ポリエステルを母材とする ジオグリッドの耐震設計用引張強さ

中村真司¹・小浪岳治¹・Seong-ho Cho²・Dong-hwan Cha³

地震が多発する我が国においても、多数のジオテキスタイル補強土が設計、施工されている。このため、地震時におけるジオテキスタイル補強土の安定も非常に重要である。一般に、常時の設計ではジオテキスタイルのクリープ低減を考慮した補強材強度を用いる。他方、地震時の設計ではこの低減させた強度を割増して設計を行っている。

今回、ポリエステルの長繊維を芯材に用いたストランドで構成した、ジオグリッドのクリープ試験とクリープ時の残留強度について試験を実施した。これらの試験結果より、このジオグリッドのクリープ特性について現在の設計値の妥当性が確認できた。また、耐震設計用引張強さの割増し係数についても提案する。

キーワード：ジオテキスタイル，ポリエステル，補強土，耐震設計，地震時割増係数

1. はじめに

「ジオテキスタイルを用いた補強土の設計施工・マニュアル(以下、ジオテキスタイルマニュアル)」が(財)土木研究センターから1993年に発行され、本年度で18年目を迎える。ジオテキスタイルマニュアルは、途中2000年に改訂¹⁾され現在に至っている。その間、ジオテキスタイル特にジオグリッドと呼ばれるプラスチックの網状の材料を用いた補強土は一般的な土構造物としての地位を確立し、徐々に大きな盛土が築造されるようになった。

一方で、補強土は1995年阪神大震災以降の様々な地震を経て、その耐震性の高さが示唆されてきたが、ジオテキスタイルマニュアルによる補強土の設計を行う場合、常時と地震時の設計引張強さを同じ設計値で設計することが一般的であった。これは、ジオテキスタイルマニュアル発行時に耐震設計に用いる設計引張強さを実験的に求める試験方法が確立されておらず、各素材の性質が明らかにされていなかったという背景がある。しかし、地震荷重のように一時的な荷重に対するジオテキスタイル強度は、クリープを考慮した強度よりも高いことがいくつかのジオテキスタイルで示されてきた。

本論文ではポリエステル繊維をポリプロピレンで被覆したジオグリッドの引張り特性を示すとともに、クリープ特性、および長期一定荷重後の引張り強度を確認した結果を報告する。

2. 耐震設計における設計引張り強さ

(1) ジオテキスタイルマニュアルによる設計引張強さ

今日、ジオテキスタイルを用いた補強土は日本国内で施工される道路盛土等に多数採用されている。さらに、これらのジオテキスタイル補強土の多くはジオテキスタイルマニュアルによる設計、施工が行われている。

ジオテキスタイルマニュアルは、設計・施工を実施する上で、ジオテキスタイルについての特性を把握するため、各種試験の実施を求めている。

ジオテキスタイルの特性は、用途、環境への対応性、長期的な耐久性他、土構造物の安定に深く関係する。

特に、ジオテキスタイルの強度・変形特性は設計引張強さを決定するための重要な特性であり、引張試験によって求められる引張特性とクリープ試験によって求められるクリープ特性がある。また、ジオテキスタイルの引張特性は試験時の引張速度に依存することが知られており、ジオテキスタイルマニュアルには“性能評価試験法”と“日本工業規格(JIS L 1908)”の2つの試験法について述べられている。

土中に敷設されたジオテキスタイルのひずみは、施工中の土のひずみ速度や土構造物が静的安定に至るまでの変形速度に影響される。これらの要因がジオテキスタイルのひずみに及ぼす影響は一樣でなく、ジオテキスタイルマニュアルでは“性能評価試験法”の引張速度として土の三軸圧縮試験のひずみ速度(1%/min)と同じ引張速度を採用している。

ここでは設計に使用するジオグリッドの引張強さを扱

¹特別会員，岡三リビック株式会社，技術部，(〒108-0023 東京都港区芝浦4-16-23 AQUACITY芝浦8F)

²Samyang Corporation, Industrial Fiber & Products BU, (263 Yeonji-dong, Jongno-gu, Seoul, 110-725, Korea)

³Samyang Corporation, Industrial Materials R&D Center, (63-2 Hwaam-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-717, Korea)

うため、この“性能評価試験法”を基本とした試験結果を主に取り扱うことにする。

(2) 常時設計の設計引張強さと耐震設計の設計引張強さ

ジオテキスタイルマニュアルによる補強土の設計では、式(1)によりジオテキスタイルの設計引張強さを決定する。この式は、ジオテキスタイルの用途、環境への対応性、長期的な耐久性など、設計に必要とされる諸条件について考慮するものになっている。

$$T_A = \frac{T_{\max}}{F_{cr} F_D F_C F_B} = \frac{T_{cr}}{F_D F_C F_B} \quad (1)$$

