울산대학교 공학연구논문집 제31권 1호 pp. 271~279, 울산대학교.
Journal of Engineering Research Vol. 31, No. 1, pp. 271~279, 2000
University of Ulsan.

보강토 옹벽의 신뢰도 해석

민덕기 · 김경민
토목환경공학부

<요 약>

일반적으로 옹벽의 설계는 설계자의 주관적 판단에 좌우되므로, 전통적인 설계방법은 설계과정을 수치적으로 일반화하기가 곤란할 뿐만 아니라 최종적인 설계 단면이 가장 적합한 것이라고 확신할 수 없다. 사용재료의 물성치에 내포되어있는 불확실성을 표현할 수 없음은 물론 불안정상태에서 발휘되고 있는 설계변수의 값이 얼마인가를 명확히 표현할 수 있는 물리적 근거가 모호하다. 특히 보강토 옹벽의 경우에는 토성치뿐만 아니라 흙/보강재 사이의 불확실성까지 고려되어져야 한다. 본 논문에서는 보강토 옹벽에 적용된 토성치와 흙/보강재 상호매개변수의 불확실성이 안정해석에 얼마나 영향을 미치는지를 확률적인 방법을 이용한 신뢰도 해석을 수행하였다.

신뢰도 해석을 수행한 결과, 흙/보강재 사이의 접촉마찰각 δ의 변화가 파괴확률 pf에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 보강토체내 뒤채움흙 단위중량 γr 및 보강재 길이 L의 경우 CV값이 20%가 될 때 일정 한계치보다 작은 값을 가지면 파괴확률 pf가 급격하게 증가함을 보였으며 배면토체 단위중량 γf은 파괴확률 pf에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 나타났다.

Reliability Analysis on Reinforced Walls

Tuk-ki Min · Kyoung-min Kim
School of Civil & Environmental Engineering

<Abstract>

Traditionally, the reliability of retaining walls is achieved through the use of safety factors or margins and adopting conservative assumption in the process of design.

However, that is often defined on the basis of subjective judgements. Such a traditional design methods are difficult to quantify and lack the logical basis of describing uncertainty. Especially, reinforced walls consider not only soil properties but soil- reinforcement interaction uncertainties.

This paper described how probabilistic description of soil parameters and soil-reinforcement interaction parameters were applied to the stability analysis. The first-order, second moment approach was explored and applied to the design of reinforced walls. An example illustrated the relative contribution of uncertainties about different parameters to the reliability of the reinforced walls.

The results obtained from this study were follows;

the reliability of the soil-reinforcement interface friction angle, δ was highly sensitive to the coefficient of variation.

However, when the backfill soil unit weight, γr and the reinforcement length, L were lower than the limited values, the probabilities of failure were increased.

The reliability of the soil unit weight, γf in the unreinforced area was lowly sensitive to the coefficient of variation.

1. 서 론

보강토(reinforced earth) 개념은 1960년대 중반 프랑스의 Vidal에 의해 강판(steel strips) 보강재를 사용하는 형태로 개발되어 보강재의 재료가 발전함에 따라 토목 여러 분야에 보강토 공법이 적용되고 있다. 보강토 옹벽은 벽면과 보강재의 연결 및 보강재와 흙 사이의 마찰에 의해 저항하는 구조로서 기존 콘크리트 옹벽에 비해 시공의 간편성 및 신속성, 경제성 등의 장점을 가지고 있다.

