

보강토 교대의 내적안정성 해석방법에 대한 연구

A Study on the Internal Stability of Reinforced Earth Bridge Abutments

이우진¹⁾, Woo-Jin Lee, 임형덕²⁾, Hyung-Duk Lim, 이원제³⁾, Won-Je Lee

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 대학원 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 대학원 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : This paper describes an effect of methods of combining vertical bridge loads on the evaluation of internal stability of strip reinforced earth bridge abutments and suggests an appropriate design method based on coherent gravity hypothesis. The method 1, considering the bridge load separately from other design loads to evaluate the vertical stress on strip, and the method 2, considering all design loads together, were evaluated by comparing the design with results of finite element analysis for example problem. It was found that the method 1 gives the similar results with finite element analysis in case of evaluating for safety factors of tensile failure. As the magnitude of bridge loads increases, the difference of the results between method 1 and finite element analysis increases, but the method 1 appears to give a conservative results for internal stability of reinforced earth bridge abutments.

Key words : Bridge loads, Coherent gravity hypothesis, Reinforced earth bridge abutments

1. 서론

평지보다는 대부분이 산지로 구성되어 있는 우리나라는 토지의 효율적 이용측면에서 콘크리트 옹벽구조물이 많이 이용되어왔다. 그러나 콘크리트 옹벽은 높이의 제한, 부등침하 방지를 위한 기초처리 등의 제한을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 최근에는 토목섬유, 보강띠, grid 등과 같은 보강재를 사용하여 지반의 강도를 증가시키는 보강토 공법이 널리 이용되고 있다. 보강토 공법은 프랑스의 Vidal에 의해 개발된 이후 그 적용성이 점차 확대되었으며, 근래에는 보강토 옹벽, 보강토 교대, 흙댐의 보강, 연약지반처리 등 여러 분야에 걸쳐 활용되고 있다. 보강토 옹벽은 상대적으로 다른 공법과 비교해 볼 때 공사가 쉽고 빠르며, 부지소요가 적고, 미적 기능이 뛰어나 주위 환경과 조화를 이루는 장점이 있는 반면에, 거동해석의 어려움, 양질의 뒤채움재의 확보, 시공 및 품질관리 측면에서 어려움이 있다.

본 연구에서는 강띠(strip)를 보강재로 사용한 보강토 교대의 내적안정성 검토시 고려되는 여러 설계 하중들에서 교대로 전달되는 연직집중하중의 영향을 분석하였다. 이를 위해 예제에 대해 현 해석법을 이용하여 교대 하중의 고려방법에 따른 내적안정성 검토와 수치해석(FEM)을 수행하였다. 또한 이들 결과를 비교, 분석하여 교대하중을 적합하게 고려할 수 있는 해석법을 제시하였다.

2. 보강토 교대의 안정성 검토

보강토 교대의 안정성 문제는 외적안정성과 내적안정성으로 구분된다. 외적안정성은 보강토체를 중력

식 옹벽으로 가정하여 외력과 수평토압에 대해 보강토 구조물이 안정성을 확보할 수 있는지를 검토하는 것이다. 벽체의 전도, 활동, 저면에서의 지지력 등이 검토대상이며 일반 콘크리트 옹벽의 해석법과 동일한 방법이 이용된다. 내적안정성은 보강재와 흙 사이의 마찰력이 수평토압에 저항하며 보강토체 내부의 안정을 이루는 것을 말한다. 보강재의 인발 및 인장파괴가 검토대상이며, 보강토 교대의 안정성 문제는 대부분 내적안정성에 의해 좌우되는 것이 일반적이다.

