뒷채움 지반에 비정착식 띠보강재를 설치한 역T형 옹벽의 현장 계측
Field Measurements of Cantilever Wall with Unattached Strips in the Backfill

이 종구[1], Jong-Ku Lee, 이 만수[2], Man-Soo Lee, 김 명모[3], Myoung-Mo Kim

[1] 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University
[2] 현대건설 기술연구소 선임연구원, Senior Research Engineer, Hyundai Institute of Construction Technology
[3] 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : This paper concerns the distribution of earth pressures on a cantilever wall with unattached reinforcements in the backfill. This type of walls is different from the existing reinforced earth walls in that unattached reinforcements are placed in the backfill of rigid retaining wall such as gravity wall and cantilever wall, instead of connecting reinforcements to the wall segments. Two large-scale prototype tests have been carried out with a 4m high cantilever wall; one with unreinforced backfill, the other with unattached strips in the backfill. The reinforcing effect of unattached strips are discussed based on the earth pressure distribution measured in two large-scale prototype tests. Also, the comparison between measured and predicted earth pressure on a wall with unattached strips are discussed herein to confirm the validity of analytical prediction.

Key Words : Unattached strip, Cantilever wall, Earth pressure distribution

1. 서 론

현재까지 수행된 보강토 옹벽에 대한 연구는 대부분 보강재가 벽체에 연결된 경우에 대하여 수행되었다. 반면에, 몇몇 연구자들은 보강재가 벽체에 연결되지 않은 경우에 대한 연구를 수행하여 중력식 옹벽이나 역T형 옹벽과 같은 강성옹벽의 뒷채움 지반에 벽체에 연결되지 않는 보강재를 삽입하는 새로운 형태의 보강토 옹벽에 대한 가능성을 제시한 바 있다. Hausman and Lee(1978)는 최초로 모형실험을 통하여 벽체와 분리된 보강재에 의한 보강효과를 확인하였고 Saran 등(1992)은 극한평형법을 이용하여 뒷채움 지반에 비정착식 보강재를 설치한 중력식 옹벽에 작용하는 이론적인 토압을 산정하는 방법을 제안한 바 있다. 또한, 한경제(1997)는 Saran 등(1992)의 연구를 확장시켜 뒷채움 지반에 비정착식 보강재를 삽입한 역T형 옹벽에 작용하는 이론적인 토압을 산정하는 방법을 제안한 바 있다. 하지만, 현재까지 비정착식 보강재가 설치된 강성옹벽에 작용하는 토압분포에 대한 현장계측 결과는 제시된 바 없어 이론적인 토압분포에 대한 검증은 아직 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 길이 10m, 높이 4m인 역T형 옹벽을 시공하여 뒷채움 지반을 비정착식 보강재로 보강하지 않은 경우와 보강한 경우에 대한 시험을 수행하여 벽체에 작용하는 토압 및 벽체의 변위, 보강재 인장력 분포를 계측하였다. 계측결과를 바탕으로 비정착식 보강재에 의한 토압감소효과를 파악

하였고 계측된 토압분포와 한경제(1997)가 제안한 이론적인 토압분포를 비교하여 이론적인 토압산정방법의 타당성을 검토하였다.

2. 실내실험

2.1 뒷채움재 실내실험

본 시험옹벽 뒷채움재의 기본적인 성질 및 강도정수를 알아보기 위하여 실내실험을 수행하였는데, 그 결과는 표 1.에 정리되어 있다. 뒷채움재는 통일분류법상으로 *SP*에 속하는 흙으로 비중은 2.65 이며, 최대 건조단위중량은 1.72t/m^3 최적 함수비는 14.1%이다. 압밀비배수(CU) 삼축실험 결과, 뒷채움재의 내부마찰각은 40° 로 나타났다.

