

**投稿論文 (和文ノート)**  
**TECHNICAL**  
**NOTE**

# ジオメンブレンの変形を考慮した厚さ評価における安全率について

今泉繁良<sup>1</sup>・横山幸満<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

<sup>2</sup>正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科 (〒321 宇都宮市石井町 2753)

貯水池や廃棄物処分場の遮水構造物として用いられているジオメンブレンの厚さ設計の問題について、基盤の不等沈下に安全に追従しうるジオメンブレンの設計法とそこでの安全率の意味を、Koerner法、Co-energy法、筆者らの弾性法を比較することにより論じた。その結果、①土中に敷設されたジオメンブレンの伸び量に関する安全率  $F_{S_s}$  と強度に関する安全率  $F_{S_F}$  との間には、 $F_{S_s} = F_{S_F}^2$  の関係がある。②厚さに関する安全率およびCo-energyに関する安全率と伸び量に関する安全率の値は一致する。③ジオメンブレンの必要厚さは、変形係数・直応力・摩擦係数の各値が大きいかほど、大きな値を必要とする。ことが分かった。

**Key Words** : design, safety factor, elasticity, friction, settlement, liner, geomembrane.

## 1. はじめに

近年、貯水池や廃棄物処分場において、遮水構造物として高分子材料からなるPVC(ポリ塩化ビニール)やHDPE(高密度ポリエチレン)などのジオメンブレンが用いられている<sup>1),2)</sup>。これらのジオメンブレンは透水性が低く、遮水層としての厚さも薄く、耐化学性にも優れているが、基盤等の不等沈下によりジオメンブレンに過大な引張り力(あるいは引張りひずみ)が生じ、ジオメンブレンの破壊が心配されている<sup>3),4),6)</sup>。

ジオメンブレンが単独で遮水層として用いられたとき、粘土ライナーに比べて層厚が薄いため、ジオメンブレンの破断や亀裂発生はその遮水機能にとって致命的となることが多く、引張り力に耐えうるジオメンブレンの設計法の確立は重要である。例えば、厚さに関するものとしてKoerner法<sup>4)</sup>や弾性理論に基づく筆者らの方法<sup>5)</sup>が提案されており、Giroud<sup>6)</sup>も現地地で予想される伸びに耐えうるジオメンブレンの種類を選ぶ方法として、引張り力-ひずみ曲線に基づくCo-energy法を示している。

ところで、ジオメンブレンの単位幅当りの引張り強さ  $T_{UL}$  は、引張り強度  $\sigma_{UL}$  と厚さ  $t$  の積 ( $T_{UL} = \sigma_{UL} \cdot t$ ) で表されるが、設計においては、不測の事態に対応する意味で安全率  $F_{S_F}$  で除して用いられるのが普通である。

本論文の目的は、ジオメンブレンの変形を考慮した厚さ設計法において、安全率が、伸び量、強度、厚さ、Co-energyの相互において、どのような数値の意味を持つものかを明らかにすることを目的としている。なお、

その過程においてCo-energy法の厚さ設計への拡張も示す。

## 2. Koerner法<sup>4)</sup>における安全率

Fig.1に示すように、基盤の不等沈下にジオメンブレンが追従することによって内部に引張り力が発生するが、この力がジオメンブレンと土との間で発現される摩擦力と釣合うと考える。すなわち、許容応力に対応した単位幅当りの引張り力  $T_{AL}$  は、ジオメンブレンの極限引張り強度を  $\sigma_{UL}$ 、その厚さを  $t$ 、安全率を  $F_{S_F}$  として式(1)で表される。

$$T_{AL} = \sigma_{UL} \cdot t / F_{S_F} \quad (1)$$

ジオメンブレンと土との摩擦角が上面で  $\phi_U$ 、下面で  $\phi_L$  であり、さらに上載圧を  $p$ 、摩擦を発揮するのに必要なジオメンブレンの影響長さを  $x$  (Fig.2参照)とすると、摩擦力  $R$  は式(2)となる。

$$R = R_U + R_L = p \cdot (\tan \phi_U + \tan \phi_L) \cdot x \quad (2)$$

$T_{AL}$  と  $R$  が水平方向で釣合うとして厚さ  $t$  を求めると、式(3)となる。

$$t = \frac{p \cdot x \cdot (\tan \phi_U + \tan \phi_L) \cdot F_{S_F}}{\cos \beta \cdot \sigma_{UL}} \quad (3)$$

