

盛土材の力学的特性とジオグリッドの諸条件が補強効果に及ぼす影響

Influence of mechanical properties of backfill material and conditions of geogrid on the reinforcing effect

20N3100016J 佐倉 拓歩 (地盤工学研究室)
Takuho SAKURA / Geotechnical engineering Lab.

Key Words: reinforced soil, geogrid, backfill material, plane strain compression test

1. はじめに

ジオグリッド補強土技術¹⁾は土/地盤の安定性を大幅に向上できるため、様々な分野の盛土構造物への適用が進んでいる。ジオグリッド敷設で得られる補強効果は“土粒子変位の拘束の度合い”で決まるが、影響要因が多いために土・補強材の諸条件～補強効果の関係性は未だに不明瞭なところがある。安定的かつ効率的に補強効果を得るための基礎的条件を集約できれば、盛土材とジオグリッドの選択方法の確立とともに、補強効果の更なる向上への検討につながる。そこで本研究では、盛土材の力学的特性とジオグリッドの諸条件が砂質土の補強効果に及ぼす影響を系統的な平面ひずみ試験を実施して調べた。

2. 研究概要

補強効果に及ぼす要因は「(a)盛土材に起因する要因」と「(b)補強材に起因する要因」に大別される。本研究では、(a)は盛土材のダイレタンシー特性、(b)については物理特性(形状、表面摩擦性)、構造条件(交点強度)、力学特性(剛性)に注目した。なお、本稿では紙面の制約上、(b)に関しては表面摩擦性については省略する。以下、使用材料(土、ジオグリッド)の諸条件、および検討方法(平面ひずみ圧縮試験)について説明する。

(1)使用材料

a)盛土材に起因する要因の検討

(a)土に起因する要因には、土の種類、密度状態、せん断過程でのダイレタンシー挙動の差異、がある。これらは「強固な土粒子構造の構築」と「拘束圧レベルの増加」の条件である。外力の作用時に生じる

補強材張力は盛土材のダイレタンシー特性に起因して誘起されるため、補強土構造物においては強い正のダイレタンシー挙動を示す盛土材を選択して十分な締固めを行うことが求められる。しかしながら、現状では盛土材の選択方法、締固め条件いずれも無補強の盛土と同様である。本研究では盛土材の力学的特性を踏まえた土の選択および密度条件の設定の重要性を把握するため、3種類の異なる砂質土(山砂、まさ土、豊浦砂：図-1)を用いた。山砂とまさ土は、実構造物と同様に加水調整～締固めた状態で比較を行う。これらの $1E_c$ (JIS A 1210, A-b法)での締固め曲線を図-2に示す。図-1～2より、山砂よりまさ土の方が良配合で、 $1E_c$ での ρ_{dmax} 値も大きいことが分かる。一般的に、砂礫材では ρ_d 値の増加は強度・剛性の増加と相関性が高いため、補強土構造物でも大きな ρ_d 値を示す場合には高い補強効果が得られると期待されがちである。

各砂質土での実験条件の各砂質土での実験条件を表-1に示す。また、図-2中には各砂質土の密度条件もあわせて示した。山砂とまさ土の締固め条件は、施工条件を考慮して最適含水比 w_{opt} 付近、締固め度 $D_c=90\%$, 95% , 100% と設定した。ここで、豊浦砂は、山砂・まさ土供試体との特性の比較を行うために用いている。豊浦砂では均一性の高い供試体を得るために、多重ふるい落下装置による空中落下法で作製した。