ここに、

T_A : 常時設計に用いるジオテキスタイルの設計引張強さ(kN/m)

$T_{\max}$: ジオテキスタイルの最大引張強さ、性能評価試験法による製品基準強度(kN/m)

F_{cr} : クリープを考慮した材料安全率

F_D : 耐久性(耐候性、耐薬品性など長期的な劣化特性)を考慮した材料安全率

F_C : 施工中の損傷を考慮した材料安全率

F_B : 接続部の強度低下を考慮した材料安全率

T_{cr} : クリープを考慮したジオテキスタイルの限界引張強さ(kN/m)

クリープを考慮した限界引張強さ T_{cr} は、ジオテキスタイルの最大引張強さ $T_{\max}$ にクリープ低減係数 μ を乗じて求められる。ここで、クリープ低減係数 μ は、クリープ試験結果に基づきクリープ限度線図などを作成して求める。

$$T_{cr} = \mu T_{\max} = \frac{T_{\max}}{F_{cr}} \quad (2)$$

$$T_{AE} = \lambda T_A = \frac{\lambda T_{\max}}{F_{cr} F_D F_C F_B} = \frac{\lambda T_{cr}}{F_D F_C F_B} \quad (3)$$

T_{cr} : クリープを考慮したジオテキスタイルの限界引張強さ(kN/m)

μ : ジオテキスタイルのクリープ低減係数

T_{AE} : 耐震設計に用いるジオテキスタイルの設計引張強さ(kN/m)

λ : ジオテキスタイルの耐震設計用引張強さの常時設計用引張強さに対する割増し係数

山内、福田ら²⁾によれば、補強土に用いられる高分子材料のジオテキスタイルは载荷速度が速くなるほど引張強さ、引張剛性ともに大きな値を示す傾向にある。このため、常時の設計に用いる、クリープを考慮した設計引張強さ T_A に対し、式(3)に示すような関係から耐震設計に用いる設計引張強さを定める。

3. ポリエステル繊維のジオグリッドの性質

(1) ジオグリッドの形状と特徴

本研究で取り扱うジオテキスタイルは高強度ポリエステル繊維を母材とするジオグリッドである。このジオグリッドは高強度ポリエステル繊維をポリプロピレン樹脂で被覆したストランドで製造されている。このストランドの主な寸法とストランドの芯材として使用しているポリエステルの繊維量を表-1に示す。表中に示された引張強さは、設計引張強さの基本となるジオグリッドの最大引張強さ、式(2)の $T_{\max}$ を示している。この $T_{\max}$ は性能評価試験法により求められる。

表-1 ジオグリッドを構成するストランドの寸法とポリエステル繊維量。

Strength (kN/m)	width (mm)	thickness (mm)	fineness (dtex)	fiber-bundle
38	6.7	1.5	22,200	3
74	8.5	1.8	44,400	3
144	10.7	2.2	83,300	5
190	11.0	2.5	111,100	5

写真-1 ジオグリッドの形状

このジオグリッドは、写真-1に示すように、幅約7～11mmのストランドを40mm間隔で縦横に配置し、平織構造の立体格子状に交差配列させた構造となっている。ストランドの交点部は溶着されており、これにより全体が一体化され1枚のジオグリッドとして製造されている。

図-1 ポリエステル繊維の強度³⁾

図-1にジオグリッド用ポリエステルとその他一般産業用ポリエステルの対比グラフを示す。芯材のポリエステル繊維はジオグリッド用として製造された繊維で、一般産業用ポリエステル繊維とは異なる高強度、低伸度、高弾性率という特質³⁾を有している。

また、図-2には、ポリエステルとその他の素材のクリープ特性を示す。

図-2 ポリエステルとその他の素材のクリープ特性³⁾

(2) ジオグリッドの引張強さ

試験を実施したジオグリッドの特性値を表-2に示す。引張強さとは式(1)、式(2)の T_{max} を示し、設計強度は式(1)、式(3)の T_d を示す。また、図-3はジオグリッドの引張試験の結果を示す。引張試験は、定速伸長型引張試験機を用いて実施した。試験体は張力のバラツキがないようチャックに巻きつけて固定し、1%/minの引張ひずみ速度で引張った。写真-2は、引張試験機と試験時の状況を示したものである。

表-2 試験を実施したジオグリッドの特性値。

grade material	EX-40	EX-80	EX-150	EX-200
	Polyester (core)			
strength (kN/m): T_{max}	38	74	144	190
design strength (kN/m): T_d	24.7	48.1	93.6	119.7
creep reduction factor		65%		63%
safety factor of creep		1.538		1.587

