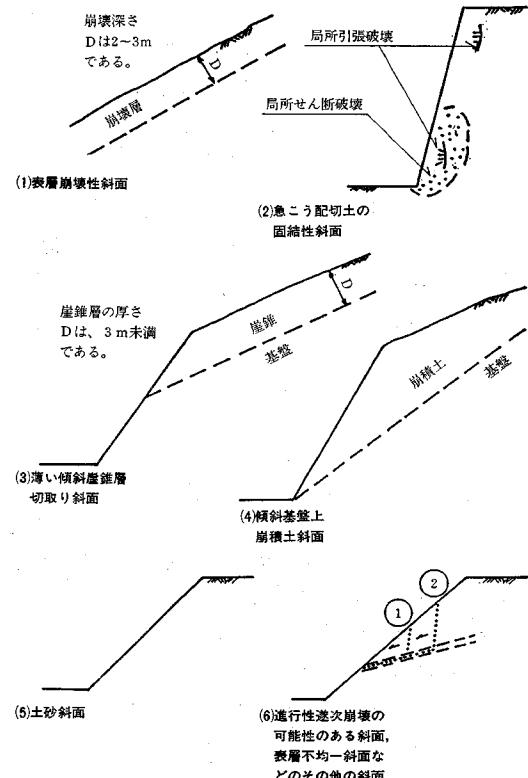


図-3 鉄筋補強土工の適用対象となる基本的な斜面形態

石型ブロック状崩壊、(3) 著しく風化した岩斜面の表層はく離状層すべり、(4) 傾斜基盤上崖錐の泥流上すべりなどが表層崩壊の典型的な例である。

(1) と (2) においては、節理などの亀裂によって岩塊は個々には分離しているが、補強鉄筋の設置によって容易に個々の岩塊の動きを拘束して不安定岩塊と基盤岩との一体化を計ることが可能である。(3) と (4) においては、土砂状の崩壊を呈する。降雨時や融雪時の斜面内流下水によって崩壊が引き起こされることが多いが、土砂は泥流状となって斜面を流下することが多い。吹付けな

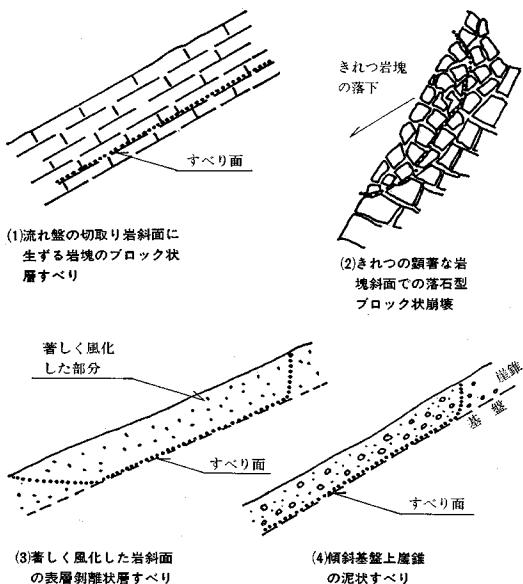


図-4 表層崩壊性斜面に生ずる崩壊のタイプ

どののり面工を併用することによって補強鉄筋間の土塊を確実に拘束することが、ポイントとなる。間隙水圧の設定の仕方は安定計算の結果に大きく影響するのであるから、斜面内地下水の挙動を正確に把握することが特に大切である。

急勾配切土の固結性斜面の崩壊は、進行性逐次破壊によって破壊面が徐々に斜面内部に進行拡大して斜面全体の崩壊にいたることが多い。ここでいう固結性斜面とは、引張り強さを有する土砂および岩塊からなる斜面の総称である。図-3(2)に模式的に示したように、急勾配切土の固結性斜面においては、局所的な引張破壊やせん断破壊が生ずる。固結性斜面への鉄筋補強工は、地山に対する補強鉄筋の付着引抜き力によって土塊を拘束し、局所引張破壊や局所せん断破壊の発生を防止しようとするものである。固結火山灰土としてのしらすの斜面安定問題を論じた山内ら<sup>11)</sup>の研究手法は、この種の問題解決に有効である。局所破壊の防止に対する補強鉄筋の引抜き力の有効性を数値解析法の中でどのように評価す

