

自然環境を保全した斜面安定工法に関する研究

Slope Stability Method Maintained Natural Environment by Rock Bolt and Unit Net

楠見晴重 (くすみ はるしげ)
関西大学教授 工学部 都市環境工学科

宅川正洋 (たくかわ まさひろ)
大日本コンサルタント(株) (前関西大学大学院)

寺岡克己 (てらおか かつみ)
(株)ダイカ 商事営業部土木資材課

片山辰雄 (かたやま たつお)
環境総合テクノス(株)

福政俊浩 (ふくまさ としひろ)
兵庫県洲本農林水産振興事務所

1. はじめに

我が国では、急速な経済発展と都市への人口集中により住宅需要が増加している。それに伴い、都市は山地の裾部や丘陵地にまで広がり、急傾斜地崩壊危険箇所が新たに数多く発生している。また近年、豪雨や地震等が誘因となって斜面の表層崩壊が多発し、甚大な被害を被っていることから、都市および都市周辺における斜面安定化対策の必要性がますます高くなっている。

一方、今年2月に京都議定書がようやく発効し、これにより温室効果ガスの排出量削減は、我が国にとって急務の課題となっている。京都議定書の数値目標を達成するためには、排出量自体を削減することは勿論のこと、CO₂を吸収する森林の保全や育成が効果的である。さらに森林の持っている防災機能を考え合わせれば、これからの都市の斜面防災において、森林の保全と斜面安定化対策とを両立させることが重要であると思われる。

本研究では、鉄筋類挿入補強土工法と落石防止ネットを応用し、樹木を極力伐採せずに自然斜面の安定化を図る新しい斜面安定工法を提案している。しかし、その効果や補強メカニズムの詳細については未解明の部分が残されている¹⁾。ここでは、各種実験を実施することで本工法の効果および補強メカニズムを解明し、より精度の高い設計手法の確立を試みている。

2. 本工法の概要

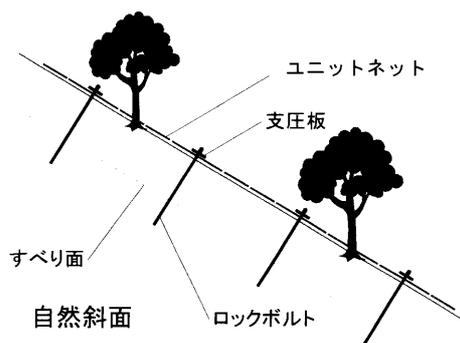
本工法は、1995年の阪神・淡路大震災で落石防止用のロープネット工が効果を発揮したという事実を基に、ロープネット工と同様の材質で製造した正方形部材（ユニットネット）と棒状補強材を支圧板で連結することによって、自然斜面の崩壊抑止力および耐震性能の向上を図っている（口絵写真—1）。ユニットネットとは、縞り線ワイヤー（材質：JISG3537SWRH62-A、径8.0 mm）を、一辺が500 mmの正方形ユニットに成形した部材であり、耐腐食性を高めるために表面には亜鉛アルミ合金メッキ処理を施している。ユニットネットには、それぞれ連結用の開閉式ジョイントを設けており、各ユニットを斜面上で簡単かつ迅速に接続することができる。図—1に、本工法の概要を示している（口絵写真—2 (a), (b)）。