b)補強材に起因する要因の検討

補強材条件(形状、表面摩擦性、交点強度、剛性)が砂質土の補強効果に及ぼす影響を検討するにあたり

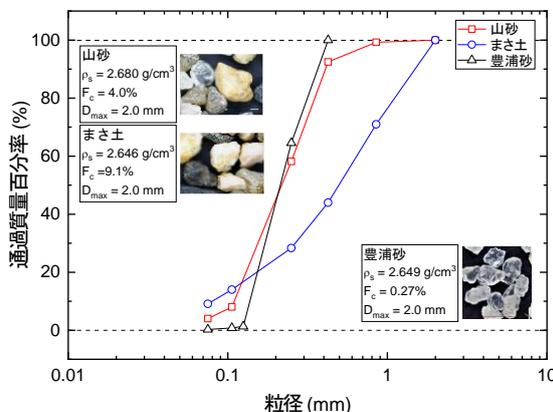


図-1 使用した砂質土の粒度、土粒子の概要

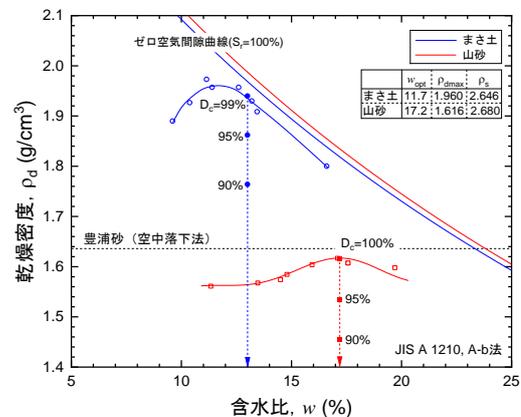


図-2 締固め曲線と実験条件

表-1 盛土材の力学的特性の影響

試験名	供試体試料	供試体作製方法	無補強/補強	供試体密度
Case1-1	山砂 ¹⁾	締固め法 $1E_c$	無補強	$D_c=90.0\%, \rho_d=1.455 \text{ g/cm}^3$
補強			$D_c=90.0\%, \rho_d=1.454 \text{ g/cm}^3$	
Case1-2		$w=w_{opt}=17.2\%$ $\rho_{dmax}=1.616 \text{ (g/cm}^3)$	無補強	$D_c=95.1\%, \rho_d=1.537 \text{ g/cm}^3$
補強			$D_c=95.0\%, \rho_d=1.535 \text{ g/cm}^3$	
Case1-3	まさ土 ²⁾	締固め法 $1E_c$	無補強	$D_c=100.0\%, \rho_d=1.615 \text{ g/cm}^3$
補強			$D_c=100.0\%, \rho_d=1.615 \text{ g/cm}^3$	
Case2-1	まさ土 ²⁾	$w=13.0\%$ ($>w_{opt}=11.7\%$) $\rho_{dmax}=1.960 \text{ (g/cm}^3)$	無補強	$D_c=90.4\%, \rho_d=1.773 \text{ g/cm}^3$
補強			$D_c=90.3\%, \rho_d=1.770 \text{ g/cm}^3$	
Case2-2		空中落下法 $e_{max}=0.917$ $e_{min}=0.586$	無補強	$D_c=95.1\%, \rho_d=1.864 \text{ g/cm}^3$
補強			$D_c=95.1\%, \rho_d=1.864 \text{ g/cm}^3$	
Case2-3	豊浦砂 ³⁾	空中落下法 $e_{max}=0.917$ $e_{min}=0.586$	無補強	$D_c=98.9\%, \rho_d=1.938 \text{ g/cm}^3$
補強			$D_c=98.7\%, \rho_d=1.935 \text{ g/cm}^3$	
Case3	豊浦砂 ³⁾	空中落下法 $e_{max}=0.917$ $e_{min}=0.586$	無補強	$D_c=93.7\%, \rho_d=1.647 \text{ g/cm}^3$
補強			$D_c=93.0\%, \rho_d=1.646 \text{ g/cm}^3$	

1) $D_c=90\%$ における強度定数は($c=0 \text{ kPa}, \phi=36^\circ$); CD-PSC
 2) $D_c=90\%$ における強度定数は($c=20 \text{ kPa}, \phi=35^\circ$); CD-PSC
 3) $D_c=90\%$ における強度定数は($c=0 \text{ kPa}, \phi=48^\circ$); CD-PSC

り、本研究では上記の諸条件をパラメータとして変化させたジオグリッド模型を作製した。設定したジオグリッド模型の形状を図-3に示す。補強材形状は計4条件とした。形状の差異はストランドの占める面積比であるCR(Covering Ratio of strand; 面内配置密度)²⁾で数値化した。CR値は100%ではシート状で、0~100%の間の値の時は格子状であることを示す。現在、用いられているジオグリッドのCR値は15~35%程度である。

本研究では、図-3の形状でストランド・リブともにリン青銅(C5210)でモデル化したジオグリッド模型を基準とし、交点強度・表面摩擦性・剛性をそれぞれ変数とすることで補強材条件(形状, 表面摩擦性, 交点強度, 剛性)の影響の全体像の把握した。検討条件を表-2にまとめる。例えば、以下の4つの実験条件では1層あたりの補強材剛性は同じであるため、これらの補強効果が異なる場合、その要因は補強材形状となる。