すなわち、Koerner法においては、強度を  $F_{S_F}$  により低減して考えることは、厚さを  $F_{S_F}$  倍することに等しい。

なお、このKoerner法における疑問点は、第一に変形の影響範囲  $x$  の仮定の仕方である。すなわち、Fig.2にも示されているように、 $x$  は厚さ  $t$  に依存する値であ

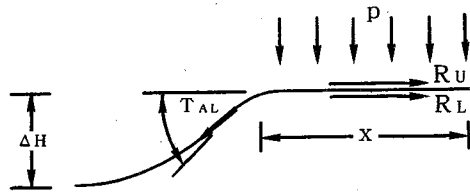


Fig.1 Design model used to calculate geomembrane thickness<sup>4)</sup>

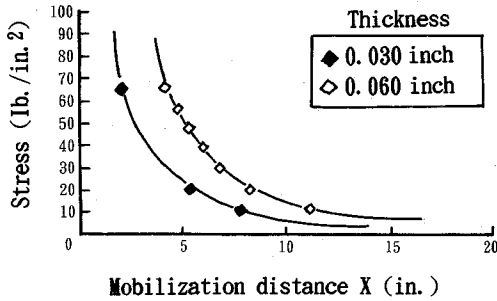


Fig.2 Mobilization distance versus applied normal stress for HDPE geomembrane<sup>4)</sup>

る。しかるに、厚さを固定して得た  $x$  の値を使用して式 (3) から  $t$  を求めるのは不合理である。第二は地盤の変形に追従するに必要なジオメンブレンの伸びの量とそれに伴い発現される引張り内力との関係についての議論がなされていない点である。ジオメンブレンの材料特性と拘束条件によっては、許容引張り強度に対応する力では地盤変形に追従するだけの伸びが生じない可能性もある。この第二の問題点の克服を目指しているのが、Co-energy 法と弾性法である。

### 3. Giroud の Co-energy 法における安全率

#### (1) Co-energy 法<sup>6)</sup>

Fig.3 (a) に示すように、一端がコンクリート構造物に固定されたジオメンブレンの基盤が  $s$  だけ沈下すると、ジオメンブレンは伸び量  $s$  が要求される。ジオメンブレン上には一様な分布圧力  $p$  が作用しており、基盤土との間には均一なせん断摩擦力度  $\tau = p \cdot \tan\phi$  が発揮していると仮定する (Fig.3 (b) 参照)。このとき、ジオメンブレン内の単位幅当たりの張力  $T$  は、この摩擦力度に比例する形で、ジオメンブレンにせん断摩擦力度が発揮しない (ひずみが生じない) 位置からの距離  $x$  に対して線形的に増大 (Fig.3 (c) 参照) する。すなわち、式 (4) で表される。

$$T = \tau \cdot x = p \cdot \tan\phi \cdot x \quad (4)$$

せん断摩擦力度が発揮するジオメンブレンの範囲を  $L$  とすると、ジオメンブレン内の最大引張り力  $T_0$  は構造物との固定部で生じ、その大きさは式 (5) である。

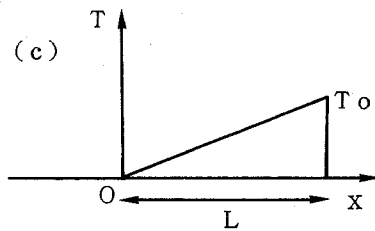
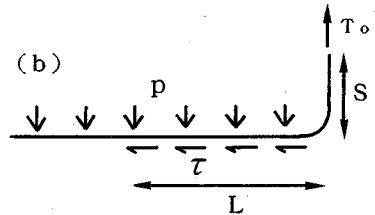
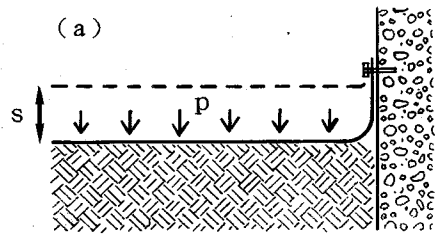


