

地山補強土工法における法面工の耐震性について

稲川 雄 宣 山 本 彰

Evaluation of Slope Protection Work in Reinforced Embankment by Soil Nailing Method with Regard to Seismic Stability

Yusen Inagawa Akira Yamamoto

Abstract

The importance of slope protection work by the soil nailing method has been confirmed in past experiments. Slope protection work has contributed to security in the slope during the earthquake. However, quantitative evaluation of slope protection work relevant to seismic stability is still unclear. We performed centrifuge tests on a slope model with different forms of slope protection to evaluate the effect of the slope protection work during an earthquake. Our results are as follows. (1) The slope failure form of an earthquake changes depending on the ground, and specifications of the soil nailing or slope protection work. (2) When the bearing area of the slope protection work is large, the stability of the slope during the earthquake is improved by the restraint effect. (3) Soil nailing needs to maintain the pull-out resistance of the slope protection work to be more than the bearing strength to produce a sufficient restraint effect. (4) The reduction factor of the slope protection work produces a small increase in the input acceleration, and the relationship between the coefficient of surface engineering and the reduction factor of the slope protection work in an earthquake is largely the same as under ordinary conditions.

概 要

地山補強土工法における法面工の重要性については既往の研究から確認されているが、地震時の定量的な評価については未解明な点も多く、実際の設計においては既往の実験等を基に設定した法面工低減係数を適用しているのが実態である。そこで、地震時の地山補強土工法における法面工の安定性に与える効果について確認するため、法面工形状を変えた遠心模型実験を実施し、その効果検証を行った。その結果、以下の知見が得られた。(1) 地震時には複数の変状形態(中抜け、表層すべり、全体すべり)が存在する。(2) 法面工の支圧面積が大きくなるほど、地震時における法面変形の抑制効果が大きく、盛土の安定性は向上する。(3) 法面工が十分な拘束効果を発揮するには、補強材は法面工の支圧力以上の引抜き抵抗力を保持する必要がある。(4) 法面工低減係数は入力加速度の増加による変化が小さく、地震時における表面工係数 f_a と法面工低減係数 μ の関係は常時のそれと概ね同様な関係にある。

1. はじめに

地山補強土工法は主に切土法面の補強対策として用いられてきたが、近年は既設盛土の補強、土留め工の反力、石積み等擁壁の補強など適用範囲は多岐にわたっている。特に最近では既設盛土の耐震性向上を目的とした事例が増えてきており、その目的に応じて法面に設置する保護工も擁壁からプレートまで様々な仕様の法面工が用いられている。

一方、地山補強土工法における法面工の重要性については既往の研究から認識されている。例えば、筆者ら¹⁾²⁾は鉄筋補強土斜面の模型実験、実物大載荷実験やFEM解析を実施し、法面工に関して以下の知見を得ている。

- 1) すべり荷重を補強材に確実に伝達する機能がある。
- 2) 地盤内に発生する局所的な引張ひずみの発達を抑制する効果がある。

- 3) 法面工の支圧効果による補強材の抵抗力増加が期待できる。

また、村松ら³⁾⁴⁾は模型実験や実物大切土実験のFEM解析によって、以下の知見を得ている。

- 1) 法面工のタイプや大きさを変えることにより、法面の安定性は飛躍的に向上する。
- 2) 法面工の法面占有率と法面の安定性には密接な関係がある。

現設計法においては過去の実験等を基に法面工低減係数を設定し、法面工による表面拘束効果を考慮した設計となっている。ただし、法面工の地震時における効果については明らかとなっておらず、法面工低減係数をそのまま適用しているのが現状である。

そこで、地震時の地山補強土工法における法面工の安定性に与える効果を確認するため、法面工の仕様を変えた補強盛土の遠心模型実験を実施し、崩壊形態や法面工

ている。しかし、地震時の効果については不明な点が多いことから、地山補強土工法で補強した盛土を模擬した遠心模型実験を実施し、崩壊形態について調査するとともに支圧板の寸法の違いによる盛土の安定性に与える影響について考察した。