- ・CR=16.7% (図-3a), ストランド厚さ 0.6 mm
- ・CR=33.3% (図-3b), ストランド厚さ 0.3 mm
- ・CR=50.0% (図-3c), ストランド厚さ 0.2 mm
- ・CR=100% (図-3d), ストランド厚さ 0.1 mm

交点強度は半田での接着の有無, 剛性はストランド厚さもしくは材料の変更, 表面摩擦角は砂粒子の接着の有無で差を与えている。

また、補強材条件の影響の検討には、土に起因する要因を最小化するために豊浦砂を用いた。豊浦砂のような貧配合なケイ砂(SiO_2)は盛土材として用いられることはないが、密詰めとすることでよく締め固めた砂礫材がせん断変形時に現れる正のダイレタンシー挙動は再現している。

(2)平面ひずみ圧縮試験の概要

「(a)盛土材に起因する要因」と「(b)補強材に起因する要因」については、平面ひずみ圧縮試験で調べた。供試体の寸法は高さ 200×幅 80(σ_2 面)×奥行き

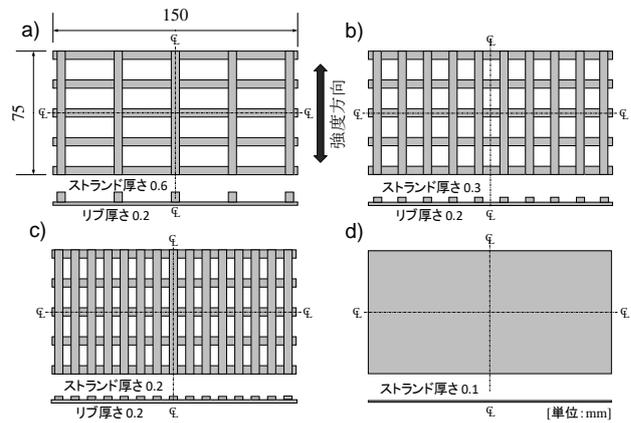


図-3 ジオグリッド模型; a)CR=16.7%, b)33.3%, c)50%, d)100%

表-2 ジオグリッドの諸条件の影響

試験名	補強/無補強	材質	補強材			表面摩擦性	
			ストランドの条件				
			本数(CR ²⁾)	厚さ	交点強度		
Case4	無補強	—	— (0%)	—	—	—	
Case5-1	補強	リン青銅	5 (16.7%)	0.6 mm ¹⁾	有	低	
Case5-2				0.3 mm ¹⁾	無	低	
Case6-1					10 (33.3%)	0.3 mm ¹⁾	有
Case6-1r				1.5 mm		高 ³⁾	
Case6-1-2			0.1 mm		低		
Case6-1-3				1.0 mm	低		
Case6-1-4			ラテックス		0.3 mm ¹⁾	無	低
Case6-2			リン青銅	15 (50%)	0.2 mm ¹⁾	有	低
Case6-2r						無	低
Case7-1					面状 (100%)	0.1 mm ¹⁾	—
Case7-2	—	低					
Case8	—	—	—	—	—	低	

1) 補強材1層あたりの総剛性:一定
 2) CR:1層あたりの占めるストランドの面積比
 3) 補強材表面に豊浦砂粒子を付着

160 mm(σ_2 面)である。供試体は飽和化し、排水条件で載荷した。拘束圧条件は、初期側圧係数 $K(\sigma_1/\sigma_3)=0.5$, $\sigma_3=40 \text{ kPa}$ とした。無補強条件でのせん断断面の状況を踏まえ、補強材の敷設数は4層とした。次章で示す補強効果およびダイレタンシー特性は、供試体を一要素と見なして算出した結果である。

3. 実験結果および考察

(1)盛土材の力学的特性が補強効果に及ぼす影響

検討した3種類の砂質土の応力-ひずみ関係の比較を図-4に示す。図-4はCR=33.3%(ストランド厚さ0.2 mm)・交点強度アリ・表面摩擦低でのジオグリッド模型を用いた時の各供試体の主応力比 $R(=\sigma_1/\sigma_3)$ - 軸ひずみ ϵ_1 - 体積ひずみ ϵ_{vol} 関係(図-4a)と pre-peak 応力状態での主応力比 R - ダイレタンシー関係 D (図-4b)である。山砂とまさ土は $D_c=90\%$ と100%のみを抜粋して示した。このジオグリッド模型の条件は、現在供用されているジオグリッドをモデル化したものである。