Fig.3 Geomembrane subjected to differential settlement <sup>6)</sup>

$$T_0 = \tau \cdot L \quad (5)$$

他方、ジオメンブレンに必要な伸び量  $s$  は、ジオメンブレン内に生じるひずみ  $\epsilon$  の区間  $L$  にわたる積分値であり、式 (6) で示される。

$$s = \int_0^L \epsilon \, dx \quad (6)$$

式 (4) からの  $dx = dT / (p \cdot \tan\phi)$  と、 $x=L$  で  $T=T_0$  を考慮すると、

$$s \cdot p \cdot \tan\phi = \int_0^{T_0} \epsilon \, dT \quad (7)$$

となる。右辺は、Fig.4 に示す「引張り力-ひずみ」関係における曲線の  $T=T_0$  までの  $T$  軸との間の面積に等しい。この面積が Co-energy:  $E'$  である。

ピーク張力に対する Co-energy を  $E'_{\max}$  とすると、圧力  $p$ 、摩擦特性  $\phi$  の下でジオメンブレンが最大に伸びうる量  $s_{\max}$  は式 (8) となる。

$$s_{\max} = \frac{E'_{\max}}{p \cdot \tan\phi} \quad (8)$$

#### (2) Co-energy に基づく安全率<sup>6)</sup>

使用するジオメンブレンの種類が異なると、引張り力-ひずみの関係、すなわち Co-energy と摩擦特性も異なる。種類  $i$  のジオメンブレンに関するこれらの値を  $E'_i$  と  $\phi_i$  とすると、伸び量  $s$  に耐えるに必要な Co-energy

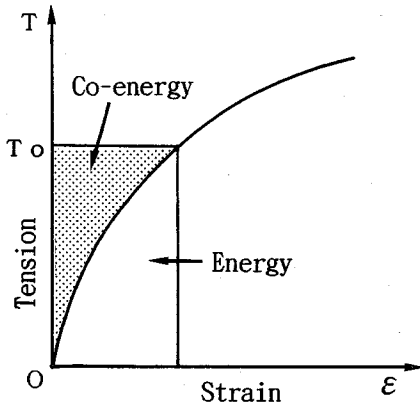


Fig.4 Geomembrane tension-strain curve and area defining the geomembrane Co-energy<sup>6)</sup>

:  $E'_{req}$  は,

$$E'_{req} = s \cdot p \cdot \tan \phi_i \quad (9)$$

であるから、地盤の変形に伴う伸びに対する種類  $i$  のジオメンブレンが有する安全率を、Co-energy に着目して表すと式 (10) となる。

$$F_{S_s} = \frac{s_{max}}{s} = \frac{E'_{i,max}}{E'_{req}} \quad (10)$$

式 (10) より、伸び量 (変形) に関する安全率  $F_{S_s}$  の値は、Co-energy の比となることがわかる。

### (3) Co-energy 法の厚さ設計への拡張

Fig.4 に示した引張り力-ひずみの関係は、引張り応力-ひずみの関係に換えることができる。この関係での Co-energy を「Unit Co-energy:  $E'_{uni}$ 」とすれば、厚さ  $t$  のジオメンブレンが有するピーク応力に対応する Co-energy は  $t \cdot E'_{uni,max}$  である。厳密には、厚さが異なると Co-energy も変化することが予想されるが、ここでは無視することにする。

$t \cdot E'_{uni,max}$  を式 (10) の  $E'_{i,max}$  に代入すると、安全率として  $F_{S_s}$  を考えたときの必要厚さ  $t_{req}$  は、式 (11) のようになる。

$$t_{req} = \frac{F_{S_s} \cdot E'_{req}}{E'_{uni,max}} \quad (11)$$

すなわち、伸び量に着目した安全率  $F_{S_s}$  でみると、式 (9) に基づく伸び量から必要とされる Co-energy に対して、ジオメンブレンの応力-ひずみ関係から評価される Unit Co-Energy を  $F_{S_s}$  だけ低減して考えることは、厚さを  $F_{S_s}$  倍することに等しい。