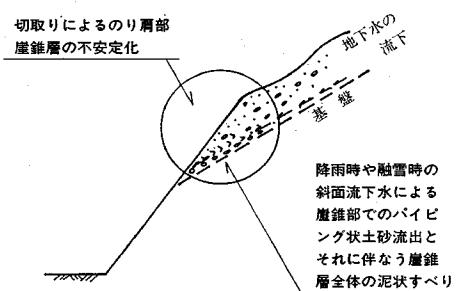


図-5 薄い傾斜崖錐層切取り斜面に生ずる崩壊の例

るかは、今後の課題である。

図-5は、薄い傾斜崖錐層切取り斜面に生ずる崩壊の例である。これまでの調査によれば、傾斜崖錐層の厚さは3m以下のことが多い。切取りによってのり肩部崖錐層が不安定化する。また、斜面全体の地形条件にもよるが、崖錐層と基盤との境界は地下水が集中して流下しやすい。豪雨時には、斜面流下水による切取り崖錐層部分でのパイピング状土砂流出と、それに伴う崖錐層全体の泥流状すべりが発生しやすい。崩壊は、次から次へと斜面上方へ拡大する。

図-6<sup>12)</sup>は、崖錐層斜面先端を通る円弧すべりとして切取り部分崖錐層の安定を試算したものである。崖錐層の厚さは3m、粘着力は0.50 tf/m<sup>2</sup>と0.70 tf/m<sup>2</sup>、内部摩擦角35°、密度1.70 t/m<sup>3</sup>、基盤傾斜角度36°、切取り勾配は1:0.5である。切取りを実施しない無限長斜面のすべり安全率 $F_s$ は、粘着力0.50 tf/m<sup>2</sup>のとき $F_s=1.13$ 、粘着力0.70 tf/m<sup>2</sup>のとき $F_s=1.20$ である。

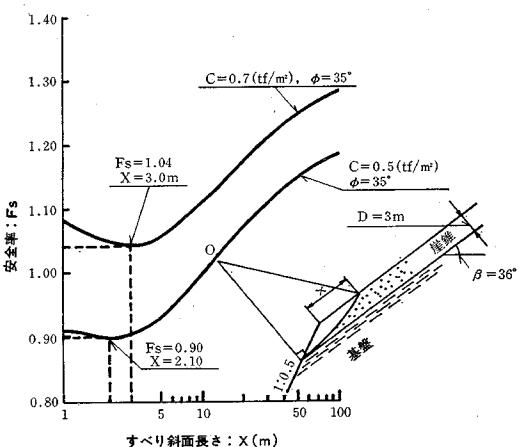


図-6 薄い傾斜崖錐層切取り斜面に生ずる円弧すべり安全率とすべり斜面長さ

図の横軸はすべり斜面長さ、縦軸は円弧すべり安全率である。 $C=0.50 \text{ tf/m}^2$ のときにはすべり斜面長さが2.10mで最小安全率は $F_s=0.90$ 、 $C=0.70 \text{ tf/m}^2$ のときにはすべり斜面長さが3.00mで $F_s=1.04$ になる。また、 $F_s=1.10$ となるときのすべり斜面長さは、 $C=0.50 \text{ tf/m}^2$ で $X=26 \text{ m}$ 、 $C=0.70 \text{ tf/m}^2$ で $X=9 \text{ m}$ である。以上のように、粘着力のわずかの差が安全率やすべり土塊の範囲に大きく影響するのが、薄い傾斜崖錐層切取り斜面に生ずる崩壊の特徴である。粘着力 $C=0.50 \text{ tf/m}^2$ や、粘着力の変化 $\Delta C=0.20 \text{ tf/m}^2$ は小さい値であり、通常の土質試験や原位置試験によって正確に評価するのは難しい。

