

대형인발시험을 이용한 수동지지저항 부재가 설치된 강재스트립 보강재의 인발저항 평가

Pullout Resistance of Steel Strip Reinforcement with Transverse Members using Large-scale Pullout Tests

이 광 우¹ Lee, Kwang-Wu 조 삼 덕² Cho, Sam-Deok
한 중 근³ Han, Jung-Geun 홍 기 권^{4*} Hong, Ki-Kwon

ABSTRACT

In this study, the large-scale pullout tests are conducted to evaluate pullout resistance of steel strip reinforcement with transverse members. The test results clearly showed the passive effect by normal stress. This suggests that both friction resistance and passive resistance by normal stress should be taken into account in the evaluation of pullout resistance for design. Therefore, The evaluation results confirmed that the developed steel strip reinforcement with transverse members depend heavily on passive resistance by normal stress.

요 지

본 연구에서는 강재스트립 보강재에 횡방향으로 연속되는 지지부재가 결속된 새로운 형태의 보강재에 대하여 대형인발시험을 수행하여 인발저항력을 평가하였다. 시험결과, 지지저항은 수직응력에 대한 영향을 받는 것으로 확인되었으며, 이는 인발저항 평가시 마찰저항과 지지저항을 각각 산정하여 설계에 반영해야 함을 의미한다. 따라서 본 실험대상 보강재의 지지부재에 의한 지지저항강도를 산정한 결과, 수직응력에 따른 수동지지저항에 의한 의존도가 매우 높은 것으로 확인되었다.

Keywords : Steel strip reinforcement, Pullout test, Passive Resistance, Pullout Resistance, Interaction factor

1. 서 론

1980년대 초 국내에 처음으로 보강토옹벽이 도입되었을 당시에는 강재스트립 보강재가 사용되었으나, 강재의 부식 문제가 제기되면서 국내에서 크게 활성화되지 못하였다. 이후 1990년대 중반에 토목섬유를 이용한 보강토옹벽이 도입되면서, 기존 콘크리트옹벽을 급속도로 대체하고 있으며, 최근에는 다양한 형태의 보강재가 개발되어 현

장에 적용되고 있다. 국내에서 적용되고 있는 보강재를 재질별로 구분하면, 우선 금속재 보강재로 강재스트립 보강재, 강그리드, 와이어 메쉬, 앵커형 강봉 보강재 등이 있으며, 토목섬유 보강재로는 지오텍스, 락 매트, 지오텍스타일 등이 있다. 이와 같은 다양한 보강재 중 국내에서는 지오텍스 보강재를 적용한 보강토옹벽이 가장 많이 적용되고 있지만, 뒤통수 흩의 사용성 제한에 따른 장기설계인장강도 감소계수를 크게 적용해야 하는 등의

1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology)
2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원 (Member, Research Fellow, Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology)
3 정희원, 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang Univ.)
4* 정희원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang Univ., E-Mail: kkhong@wm.cau.ac.kr)

문제가 발생한다.

보강토옹벽은 지반과 보강재 사이에서 작용하는 보강 메커니즘에 의해 구조물의 안정성이 유지되며, 이 때 보강 토옹벽의 내적안정성에 있어서 보강재의 인발저항은 중요한 평가요소 중 하나이다. 보강재의 인발저항은 일련의 실험적 방법을 통하여 보강재와 지반 사이에서 발생하는 인발저항력으로 평가하게 되며, 크게 지반과 보강재 표면 사이의 마찰저항력과 보강재의 지지부재에 의한 지지저항력으로 구분된다(Jewell et al., 1990; Matsui et al., 1997; 홍원표 등, 2001). 즉, 보강토옹벽 도입 초기에 적용되었던 강재스트립 보강재의 인발저항은 마찰저항력에만 의존되었기 때문에 부식 문제뿐만 아니라 뒤채움 흙 및 보강재의 사용성 제한과 경제성 등의 다양한 문제가 발생되었다. 이와같은 문제를 개선하기 위하여 보강재의 인발저항력을 향상시킨 돌기형 강재스트립 보강재 및 'L'자 형의 버팀재를 결속시킨 보강재 등과 같은 다양한 형태의 지지부재가 형성된 강재스트립 보강재가 응용개발되고 있다(김홍택 등, 2003).