2.1 내적안정성 해석

보강토 교대의 내적안정성 해석시 콘크리트 옹벽과의 차이점은 가상파괴면과 뒤채움재의 토압계수의 분포에 있다. 내적안정성 해석법은 위의 두 요인의 가정에 따라 보강토체를 기존 옹벽의 설계개념을 이용한 타이백 구조물(tie-back)로 가정하는 방법과 현장 또는 실내시험 및 시공 자료에 근거한 복합중력식 구조물(coherent gravity structure)로 가정하는 방법이 있다. 위의 두 방법 모두 가상파괴면의 바깥쪽에 존재하는 보강재만이 수평토압에 저항한다는 모순점이 있다. 그러나 복합중력식 구조물 가정법이 보강토 옹벽의 거동을 설명하는 데에 유리하며, 실제로 가상파괴면의 연구, 보강재에 작용하는 인장력 등을 연구하는 데에 많이 이용된다(Mitchell and Schlosser, 1979).

본 연구에서는 보강토 교대의 내적안정성 검토시 교대하중이 미치는 영향을 분석하기 위하여 복합중력식 구조물 가정법에 근거한 설계 및 해석법을 이용하였다. 실내 및 현장시험으로 보강토 옹벽의 토압을 실측한 결과 옹벽 상부에서의 토압은 정지토압과 같으며, 깊이가 증가할수록 감소하다가 6 m(20 ft) 아래에서는 주동토압과 같은 결과를 얻었다(Juran 등, 1978). 또한, 보강재에 작용하는 인장력을 측정하여 최대인장력의 분포를 기준으로 파괴면을 가정하였다. 보강재와 흙간의 마찰계수는 보강재와 흙간의 복잡한 거동과 보강재의 종류 또는 표면상태에 따라 그 양상이 달라지므로 보통 실험을 통하여 산정되어지며, 강피를 보강재로 사용하는 경우 일반적으로 상재하중이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 그림 1은 복합중력식 구조물 가정법을 근거로 한 보강토 교대의 가상파괴면 및 토압계수와 마찰계수의 분포를 나타내고 있다.

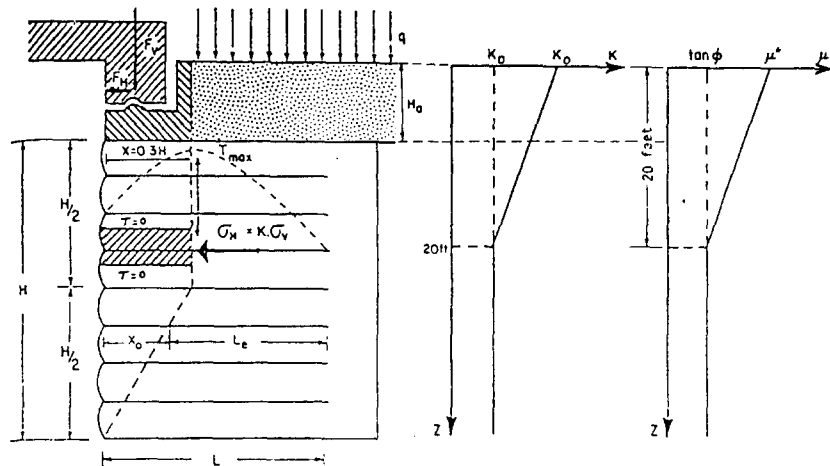


그림 1. 복합중력식 구조물 가정법

2.2 설계하중의 조합

보강토 교대의 설계하중으로는 교대에 직접 작용하는 집중 연직 또는 수평하중, 교통하중, 그리고 배면의 사하중 등이 고려된다. 이중 교대하중은 일반적인 옹벽구조물에서는 고려되지 않는 하중으로 보강재에 작용하는 인장력 또는 수평력의 크기에 영향을 미치기 때문에, 보강재의 인장 및 인발파괴에 대한 해석시 교대하중의 적절한 고려가 요구된다.

본 연구에서는 교대하중을 고려하는 방법을 설계하중과 뒤채움재의 자중에 의한 보강재에서의 연직응력을 교대하중과 그 외의 하중을 분리하여 고려하는 방법(방법 1)과 모든 외력을 함께 고려하는 방법(방법 2) 두 가지로 구분하여 각각의 조합방법에 대한 적합성을 검토하였다. 그림 2는 본 연구에서 검토한 방법 1과 2를 나타내고 있다. 교대에 작용하는 수평하중은 고려하지 않았으며, 교대의 연직집중하중에 의한 보강토체에서의 연직응력의 증가량은 2:1 (수직:수평)법을 사용하여 산정하였다. 또한 보강재에 작용하는 연직응력은 모멘트를 고려하여 일정하게 분포시키는 Meyerhof 방법을 사용하였다.