しかし、斜面上の不飽和土は降雨水などの浸透によって容易にせん断強さ、特に見掛けの粘着力の低下を生ず

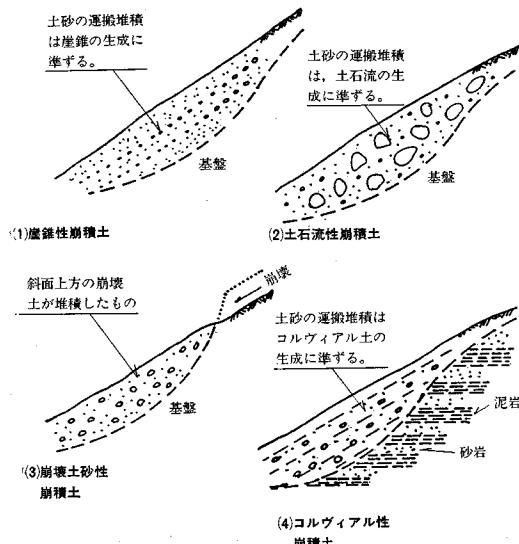


図-7 傾斜基盤上崩積土の基本形態

る。安全率に大きく影響するのであるから、崖錐の粘着力の評価には現場の条件にあわせた工夫が必要である。

傾斜基盤上崩積土斜面は、基盤が凹状に侵食された部分に土砂が堆積したものである。図-7は、傾斜基盤上崩積土の基本形態であり、斜面上方からの崩積土の種類と運搬形態によって土層構成が異なる。崖錐性崩積土は、角ばった岩屑を多量に含む粗粒土である。土石流性崩積土は、土石流によって斜面を流下してきた土砂が堆積したもので、大きな転石を含んでいる場合もある。崩壊土砂性崩積土は、そう遠くない斜面上方の崩壊土が堆積したもので土層構成は乱雑である。コルヴィアル性崩積土<sup>13)</sup>は、風化作用によって細粒土化した岩塊土砂がクリープ性移動によって斜面末端部分に堆積したもので、土の種類としては疎混り粘性土のことが多い。

土層構成の複雑さとともに、切土のり面と基盤の位置関係によって斜面の安定性が影響を受けるのが、傾斜基盤上崩積土安定化問題の特徴である。安定計算においては基盤の位置と形状に留意してすべり形状を定めることになるわけであるが、計算に含めることのできる地盤情報は限られており、斜面周辺の地形地質情報や施工経験を十分参考にして補強鉄筋の設置効果を評価することが重要となる。

すべり形状を支配するような外力の作用しない均一な土砂斜面のすべり形状は、一般に円弧状である。図-8は、斜面高さ7m、のり勾配1:0.5の土砂斜面において、安全率が $F_s=1.00$ 付近の粘着力と内部摩擦角の組合せとすべり円弧の深さについて試算したものである。粘着力の増加と内部摩擦角の減少とともに、すべり円弧の深さは大きくなる。図によれば、すべり円弧の深さが

ケース	$c(\text{tf}/\text{m}^2)$	$\phi$	$F_s(\text{min})$	斜面からすべり円弧までの最長深さ $d_i(\text{m})$
1	2.5	0°	1.00	5.00
2	1.4	20°	1.02	2.60
3	1.0	30°	1.03	1.70