3.2 実験方法

実験ケースをTable 1, Fig.3に示す。Case1は無対策のケース、Case2~Case4は各々20×20mm, 40×40mm, 60×60mmの支圧板を法面工として設置したケースである。模型寸法は実物での掘削高さ12.5mを想定し、縮尺は1/25とした。したがって、支圧板の実規模での寸法は、各々1辺50×50cm, 100×100cm, 150×150cmの法面工に相当することになる。模型斜面の奥行きは40cmである。土槽側面にはシリコングリースとテフロンシートで潤滑層を設けて、側面摩擦を低減している。模型は、含水比調整した材料を1層当たりの締固め後の層厚が75mmとなるよう締固め、各層ごとに補強材の設置を行った。模型実験では補強土材としてφ2mmのアルミ棒に地盤材料の細粒分の粒子を付着させて使用した。地盤材料の物性は、室内試験より土粒子密度2.663g/cm³, 乾燥密度1.85g/cm³, 含水比12.6%, 内部摩擦角36.2°, 粘着力19.2kN/m²である。計測項目は、盛土法肩の沈下および、水平変位、地盤内に設置した加速度、アルミ棒(φ2mm)に設置したひずみ(表裏8箇所)である。実験は遠心加速度を25Gまで増加させた後、25Hz正弦波20波にて、100gal~500galまで100galずつの段階加振で行った。

3.3 実験結果

3.3.1 崩壊状況 各ケースの崩壊後の状況をPhoto 1に示す。また、無対策と対策工の崩壊形態の模式図をFig.4に示す。各ケースの崩壊形態について以下に述べる。

- Case1では遠心加速度19.4Gで、法肩から10cm程度背面側に亀裂が発生しすべり崩壊した。すべり形状は側面の影響が少ない盛土中央付近で円弧すべり形状を示し、概ね円弧すべり法による計算結果(Fs=0.989)と整合する形状であった。
- Case2では400galで法肩部分が崩壊に至った。崩壊は加振時に法肩から徐々に盛土天端に亀裂が入り、中抜けによって土塊が次々と滑落した。法肩は幾何学的に揺れやすいことから、盛土天端において崩壊が生じたと想定される。また、補強材設置背面にも亀裂が発生し、加振時に亀裂の開閉する様子が確認された。一方、中段から下段にかけての法面は、法面工の間の土が小崩落していた(Photo 2)。ただし、補強材自体は盛土と一体化しており、引き抜け等の変状は確認できなかった。
- Case3, Case4では、500galで法肩部分が崩壊に至った。ただし、その範囲はCase2と比較すると上部に限定している。この法肩部の小崩壊は加振時に法肩から徐々に盛土天端に亀裂が入り、最上段の補強材が引き抜かれ土塊が一気に滑落した。法肩が幾何学的に揺れやすい

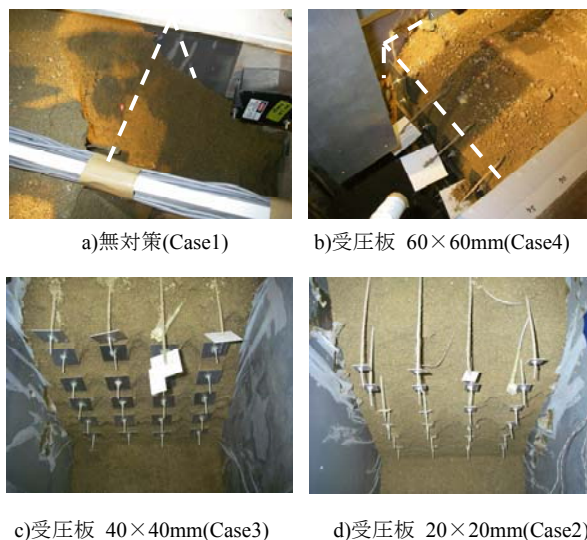
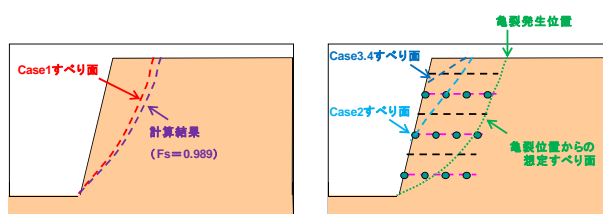