本工法は、樹木の伐採や切土作業を行わずに施工できるため、生態系を乱さず、CO₂削減にも貢献できる「自然にやさしい工法」といえる。

3. 模型試験概要

本工法の補強メカニズムおよび安定効果を明確にし、その設計手法を確立するため、各補強部材の変形挙動および力学的特性の把握を目的としてせん断試験を行った。

図—2は、模型試験装置の概要を示す。試験装置は、実物の1/10スケールとなるように製作した。本装置は、厚さ50 mmまたは100 mmのアルミニウム製せん断枠を組み合わせることで、任意の層厚（せん断面）を有する全長600 mm、幅500 mmの土槽を形成できる。模型地盤は、気乾状態 $S_r = 0\%$ では豊浦珪砂（粒径0.3 mm、比重2.65）を空中落下法により、飽和状態 $S_r = 100\%$ では水中落下法により作製した。載荷方法は、パワージャッキをサーボ式電動モーターで変位制御し、あらかじめ設定したせん断面より上段にあるせん断枠を一定速度で押し出すことにより、土槽内地盤に強制せん断変形を与えるようにした。試験は、模型地盤の全層厚を350 mm、補強材を200 mm間隔の千鳥配置、補強材と



図—1 本工法の概要

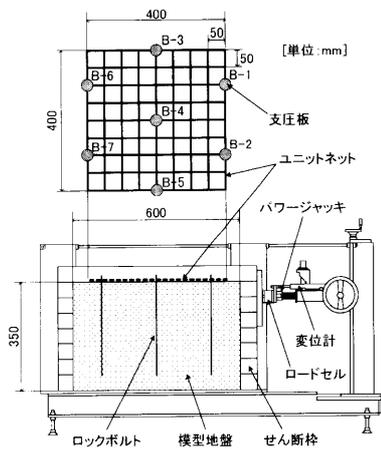


図-2 模型試験装置の概要

せん断面のなす角を90°, 載荷速度を2.0 mm/minの一定として、表-1に示すような各種の条件下で実施した。ここで、対策工におけるB, P, N, N'とは、それぞれ補強材、支圧板、地表面に接するように敷設したユニットネット（接地状態）、地表面から若干浮かせて敷設したユニットネット（非接地状態）を示しており、せん断面位置に関しては、それぞれ地表面からの深さを示している。

ユニットネットおよびロックボルト模型は、それぞれ径2.0 mm および2.5 mm のSS400 鋼材によって製作し、表面には一對のひずみゲージを、ユニットネットには160カ所、B-4のロックボルトには6カ所貼り付けて各位置における応力計測を行った。ここで、ユニットネット模型は本来縫い線ワイヤーで制作し、各交点部分が自由に移動・回転できる構造とするべきであるが、今回はひずみゲージの取り付けおよび模型自体の取扱いやすさを重視し、実物の1/10よりも大きな径を採用するとともに、交点をすべて溶接した鋼製格子枠とした。また、ロックボルト模型には、グラウト材として周囲の砂層との摩擦力を確保するとともに、試験中にひずみゲージが損傷・剥離するのを防ぐため、エポキシ樹脂系充填接着剤を塗布した。ロックボルトは有効長 $l=350$ mmとし、末端部を試験装置底板に固定させた。支圧板には、径

表-1 試験項目

CASE NO.	1	2	3	4	5	6	7	8
Sr(飽和度)	0%							
対策工	B+P+N				B+P+N'			
せん断面位置	100mm	150mm	200mm	250mm	100mm	150mm	200mm	250mm

CASE NO.	9	10	11	12	13	14	15	16
Sr(飽和度)	0%				100%		0%	
対策工	B+P				B+P+N	B+P+N'	B+P	無対策
せん断面位置	100mm	150mm	200mm	250mm	150mm		150mm	100mm

CASE NO.	17	18	19	20
Sr(飽和度)	0%			
対策工	無対策			
せん断面位置	150mm	200mm	250mm	150mm

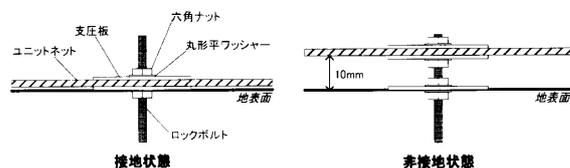


図-3 ユニットネットの固定方法

30 mm, 厚さ1.0 mm のステンレス板を使用し、2枚の支圧板でユニットネットをロックボルト頭部に挟み、ナット締めによって固定した。図-3に、ユニットネットの固定方法を示す。