ここで、ある応力を想定したとき、ピーク時に対する Co-energy の低減率と応力に対する低減率とが一致しないことは、前者が Fig.4 での縦軸と曲線で囲まれる面積の比率であることから明らかである。以上のことから、

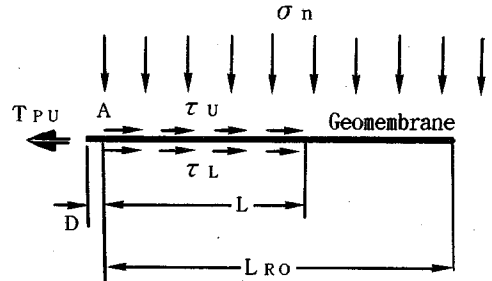


Fig.5 Forces acting on embedded geomembrane

伸び・Co-Energy・厚さに関する安全率 (もしくは低減率) の数値は一致したものとなるが、応力に関する安全率の数値は異なったものとなる。応力に関する安全率の数値的意味について次の 4. で詳しく述べる。

## 4. 弾性法に基づく厚さの評価と安全率

### (1) 厚さの評価<sup>5)</sup>と安全率

Fig.5 に示すように、厚さ  $t$ 、引張り弾性係数  $E$  のジオメンブレンが、廃棄物や覆土荷重による一様な鉛直応力  $\sigma_n$  の下で、長さ  $L_{RO}$  だけ敷設されているとする。このとき、点 A が単位幅当り  $T_{PU}$  なる引抜き力を受ける場合の引張り量  $D$  は、式 (12) もしくは式 (13) で表される<sup>7)</sup>。

$$D = \frac{T_{PU}^2}{2 \cdot E \cdot t \cdot (\mu_U + \mu_L) \cdot \sigma_n} \quad (12)$$

$$T_{PU} = (2 \cdot D \cdot E \cdot t \cdot (\mu_U + \mu_L) \cdot \sigma_n)^{0.5} \quad (13)$$

ここに、 $\mu$  は砂とジオメンブレンとの間の摩擦係数 (上面で  $\mu_U$ 、下面で  $\mu_L$ ) であり、両者の相対変位の大きさに依存しない、すなわちせん断応力度は相対変位に関して剛塑性的挙動をすると仮定している。

上記関係式を厚さ  $t$  の評価に応用するには、何等かの原因 (例えば、基盤の局所的沈下) によってジオメンブレンに要求される伸び  $s$  を上記  $D$  と等値におき、式 (13) を用いて計算される疑似引抜き力  $T_{PU}$  がジオメンブレンの引張り強度に対して安全となるように考える。

すなわち、ジオメンブレンの許容応力  $\sigma_{AL}$  に対応する許容引張り力を  $T_{AL} (= t \cdot \sigma_{AL})$  とすると、伸び  $s$  が許容引張り力以内で生じるための条件は式 (14) となる。

$$T_{AL} \geq T_{PU} \quad (14)$$

必要厚さを  $t_{req}$  として、強度安全率  $F_{SF} = \sigma_{UL} / \sigma_{AL}$  ( $\sigma_{UL}$  はピーク強度) を用いると、式 (15) が得られる。

$$\frac{\sigma_{UL} \cdot t_{req}}{F_{SF}} \geq \{2 \cdot s \cdot E \cdot t_{req} \cdot (\mu_U + \mu_L) \cdot \sigma_n\}^{0.5}$$

$$t_{req} \geq \frac{2 \cdot s \cdot E \cdot (\mu_U + \mu_L) \cdot \sigma_n \cdot F_{SF}^2}{\sigma_{UL}^2} \quad (15)$$

式 (15) は、伸び量  $s$  と伸びが許容引張り力以内で生

じるために必要な厚さ  $t_{req}$  が比例関係にあることを示しており、このことから伸びに関する安全率の値は厚さの比となり、Co-energy 法で述べたことと一致する。しかし、強度に関して安全率  $F_{SF}$  だけ低減することは、厚さを  $F_{SF}^2$  倍すること、すなわち伸びに対して  $F_{SF}^2$  の安全率を見込むことになる。逆に考えると、伸びに関する安全率  $F_{S_s}$  は強度に対して  $(F_{S_s})^{0.5}$  の安全率を考えていることになる。