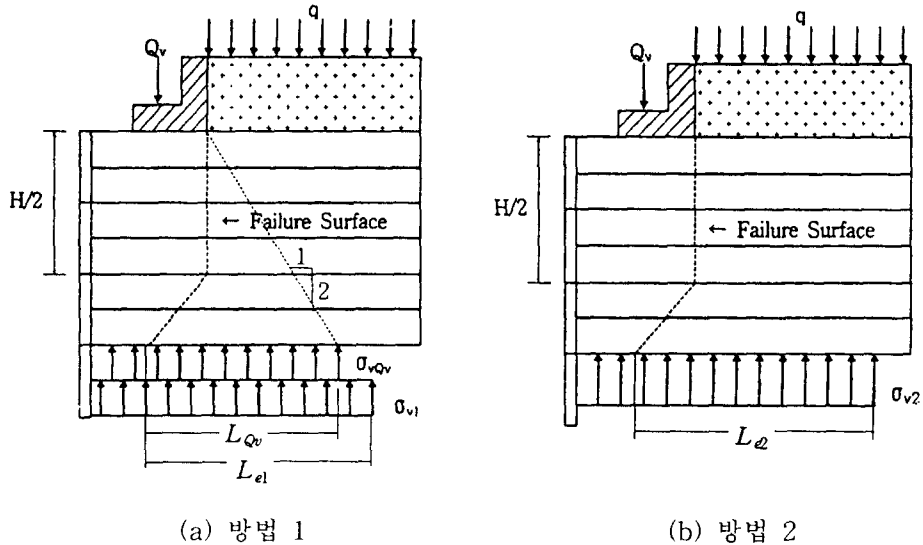


그림 2. 교대하중의 고려방법에 따른 연직응력의 분포

2.3 보강재의 인장파괴

교대하중을 포함한 외력 및 뒤채움재의 자중으로 인하여 발생하는 인장응력은 보강재의 허용인장응력보다 적어야 한다. 보강재에 작용하는 연직응력의 분포 및 크기는 교대하중을 고려하는 방법에 따라 달라지며, 따라서 인장파괴에 대한 안전율의 산정방법도 달라지게 된다. 표 1은 교대하중의 고려방법에 따라 각각 보강재에 작용하는 인장응력의 크기와 분포 및 보강재의 인장파괴에 대한 안전율을 산정하는 방법을 나타내고 있다.

표 1. 보강재의 인장파괴에 대한 검토

	방법 1	방법 2
보강재에 작용하는 인장력	$T_1 = K(\sigma_{vQv} + \sigma_{v1}) \times A_p$	$T_2 = K\sigma_{i2} \times A_p$
인장파괴에 대한 안전율	$FS_{ten} = \frac{\sigma_y \times n \times A_s}{T_1}$	$FS_{ten} = \frac{\sigma_y \times n \times A_s}{T_2}$
비 고	σ_{vQv} ; 교대하중에 의한 응력증가량 σ_{v1} ; 그 외의 하중에 의한 연직응력	σ_{i2} ; 모든 하중을 함께 고려한 연직응력

표 1에서, K는 토압계수로 그림 1에서 산정되며, A_p 는 전면판(panel)의 단면적, σ_y 는 보강재의 허용응력, A_s 는 보강재의 단면적, n은 옹벽의 전면판당 보강재의 수이다.