Photo 1 崩壊状況 (Case1~4)
Slope Failure (Case1~4)



(a) Case1 (b) Case2~4
Fig. 4 崩壊形状
Slope Failure Deformation



Photo 2 崩壊状況 (Case2-20mm)
Slope Failure (Case2)

ことに加え、上部補強材は周面に作用する拘束圧が低いと引抜き抵抗力が小さく、盛土天端において崩壊が生じたと想定される。補強材設置背面の亀裂はCase2と同様に発生したが、Case3の亀裂はCase4と比較すると盛土天端により多くの亀裂が発生した。すなわち、支圧面積の大きいCase4がより盛土を拘束し、高い安定性を保っていたと想定される。ただし、両ケースが同じ加速度で小崩壊したことからその拘束力を発揮するには相応の引抜き抵抗力が必要と考えられる。これらのことから以下の知見を得た。

- 1) 地震時には複数の変形状態(中抜け、表層すべり、全体すべり)が存在する。

- 2) 法面工の寸法によらず、地山補強土工法による補強を行うことによって、盛土法面の耐震性は大きく向上する。
- 3) 支圧面積が大きくなるほど、地震時における盛土の安定性は向上する。
- 4) 法面工の拘束効果を発揮するには相応の補強材の引き抜き抵抗が必要である。
- 5) 補強範囲は一体化して疑似擁壁化し、背面に発生したクラックが加振に伴って開閉する挙動を示し、亀裂が徐々に深部に発展することから、最終的な崩壊時の形態は全体すべりに至ると予想される。したがって、補強材の設計は地震時においても円弧すべり等による極限解析による評価でよいと考えられる。

3.3.2 法肩変位について 加振時の法肩変位履歴(水平・鉛直)をFig.6に示す。水平変位量について300galまでは、Case2, Case3, Case4の順で小さくなってきているが、400galにおいてはCase4の方がCase3より若干変位量が多くなっている。一方、鉛直変位についてはCase2, Case3, Case4の順で小さくなっており、全体的には支圧面積が大きいと加振時の変形量をより抑制できるといえる。これは、支圧面積が大きいかほど法面を拘束するため、地盤と補強材が一体化となって、地震による地盤の緩みやせん断ひずみの発生を抑制する効果が大きくなるためと推察される。

3.3.3 補強材の軸ひずみの分布 加振時の補強材の軸ひずみ分布をFig.7に示す。すべてのケースにおいて、軸ひずみは下段に設置した補強材ほど大きくなっており、

下段部において地盤に大きな引張りひずみの発生していることがわかる。このことから、地震時には盛土法尻付近に大きなすべり荷重が作用するが、それに対して補強材が引張り抵抗部材として機能し、盛土の安定を確保していると考えられる。また、100gal, 200galでの分布を比較すると、Case2では各段とも法面工付近での軸ひずみが小