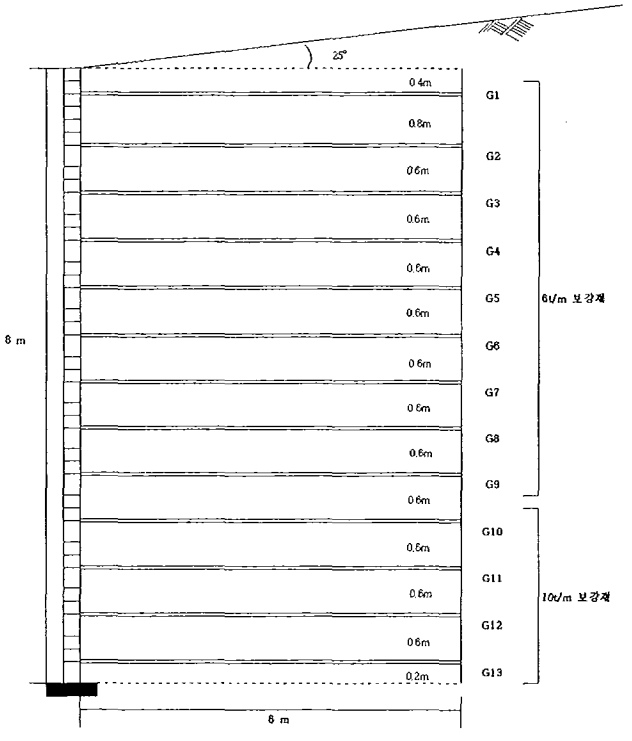
그동안 보강토 옹벽의 합리적인 설계를 위해 다양한 해석 및 설계방법들이 제안되어 왔으며, 대부분 옹벽파괴에 대한 안전율의 결정에 한계평형해석(limit equilibrium analysis)을 사용하고 있다. 이러한 설계방법은 활동파괴면에 대한 응력상태, 활동파괴면의 형상, 보강재의 인발저항 등을 가정하여 힘과 모멘트에 대한 평형을 분석하므로 가정사항들에 대한 차이와 안전율의 적용방법에 따라 상이한 결과를 나타내게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 한계평형해석의 문제점을 보완하기 위해 가정사항의 불확실성을 고려한 보강토 옹벽의 신뢰도 해석을 수행하였다.

2. 토목섬유 보강토 옹벽의 설계

보강토 옹벽의 합리적인 설계를 위해 크게 두 가지 한계평형해석에 의한 설계 방법을 사용하고 있다. 첫 번째 방법은 보강토체의 수평방향 활동력이 보강재에 의해 유발되는 수평방향 저항력과 평형을 이룬다고 가정하여 해석하는 타이백(tie-back) 해석방법이고, 두 번째 방법은 전통적인 사면안정 해석방법과 같이 가정된 파괴활동면에서의 힘이나 모멘트

평형 해석시 보강재 효과를 고려하는 방법이다.

본 연구에서는 민감도 해석 및 신뢰도 해석 수행을 위해 전자 해석방법, 즉 보강재가 쐐기형태의 파괴토체에 대하여 인장저항한다고 보는 타이백(tie-back) 해석방법을 이용한 토목섬유 보강토 옹벽의 설계 예를 정하였다.



[그림. 1] 보강토 옹벽의 설계 단면

설계조건은 뒤채움흙 물성 γr = 1.9t/m3, cr = 0t/m2, ϕr = 32° , 배면토체 물성 γf = 1.85t/m3, cf = 0t/m2, ϕf = 30° , 기초지반 물성 γb = 1.85t/m3, cb = 0t/m2, ϕb = 30° , 보강재 종류는 지오그리드 2종류(최대인장강도 10t/m, 6t/m,), 흙/보강재 마찰 특성은 c* = 0t/m2, δ = 30° 이다. 그리고 옹벽의 단면 조건은 옹벽높이, H = 8m, 보강재 설계길이, L = 6m, 옹벽 경사는 수직으로 θ = 0, 상부 성토사면경사도, β = 25° 이다. [그림. 1]은 보강토 옹벽의 설계 단면으로 보강재의 수직간격 및 층별 지오그리드(geogrid) 종류를 나타내었다.

3. 한계상태법에 의한 안정 해석

[그림. 2]와 같이 수평에 대해서 각도 φ인 활동면을 따라 활동을 일으키는 토체는 한계평형상태에 있으며, 이 때에 토체에는 토체의 자중, V1과 토압의 연직성분, FV 및 토압의 수평성분, FH, 활동면에서의 반력, R 그리고 활동면에 놓인 보강재에 발생하는 마찰저항력

의 합, ΣPR과 같은 힘이 작용한다. 따라서 활동면의 각도가 φ일 때에 힘의 평형식은 식 (1)과 같다.