写真-2 定速伸長型引張試験機

図-3 ジオグリッドの引張強さ

4. クリープ載荷試験とクリープ低減係数

(1) 試験方法と試験ケース

試験は引張クリープ試験機を用い、JIS K 7115に準じて行った。試験を実施した装置と試験状況を写真-3に示す。試験体は、ジオグリッドの縦ストランド3本を切り出し、その両端を試験機のチャックに巻き付けて固定した。実施したクリープ載荷試験の荷重条件は、表-3に示したものである。

写真-3 引張クリープ試験機と試験状況

表-3 ジオグリッド強度に対するクリープ載荷率。

Strength : T_{max} (kN/m)	loading ratio (%)					
38	73	79	85	94	97	99
74	71	77	83	92	95	97
144	67	73	78	87	90	92
190	65	71	76	85	87	89

(2) クリープ載荷試験結果

図-4から図-7はそれぞれのジオグリッドのクリー

ブ載荷時間と伸びひずみの関係を示したものである。ただし、一部のデータについては試験が進行中であり、現時点でのデータを示している。

図-4 $T_{\max}=38\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ伸びひずみ

図-5 $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ伸びひずみ

図-6 $T_{\max}=144\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ伸びひずみ

図-7 $T_{\max}=190\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ伸びひずみ

これらのデータよりクリープ限度時間とクリープ限度強度の関係を示したグラフを図-8から図-11に示す。これらのクリープ限度線図を作成するにあたって、クリープ限度を8%³⁾としてクリープ限度強度を求めた。

図-8 $T_{\max}=38\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ限度線図

図-9 $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ限度線図

図-10 $T_{\max}=144\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ限度線図

図-11 $T_{\max}=190\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ限度線図

以上の結果より、ジオグリッドの製品基準強度 $T_{\max}$ に対して70%程度のクリープ荷重の場合、概ね40,000時間の載荷時間では破断に至っていない。(ただし、強度190kN/mのジオグリッドは、後述する残留強度試験のため14,000時間で載荷を中断した)

クリープ限度を8%とした場合の1,000,000時間でのクリープ限度強度とクリープ低減係数は、表-4に示す値となった。

表-4 1,000,000時間でのクリープ限度強度と低減係数。

Strength (kN/m): $T_{\max}$	38	74	144	190
Strength of creep limit	28.3	54.1	95.7	122.4
creep reduction factor	74.5	73.1	66.5	64.4

5. クリープ載荷後の引張強さ

(1) 試験方法と試験ケース

クリープ載荷試験により残留ひずみが発生している試験体について、クリープ載荷後の引張強さの試験を実施した。あらかじめジオグリッドに載荷したクリープの載

荷条件は、表-5から表-8に示すとおりである。クリープ荷重の載荷は、クリープ試験と同じ引張クリープ試験機を用い、JIS K 7115に準じて行った。

引張試験は、クリープ試験機に取り付けられていた試験体を定速伸長型引張試験機に設置し直して実施した。試験装置並びに試験方法は前述のジオグリッドの強度特性を確認した性能評価試験方法と同じとし、引張りひずみ速度1%/minで試験した。

表-5 $T_{\max}=38\text{kN/m}$ のジオグリッドに対するクリープ条件

loading ratio (%)	loading time(hr)			
89.5	10	100	500	
84.7	10	100	500	1000
78.7	1000	19000		

表-6 $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドに対するクリープ条件。

loading ratio (%)	loading time(hr)			
89.2	10	100	500	
82.8	10	100	500	1000
77.0	1000	10000		

表-7 $T_{\max}=144\text{kN/m}$ のジオグリッドに対するクリープ条件。

loading ratio (%)	loading time(hr)			
83.3	10	100	500	
78.5	10	100	500	1000
72.9	1000	10000		

表-8 $T_{\max}=190\text{kN/m}$ のジオグリッドに対するクリープ条件。

loading ratio (%)	loading time(hr)					
76.1	10	100	500	1000	14000	
70.7	10	100	500			14000

(2) クリープ荷重載荷後の引張試験結果

クリープ荷重載荷後に実施した、表-5から表-8のケースのジオグリッド引張試験のうち、表-6に示した $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のケースを例として次に示す。図-12は $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドに事前のクリープ荷重を載荷した際のクリープ載荷時間と伸びひずみの関係を示している。図中の凡例に示された $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のクリープ載荷率に対するクリープ荷重は、表-9に示す値となる。クリープ荷重の大きさ並びに載荷時間については、ジオグリッドが破断しない範囲で実施した。