본 연구에서는 강재스트립 보강재에 횡방향으로 연속되는 지지부재가 결속된 새로운 형태의 보강재에 대하여 대형인발시험을 수행하여 인발저항력을 평가하였으며, 이를 바탕으로 기존에 적용되던 강재스트립 및 돌기형 강재스트립 보강재의 인발저항력과 비교·분석하였다. 또한 횡방향 지지부재에서 발휘되는 수동지지저항력을 평가하여 실험대상 보강재의 인발저항 평가방법에 대하여 고찰하였다.

2. 강재스트립 보강재의 인발저항 평가

보강재의 인발저항은 보강재와 흙 사이의 마찰저항과 보강재의 지지부재에 의한 수동저항에 의해 유발된다. 국내에서 보강토옹벽의 설계 및 시공에 있어서 주로 적용되고 있는 FHWA(2001) 설계기준에 의한 인발저항력(P_r)은 보강재를 보강토체로부터 인발시키는데 요구되는 최대 인발하중으로 정의하고 있으며, 식 (1)과 같이 산정된다.

$$P_r = F^* \cdot \alpha \cdot \sigma'_v \cdot L_e \cdot C \quad (1)$$

여기서, F^* : 인발저항계수

(= *Passive Resistance* + *Frictional Resistance*)

α : Scale effect factor (비신장성 보강재의 경우 = 1.0)

σ'_v : 유효수직응력(kN/m²)

L_e : 저항영역 내 보강재 유효정착길이(m)

C : 보강재의 유효 면(strip, grid & sheet = 2)

$$F^* = F_q \cdot \alpha_\beta + \tan \rho \quad (2)$$

여기서, F_q : 지지력계수

α_β : 지지부재의 수동지지저항 계수

ρ : 흙/보강재 마찰각(°)

보강재의 인발저항 평가에 있어서 인발저항력에 영향을 미치는 인발저항계수(F^*)는 마찰저항뿐만 아니라 지지저항특성을 포함하고 있기 때문에 식 (2)와 같은 이론식을 사용할 수 있다. 하지만 보다 정확한 설계적용을 위해서는 인발시험을 통한 평가가 이루어져야 한다.

한편, 인발저항력이 마찰저항으로만 발휘되는 경우에 인발저항강도(τ_p)는 식 (3)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\tau_p = \frac{P_r}{2A} \quad (3)$$

여기서, P_r : 최대인발력(kN)

A : 보강재 단면적(m²)

3. 인발시험

수동지지저항 부재가 설치된 강재스트립 보강재의 인발저항강도를 평가하기 위하여 일련의 대형인발시험을 수행하였으며, 시험방법은 FHWA(2001)에서 제안하고 있는 시험법을 참조하였다.

3.1 실험장비 및 보강재

본 연구에서 사용한 대형인발시험기는 그림 1 및 그림 2와 같다. 시험기는 토조와 공기압에 의한 구속하중 재하장치, 인발하중 재하장치, 데이터수집부 등으로 구성되어 있다. 토조는 길이 160cm, 폭 76cm, 깊이 550cm이며, 이는 ASTM D 6706-1(2003)의 최소 권고치(길이×폭×깊이 = 61cm×46cm×30.5cm) 보다 크게 제작되었으며, 700 kN/m²의 내압에 견딜 수 있는 강성을 가지고 있다. 토조 내부에 설치된 보강재의 내부변위는 6지점까지 측정할 수