図-4から得られる重要な知見を以下にまとめる;
 1) 同じジオグリッドを用いても、盛土材が異なれば

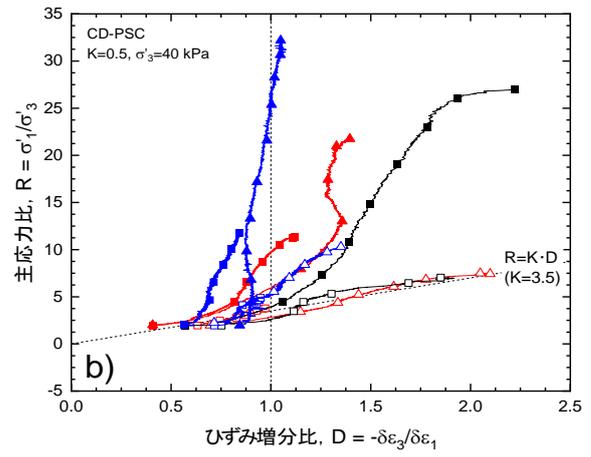
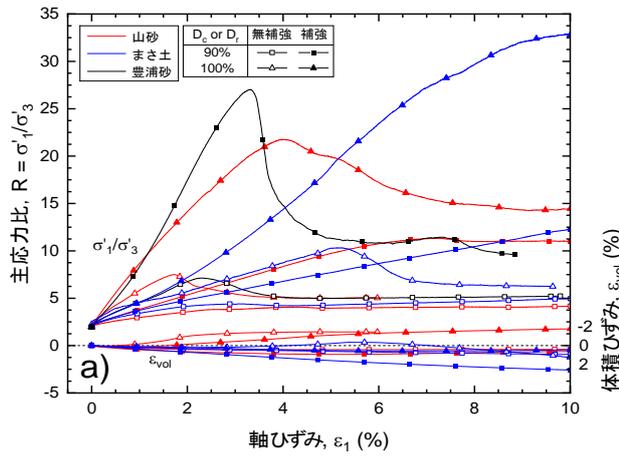


図-4 盛土材のダイランシー特性が補強効果に及ぼす影響：a)応力-ひずみ関係，b)ストレスダイランシー関係

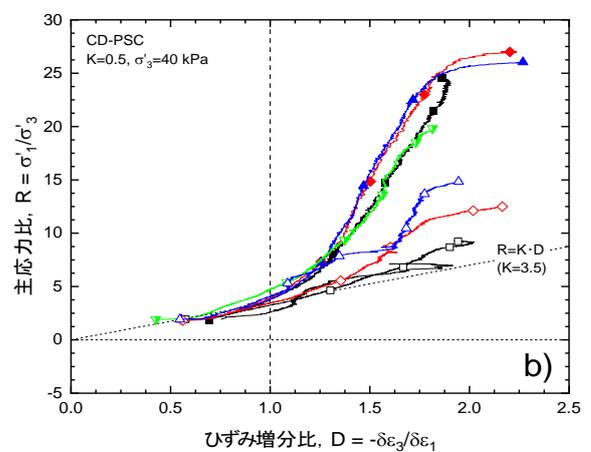
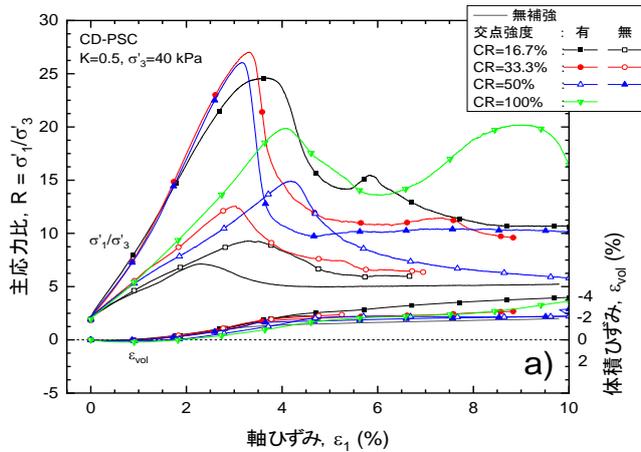