표 1. 뒷채움재 실내실험 결과

통일분류	비중	표준다짐 실험결과		내부마찰각
		최대건조 단위중량 ($\gamma_{d,max}$)	최적함수비 (w_{opt})	
SP	2.65	1.72 t/m^3	14.1%	40°

2.2 뒷채움재 적합성 검토

비정착식 보강재를 뒷채움 지반에 삽입한 옹벽에서도 흙-보강재 마찰력에 의하여 벽체에 작용하는 토압이 감소되므로 뒷채움재는 양질의 흙을 사용하여야 한다. 따라서, 본 시험옹벽에 사용된 뒷채움재가 정착식 보강토 옹벽에서 규정된 뒷채움재 기준을 만족하는지 살펴보았다. 실내실험 결과를 바탕으로 뒷채움재의 적합성을 검토한 결과는 표 2.에 나타나 있다. 표 2.를 통하여 알 수 있듯이 선택한 뒷채움재는 보강토 옹벽의 뒷채움재로서 적합한 것으로 판단된다. 시험옹벽에 사용된 보강재는 띠보강재의 하나인 'Friction Tie 50' (폭: 9cm, 두께: 3mm, 인장강도: 50kN)인데, 이 보강재는 폴리에스터 섬유를 폴리에틸렌으로 피복하여 부식에 대한 저항성이 매우 크므로 부식에 대한 검토는 생략하였다.

표 2. 뒷채움재의 적합성 검토

항목	기준	실험결과	적합성 판단
#200체 통과율	15% 이하	4.3 %	적합
소성지수	6% 이하	비소성	적합
내부마찰각	25° 이상	40°	적합

2.3 보강재 인발시험 및 인장시험

옹벽에 변위가 발생하면 뒷채움 지반은 그림 1.과 같이 파괴면을 기준으로 주동영역과 저항영역으로 나뉠 수 있다. 이 때, 비정착식 보강재의 보강효과는 저항영역의 흙-보강재 마찰력이 주동영역의 흙-보강재 마찰력보다 커서 보강재가 저항영역에 의하여 고정되어 있는 상태에서 주동영역의 흙-보강재 마찰력에 의하여 발생한다.

주동상태의 흙-보강재 마찰각은 그림 1.에 나타난 바와 같이 회전판을 일정한 각도로 회전시킨 후 보강재를 인발하여 인발력과 인발변위를 측정하여 산정하였다. 실험결과는 그림 2.에 정리되어 있는데 벽

체상단 변위에 따라 흙-보강재 마찰각이 변화하는 것으로 나타나 주동상태의 흙-보강재 마찰각은 실험에서 얻어진 최소값으로 결정하였다. 따라서, 그림 2.을 통하여 정지상태 및 주동상태의 흙-보강재 마찰각은 각각 25° 와 14° 로 결정되었다.

보강재에 유발된 인장변형율과 인장력과의 관계를 알아보기 위하여 ASTM D 4595에 의거한 보강재 인장시험을 수행하여 그림 3.과 같은 관계곡선을 얻었다. 그림 3.을 통하여 보강재에 설치된 변형율 게이지에서 얻어진 인장변형율을 보강재에 유발된 인장력으로 환산할 수 있다.