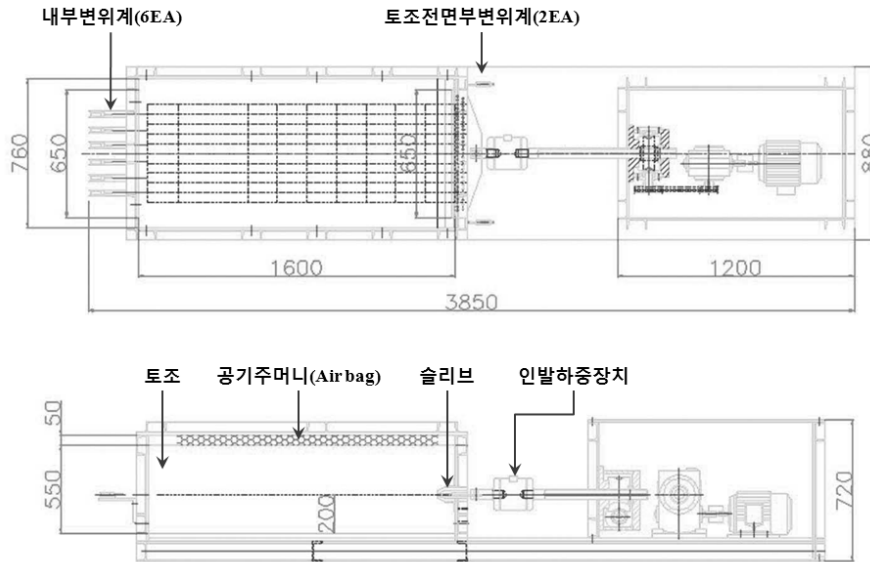


그림 1. 대형인발시험기 모식도

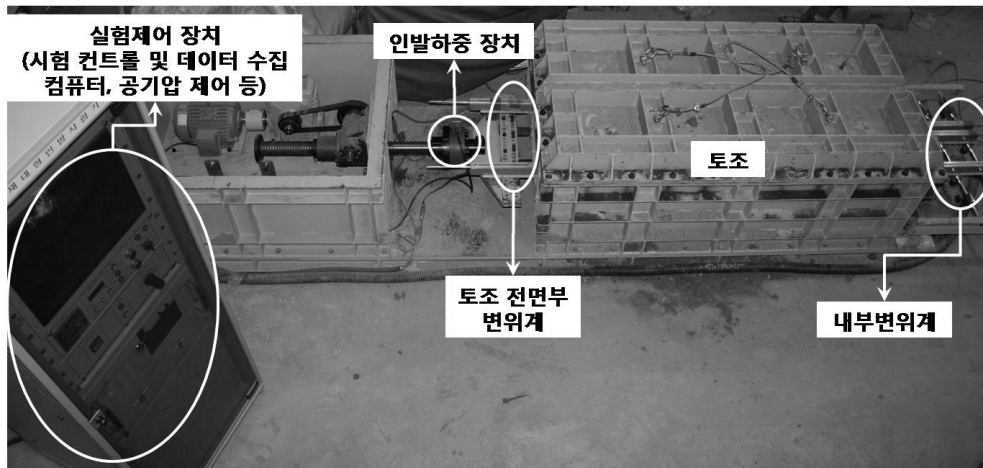


그림 2. 대형인발시험기

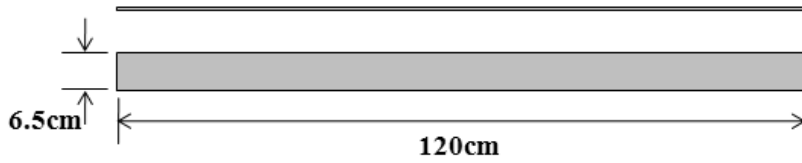
있도록 하였으며, 구속압력은 공기주머니(air bag)를 이용하여 최대 200 kN/m^2 까지 재하할 수 있다. 또한 인발변위는 최대 220mm까지 측정할 수 있고, 인발하중은 최대 200kN까지 사용할 수 있도록 설계되어 있다.

시험에 사용된 보강재는 총 3종류의 보강재로서, 기존의 강재스트립 및 돌기형 강재스트립 보강재와 본 연구를 통해 제시된 횡방향 지지부재가 결속된 강재스트립 보강재를 사용하였다. 각 보강재의 형상 및 외관은 그림 3에 나타낸바와 같으며, 횡방향 지지부재를 결속하기 위한 강재스트립의 천공직경은 11mm이고, 지지부재의 직경은 10mm이다(그림 3(c) 참조). 그리고 강재스트립 보강재의 두께는 5mm이고, 돌기형의 경우에는 4mm이다.