図-5 補強材形状と交点強度が補強効果に及ぼす影響：a)応力-ひずみ関係，b)ストレスダイランシー関係

得られる補強効果は異なる。

2) 盛土材とジオグリッドが同じであっても、締固めの程度が異なれば補強効果は異なる。D_c 値の増加に伴い、盛土材の違いによる差はさらに広がる。上記 1)~2)は、ダイランシー特性の差が強く反映された結果である。すなわち、山砂供試体では正のダイランシー挙動が生じやすく、この挙動は D_c 値の増加に伴って強く表れる。正のダイランシー挙動は安定した土粒子骨格によるもので、さらに前述のように補強材張力の発現に至る。土粒子が効果的に噛み合う結果、無補強条件と比べて剛性・強度が大幅に向上する。これに対して、まさ土供試体はせん断変形時に正のダイランシー挙動が現れにくく、有意な補強材張力は発現しにくい。

せん断変形時のダイランシー挙動はその土の物性であり、また密度状態でも異なる。また、ダイランシー特性は、粒度と締固め密度値では把握できない。すなわち、対象構造物に求められる要求性能を満たすためには、粒径区分に加えて盛土材の力学的特性を踏まえた上で盛土材を選定するとともに、盛土材の物性に合わせて適切な施工管理値 (D_c 値)

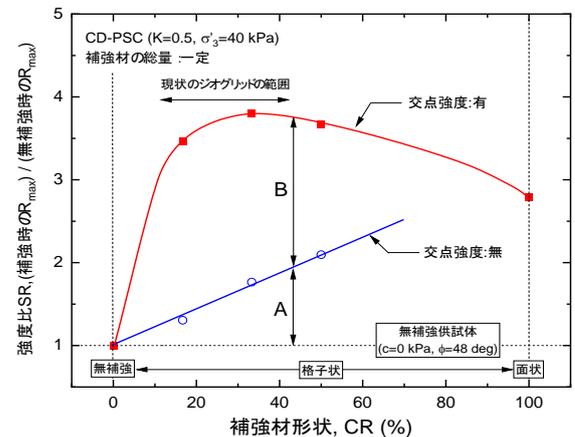


図-6 強度比-補強材形状の関係(層剛性一定)

を設定することが重要である。

(2)補強材の諸条件が補強効果に及ぼす影響

(a)補強材形状と交点強度

1 層あたりの補強材剛性を一定として補強材形状を変化させれば、補強材形状が補強効果に及ぼす影響を把握できる。さらに交点強度の有無の条件を追加すれば、形状の違いによる交点強度の影響に關す