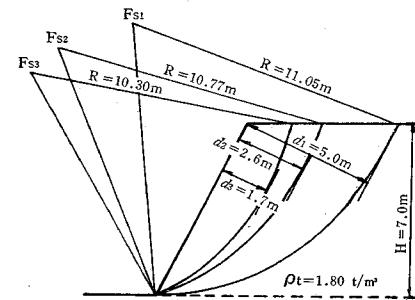


図-8 土砂斜面の強度定数とすべり円弧深さ

2.6mのときの粘着力は $1.4 \text{ tf}/\text{m}^2$ 、内部摩擦角は $20^\circ$ である。一般に、補強鉄筋の長さは3m程度のことが多いので、鉄筋補強土工は内部摩擦角が $20^\circ$ 以上の土砂斜面に効果的に適用される。

図-3の(1)～(5)までの斜面においては、安定の程度を計算によって知ることができる。しかし、切取り斜面においては現状では安定計算に含めることができないけれども、斜面安定上は影響を与える力学的弱点が存在している場合も多い。図-9は、鉄筋補強土工の適用対象となる斜面の局所的な劣化と崩壊の例である。図中の(1)は、断層、破碎帶、変質帯などの地質的脆弱部分が存在する場合である。(2)は切取りによる節理や層理などの不連続面の露出、(3)は風化変質が不均一な斜面、(4)は異種岩層の境界が力学的不連続面の拡大を生ずる

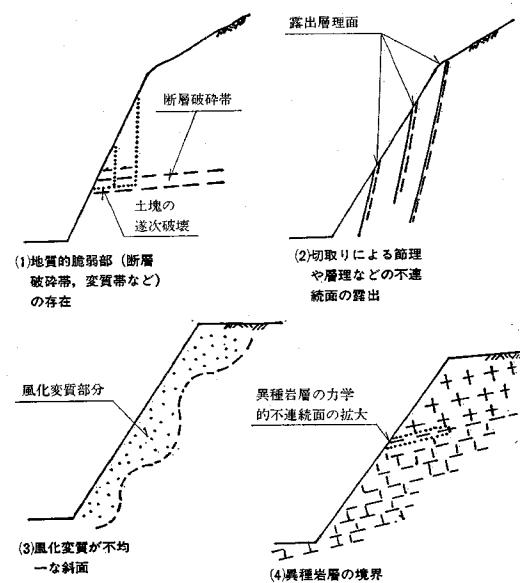


図-9 斜面の局所的な劣化の例

場合などである。いずれの場合も力学的弱点部分は局所的であるが、のり面の形状や規模、外力の作用によっては崩壊が徐々に進行する可能性が大きい。斜面土工初期における力学的弱点部分の補強が効果的になる例である。

以上のように、鉄筋補強土工の施工対象となる斜面の地盤条件はさまざまである。補強効果の評価には、数値計算に加えて施工経験を加味した総合的な判断が必要とされる理由である。

#### 4. 設計計算法の基本

現状においては、斜面補強に対する統一的設計計算法が確立しているわけではない。設計計算法の基本的考え方を論ずる中から、設計計算法の課題について考察を加えることとする。

図-10 は、鉄筋補強土工設計の基本流れである。斜面の軽微な潜在的崩壊を防止しようとする場合には、標準設計に基づき設計計算法を省略することができる。軽微な潜在的崩壊とは、表層 2 m 程度以浅の表層の斜面劣化の状態が将来斜面崩壊を発生させる可能性のある様子のことという。標準設計の鉄筋諸元は、次のようにある。鉄筋は異形の  $\phi 25 \text{ mm}$ 、打設長さは 2 m 程度、打設間隔は 1.5~2.0 m としてグラウト工を実施する。また、のり面工については、地盤条件と補強目的を考慮しながら適切に定める。標準設計以外の場合には、設計計算によって鉄筋補強土工の力学的安定性を確認すること必要となる。

設計計算によって求めるものは、補強鉄筋諸元(直径、長さ、設置角度、設置間隔)とのり面工諸元である。また、鉄筋自体のせん断抵抗、鉄筋の引抜き抵抗、すべり面土塊の増加せん断抵抗力の基本的な 3 つの補強効果は、予想される補強斜面の破壊形態に影響される。ゆえに、土塊の性質、補強斜面の全体構造、外力の作用などを総合的に検討して設計のための補強効果を定めること