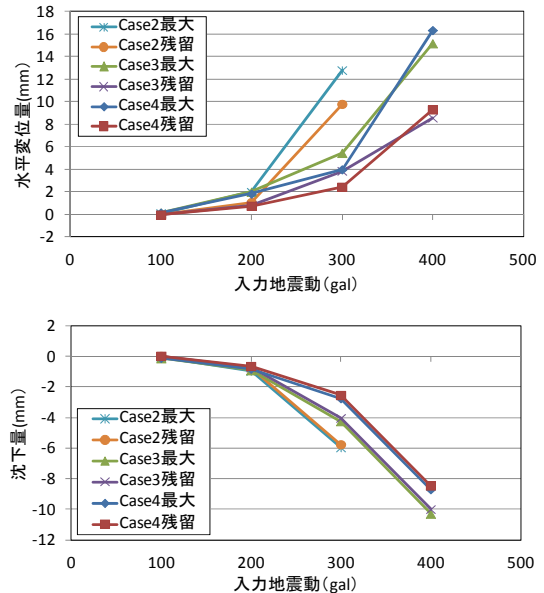


Fig. 6 加振時の法肩の変位履歴(400gal)
Time History of Top of Slope during Excitation

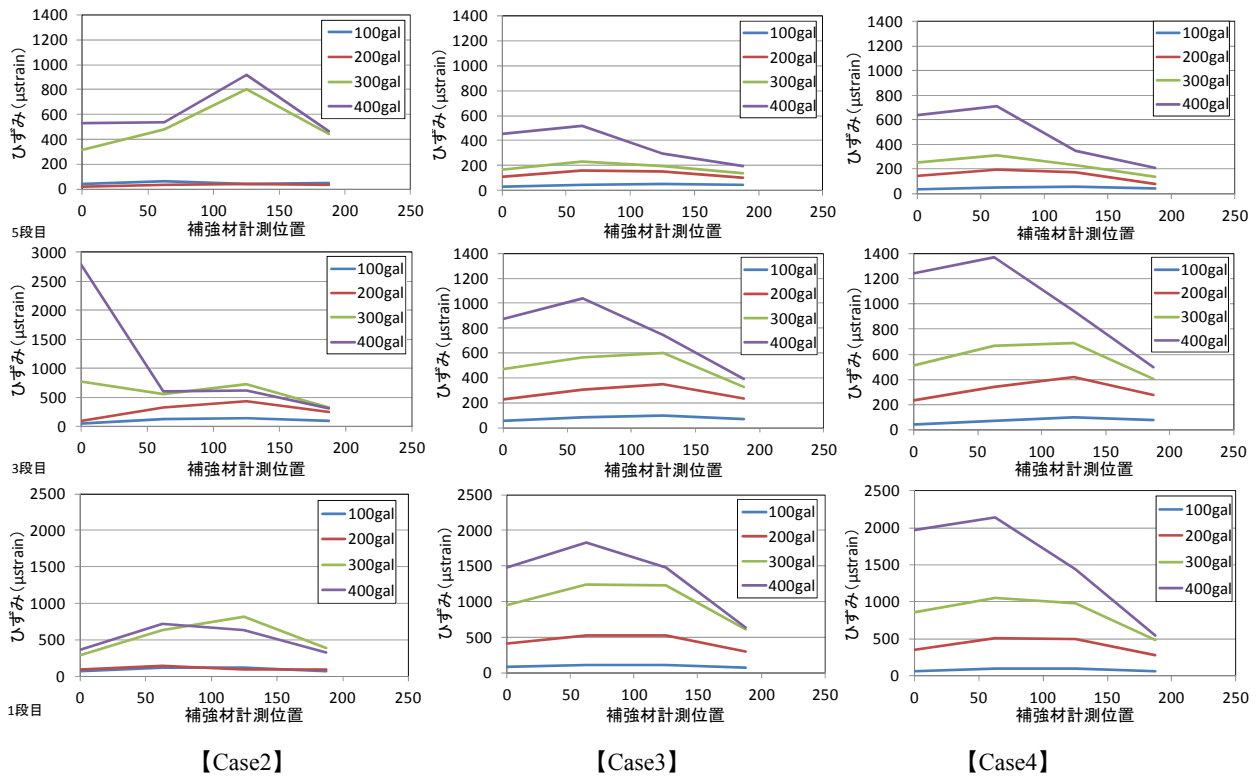


Fig. 7 補強材の軸ひずみ・曲げひずみ分布
Nailing Tensile Distribution

さいのに対して、Case3、Case4では法面工付近での軸ひずみが大きくなっており、支圧面積が大きいほど補強材がより効果的に機能しているといえる。なお、Case2では、300gal、400galにおいての法面工付近での軸力が急激に大きくなっているのは、先に述べたように周辺地盤の滑落により補強材が大きく変形したためである。一方、Case3とCase4については300galまでは同程度のひずみが発生しているが、400galではCase3に比べてCase4の方がより大きいひずみを発生しており、拘束効果の大きいことがわかる。このことから、加振力の大きい場合についても法面工が大きいほど補強材に作用する力が大きくなり、盛土の安定性に対して補強材が効果的に機能していると考えられる。