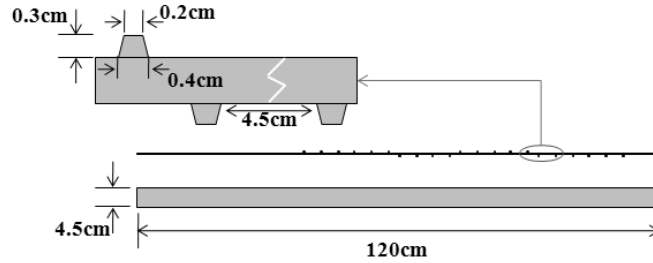
3.2 모형지반의 공학적 특성

본 실험에서 사용한 흙시료의 공학적 특성은 그림 4~그림 6과 같으며, 이를 정리하면 표 1에 나타낸 바와 같다. 표 1에서 보는바와 같이 200번체 통과율이 4.07%이고, 통일분류법상 SW로 분류할 수 있다. 또한 흙시료의 비중(G_s)은 2.67이고, 소성지수는 N.P로 나타났다.

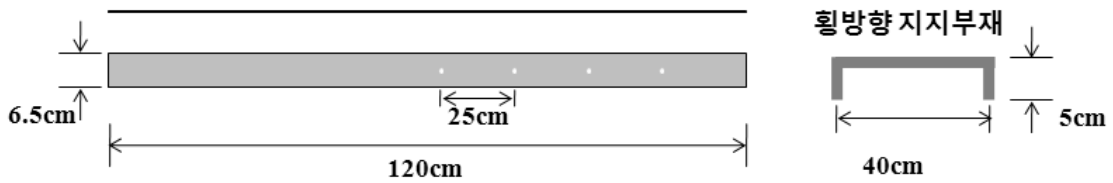
표준다짐시험(A다짐) 결과와 흙시료의 강도특성 평가를 위한 직접전단시험 결과는 각각 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5에서 보는바와 같이 다짐시험 결과, 최적함수비(OMC)와 최대건조단위중량($\gamma_{d,max}$)는 각각 14.05%와 18.82 kN/m^3 인 것으로 평가되었다. 또한 직접전단시험 결과, 흙시료의 강도정수는 점착력과 내부마찰각이 각각 8.66 kN/m^2 와 35.5° 인 것으로 확인되었다.