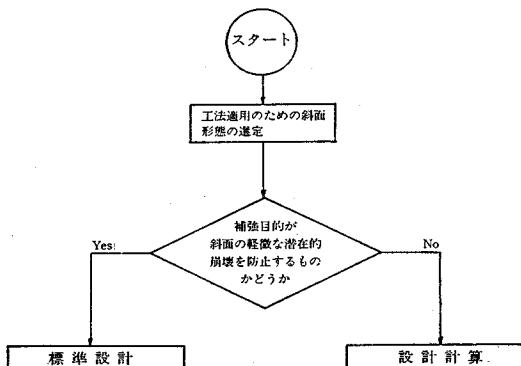
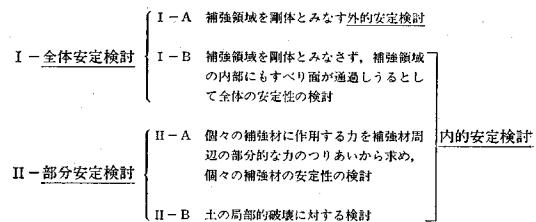


図-10 鉄筋補強土工設計の基本流れ

表-2 補強土の安定解析法の概略



が必要となる。

設計計算法とは、補強斜面の安定解析によって補強鉄筋諸元を定めることである。表-2 は龍岡<sup>14)</sup>によるもので、安定解析法の概念である。補強鉄筋諸元は、補強部分の外的安定と内的安定を満足するように定める必要がある。

図-11 は、鉄筋補強土工の安全率の考え方である。補強斜面の破壊に対する計画安全率と補強構造体の材料安全率を考慮することになる。

補強斜面の破壊に対する計画安全率は、無補強斜面に対して採用される計画安全率の考えに準ずるものとする。地すべりや崩壊対策工の検討に際しては、計画安全率として  $F_s = 1.2 \sim 1.3$  を採用することが多い。

補強構造体の材料安全率としては、補強鉄筋、引抜き、その他を考慮する。補強鉄筋についてはせん断力と引張力、その他については吹付けコンクリートや補強鉄筋頭部固定材系の材料安全率を含んでいる。

鉄筋補強土工は機能的にはアースアンカーとは異なる面があるが、構造上の類似性という観点から、補強鉄筋の許容引抜き力に関する安全率としては、土質工学会アースアンカーの設計・施工基準 (JSF 規格: D 1-77) に準じて、仮設時 1.5、永久 2.5 とすることが多い。また、鉄筋の許容引張応力度については、コンクリート標準示方書に準ずる。グラウト材の設計基準強度が  $\sigma_{ck} < 180$

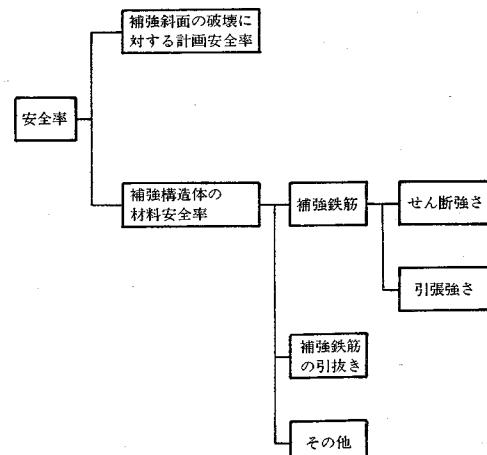


図-11 鉄筋補強土工の安全率

$\text{kgf/cm}^2$  のときには、普通丸鋼に対して  $1200 \text{ kgf/cm}^2$  以下、異形鉄筋に対して  $1600 \text{ kgf/cm}^2$  以下とする。許容せん断応力度については、鋼部材の設計に関する現在の一般的な考え方に基づき許容引張応力度の  $1/\sqrt{3}$  とすることが多い。