2.4 보강재의 인발파괴

교대하중을 포함한 외력 및 뒤채움재의 자중으로 인하여 발생하는 수평토압은 보강재와 흙간의 마찰력보다 적어야 보강재가 인발되지 않는다. 복합중력식 구조물 가정이론에 따라 가상과괴면 바깥쪽에 존재하는 보강재만이 수평토압에 저항하는 것으로 가정하며, 교대하중의 고려방법에 따라 인장과괴의 검토와 마찬가지로 연직응력의 분포가 달라져 인발파괴에 대한 안전율의 산정방법도 달라지게 된다. 표 2는 교대하중의 고려방법에 따른 보강재의 인발파괴에 대한 검토방법을 나타내고 있다.

표 2. 보강재의 인발파괴에 대한 검토

	방법 1	방법 2
보강재의 유효저항력	$R_1 = (\sigma_{vQv} \times L_{Qv} + \sigma_{v1} \times L_{e1}) \times \mu^* \times 2d$	$R_2 = (\sigma_{v2} \times L_{e2}) \times \mu^* \times 2d$
인발파괴에 대한 안전율	$FS_{bond} = \frac{R_1}{T_1} \geq 1.5$	$FS_{bond} = \frac{R_2}{T_2} \geq 1.5$

표 2에서, μ^* 은 보강재와 흙간의 마찰계수로 그림 1에서 산정되며, d 는 보강재의 폭이며, L_{Qv} , L_{e1} 과 L_{e2} 는 그림 1에서 보는 바와 같이 각각의 σ_{vQv} , σ_{v1} 과 σ_{v2} 에 해당하는 보강재의 유효길이이다.

3. 예제 해석

보강토 교대의 내적안정성 검토시 교대로 전달되는 집중연직하중의 고려방법에 따라 보강재의 인장파괴 및 인발파괴의 해석결과는 달라지게 된다. 본 연구에서는 교대하중의 고려방법에 따른 내적안정성 검토 방법 1, 2를 이용하여 각각 예제 해석을 실시하고, 또한 수치해석(FEM)을 수행하여 이들 결과를 비교, 분석하여 적절한 하중조합방법을 검토하였다. 수치해석은 SSCOMPPC 프로그램(Boulanger 등, 1991)을 이용하여 2차원으로 수행하였으며, 해석단면 및 모델 물성치는 각각 그림 3, 표 3과 같다.

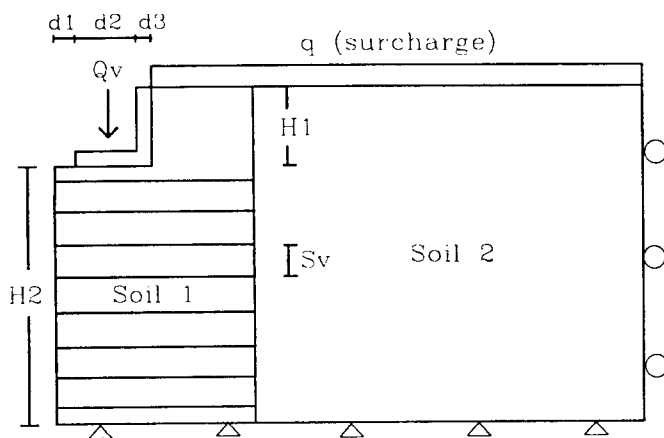


그림 3. 예제 해석 단면

표 3. 수치해석 모델 물성치

물 성 치	Soil 1	Soil 2
c (k/ft ²)	0.00	0.0
ϕ (degrees)	36.0	32.0
$\Delta\phi$ (degrees)	8.0	4.0
K (Young's modulus no.)	600.0	300.0
n (Young's modulus exp.)	0.25	0.25
R_f (Failure ratio)	0.7	0.7
K_b (Bulk modulus no.)	450.0	250.0

또한 그림 1에서 뒤채움재의 높이(H1)는 6(ft), 교대 벽체의 높이(H2)는 19(ft), 보강재의 길이는 15(ft), d_1 , d_2 와 d_3 은 각각 1(ft), 5(ft), 1(ft), 상재하중(q)은 0.25 (kips/ft²)이다.