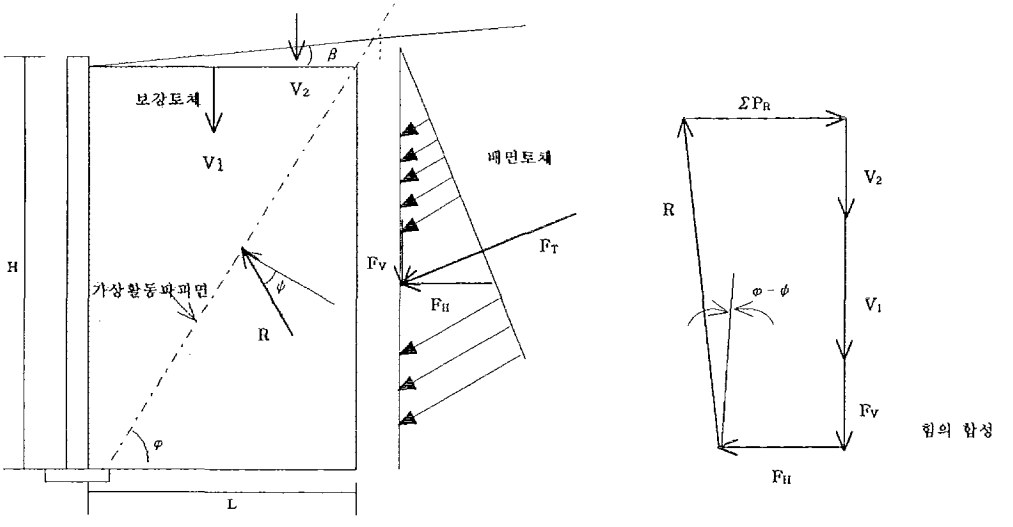
$$\Sigma PR = FH + (V1 + V2 + FT \sin\beta) \tan(\varphi - \psi) \quad (1)$$

각각의 보강재의 마찰저항력, PR은

$$PR = 2\ Le(c^* + \sigma'v \tan\phi^*) \quad (2)$$

여기서,

Le= 보강토체 내의 저항영역([그림. 2]의 가상활동파괴면 바깥영역)에 묻혀진 보강재의 유효저항 길이
c*= 흙과 보강재 사이의 점착력(세립분 함유량이 적은 사질토에서는 고려하지 않음)
δ = 흙과 보강재 사이의 접촉마찰각
$\sigma'v$ = 보강재에 작용하는 유효수직응력
($=\gamma r \cdot z + L \cdot \tan\beta \cdot \gamma f /2$, z : 보강토체 상면에서 보강재 묻힌 깊이)



[그림. 2] 토목섬유 보강토 옹벽의 해석

4. 민감도 해석

해석 모델에서 안정해석에 영향을 미칠 수 있는 중요 기본 설계변수를 확인하기 위해서 민감도 해석을 식 (2)을 이용하여 수행하였다. 이 연구를 위해 사용된 기본 데이터는 아래

와 같다.

Le=0.485m, c*= 0t/m2, δ =30° , γ r=1.9t/m3, z=5.4m, H=8m, L=6m, β =25° γ f=1.85t/m3

[표. 1] 민감도 해석 결과

Parameter	Baseline Value	Coefficient of Variation, CV(%)	New Value	P_R	Change P_R
δ	30°	5	28.5	6.93	-5.83
		10	27	6.51	-11.50
		15	25.5	6.10	-17.02
γ_r	1.9t/m^3	5	1.805	7.07	-3.91
		10	1.71	6.78	-7.82
		15	1.615	6.49	-11.73
c*	0.16t/m^2	20	0.128	7.32	-0.42
		40	0.096	7.29	-0.84
		60	0.064	7.26	-1.27
L	6m	5	5.7	7.28	-0.99
		10	5.4	7.21	-1.97
		15	5.1	7.14	-2.96
γ_f	1.85t/m^3	5	1.7575	7.28	-0.99
		10	1.665	7.21	-1.97
		15	1.5725	7.14	-2.96

이 때, 보강재 마찰저항력은 7.35t/m이었다. [표. 1]에서 나타난 바와 같이 흙/보강재 사이의 접촉마찰각, δ 에서 가장 민감한 변화가 있었고 뒤채움흙 단위중량, γ r에서도 민감한 변화가 나타났다. 반면에 배면토체 단위중량, γ f와 보강재길이, L 그리고 흙/보강재 사이의 점착력, c*에 대해서는 낮은 민감도를 나타냈다.