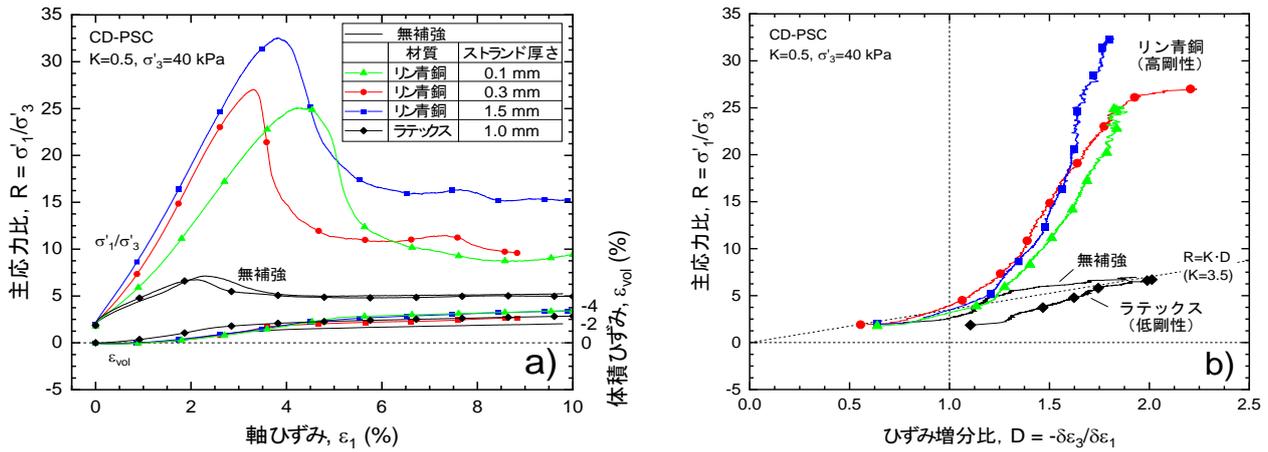


図-7 ジオグリッドの剛性が補強効果に及ぼす影響：a)応力-ひずみ関係，b)ストレーヌ-ダイラテンシー関係

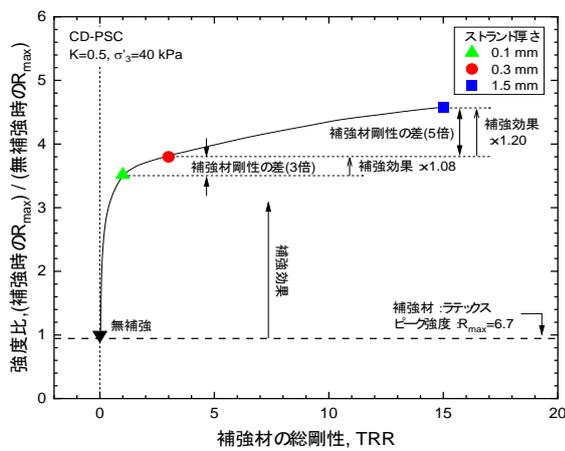


図-8 ジオグリッドの剛性が補強効果に及ぼす影響：強度比-総剛性の関係

る全体像を捉えることが可能となる。補強材形状と交点強度の有無を変えた計7ケースの応力-ひずみ関係，およびストレーヌ-ダイラテンシー関係を図-5に示す。図-5より，層あたりの補強材剛性が同じであっても補強効果はジオグリッドの形状によって異なること，交点強度は補強効果を左右する最重要な要因であることが確認できる。交点強度を有してストランドとリブが一体化すると，グリッドの目合いに関係なく，補強材張力が効率良く増加する(図-5b)。

強度に対して補強材形状 CR で整理した結果を図-6にまとめる。図-6の強度比は，各補強供試体の強度を無補強供試体の強度で正規化した値である。補強効果は「補強材の表面摩擦に関する成分(A)」と「土粒子がリブを押すことで生じる張力成分(B)」に大別できる。これより，同じ素材量であっても，形状と交点強度を適切に設定することで安定的な補強効果が実現できると言える。また，現状でのジオグリッドの形状は最適な条件にあることも確認できた。

(b)補強材の剛性

CR=33.3%のCase6-1を基準として，ストランドの

剛性を5倍にしたCase6-1-2，0.33倍にしたCase6-1-3，補強材の材料をラテックスに変えたCase6-1-4の計4Caseで比較した結果を図-7～8に示す。図-7は図-4・5と同様に応力-ひずみ関係とストレーヌ-ダイラテンシー関係，図-8は強度比を補強材1層あたりの総剛性 TRR: Total Rigidity Ratio²⁾で整理している。図-7～8より，補強効果を得るためにはジオグリッドは土の水平方向の剛性よりも硬いことが必須であるが，補強材剛性を大幅に増加させても補強効果の効果的な向上は見込めないことが分かる。この結果は，補強材の水平方向の伸びに対してある一定以上の剛性を有する補強材であれば，補強土構造物に想定される性能を十分に保持することを示している。

以上の結果から，補強効果に及ぼす影響は，「(b)補強材に起因する要因」より「(a)盛土材に起因する要因」の方が大きいことが明らかとなった。

4. まとめ

ジオグリッドによる土の補強技術において，安定的かつ効率的に補強効果を得るための基礎的条件について検討した。盛土材の力学的特性とジオグリッドの諸条件が砂質土の補強効果に及ぼす影響を系統的な平面ひずみ試験を実施して調べた。この結果，「(b)補強材に起因する要因」より「(a)盛土材に起因する要因」の方が大きいことが明らかとなった。

また，現在用いられている種々のジオグリッドは概ね良好な条件にある一方で，盛土材の選定および施工管理条件の設定には改善の余地がある。対象構造物に求められる要求性能を満たすためには，粒径区分に加えて盛土材の力学的特性を踏まえた上で盛土材を選定するとともに，盛土材の物性に合わせて適切な施工管理値を設定することが重要である。

参考文献

- 1)龍岡文夫監修：新しい補強土擁壁のすべて—盛土から地山まで—，総合土木研究所，2005。
- 2)F.L. Peng et al.: Plane strain compression behaviour of geogrid-reinforced sand and its numerical analysis, *Soils and Foundations*, 40(3), pp.55-74, 2000.