예제에 대한 수치해석과 본 연구에서 검토한 하중조합방법 1, 2에 의한 보강재의 인장파괴에 대한 해석결과는 그림 4에 나타나있다. 그림에서 알 수 있듯이 교대하중을 다른 하중과 분리하여 보강재에 작

용하는 연직응력을 산정하는 방법 1이 수치해석과 비슷한 인장파괴에 대한 안전율을 주는 것으로 나타났다. 벽체 상부에서 방법 1과 2에 의한 안전율이 상당한 차이를 보이는데 반해 벽체 저부에서는 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 이는 깊이가 증가할수록 교대하중의 영향이 감소되기 때문이다. 또한, 교대하중이 증가할수록 수치해석결과와 방법 1에 의한 결과의 차이가 증가하는데, 이는 2:1 법칙에 의한 연직응력의 산정이 실제 보강토체에서의 하중전달과는 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다.

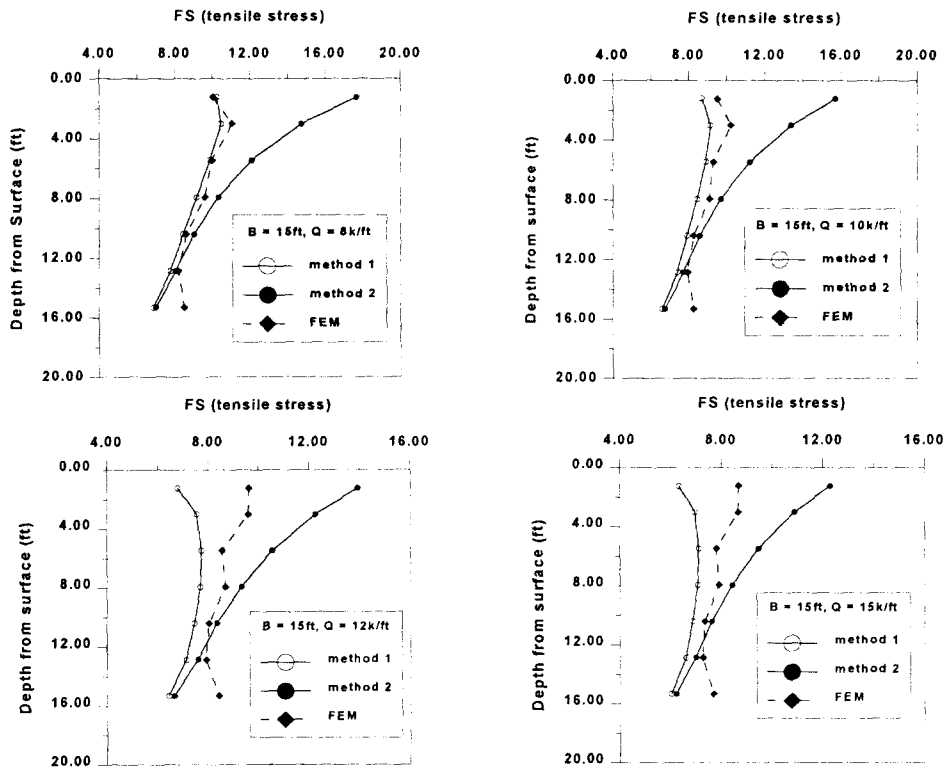


그림 4. 인장파괴에 대한 예제 해석결과

그림 5는 방법 1, 2에 의한 보강재의 인발파괴에 대한 예제해석 결과를 보여주고 있다. 인장파괴의 해석결과와 유사한 경향을 보이며, 벽체 저부에서는 비슷한 값을 나타내나 상부에서는 방법 1에 의한 안전율이 방법 2보다 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 이는 방법 2가 교대하중의 영향을 과소평가하기 때문인 것으로 판단된다. 수치해석결과와 직접적으로 비교 할 수는 없으나, 인장파괴에 대한 해석결과로 미루어 볼 때 방법 1에 의한 인발파괴에 대한 해석이 타당하다고 판단된다.