3.3.4 法面工の効果について Fig.8は遠心载荷時および加振時における各ケースの法面工付近での軸力(T_{0a})と、 T_{0a} を軸力の最大値(T_{max})で除した値を示している。 T_{0a} は法面工の拘束力であり、その力は補強材に伝達される。

(1) 遠心载荷時 遠心载荷時の T_{0a} に着目すると、 T_{0a} はいずれも遠心加速度に伴って増加しているものの、Case2の T_{0a} の増分は小さく、 T_{max} も小さい。一方、Case3、Case4では遠心加速度に伴って T_{0a} がいずれも大きく増加しているが、特にCase3では3段目の T_{0a} が大きいのに対して、Case4では1段目の T_{0a} が大きい結果となっている。Case4の方が拘束効果が大きく、中腹での変形の抑制効果が

大きかったためと考えられる。 T_{0a} は法面工から補強材に伝達される力であることから、法面工が大きいほど、その伝達される力は増加すると言える。次に、法面工低減係数(T_{0a}/T_{max})について着目すると、変形形態によって各段の値も異なり、 T_{0a} が大きい法面工ほど法面工低減係数も大きくなる傾向であった。すなわち、常時の法面工低減係数は補強盛土の安定性の変化に伴い、法面が変形して法面工の拘束力がより大きく発揮されるようになるため、増加すると推察される。

(2) 加振時 次に加振時であるが、 T_{0a} に着目すると T_{0a} はいずれも入力加速度の増加に伴って概ね増加しているものの、Case2の T_{0a} は小さい値となっている。なお、Case2で、3段目が大きくなっているのは補強材に大きな曲げが発生したためである。一方、Case3、Case4では加振の増加に伴い T_{0a} が比例的に増加しているが、その増分はCase3よりCase4の方が大きい。すなわち、地震時の補強盛土の安定性は支圧面積が小さいと拘束効果(抑制効果)があまり発揮されないが、支圧面積が大きくなるほど大きな拘束効果が得られるものと推察される。次に、法面工低減係数(T_{0a}/T_{max})について着目すると、Case3、Case4は常時(遠心载荷時)と比較して大きな値となっているが、各段とも法面工低減係数は同程度で入力加速度の増加による変化は小さい。すなわち、法面工低減係数は加速度の小さい段階から比較的大きな値となっており、設計に当たっては震度によらず一定の値を用いてもよい