(a) 강재스트립 보강재



(b) 돌기형 강재스트립 보강재



(c) 강재스트립 + 횡방향 지지부재

그림 3. 보강재 종류에 따른 형상

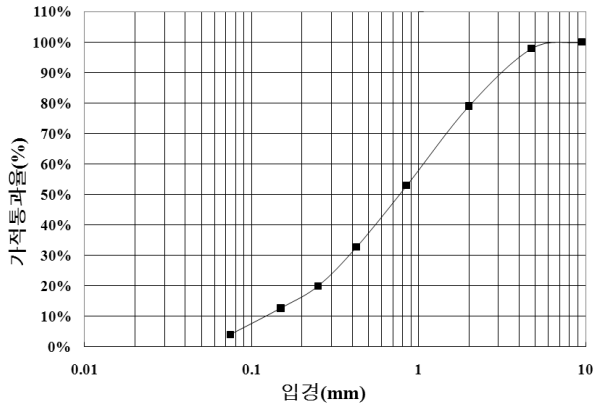


그림 4. 흙시료의 입도분포곡선

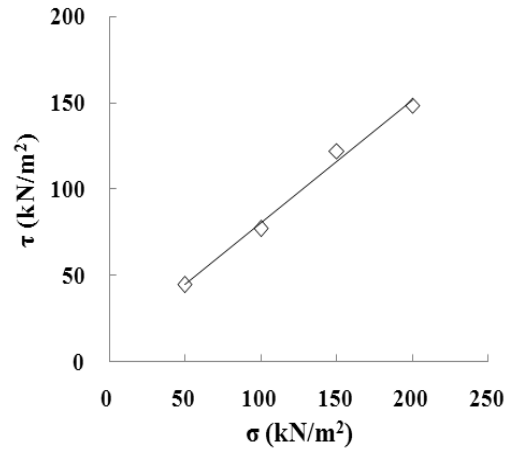


그림 6. 직접전단시험 결과

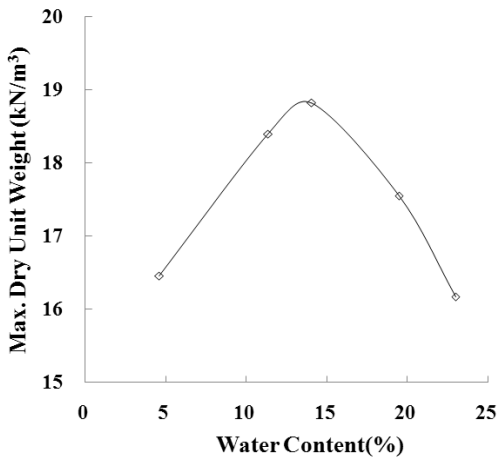


그림 5. 흙시료의 다짐곡선

3.3 실험내용 및 방법

인발시험은 표 2에서 보는바와 같이 마찰저항만이 발현되는 강재스트립 보강재 및 지지저항이 동시에 발현되는 돌기형과 지지부재가 결속된 강재스트립 보강재에 대하여 수행하였다. 보강재에 작용하는 수직응력은 흙 시료의 최대건조단위중량을 반영하여, 뒤채움 높이를 약 2.7m~8.0m에 해당하는 조건으로서 각각 50, 100 및 150kN/m²를 적용하였다. 인발시험시 각 보강재의 설치간격은 토조의 크기 및 지지부재를 고려하여 400mm로 하였고, 지지

표 1. 흙시료의 물리적 및 공학적 특성

비중 (G_s)	자연 함수비 ($w_n, \%$)	소성지수 ($PI, \%$)	U.S.C.S	다짐시험		직접전단시험	
				최적함수비 (OMC, %)	최대건조단위중량 ($\gamma_{d_{max}}, kN/m^3$)	점착력 ($c, kN/m^2$)	내부마찰각 ($\phi(^{\circ})$)
2.67	9.58	N.P.	SW	14.05	18.82	8.66	35.53

표 2. 인발시험 내용

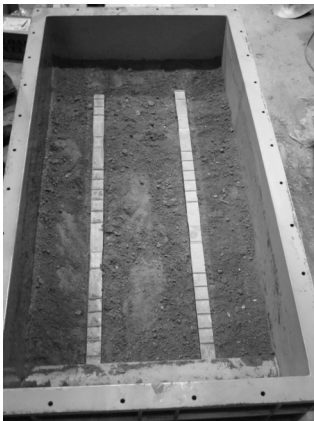
수직응력 (kN/m^2)	보강재 조건
50, 100, 150	강재스트립 2열
	돌기형 강재스트립 2열
	천공 강재스트립 2열 + 지지부재 2개

부재의 결속은 강재스트립 보강재의 천공구멍을 통과하여 35mm 정도가 지반내에 삽입되도록 설치하였다. 한편, 인발시험 중에 토조내부의 벽면마찰의 영향을 최소화하기 위해, 오일(oil)과 비닐랩을 이용하여 마찰저감처리를 실시하였으며, 인발하중재하는 1mm/min의 변위제어 방식으로 하였다.

4. 인발시험 결과

4.1 인발력-인발변위 관계

각 보강재에 따른 인발시험결과를 바탕으로 인발력-인발변위 관계를 그림 8에 나타내었으며, 이를 통하여 인발력을 산정하였다. 각 수직응력에 따른 인발력은 FHWA (2001) 설계기준에 나타나 있는 비신장성 보강재의 저항 특성을 반영한 기준변위량을 참조하여 선정하였다. FHWA (2001) 설계기준에 의하면, 마찰저항만 발현되는 강재스트립 보강재의 기준변위는 1.2mm이며, 마찰저항과 지지저항이 동시에 발현되는 비신장성 보강재의 경우에서, 돌



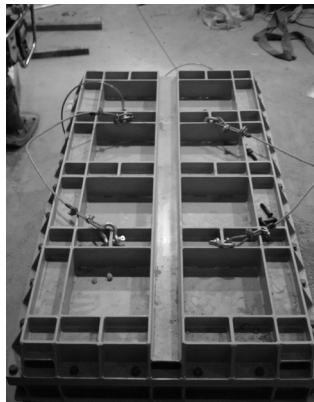
(a) 하부층 다짐 및 보강재 포설
(좌측 : 돌기형, 우측 : 천공강재스트립 + 지지부재)