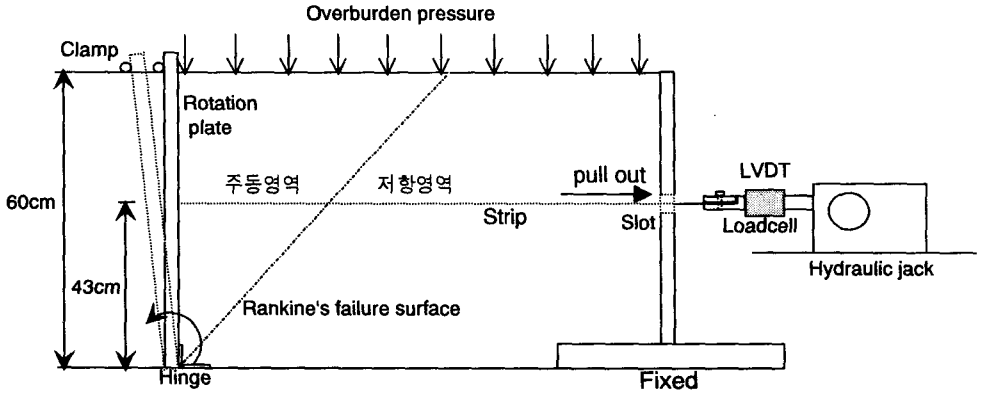

그림 1. 보강재 인발시험 장치

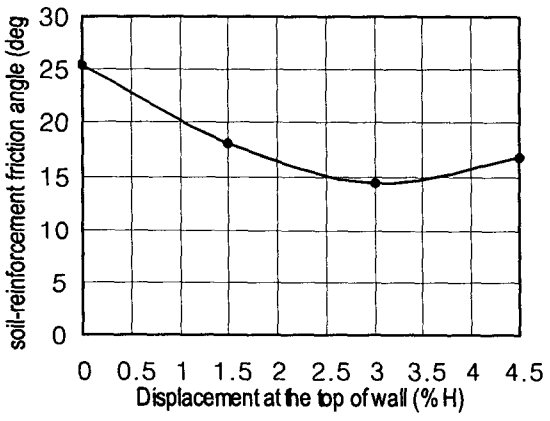

그림 2. 보강재 인발시험 결과 (H: 벽체높이)

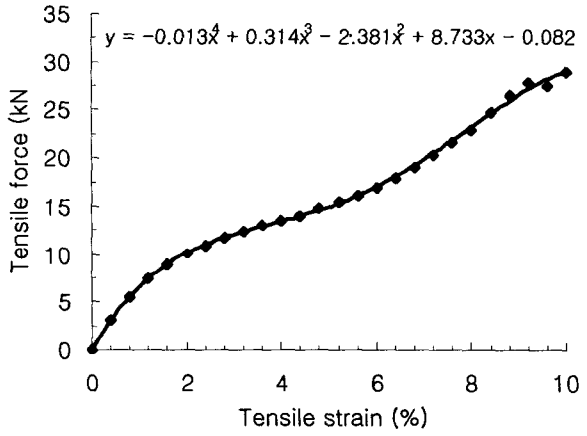

그림 3. 인장변형율-인장력 관계곡선 및 관계식

3. 실규모 옹벽시험

3.1 시험옹벽의 시공

본 시험옹벽은 높이 4.0m이고 뒷굽길이가 1.0m인 역T형 옹벽으로 측면도는 그림 4.에 나타나 있다. 그림 4.에서 알 수 있듯이 옹벽의 저판아래로 1.0m를 굴착하여 뒷채움 흙과 동일한 흙을 채워 기초지반을 조성하고 저판은 근입시키지 않고 기초지반 위에 설치하였다. 또한, 뒷채움 지반의 배수는 그림 4.에 나타나있는 바와 같이 집수관을 선 시공 후, 그 위에 필터를 설치하고 암사면부에 잡석층을 설치하여 배수가 원활히 이루어지도록 하였다. 시험옹벽의 설계시 전도 및 활동에 대한 안전율은 각각 1.83과 1.54이었다.

뒷채움 지반은 1층의 두께를 30cm로 하여 중량 1ton 롤러를 이용하여 상대다짐도 90%이상이 되도록 조성하였다. 이 때, 다짐으로 유발된 토압이 벽체에 직접 영향을 주지 않도록 벽체와 롤러와의 거리는

15cm를 유지하였고 롤러와 롤러의 다짐 겹침폭은 롤러폭의 1/3이상을 유지하였다. 다짐횟수는 들밀도시험을 수행하여 그림 5.와 같이 다짐횟수와 건조단위중량과의 관계를 도시하여 4회로 결정하였다.

한경제(1997)는 비정착식 보강재가 설치된 역T형 옹벽에 대한 모형실험을 통하여 비정착식 보강재의 길이는 벽체높이의 0.6배 이상이 되어야하고, 보강재-벽체의 분리거리는 역T형 옹벽 뒷굽길이의 1/3 이내가 될 것을 제안하였다. 이에 따라 보강재 길이(L)은 그림 4.에 나타난 바와 같이 벽체높이의 1.0배 이상이 되도록 하였고 보강재는 벽체에 바짝 붙여서 설치하여 보강재-벽체의 분리거리가 0m가 되도록 하였으며 보강재는 수직간격(S_v) 0.6m, 수평간격(S_h) 1.0m로 설치하였다. 그림 6.은 뒷채움 지반에 비정착식 보강재를 설치한 것을 보여주고 있다.