表-9 $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドに対するクリープ荷重。

loading ratio (%)	creep load (kN/m)
89.2	66.0
82.8	61.3
77.0	57.0

図-12 $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドの事前クリープ載荷

図-13から図-15は、事前にクリープ荷重を載荷した $T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドを、定速伸長型引張試験機に設置直して引張試験したときのジオグリッドの伸びと引張強さを示している。

図-13 $T_{\max}=74\text{kN/m}$ の89.2%の事前クリープ荷重を載荷したジオグリッドの引張試験

図-14 $T_{\max}=74\text{kN/m}$ の82.8%の事前クリープ荷重を載荷したジオグリッドの引張試験

図-15 $T_{\max}=74\text{kN/m}$ の77.0%の事前クリープ荷重を載荷したジオグリッドの引張試験

$T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドの引張試験結果は、事前のクリープ荷重の大きさや載荷時間にかかわらず、クリープ荷重を載荷していないジオグリッドとほぼ同等の引張強さとなった。ただし、事前にクリープ荷重を載荷したケースでは、いずれも破断時の引張りひずみが1~2%程度小さくなっている。

$T_{\max}=74\text{kN/m}$ のジオグリッドのクリープ載荷時間と引張強さの関係を図-16に示す。このケースでは、クリープ載荷率89.2%、載荷時間500hrでの引張強さを除き、おおむね81kN/mから84kN/mの引張強さとなった。

図-16 クリープ載荷時間と引張強さ

クリープ荷重載荷後のジオグリッド引張強さを T_e とし、事前のクリープ荷重を載荷しないジオグリッドの引張強さを T としたとき、クリープ載荷時間と T_e/T の関係を図-17に示す。この図より、事前にクリープ荷重を載荷したジオグリッドの引張強さは、クリープ荷重の大きさと載荷時間に関係なく、おおむね元の引張強さを保持しているといえる。

図-17 クリープ載荷時間と強度残存率

(3) クリープ荷重載荷後の強度残存率

今回実施した全てのケースについて、ジオグリッドの引張強さ $T_{\max}$ に対する T_e の強度残存率とクリープ載荷時間の関係を図-18に示す。また、図-19にはクリープ低減を考慮した限界引張強さ T_{cr} に対する T_e の強度残存率とクリープ載荷時間の関係を示す。

図-18 クリープ載荷時間と $T_e/T_{\max}$ の関係

図-19 クリープ載荷時間と T_e/T_{cr} の関係

これらの図より、あらかじめクリープ荷重を載荷したジオグリッドの引張強さ T_e は、 $T_{\max}$ (製品基準強度)に対してクリープ載荷時間に関わらず同等以上の強度を有している。さらに、クリープ低減を考慮したジオグリッドの限界引張強さ T_{cr} に対しては、155%から178%の引張強さを示している。この傾向は、ジオグリッドの引張り強さやクリープ荷重を載荷した条件に関わらず認められる。

6. 地震時の割増係数

平井ら⁴⁾は、高密度ポリエチレンの一軸延伸タイプジオグリッドについて、クリープ試験とその後の引張試験を実施し、ジオグリッドに常時の荷重によるクリープ現象が生じた後の地震時の最大引張強さを次式で定義した。

$$T_{E \max} = f(T_{\max}, T_c, t_c, s_T) \quad (4)$$

$T_{E \max}$: 常時のクリープを考慮した、地震時のジオテキスタイルの最大引張強さ(kN/m)

$T_{\max}$: ジオテキスタイルの最大引張強さ(kN/m)

T_c : クリープ現象を生じさせる常時の引張荷重(kN/m), クリープ載荷荷重

t_c : クリープ現象を生じさせる時間(hr), クリープ載荷時間

s_T : 地震時のジオテキスタイル引張速度(%/min)

$T_{E \max}$ は、常時のクリープ現象を考慮した地震時の最大引張強さである。ジオテキスタイルに対するクリープの影響を含んだ地震時の材料安全率を $F_E = T_{\max}/T_{E \max}$ とすると、式(1)及び式(3)より

$$T_{AE} = \frac{T_{\max}}{F_E F_D F_C F_B} = \frac{T_{E \max}}{F_D F_C F_B} \quad (5)$$

$$\frac{\lambda T_{cr}}{F_D F_C F_B} = \frac{T_{E \max}}{F_D F_C F_B} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{T_{E \max}}{T_{cr}} \quad (7)$$

F_E : クリープの影響を含んだ地震時の材料安全率

$T_{E \max}$: 常時のクリープを考慮した、地震時のジオテキスタイルの最大引張強さ(kN/m)