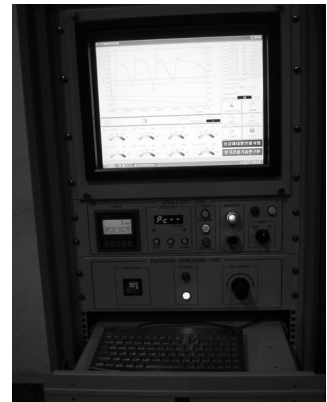
(b) 상부층 다짐



(c) Air pressure bag 설치

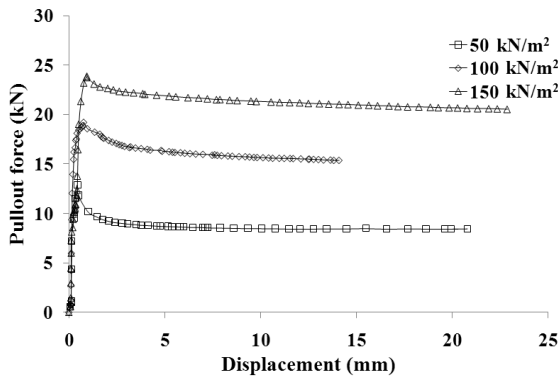


(d) 토조 조정

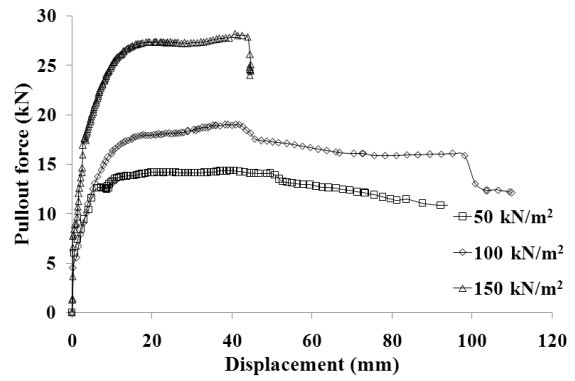


(e) 실험제어

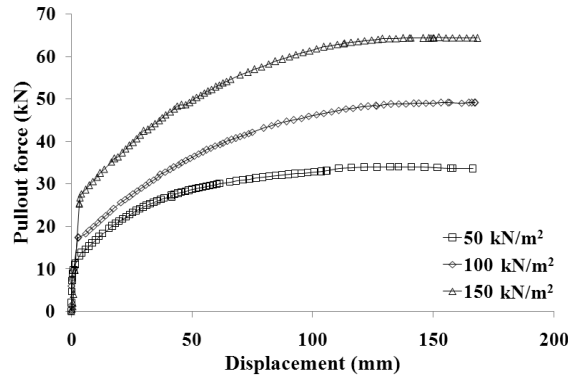
그림 7. 인발시험 과정



(a) 강재스트립 2열



(b) 돌기형 강재스트립



(c) 천공 강재스트립 2열 + 지지부재 2개

그림 8. 보강재 형태에 따른 인발시험 결과

표 3. 수직응력에 따른 인발력 산정결과

보강재 형태	기준 인발변위량 (mm)	수직응력 ($\sigma_v, kN/m^2$)	최대인발력 (P_r, kN)
강재스트립 2열	1.2	50	12.90
		100	19.25
		150	23.90
돌기형 강재스트립 2열	12	50	13.72
		100	17.05
		150	26.06
천공 강재스트립 2열 + 지지부재 2개	50	50	28.62
		100	36.56
		150	49.78

기형 강재스트립은 12mm, mesh형태의 보강재의 경우에는 12~50mm의 범위를 기준으로 저항특성이 나타나는 것으로 제안되었다. 따라서 본 실험에서는 강재스트립 보강재의 경우, 모든 수직응력에 있어서 1.2mm 내에서 최대 인발력이 나타났기 때문에 최대값을 인발력으로 적용하였고, 돌기형의 경우에는 12mm의 인발변위에 해당하는 인발력을 적용하였다. 그리고 횡방향 지지부재가 설치된 경우에는 지지부재가 강재스트립 보강재에 mesh형태로 결속되기 때문에 인발변위를 50mm 기준으로 하여 인발력

을 선정하였다. 각 보강재 형태에서의 수직응력에 따른 인발력 산정결과를 표 3에 나타내었다.