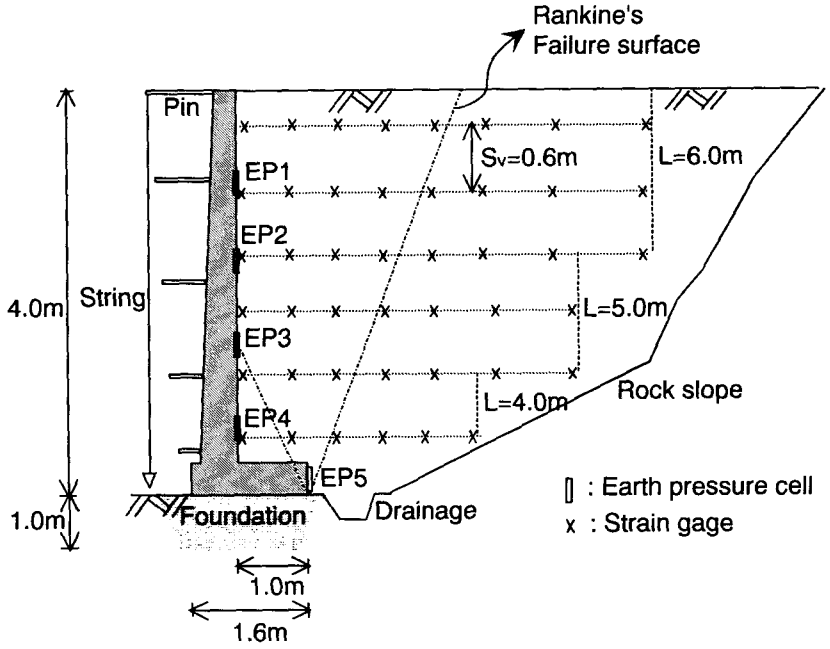

그림 4. 시험옹벽의 측면도 (L: 보강재 길이, S_v: 보강재 수직간격)

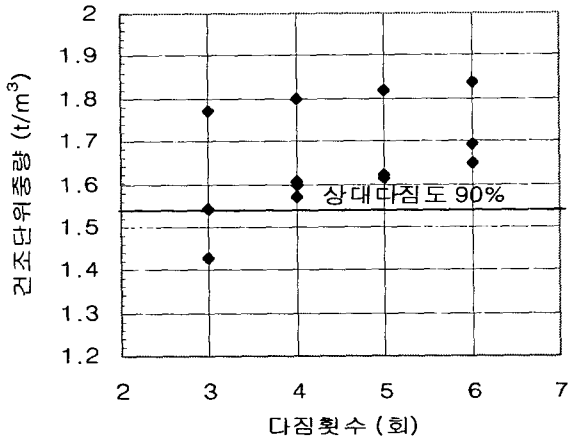

그림 5. 다짐횟수의 결정

그림 6. 비정착식 보강재의 설치

3.2 시험옹벽의 계측

벽체에 작용하는 토압을 측정하기 위하여 총 5개의 토압계를 사용하였다. 사용한 토압계는 직경이 22.9cm이고 두께는 0.99cm이며 진동현(Vibrating wire) 형식의 압력변환기를 통하여 토압을 데이터 로

거로 전달한다. 토압계는 그림 7.과 같이 두께 1.6cm의 반력판을 제작하여 에폭시와 나사를 이용하여 반력판에 고정시킨 후, 반력판을 벽체에 고정시킴으로서 벽체에 부착하였다. 토압계는 시험을 시작하기 전에 수압을 이용하여 보정하였다.