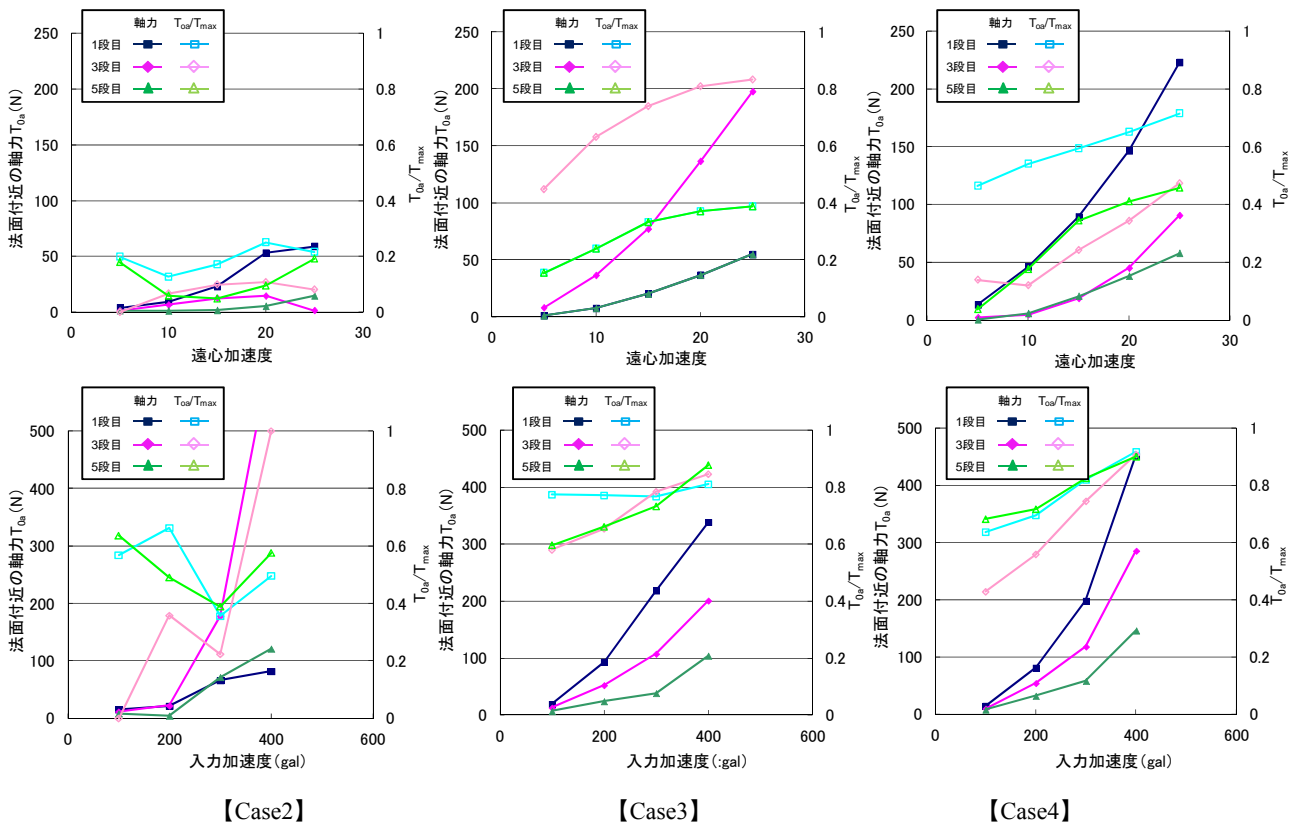


Fig. 8 法面付近の軸力と T_0/T_{max} (上段：遠心载荷時，下段：加振時)
Nailing Axial Forces near the Slope and T_0/T_{max}

と考えられる。次に、法面工の効果を占有率で示し、その効果を定量的に評価することを試みる。各法面工の斜面占有率はCase2 7%, Case3 28%, Case4 64%であり、斜面占有率が25%程度でも法面工による耐震効果が発揮される結果となった。ただし、盛土表面の地盤強度によっては地震時に中抜けが生じて、法面工の効果が発揮されない場合も考えられる。

Fig.9は先に述べた法面工の種類や形状に応じた表面工係数 f_a と法面工低減係数 μ の関係図に遠心実験結果を追記したものである。この関係図を用いて表面工係数から求められる法面工低減係数は、Case2で0.65, Case3で0.8, Case4で0.9である。一方、実験結果から求めた法面工係数は、常時(遠心载荷)では変状形態により各補強材の発揮される軸力が異なることから遠心加速度25Gで最大の値を示す補強材の T_{Oa}/T_{max} を採用するとCase2で0.2, Case3で0.8, Case4で0.7程度となっている。Case2では若干小さめの値となっているが、Case3については整合している。また、Case4についてはFig.8より T_{Oa}/T_{max} がさらに大きくなる傾向にあり、遠心加速度を増加させればFig.9の近似線に近づく可能性がある。一方、地震時(加振)での崩壊前の最大 T_{Oa}/T_{max} については、Case2は曲げによる増加の3段目を除くと0.6, Case3で0.8, Case4で0.9であり、Fig. 9に近似線に概ね整合している。以上の結果より、地震時の安定計算においても法面工低減係数を準用できると判断される。

3.3.5 適正な法面工と補強材の選定 盛土など比較的強度の低い地盤を補強する場合、中抜けを防止するため法面工の面積は大きくする必要がある。しかし、地盤強度の低い盛土地盤では補強材の引き抜き抵抗が小さいため、面積の大きな法面工の効果が十分に発揮されない可能性が高い。このため、中抜けを防止し、かつ盛土の安定性を確保するには法面工の面積をできるだけ大きくし、かつ強度の低い盛土地盤においても大きな引き抜き抵抗を確保できる地山補強土工を選定する必要がある。大林組は盛土など強度の低い地盤において従来のネイリングの2倍~4倍の引き抜き抵抗が得られる「ハイスペックネイリング工法」を開発している(Fig.10)。このような引き抜き抵抗の得られる地山補強土工を適用することで、法面工を大きくできるとともに、打設ピッチを広くすることが可能となるため、工期の短縮、工費の削減においても有利となる。