前述したように、斜面の地盤条件によって崩壊形態は異なるのであるから、図-3 の斜面形態の特徴にあわせて具体的な設計計算を実施することになる。

表層崩壊性斜面に対する設計計算は、極限平衡条件のもとですべり面上の力のつり合い条件式を解くことによって行う。これまでの経験によれば、表層崩壊の発生に關係する外力の内地下水（すべり面上の間隙水圧）の影響が特に大きい。斜面内の間隙水圧は時として非常に大きなものになり、土の重量よりも大きくなる場合もあり得る。このような場合には、内部摩擦角によるすべり面上のせん断抵抗力は期待できない。安定計算においては、斜面内地下水の流下に関する地盤情報を総合的に評価するとともに、降雨による不飽和土のせん断強さの減少についての検討が大切となる。

急勾配切土の固結性斜面に対する補強鉄筋の打設効果は局所引張破壊や局所せん断破壊に基づく進行性逐次破壊現象を抑制することであるから、設計計算には FEMなどの数値計算法が有効である。しかしながら、補強土塊の応力・ひずみ特性を考慮した形で実際に生ずるであろう補強鉄筋の設置効果を詳細にシミュレートするまで数値解析法が発達していないのも現状であろう。現地調査によって、固結性斜面の崩壊に関する情報をを集め、設計計算上の妥当性を経験上から検討することは特に重要である。

薄い傾斜崖錐層取り斜面の補強部分は、崖錐の土塊特性、のり面工、鉄筋の拘束効果などの相互関連によつては、上部斜面からの土圧の作用による締付け効果が發揮されるために擬似剛体化する場合もあり得る。

図-12 は、補強部分が擬似剛体化する場合の必要引張合力  $T$  を力の多角形によって求める場合の例であ

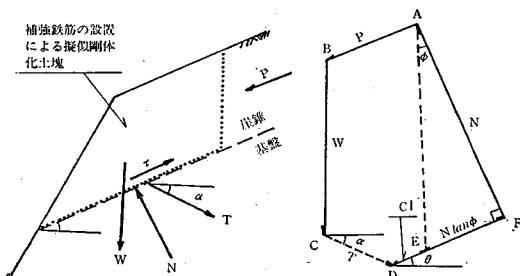


図-12 薄い傾斜崖錐層取り斜面安定のために必要な引張力の求め方（補強部分が擬似剛体化する場合）

る。図において、

$P$ : 擬似剛体面に作用する土圧

$W$ : 補強土塊重量

$N$ : すべり面に作用する垂直反力

$\tau$ : すべり面上の土塊のせん断抵抗力、 $\tau = cl + N \tan \phi$

$\phi$  (c: 粘着力,  $\phi$ : 内部摩擦角,  $l$ : すべり面の長さ)

$T$ : 引張合力

$\theta$ : 基盤傾斜角

$\alpha$ : 鉄筋打設角

上記において、 $W$ ,  $\alpha$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ ,  $c$  が既知量である。土圧  $P$  は、崖錐の土塊特性を考慮して適切に推定することになる。所定の安全率  $F_s$  を確保するために必要な補強鉄筋の引張合力  $T$  は、式(1)より求まる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{N \tan \phi + cl + T \cos(\alpha + \theta)}{P + W \sin \theta} &> F_s \\ N = W \cos \theta + T \sin(\alpha + \theta) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

力の多角形から求まる  $N$  と  $T$  は、全体の合力である。個々の鉄筋の引張力は、鉄筋間の分担率を仮定することで求めることができる。引張力に対して、所定の安全率を有する定着長が求まる。