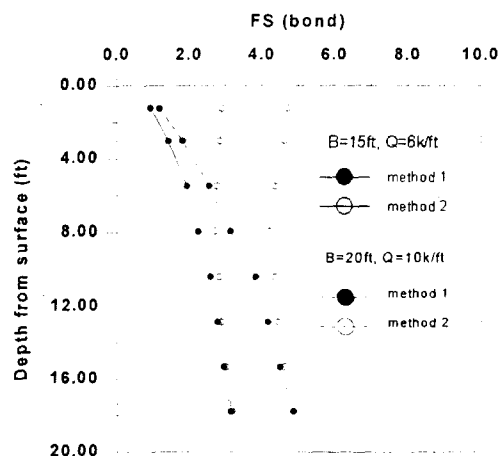


그림 5. 인발파괴에 대한 예제 해석결과

4. 결론

보강토 교대의 내적안정성 검토시 고려되는 하중조합방법을 교대하중의 고려방법에 따라 두 가지로 구분하여 제시하였다. 또한 예제에 대해 수치해석을 수행하여 이를 방법 1, 2에 의한 내적안정성 해석결과와 비교, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보강재의 인장파괴에 대한 안전율 산정시 교대하중을 다른 하중과 분리하여 고려하는 방법(방법 1)이 수치해석결과와 유사한 경향을 보였으며, 방법 2는 벽체 상부에서 보강재의 인장 및 인발파괴에 대한 안전율을 과대평가 하는 것으로 나타났다.
- 2) 방법 1에 의한 인장파괴에 대한 안전율은 교대하중의 크기가 증가할수록 수치해석결과와의 차이도 증가하였는데, 이는 교대하중으로 인한 연직응력의 증가량을 2:1법을 사용하여 산정하였기 때문이다. 그리고 벽체 저부에서는 방법 1, 2에 의한 인장 및 인발파괴의 안전율이 비슷하였는데, 이는 깊이가 증가할수록 교대하중의 영향이 감소하기 때문이다.
- 3) 이상의 예제 해석결과로 미루어 볼 때 복합중력식 구조물 가정법에 근거하면 보강토 교대의 내적안정성 검토, 즉 보강재의 인장 및 인발파괴에 대한 안전성은 교대하중을 다른 하중과 분리하여 고려하는 방법 1을 사용하여 검토하는 것이 타당하다고 판단된다.

참고문헌

1. Adib, M., Mitchell, J. K. and Christopher, B. (1990), "Finite Element Modeling of Reinforced Soil Walls and Embankments", *Proceedings of Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structure*, Geotechnical Engineering Division, ASCE, Cornell University, Ithaca, June 18-21, Geotechnical Special Publication No. 25, pp. 409~423
2. Boulanger, R. W., Bray, J. D., Chew, S. H., Seed, R. B., Mitchell, J. K. and Duncan, J. M. (1991), "SSCOMPPC : A Finite Element Analysis Program for Evaluation of Soil-Structure Interaction and Compaction Effect", *Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT/91-02*, University of California, Berkeley
3. Colin JFP Jones (1985), *Earth Reinforcement and Soil Structures*, Butterworths Advanced Series in Geotechnical Engineering
4. Duncan, J. M., Bryne, P., Wong, K. S. and Mabry, P. (1980), "Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stress and Movement in Soil masses", *Geotechnical Engineering Research Report No. UCB/GT/80-02*, University of California, Berkeley
5. Juran, I., Schlosser, F., Long N. T. and Legeay, G. (1978), "Full Scale Experiment on a Reinforced Earth Bridge Abutment in Lille", *Proceeding of a ASCE Symposium on Earth Reinforcement*, Pittsburgh, pp. 556~584
6. Mitchell, J. K. and Schlosser, F. (1979), "General Report, Session Number 1.", *Proceedings of International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques*, Paris, pp. 25~62
7. Mitchell, J. K. and Villet, W. C. B. (1987), Reinforcement of Earth Slopes and Embankments, *National Cooperative Highway Research Program Report 290*, Transportation Research Board