4. 本工法による補強効果

図-4は、せん断面150 mmにおけるせん断変位量とせん断載荷重との関係を、対策工の違いによって比較したものである。また、図-5は対策工の違いによる補強効果の変化を示したものである。ここで、補強比 R は次式によって算出した。

$$R = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{0 \max}} - 1.0 \dots \dots \dots (1)$$

τ_{\max} : 各対策工の最大せん断応力 (kN/m²)

$\tau_{0 \max}$: 無対策時の最大せん断応力 (kN/m²)

これらの図から、対策工を施すことによって、せん断面位置にかかわらず、地盤の抵抗力は増加し、対策工B+P+Nにおいて最も大きな補強効果が得られることが認められる。すなわち、本工法の補強効果を十分に発揮させるには、ユニットネットを地表面に密着させて敷設することが重要であるといえる。逆に、ネットやロープを空中に浮かした状態では、その効果はほとんどロックボルトのみと同じで、ネットやロープは不要となる。

次に、本工法による崩壊抑止効果は、補強材頭部の連結による補強領域の一体化と、ユニットネットによる地表面の押さえ込み効果²⁾であると考えられるため、それぞれの効果がユニットネットによる補強効果全体に占める割合を求めた。図-6は、ユニットネットの補強効果と各補強効果の分担割合を、せん断面位置の違いによって比較したものである。ここで、ユニットネットによる補強効果 R_N は、式(2)によって算出し、各補強効果の増加率は、式(2)にならって算出した。すなわち、補強材頭部連結効果は、対策工B+P+N'とB+Pとの比、地表

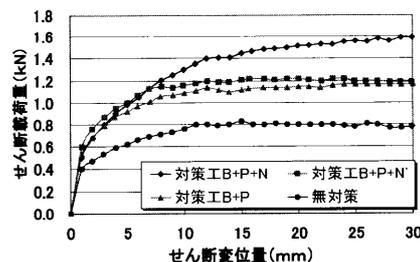


図-4 せん断変位量とせん断載荷重との関係 (case. 2, 6, 10, 17)

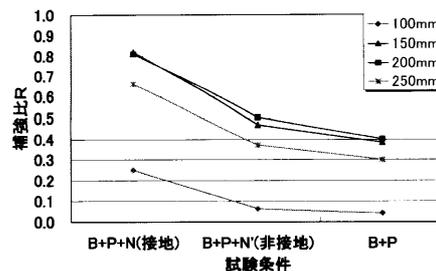
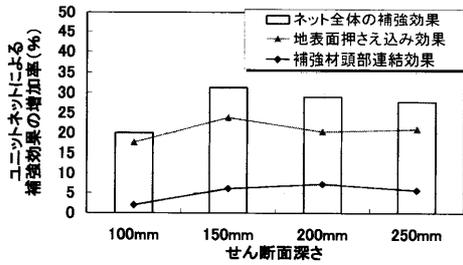


図-5 対策工の違いによる補強効果の変化



図一六 ユニットネットの補強効果と各補強効果の分担割合

面の押さえ込み効果は、対策工 B+P+N と B+P+N' との比で表すことができる。

$$R_N = \left(\frac{\tau_{(B+P+N)}}{\tau_{(B+P)}} - 1.0 \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\tau_{(B+P+N)}$: 対策工 B+P+N における最大せん断応力 (kN/m²)

$\tau_{(B+P)}$: 対策工 B+P における最大せん断応力 (kN/m²)

また、ロックボルトの末端部を固定させた場合、補強材の弾性限界となるせん断変位量が20 mm 前後となった。このことから、補強効果を検討する際に、補強材の弾性限界となるせん断変位量である20 mm までで評価することにした。

この結果、ユニットネット全体の補強効果の増加率は、25%程度となり、ユニットネットの分担割合は、せん断変位位置にかかわらず、頭部連結効果：押さえ込み効果 = 1 : 4 程度になるといえる。また、せん断面が補強材の中央付近に位置することで、本工法の効果が効率よく発揮されることが示された。