地盤条件にもよるが、傾斜基盤上崩積土斜面の場合には、補強部分が一様に擬似剛体化するとは限らない。図-13 に示すように、斜面上方からの土圧  $P$  によって生ずる基盤上のすべりは、基盤内に定着した補強鉄筋によって抵抗されることになる。上半部の補強部分は、土圧  $P$  を下部の擬似剛体化部分へ伝達するのに十分な剛性を有することが必要となる。ゆえに、安定計算は下部の擬似剛体化部分については図-12 の考え方を適用できるが、上部補強部分については土圧  $P$  に対して十分な安定性を有する鉄筋を設置することが必要となる。

補強部分の擬似剛体化が期待できない土砂斜面の設計計算は、極限つり合い法によるすべり安定解析によるのがよい。実際の安定計算においては、簡易ビショップ法に基づく龍岡の手法<sup>15)</sup>を用いて補強鉄筋諸元を求むことができる。

以上が、斜面形態ごとの設計計算法の基本概念である。実際の設計計算においては、現場での施工経験を考

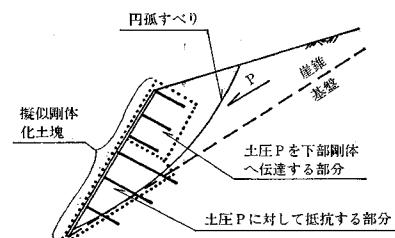


図-13 傾斜基盤上崩積土の補強状態

慮しながら設計条件を設定していくことが必要となる。

鉄筋補強土工の設計法に関する基本的考え方について述べてきた。設計法そのものをつくりあげていくためには、解決されなければならない課題も数多く残されている。それらの主なものは、次のようにある。

(1) 補強鉄筋の補強効果と破壊形態の定量的把握

(2) 安全率の明確化

(3) 設計計算に用いる設計条件の具体的検証

(1) に関しては、補強された土塊がどのような形で破壊するかを調べることが基本となる。すなわち、補強鉄筋の設置による地中応力と変形挙動、補強鉄筋に発生する応力、擬似剛体化破壊と土砂状破壊の明確化などについて、補強鉄筋・のり面工・地盤条件の相互関連を考慮した具体的な定量的データの収集と整理が必要である。

(1) の項目で明確となる補強効果は、設計において安全率という形で定量的な評価を与えることになる。(2) に関しては、耐久性と仮設・永久の使いわけに関する明確化を計る必要がある。耐久性に関しては、補強土塊全体としての構造的安定性をのり面工・グラウト工・補強鉄筋などの材料的な耐久性を考慮しながら評価する手法を確立する必要がある。

(1) および(2) の項目が定式化されるなかで設計計算は実施されることになるが、具体的な設計計算においては仮定条件の設置ということが避けられない。すなわち、(3) に関しては、設計計算の普遍性を計る意味からも仮定条件の数を最小限に抑え、またその判断の幅を小さくすることができるような、いわゆる使いやすい設計計算法を確立することを業の主体とするものである。そのためには、室内実験・野外動態観測・FEMなどの数値計算法によって設計計算に用いる設計条件の具体的検証を行うことが基本となろう。

## 5. 結論

以上の考察の結果、本論文で得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 鉄筋補強土工の適用は、補強効果の評価により規定されることがわかった。補強鉄筋の補強効果は、鉄筋自体のせん断抵抗、鉄筋の引抜き抵抗およびすべり面上の増加せん断力の3つとして表現し得る。また、これらの補強効果のどの成分が効果的に期待し得るかは斜面形態によって異なることがわかった。

(2) 鉄筋補強土工の適用対象となる斜面形態には、補強効果の特徴という観点から考えて、表層崩壊性斜面、急勾配切土の固結性斜面、薄い傾斜崖錐層切取り斜面、傾斜基盤上崩積土斜面、土砂斜面、進行性逐次破壊の可能性のある斜面や表層不均一斜面などの他の斜面の6群に分類できる。