5. 신뢰도 해석

구조물 설계에 입력되는 저항조건이나 하중조건은 일반적으로 여러 개이며 이러한 설계변수값들은 불확실성을 가지고 있다. 그러므로 구조물 안정에 영향을 끼칠 수 있는 기본설계변수들을 일반식으로 나타내어 신뢰도 해석을 하는 것이 바람직할 것이다. 기본 설계변수들의 항으로 나타낸 일반식은 식 (3)과 같다.

$$g(X) = g(X1, X2, X3, ..., Xn) \quad (3)$$

여기서, X는 기본설계변수 X1, X2, X3, ..., Xn에 대한 vector량이다. 식 (3)에서 g(X) = 0인 상태가 한계상태(limit state)이고 g(X) > 0 및 g(X) < 0이면 각각 안정상태(safe state) 및 파괴상태(failure state)이다.

일반적으로 구조물에는 저항력(R)과 활동력(S)이 존재하게 되고, 이 구조물이 안정을 유

지할 조건은 R > S이며, 구조물이 파괴에 이른 상태에 대한 확률은 P(SM < 0)로 나타낼 수 있을 것이다(Safety Margin, SM = R - S). 따라서 식 (3)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SM = R - S = g(X1, X2, X3, ..., Xn) < 0 \quad (4)$$

본 연구에서는 보강토 옹벽의 파괴확률(Probability of Failure)을 평가할 수 있는 신뢰도 해석을 흙/보강재 사이의 마찰특성에 초점을 맞춰 적용하였다. 검토 대상 보강토 옹벽의 흙/보강재 사이의 마찰특성에 대해, 보강토체내 주동영역에 작용하는 힘(S)과 이에 대해 흙/보강재 접촉마찰력으로 저항하려는 힘(R)을 토대로, g함수를 구하면 식 (5)과 같다.

$$SM = R - S = \Sigma PR - [FH + (V1 + V2 + FT \sin\beta) \tan(\varphi - \psi)] = g(\gamma r, c^*, L, \beta, \delta, \gamma f) \quad (5)$$

SM의 평균 μM 및 표준편차 σM을 써서 확률밀도함수(Probability Density Function)를 구하면 신뢰도를 구할 수 있다(Rosenblueth, 1975[19]).

신뢰도는 구조물의 종류에 따라 다소 차이가 있으나 일반적으로 95%이상을 허용설계기준(Smith, 1986[21])으로 규정하였으며, Meyerhof(1982)[16]은 흙막이 구조물에 대해서 β = 3.1, 최대 파괴확률, pf = 10-3의 한계치를 제안하였다.

파괴확률을 구할 때 신뢰도 지수(Reliability Index, β) 식 (6)이 사용되는데, 이는 SM의 평균 μM과 표준편차 σM의 비로써 정의되며, 이를 토대로 파괴확률의 식을 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\beta = \mu M / \sigma M \quad (6)$$

$$pf = pfFORM = \Phi(-\beta) \quad (7)$$

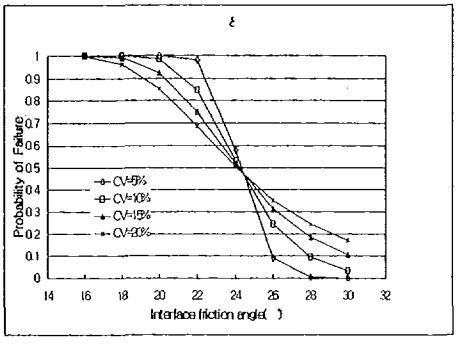
식 (6)에 Φ는 누적정규분포함수(Cumulative Normal Distribution Function)를 의미하며, 신뢰도 지수가 FORM(First Order Reliability Method)에 의해 결정되면, Φ-도표를 이용하여 파괴확률, pf를 구한다.

6. 신뢰도 해석 결과

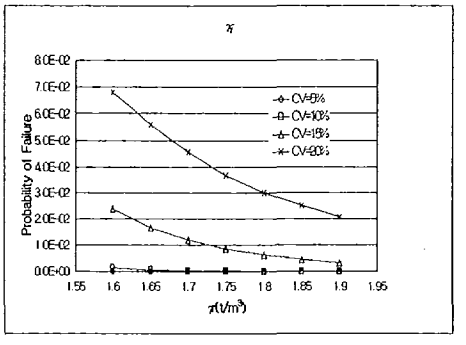
제시한 설계 예에 대한 설계변수인 흙/보강재 접촉마찰각, δ과 뒤채움흙 단위중량, γr, 보강재 길이, L 그리고 배면토체 단위중량, γf의 신뢰도 결과가 [그림. 3], [그림. 4], [그림. 5], [그림. 6]과 같다.