では、伸び量に関する安全率  $F_{S_s}$  を採用するか、あるいは強度に関する安全率  $F_{SF}$  を採用するかについては、ジオメンブレンに対して要求される伸び量  $s_{req}$  の評価が現時点において確立されていないこと、および、強度安全率の2乗が伸び安全率に相当することを考えると、強度安全率を採用するほうがよいように思われる。

なお、ジオメンブレンが強度面において安全で、かつ、基盤の変形に追従しうるジオメンブレンの必要厚さは、弾性係数  $E$ ・直応力  $\sigma_n$ ・摩擦係数  $\mu$  の各値が大きいほど、大きな値を必要とすることも、式 (15) から理解できる。

## (2) Co-energy 法と弾性法

Fig.4 に示した引張り力-ひずみの関係が、もっとも簡単な線形関係であるとすれば、

Co-energy:  $E'$  は、式 (7) とともに

$$E' = \frac{T \cdot \varepsilon}{2} = \frac{\sigma \cdot t \cdot \varepsilon}{2} = \frac{\sigma^2 \cdot t}{2 \cdot E} = \frac{T^2}{2 \cdot E \cdot t}$$

$$= s \cdot p \cdot \tan \phi \quad (16)$$

となる。他方、弾性法の式 (12) から

$$D \cdot (\mu_U + \mu_L) \cdot \sigma_n = \frac{T_{PV}^2}{2 \cdot E \cdot t} \quad (17)$$

となる。このように、応力-ひずみ関係が線形的であれば両者は全く同じものとなるが、Co-energy 法はその関係が非線形であっても、一応図解できるという点で優れているように思われる。

## 5. 計算例

単位体積重量が  $12.54 \text{ kN/m}^3$  の廃棄物が  $45.72 \text{ m}$  の高さで埋め立てられる。基盤上にジオネットが水平に敷かれ、その上に HDPE ジオメンブレン、さらにその上方に砂が敷かれる。基盤が Fig.6 に示すように幅  $30.48 \text{ cm}$ 、その中心で  $5.55 \text{ cm}$  の不等沈下が心配される<sup>8)</sup>場合、強度に関する安全率  $F_{SF} = 1.5$  を基準として、厚さ・Co-Energy・伸び量に関する安全率を、Koerner 法・Co-energy 法・弾性法に従って評価してみる。条件として、HDPE は降伏強度 ( $\sigma_Y = 13.78 \text{ MN/m}^2$ ) までの応力-ひずみ関係が線形であり、弾性係数を  $E = 172.3 \text{ MN/m}^2$  とする。また、HDPE とジオネットおよび砂と

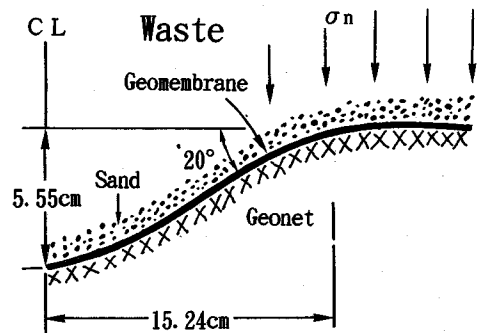


Fig.6 Deformation of HDPE geomembrane caused by settlement of subgrade

の摩擦係数をそれぞれ  $\mu_L = 0.176$ ,  $\mu_U = 0.325$  とする。

### (1) Koerner 法

ジオメンブレンが水平であるとき、そこに作用する廃棄物からの直応力は  $p = 573.3 \text{ kN/m}^2$  ( $83.2 \text{ lb/in.}^2$ ) である。この直応力のもとで HDPE が変形を生じる影響範囲は、Fig.2 を参照すると、約  $7.62 \text{ cm}$  ( $3 \text{ in.}$ ) である。諸数値を式 (3) に代入すると、必要厚さは、