図一七は、ユニットネットの補強効果を、地盤の含水状態の違いによって比較したものである。この図から、地盤の含水状態の影響としては、ユニットネットの補強効果は減少傾向になるといえる。

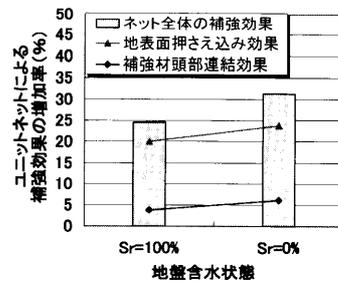
最後に、現在主流となっている鉄筋挿入工法の設計法について概説するとともに、その問題点を指摘し、模型せん断載荷試験によって得られた本工法の補強特性および補強効果を基に、本工法における設計手法の構築を試みた。補強材が法面工に結合されている場合、移動土塊の抜け出しに対する抵抗力は、定着長以外にも法面工の影響を強く受けるため、適切な法面工を併用することで、移動土塊から受ける補強材の引張り力(抜け出し抵抗力)の増大を図ることができる。このため、現行設計法では、法面工に作用する補強材引張り力に関わる法面低減係数 μ^3 を移動土塊から受ける補強材の引張り力(抜け出し抵抗力)の評価を行っており、 μ は式(3)によって定義されている。

$$\mu = \frac{T_0}{T_{max}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

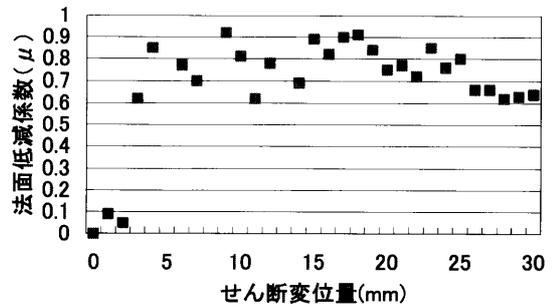
T_0 : 法面工と補強材の結合部に作用する補強材引張り力 (kN/本)

T_{max} : 補強材引張り力の最大値 (kN/本)

ここで、模型せん断載荷試験結果より、本工法におけ



図一七 地盤の含水状態によるユニットネットの補強効果比較



図一八 本工法の法面低減係数

る法面工、すなわちユニットネットの法面工低減係数 μ を算出する。図一八は、式(3)を用いて、乾燥状態のときの本工法における法面低減係数を示したものである。なお、模型せん断載荷試験では、ひずみゲージの取り付けに関する問題から、ユニットネットと補強材との結合部の軸力は計測していないため、 T_0 には地表面から深さ25 mm の位置で計測された軸力の値を代用した。この図から、本工法における法面低減係数は0.7~0.8程度であると確認できる。

5. まとめ

本研究によって、ロックボルトとユニットネットを併用した斜面安定工法の補強機構が明らかとなった。また、2004年に発生したすべての集中豪雨地域において、本工法によって施工された自然斜面は数箇所存在していたが、これらの補強された斜面は、斜面の変状や樹木の倒壊等の被害は見られなかったことから、本工法の有効性が認められたものと思われる。

今後更に本工法を進化させるべく、研究を続ける予定である。

参考文献

- 1) 楠見晴重・岩井慎治・福政俊浩・北村善彦：景観・樹木に配慮した自然斜面の安定工法に関する基礎的研究，第11回岩の力学国内シンポジウム，p. 108, 2002.
- 2) 楠見晴重・岩井慎治・宅川正洋・寺岡克己：樹木を保全した斜面安定工法におけるロックボルト頭部連結ネットの補強効果，第38回地盤工学研究発表会，CD-ROM, 2003.
- 3) 日本道路公団：切土補強土工法設計・施工指針，p. 39, 2002.

(原稿受理 2005.5.16)