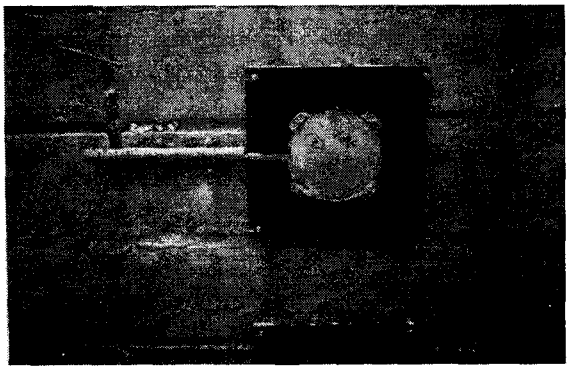

그림 7. 반력판을 이용하여 토압계를 설치한 모습

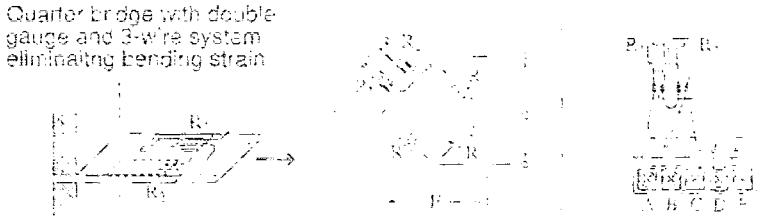

그림 8. 휨에 의한 변형율을 상쇄하기 위한 게이지 연결방법

벽체의 변위는 그림 4.에 나타나 있는바와 같이 벽체 전면부에 회전핀 설치하고 회전핀에 낚시줄을 이용하여 추를 매단 다음 이를 고정된 기름통에 떨어뜨려 측정하였다.

보강재에 유발되는 인장 변형율은 보강재에 변형율 게이지를 부착하여 측정하였다. 사용한 변형율 게이지는 전기저항식 게이지로서 최대 10%의 변형율까지 측정 가능하다. 본 시험에서 측정하고자 하는 것은 흙과 보강재의 마찰에 의하여 보강재에 유발되는 인장변형율이므로 보강재의 휨에 의한 인장 또는 압축변형율을 상쇄하기 위하여 그림 8.과 같이 보강재의 양면에 변형율 게이지를 부착한 다음, 두 개의 게이지로 quarter bridge를 구성하여 데이터 로거에 연결하였다.

4. 시험옹벽 계측결과

4.1 토압분포

실규모 옹벽시험은 뒷채움 지반을 비정착식 보강재로 보강하지 않은 경우와 보강한 경우에 대하여 수행되었다. 그림 9.는 뒷채움 지반이 보강된 경우에 대한 시간에 따른 토압의 변화를 나타내고 있다. 그림 10.은 두 번의 실험을 통하여 계측된 토압분포와 한경제(1997)에 의하여 제안된 이론해석방법에 의하여 예측된 토압분포를 나타내고 있고 표 3.은 계측된 토압의 합력과 이론해에 의하여 예측된 토압의 합력, 그리고 계측된 옹벽 상단부에서의 변위를 나타내고 있다. 한경제(1997)가 비정착식 보강재를 삽입한 역T형 옹벽에 대하여 제안한 이론해석 방법에서 비정착식 보강재를 삽입하지 않고 벽면 마찰력을 고려하지 않으면 Rankine의 주동토압과 같으므로 뒷채움 지반을 보강하지 않은 경우에 대한 이론적인 토압분포로서 Rankine의 주동토압을 이용하였다. 그림 10.을 통하여 뒷채움 지반을 보강하지 않은 경우는 옹벽 하단부에서 상당히 큰 토압이 계측되었지만 뒷채움 지반을 보강한 경우는 비정착식 보강재에 의한

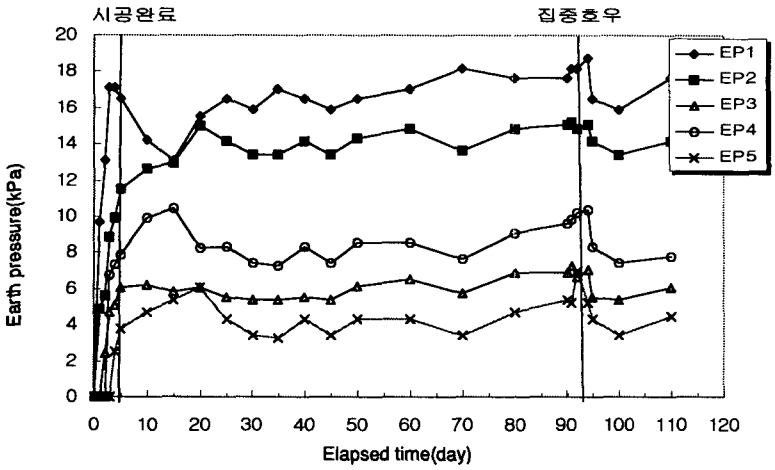

그림 9. 시간에 따른 토압의 변화 (EP: 토압계 번호)