[그림. 3]에서 보는 바와 같이 CV = 5%, 10%, 15%에 대해 흙/보강재 접촉마찰각, δ가 24° 이하일 경우, 파괴확률, pf가 50%이상이 됨을 알 수 있다. [그림. 4]에서는 보강토체내 뒤채움흙 단위중량, γr이 커질수록 파괴확률이 작아지고 있으며, CV = 15%이고 γr = 1.9t/m3일 경우 파괴확률, pf가 3.26×10-3으로 나타났고, CV = 20%이고 γr = 1.9t/m3일 경우 파괴확률, pf가 2.07×10-2로 Meyerhof(1982)[16]가 제안한 한계치 10-3보다 크게 나

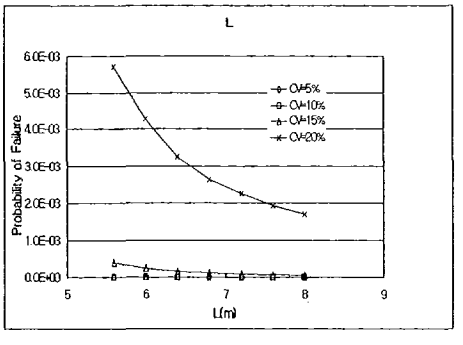
타났다. [그림. 5], [그림. 6]에서는 보강재 길이, L과 배면토체 단위중량, γf의 파괴확률, pf를 나타낸 것으로 앞서 수행한 민감도 해석에서 별 영향은 없었으나 파괴확률, pf에 어떤 영향을 미치는지의 경향을 보여주고 있다. 보강재 길이, L이 길어질수록 파괴확률, pf는 작아졌고 배면토체 단위중량, γf가 커질수록 파괴확률, pf는 커짐을 알 수 있었다.



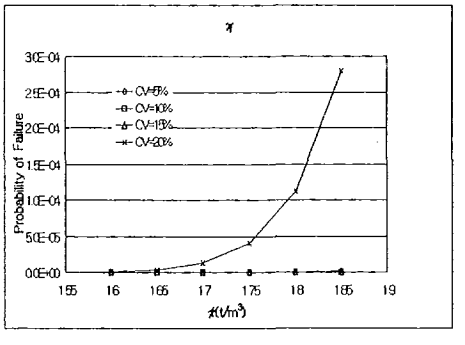
[그림. 3] 흙/보강재 접촉마찰각, δ 변화에 따른 파괴확률, pf



[그림. 4] 뒤채움흙 단위중량, γr 변화에 따른 파괴확률 pf



[그림. 5] 보강재 길이, L 변화에 따른 파괴확률, pf



[그림. 6] 배면토체 단위중량, γf 변화에 따른 파괴확률, pf

7. 결 론

본 논문에서는 보강토 옹벽 설계시 설계변수들의 불확실성을 고려하여 신뢰도해석을 수행하였다. 우선 한계평형해석법을 이용하여 거동함수를 나타내었으며, 그 식을 1계 신뢰도 해석법(first order reliability method, FORM)을 이용하여 신뢰도 해석을 수행하였다. 그 결과로 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 1계 신뢰도 민감도 측정(first order reliability sensitivity measures)

설계변수의 민감도를 측정한 결과, 흙/보강재 사이의 접촉마찰각 δ에서 가장 민감한 변화를 보였고, 뒤채움흙 단위중량 γr에서도 민감한 변화가 나타났다. 반면 배면토체 단위

중량 γf와 보강재 길이 L 그리고 흙/보강재 사이의 점착력 c*에 대해서는 낮은 민감도를 나타냈다.