(3) 鉄筋補強土工法の設計において、表層2m程度以浅の斜面を補強する場合には、標準設計に基づき設計計算を省略できる。ここでいう標準設計とは設置鉄筋の諸元等を規定することであり、標準設計における諸元は、異形鉄筋のφ22~25mmを鉄筋長2m程度、設置間隔1.5~2.0mとしてグラウト工を実施するものとする。また、のり面工については、地盤条件と補強目的、永久構造物であるか仮設構造物であるかを考慮して適切に定める。これ以外の標準設計のできないものについては、本論文中に示した設計法の考えに基づいて設計計算を行い、補強部分の力学的安定性を確認することが必要である。

(4) 以上3項目に基づき、従来は明確にされていなかった鉄筋補強土工の適用対象斜面と設計計算法の基本をより明確な形で設定することができた。

**謝 辞：**この論文を作成するにあたっては、鉄筋補強による斜面補強工法に関する委員会（三木五三郎委員長：日本道路公団試験所、（社）日本建設機械化協会建設機械化研究所、昭和58年～60年）での討論が参考となった。ご指導頂いた三木五三郎先生（東京大学名誉教授）、龍岡文夫助教授（東京大学）、林重徳助教授（九州大学）をはじめとする委員会諸氏に御札を申し上げるとともに、奥園誠之氏（日本道路公団本社調査役）には鉄筋補強土工法全般に関するアドバイスを頂いた。ここに、関係各位に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 三木五三郎・坂下五男・児玉秀文：網状ルートパイル(R.R.P)工法の日本における実例、土と基礎、Vol. 31, No. 9, pp. 35~40, 1983.
- 2) Gassler, G. and Gudehus, G.: Soil-nailing some aspects of a new technique, Pro. of the 10th ICSMFE, Vol. 3, pp. 665~670, 1981.
- 3) 北原正一・上野正高：モールクーロンの破壊条件を活用した新しい土留め工の理論、トンネルと地下、Vol. 17, No. 6, pp. 457~462, 1986.
- 4) 山本稔・佐々木健二・佐藤恭介：ボルトによる斜面安定工法(SW工法)について、第37回土木学会年次学術講演会講演概要集、第III部門、pp. 255~256, 1982.
- 5) Jewell, R.A.: Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils, Ph.D. Thesis, Cambridge Univ., 1980.
- 6) 徳江俊秀・梅津喜美夫：補強土の強度、変形特性と補強材挿入角度、第16回土質工学研究発表会、pp. 509~512, 1981.
- 7) 龍岡文夫・金藤浩司・三木五三郎・生原修・浜田英治・佐藤剛司：引張補強材による砂の補強についての基礎的研究、土と基礎、Vol. 31, No. 9, pp. 11~19, 1983.
- 8) 龍岡文夫・浜田英治：鉄筋による砂斜面の補強法に関する室内実験〔I〕～〔XI〕、生産研究、Vol. 36, No. 10～Vol. 37, No. 9, 1984, 1985.
- 9) 北村照喜・奥園誠之・長尾哲：鉄筋による補強土工法に関する実験的研究、第16回日本道路会議論文集、pp.

- 93～94, 1985.
- 10) 山内豊聰・落合英俊・林重徳・田山聰・藤崎裕司・古賀浩：鉄筋による切土斜面の補強効果に関する実験研究（補強鉄筋の頭部プレートの効果），第20回土質工学研究発表会，pp. 1361～1364, 1985.
- 11) 山内豊聰・持永龍一郎・後藤恵之輔・村田秀一：しらす切土斜面の研究と高速道路の設計基準，土質工学ケースヒストリー集第1集，土質工学会，pp. 267～318, 1983.
- 12) 斎藤孝夫：地盤土と土層断面図，鹿島出版会，p. 49, 1985.
- 13) 田中健明・門田信一・斎藤孝夫・白子博明：コルヴィアル斜面沿いの低湿地の地盤特性，第18回土質工学研究発表会，pp. 89～92, 1983.
- 14) 土質工学会編：補強土工法，p. 85, 1986.
- 15) 土質工学会編：補強土工法，pp. 152～157, 1986.  
(1986.1.26・受付)