$T_{\max}$: ジオテキスタイルの最大引張強さ(kN/m)

T_{cr} : ジオテキスタイルのクリープを考慮した限界引張強さ(kN/m)

λ : ジオテキスタイルの耐震設計用引張強さの常時設計用引張強さに対する割増し係数

$T_{E \max}$ はクリープの影響を考慮したジオグリッドの引張り強さである。また、一般的な施工条件下においてはク

リーブを除く材料安全率は1.0となるため³⁾、式(1)の F_a 以外の材料安全率を1.0とすると式(1)は $T_A=T_a$ となる。

よって、図-19より式(7)の λ は1.55~1.78の範囲にあると言え、ジオグリッドの設計引張強さ T_A に対して地震時の割増係数 $\lambda=1.50$ とすれば十分安全側の値となる。

7. おわりに

今回、高強度ポリエステル繊維を母材とするジオグリッドのクリープ載荷試験並びにクリープ載荷後のジオグリッドの残留強度試験を実施した。

特に、残留強度試験では、クリープ試験装置に設置されていた試験体を定速伸長型引張試験機に設置し直したため、試験体に対する荷重を一時的に開放することになった。また、ジオグリッドの引張強さの試験を全て性能評価試験法(引張りひずみ速度1%/min)で実施したため、地震時のジオグリッドに対する引張り速度とは、異なる状態での評価となっている。

一つめの問題に対しては、龍岡らによるジオテキスタイルのクリープ変形と引張り強度に対する考察⁵⁾や平川らによるジオテキスタイル補強土擁壁の材料粘性についての発表論文⁶⁾を参考とし、クリープ破断しないよう設定されたクリープ荷重の場合、変形履歴に対してジオグリッドの引張強さは影響されないと判断した。

二つめの問題はジオグリッドの破断時ひずみ速度の問題である。ジオグリッド自体の引張強さは破断時のひずみ速度に支配され、ひずみ速度の増加とともに引張強さも増大する⁹⁾。性能評価試験法による評価を行っておけば、地震時のジオグリッドに生じるひずみの速度の方が大きいと、引張強さに対して十分安全側の評価となる。

試験の結果、確認された内容は以下のとおりである。

(1)現在使用している、クリープ低減係数について妥当性を確認することができた。

(2)ポリエステル繊維を芯材とするジオグリッドの地震時の割増係数を $\lambda=1.50$ とした場合、十分安全側の値となることが確認された。

今後、経済的な設計を行うために、引張ひずみ速度によるジオグリッドへの影響など試験を実施し地震時割増係数の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 財団法人土木研究センター：ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル，2000。
- 2) 山内豊聡，福田直三，周藤宜二：ポリマーグリッドの設計強度の評価試験，第30回土質工学シンポジウム発表論文集，社団法人土質工学会，pp.23-26，1985。
- 3) 財団法人土木研究センター：建設技術審査証明報告書 土系材料・製品・技術(建技審証第0808号)
- 4) 平井貴雄，谷津淳：耐震設計に用いるジオグリッドの引張強さに関する一考察，ジオシンセティック論文集第15巻，国際ジオシンセティック学会日本支部，pp.205-214，2000。
- 5) 龍岡文夫，平川大貴，Warat KONGKITKUL，内村太郎：ジオテキスタイルのクリープ変形と引張り強度に対するクリープ補正係数についての考察，ジオシンセティック論文集第18巻，国際ジオシンセティック学会日本支部，pp.167-174，2003。
- 6) 平川大貴，高岡英明，龍岡文夫，内村太郎：ジオテキスタイル補強土擁壁の変形特性に対する材料粘性の影響，ジオシンセティック論文集第18巻，国際ジオシンセティック学会日本支部，pp.175-182，2003。

TENSILE STRENGTH FOR SEISMIC DESIGN OF GEOGRID MADE FROM POLYESTER

Shinji NAKAMURA, Takeharu KONAMI, Seong-ho CHO, Dong-hwan Cha

A lot of geotextile reinforced soils are designed, and constructed in Japan where the earthquake happens frequently. Therefore, the stability of the geotextile reinforcement soil at the earthquake is also very important. In general, the creep decrease of reinforcement is considered in the design of the ordinary condition. On the other hand, allowable strength of reinforcement is surcharged in the design at the earthquake. In this research, the test series were carried out to investigate the residual strength and creep performance of geogrid that is made from the continuous fiber of polyester. This paper describes the validity of the allowable strength of geogrid and proposes the extra coefficient of allowable strength of geogrid for seismic design.

KEYWORDS:

Geotextile, Polyester, Reinforced soil, Seismic Design, Extra Coefficient