$$t = \frac{573.3 \times 10^3 \cdot 7.62 \times 10^{-2} \cdot (0.325 + 0.176) \cdot 1.5}{\cos 20^\circ \cdot 13.78 \times 10^6}$$

$$= 0.00253 \text{ (m)} = 2.53 \text{ (mm)}$$

である。強度に関する安全率  $F_{SF}$  を考慮しないときの必要厚さは、同様な計算によって  $t = 1.69 \text{ mm}$  となり、強度に関する安全率を見込むことによって HDPE ジオメンブレンの必要厚さも  $F_{SF}$  倍となる。

### (2) Co-energy 法

水平に敷かれたジオメンブレンが基盤の局所沈下により Fig.6 の形状に変形する。この幾何形状の変化に追従するために必要な伸びが、中心の両側で等しく負担されると仮定すれば、片側でのジオメンブレンに要求される伸び量  $s$  は次のようになる。

$$s = 15.24 \cdot (1/\cos 20^\circ - 1) = 0.98 \text{ (cm)}$$

HDPE ジオメンブレンに必要な Co-energy は、式 (9) に諸数値を代入して、

$$E'_{req} = 9.8 \times 10^{-3} \cdot 573.3 \times 10^3 \cdot (0.325 + 0.176)$$

$$= 2.81 \text{ kN/m}$$

となる。

他方、降伏強度および許容強度 ( $\sigma_{AL} = 9.19 \text{ MN/m}^2$ ) に関する Unit Co-energy は、

$$E'_{uni,max} = 0.5 \cdot 13.78 \cdot (13.78/172.3) = 0.551 \text{ MN/m}^2$$

$$E'_{uni,AL} = 0.5 \cdot 9.19 \cdot (9.19/172.3) = 0.245 \text{ MN/m}^2$$

である。Unit Co-energy の比は  $2.25$  であり、 $F_{SF}$  の  $2$

乗となっている。

必要な厚さは、式 (11) において伸びに関する安全率を  $F_{S_s}=1.0$  とおいて、

$E'_{uni,max}$  に対して

$$t_{req} = \frac{2.81}{551} = 0.0051 \text{ (m)} = 5.1 \text{ (mm)}$$

$E'_{uni,AL}$  に対して

$$t_{req} = \frac{2.81}{245} = 0.0114 \text{ (m)} = 11.4 \text{ (mm)}$$

が得られる。これらの値からも、厚さの比は  $F_{S_F}$  と異なることが分かる。

伸び量  $s$  に対して  $F_{S_s} > 1.0$  の安全率を見込む（幾何形状の変化から評価された伸び量に割増しを考える）とき、必要とされる Co-energy も  $F_{S_s}$  倍されるので、必要厚さも上記の値の  $F_{S_s}$  倍となる。

### (3) 弾性法

必要な伸び量  $s=0.98$  cm と諸数値を式 (15) に代入すると、HDPE ジオメンブレンの伸びに伴い発生する応力を降伏強度および許容強度以内に収めるために必要な厚さは、それぞれ次のようになる。

降伏強度に対して、

$$t_{req} = \frac{2 \cdot 9.8 \times 10^{-3} \cdot 172.3 \times 10^6 \cdot 0.501 \cdot 573.3 \times 10^3}{(13.78 \times 10^6)^2} \\ = 0.0051 \text{ (m)} = 5.1 \text{ (mm)}$$

許容強度に対して

$$t_{req} = \frac{2 \cdot 9.8 \times 10^{-3} \cdot 172.3 \times 10^6 \cdot 0.501 \cdot 573.3 \times 10^3 \cdot 1.5^2}{(13.78 \times 10^6)^2} \\ = 0.0115 \text{ (m)} = 11.5 \text{ (mm)}$$

ここでも、厚さの比は応力に関する安全率の 2 乗となっている。

また、弾性法においても幾何形状の変化から評価された伸び量に  $F_{S_s}$  倍の割増しを考えれば（伸びに関する安全率を考慮すれば）、上式の右辺が  $F_{S_s}$  倍され、結果として必要厚さも  $F_{S_s}$  倍となることは明かである。