(2) 1계 신뢰도 해석(first order reliability method)

1계 신뢰도 해석 수행한 결과, 흙/보강재 사이의 접촉마찰각, δ 및 뒤채움흙 단위중량, γr, 배면토체 단위중량, γf, 보강재 길이, L 그리고 흙/보강재 사이의 점착력, c*의 중요 설계변수들 중에서도 특히, 흙/보강재 사이의 접촉마찰각, δ의 변화가 파괴확률, pf에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

보강토체내 뒤채움흙 단위중량, γr의 경우 CV값이 20%가 될 때, γr이 일정 한계치보다 작은 값을 가지면 파괴확률, pf가 급격하게 증가함을 보였다. 보강재 길이, L의 경우에 있어서도 마찬가지로 CV값이 20%가 될 때, 보강재 길이, L이 일정 한계치보다 작은 값을 가지면 파괴확률, pf가 급격하게 증가함을 보였다. 배면토체 단위중량, γf는 파괴확률, pf에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 나타났다.

따라서 1계 신뢰도 해석법의 가장 중요한 장점 중의 하나인 입력계수로 주어지는 확률변수 또는 확률분포나 한계상태의 함수를 정의하는 매개변수에 대한 민감도 측정, 신뢰도 지수, β와 파괴확률, pf를 구함으로써 불확실성의 근원을 찾을 수 있었으며, 정량적인 수치로 표현하여 해석근거를 객관화시켰다.

참 고 문 헌

1. 김용필, "유상관 설계변수에 의한 얕은 기초의 신뢰도해석에 대한 연구", 고려대학교 박사학위 논문, 1985
2. 김홍택, 강인규, 박사원, 고용일, 권영호,(1999), "프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 신뢰도 분석", 한국지반공학회논문집, Vol. 15, No. 2, pp. 105~127
3. 이상덕(1996), "전문가를 위한 기초공학", 엔지니어즈, pp. 399~406
4. 이은수(1999), "보강토공법의 설계와 적용", 대한토목학회(1999), 토목기술강좌 II, Vol. 4, No. 1, pp. 209~237
5. 한국지반공학회(1998), "토목섬유", 지반공학 시리즈 9
6. 한국지반공학회(1994), "사면안정", 지반공학 시리즈 5
7. Ahmed M. Hassan Thomas F. Wolff(1999), "Search Algorithm for Minimum Reliability Index of Earth Slopes", ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 301~308
8. Alfedo H-S. Ang(1975), "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", Vol. I, Vol. II, John Wiley & Sons, Ins
9. C. Cherubini, A. Garrasi, C. Petrolla (1992), "The reliability of an anchored sheet-pile embedded in a cohesionless soil", Can. Geotech. J. Vol. 29, pp. 426~435
10. Collin J. G.(1986), Earth Walls Design, Ph. D. Thesis, University of California at Berkeley.
11. Cornell C. A.(1969), "A Probability-Based Structural Code", ACI Journal, Dec, pp. 974~985
12. Haosfer, Abraham M. Lind, N. C.(1974), "Exact and Invariant Second-Moment Code

Format", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. EM1, pp. 111~121
13. Ian K.Lee et al.(1983), "Geotechnical Engineering", University of New South Wales, pp. 57~88
14. James M. Landrum et al.(1995), "Stability analysis of landfill slopes : a probabilistic approach", Geoenvironment 2000, Vol. 2-1, pp. 1020~1034
15. Leshchinsky, D. and Boedeker, R. H.(1989), "Geosynthetic reinforced soil structure", ASCE, Vol. 115, No. 10, pp. 1459~1478
16. Meyerhof, G. G.(1982), "Limit state designs in geotechnical engineering", Structure Safety 1, No. 1, pp. 67~71
17. Milton E. Harr(1987), "Reliability-based design in civil engineering", McGraw-Hill
18. P .L. Bourdeau et al.(1993), "Stability of Soil-Covered Geosynthetic-Lined Slopes: A Parametric Study", Geosynthetics '93 Conference Proceedings, pp. 1511~1521
19. Rosenblueth, E.(1975), "Point estimates for probability moments", Proceedings of the National Academy of Science of the United State America, Vol. 72, pp. 3812~3814
20. Robert M. Koener(1996), "Design with Geosynthetics", Prentice Hall
21. Smith, G. N. (1985), "The use of probability theory to assess the safety of propped embedded cantilever retaining walls", Géotechnique Vol. 35, No. 4, pp. 451~460
22. Sixth International Conference on Geosynthetics Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 1~23
23. Terzaghi, K., and Peck, R. B.(1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice", Wiley, New York.'