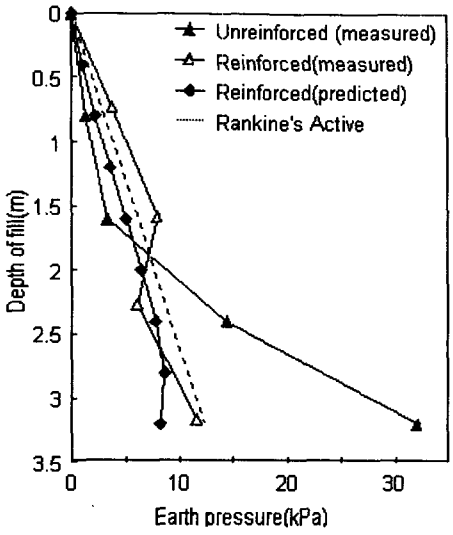

그림 10. 계측된 토압분포와 예측된 토압분포의 비교

보강효과로 인하여 옹벽 하단부의 토압이 크게 감소됨을 알 수 있다. 하지만, 옹벽 상단부에서는 비정착식 보강재를 삽입한 경우에 더 큰 토압이 나타났는데 이는 비정착식 보강재의 보강효과로 인하여 옹벽 상단부의 변위가 보강재를 삽입하지 않은 경우보다 작게 나타남으로서 유발된 것으로 보인다. 또한, 그림 10.을 통하여 한경제(1997)에 의하여 제안된 이론해석에 의한 토압은 계측된 토압을 과소평가하는 것으로 나타났으나 전체적인 토압분포는 유사함을 알 수 있다.

각각의 경우에 대한 토압합력 및 토압감소 효과는 표 3.에 정리되어 있다. 표 3.을 통하여 비정착식 보강재에 의하여 시험옹벽에서 계측된 토압은 29.8% 감소됨을 알 수 있고 이론해석을 통하여 예측된 토압은 23.0% 감소됨을 알 수 있다. 따라서, 본 시험옹벽에 대하여 이론적으로 예측된 토압분포는 신뢰성 있는 결과를 나타낸다고 판단된다.

표 3. 토압합력과 옹벽상단 변위의 비교

항 목		계측	예측
토압합력	뒷채움재를 보강하지 않음	2.82 t/m	2.00 t/m
	뒷채움재 보강	1.98 t/m	1.54 t/m
	보강효과	29.8 %	23.0 %
옹벽상단 변위	뒷채움재를 보강하지 않음	13.0mm	-
	뒷채움재 보강	7.5mm	-

4.2 보강재 인장력 분포

보강재에 설치된 변형율 게이지로부터 보강재 인장 변형율을 측정하여 그림 11.과 같은 보강재 인장력 분포를 얻었다. 그림 11.을 통하여 흙-보강재 마찰력은 주로 Rankine의 파괴쐐기 안에서 나타남을 알 수 있다. 정착식 보강토 옹벽의 경우 전면판에 작용하는 토압을 모두 보강재 인장력으로 감당해야하기 때문에 보강재 깊이별 최대인장력은 주동토압 또는 정지토압 이상이 되도록 설계되므로 깊이 z에서의 보강재 최대인장력은 식(1)과 같이 산정한다.