以上、3 種類の厚さ評価法に従う数値計算例を示したが、Koerner 法で評価された厚さは、伸び量が大きいつき、他の 2 つの方法に比べて過小評価となることが心配される。

## 6. ま と め

廃棄物処分場の遮水シートとして、HDPE、PVC、EPDM（加硫ゴム）等のいわゆるジオメンブレンが使用されているが、わが国での構造的設計方法は未整備のように思われる。本研究においては、ジオメンブレン下

の基盤の不等沈下に対してジオメンブレンが伸びることによって追従しうるような厚さ設計法とそこでの安全率の意味を、海外での研究成果の紹介を含みながら考察した。以下に、主な結論を示す。

- ① ジオメンブレンの応力-ひずみ関係を線形と仮定すると、土中に敷設されたジオメンブレンの伸び量に関する安全率  $F_{S_s}$  と強度に関する安全率  $F_{S_F}$  との間には、 $F_{S_s} = F_{S_F}^2$  の関係がある。
- ② 厚さに関する安全率および Co-energy に関する安全率と伸び量に関する安全率の値は一致する。
- ③ Co-energy 法と弾性法の基本的となる考えは同じである。現時点では、応力-ひずみ関係が非線形な場合でも、Co-energy 法は一応図解できるという点で優れている。
- ④ 敷設されたジオメンブレンが強度面において安全で、かつ、基盤の変形に追従しうるジオメンブレンの必要厚さは、ジオメンブレンには直応力のみが作用すると仮定すれば、弾性係数・直応力・摩擦係数の各値が大きいくほど、大きな値を必要とする。
- ⑤ 厚さ設計にジオメンブレンの伸び量を考慮していない Koerner 法を用いた計算値は、Co-energy 法や弾性法に比較して過小評価となる心配がある。

### 参考文献

- 1) 正井敬人：米国における遮水シートの現状，廃棄物，No.11, pp.138-143, 1992.
- 2) 三木博史，林 義之：国内におけるジオメンブレンの現状，第 1 回ジオメンブレン技術に関するセミナーテキスト，国際ジオテキスタイル学会日本支部，pp.28-46, 1994.
- 3) G.N. Richardson and R.M. Koerner : *Geosynthetic Design Guidance for Hazardous Waste Landfill Cells and Surface Impoundments*, 1986.
- 4) R.M. Koerner : *Designing with Geosynthetics-Second Edition*, Prentice Hall, pp.411-413, 1990.
- 5) 今泉繁良，横山幸満：ジオメンブレンライナーの厚さ評価法に関する一考察，国際ジオテキスタイル学会日本支部第 9 回ジオテキスタイルシンポジウム発表論文集，pp.94-101, 1994.
- 6) J.P. Giroud : *Quantification of Geosynthetic Behavior, Proceedings of the 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Special Lecture & Keynote Lectures*, pp.3-27, 1994.
- 7) 今泉繁良，高橋 悟，横山幸満，西形達明：埋め込まれた HDPE ジオメンブレンの引抜き抵抗挙動の評価，土木学会論文集 No.11, III-30, pp.55-162, 1995.
- 8) R.M. Koerner : *Designing with Geosynthetics-Second Edition*, Prentice Hall, pp.465-466, 1990.

(1995.3.24 受付)

# CONSIDERATION ON FACTOR OF SAFETY IN THICKNESS DESIGN OF GEOMEMBRANE USED AS A LINER SUBJECTED TO DEFORMATION

Shigeyoshi IMAIZUMI and Yukimitsu YOKOYAMA

Design methods of thickness, such as Koerner's method, Co-energy method and elastic method proposed by authors, with which geomembrane deforms without any failure in case of differential settlement of subgrade soils are reviewed and meanings of factors of safety,  $F_s$ , employed in design are discussed from a view point of elastic theory. As a result, it is found that  $F_s$  or elongation of geomembrane embedded in ground is related to square of  $F_s$  for strength, that  $F_s$  for thickness coincidence with those for Co energy and for elongation and that stiffer geomembrane, larger overburden pressure or higher frictional coefficient need thicker thickness.