4. おわりに

本報告では、遠心模型実験より、地震時の地山補強土工における法面工の効果等について確認した。以下に知見を示す。

- 1) 地震時には複数の変状形態(中抜け、表層すべり、全体すべり)が存在する。
- 2) 法面工の支圧面積が大きくなるほど、地震時における盛土変形の抑制効果が大きく、盛土の安定性は

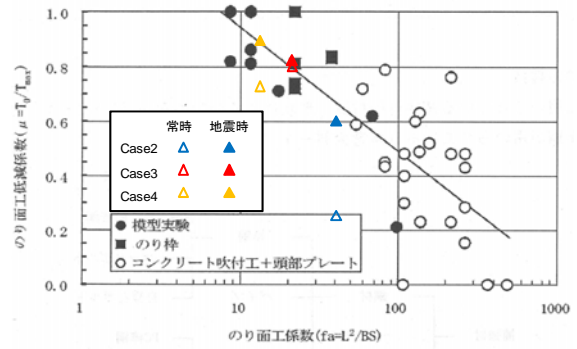


Fig. 9 表面工係数と法面工低減係数 7)に追記
Coefficient of Surface Engineering and Reduction Factor of Slope Protection Work

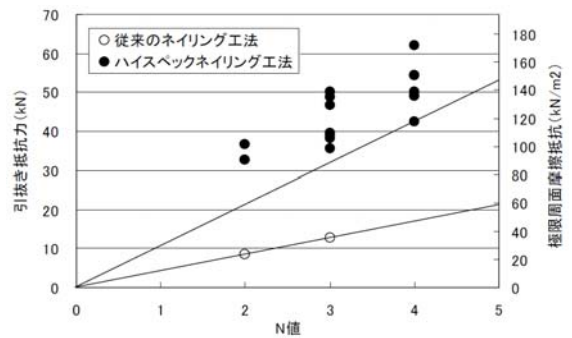


Fig. 10 ハイスペックネイリング引き抜き試験結果(粘性土)
Pull-out Results of New Soil Nailing Method (Soft Clay)

向上する。

- 3) 法面工が十分な拘束効果を発揮するには、補強材は法面工の支圧力以上の引き抜き抵抗を保持する必要がある。
- 4) 法面工低減係数は入力加速度の増加による変化が小さく、地震時における表面工係数 f_a と法面工低減係数 μ の関係は常時のそれと概ね同様な関係にある。

参考文献

- 1) 山本 彰, 鳥井原誠, 平間邦興: 鉄筋で補強した斜面の室内模型実験(その4)―法面保護工の効果について―, 第25回土質工学研究発表会, pp.2059-2060, (1990)
- 2) 山本 彰, 鳥井原誠, 平間邦興: 鉄筋で補強した斜面の三次元解析(その3)―法面保護工の効果について―, 第47回土木学会年次学術講演会, pp.1228-1229, (1992)
- 3) 村松正重, 須網功二, 末岡徹, 名倉克博, 北村照喜: 鉄筋補強土工における法面保護工の効果(その1), 第27回土質工学研究発表会, pp.2549-2550, (1992)
- 4) 須網功二, 村松正重, 名倉克博, 守屋重孝, 北村照喜: 鉄筋補強土工における法面保護工の効果(その2), 第27回土質工学研究発表会, pp.2551-2552, (1992)

- 992)
- 5) 地盤工学会：地山補強土工法設計・施工マニュアル，
(2011)
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解
説 土構造物，(2007)
- 7) 東日本高速道路等：切土補強土工法設計・施工要領，
(2007)
- 8) 日本道路協会：道路土工盛土工指針， (2010)