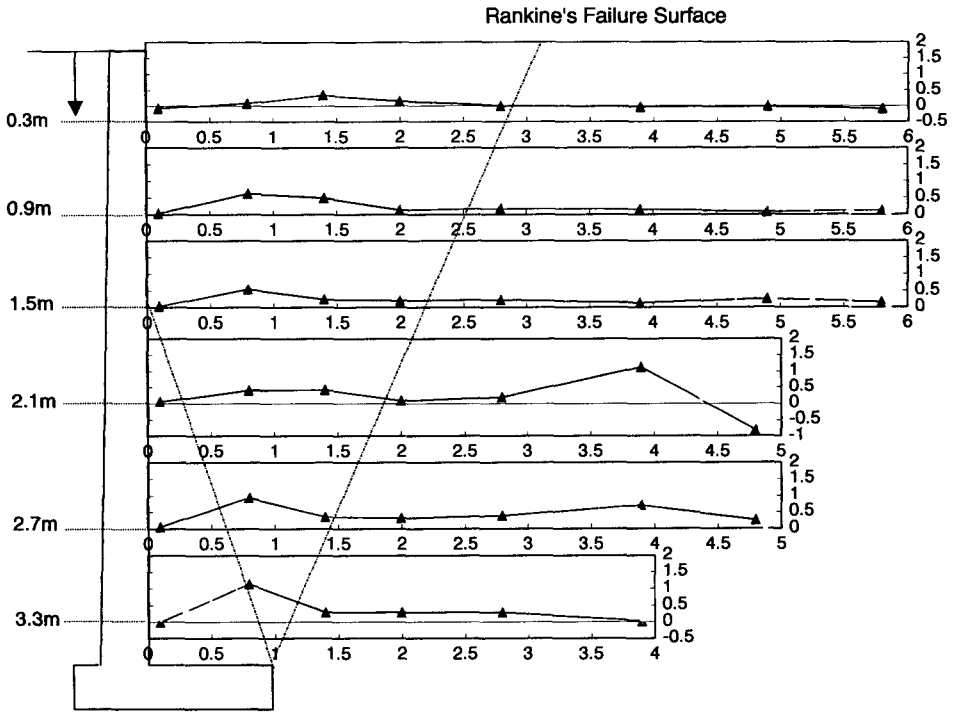

그림 11. 보강재 인장력 분포

$$\frac{T_{\max}}{S_h} = S_v K(z) \gamma z \tag{1}$$

여기서, $K(z)$: 깊이 z에서의 토압계수 ($K_a \leq K(z) \leq K_0$)

S_h, S_v : 각각 보강재 수평간격 및 수직간격

K_a, K_0 : 각각 주동토압계수 및 정지토압계수

계측된 보강재 깊이별 최대인장력($T_{\max}$) 분포와 식(1)에 의한 최대인장력 분포는 그림 12.에 나타나 있다. 그림 12.을 통하여 보강재를 벽체와 연결하지 않는 경우 최대인장력은 벽체에 연결한 경우에 비하여 크게 작아짐을 알 수 있어 보강재 효율은 떨어지는 것으로 판단된다.

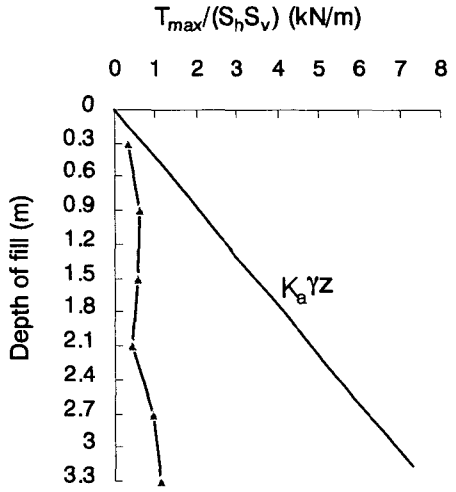

그림 12. 깊이별 최대 보강재 인장력 분포

5. 결론

높이 4.0m인 역T형 옹벽의 뒷채움재를 비정착식 보강재로 보강하지 않은 경우와 보강한 경우에 대한 실규모 옹벽 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 뒷채움 지반을 보강하지 않은 경우와 보강한 경우의 토압분포를 비교하여 비정착식 보강재의 토압 감소효과는 벽체 하단부에서 뚜렷이 나타남을 알 수 있었다.
(2) 본 시험옹벽의 뒷채움 지반에 수직간격 0.6m, 수평간격 1.0m로 비정착식 보강재를 삽입함으로서 벽체에 작용하는 토압합력을 약 30%정도 감소시킬 수 있었다.
(3) 역T형 옹벽의 뒷채움재에 비정착식 보강재를 삽입한 경우에 대하여 한경제(1997)가 제안한 이론적인 토압분포를 계측된 토압분포와 비교한 결과, 이론적인 토압분포는 타당성 있는 결과를 제시하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부의 '97 연구개발사업인 "옹벽의 설계 자동화 기법에 관한 연구(R&D/970007-4)"의 일환으로 수행된 것으로 건설교통부와 현대건설(주), (주)우대기술단의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한경제 (1997). 역T형 옹벽에 대한 비정착식 띠보강재의 보강효과 분석, 박사학위논문, 서울대학교.
2. Hausmann, M. R., and Lee, K. L. (1978). Rigid model wall with soil reinforcement. *Proc. Symp. On Earth Reinforcement*, ASCE, pp.400-427.
3. Saran, S., Garg, K. G., and Bhandary, R. K. (1992). Retaining wall with reinforced cohesionless backfill. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 118(12), pp.1869-1888.