4.2 인발저항강도 평가

기준변위량을 통해 산정된 최대인발력을 바탕으로 수직응력에 따른 인발저항강도를 산정하였다. 그림 9 및 표 4에서 보는바와 같이, 마찰저항만이 인발저항력으로 발현되는 강재스트립 보강재의 인발강도정수는 $24.62kN/m^2$ 와

표 4. 인발강도정수 산정 결과

보강재 종류	수직응력 ($\sigma_v, kN/m^2$)	인발저항강도 ($\tau_p, kN/m^2$)	인발강도정수	
			인발점착력 ($c_p, kN/m^2$)	인발저항각 ($\delta_p, ^\circ$)
강재스트립 2열	50	41.35	24.62	19.39
	100	61.70		
	150	76.60		
돌기형 강재스트립 2열	50	63.52	30.57	29.73
	100	78.94		
	150	120.65		
천공 강재스트립 2열 + 지지부재 2개	50	91.73	55.00	34.14
	100	117.18		
	150	159.55		

표 5. 지지부재 2개에 대한 지지저항 강도 산정 결과

구 분	수직력 (kN/m)	수동지지저항력 ($P_{pr}, kN/m$)	지지저항 강도정수	
			지지점착력 ($c_{pr}, kN/m$)	지지저항각 ($\delta_{pr}, ^\circ$)
지지부재 2개	50	39.30	23.69	14.3
	100	43.28		
	150	64.70		

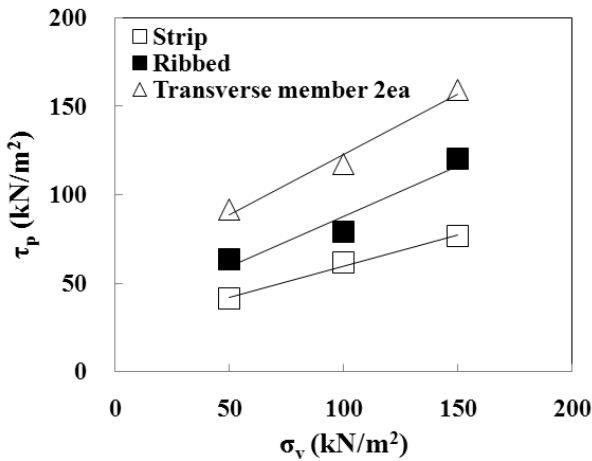


그림 9. 수직응력-인발저항강도 관계

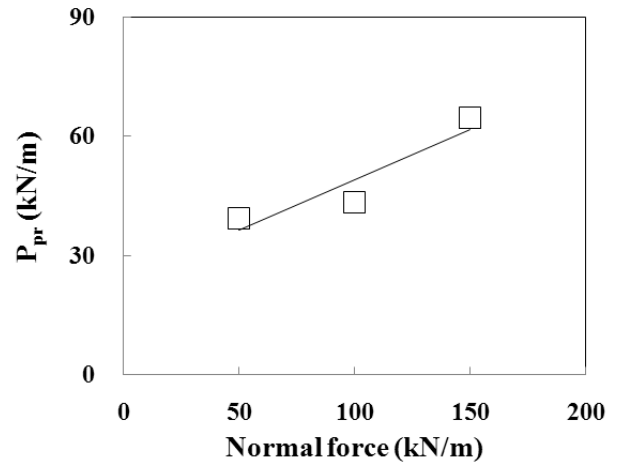


그림 10. 지지부재에 의한 수직력-수동지지저항력 관계

19.4°로 평가되었다. 그리고 마찰저항과 지지저항이 동시에 발생하는 경우, 돌기형 강재스트립의 인발강도정수는 30.57kN/m²와 29.7°, 횡방향 지지부재가 결속된 강재스트립은 55kN/m²와 34.14°인 것으로 확인되었다. 이 때 돌기형과 횡방향 지지부재가 결속된 보강재의 인발저항강도를 강재스트립 결과와 비교하기 위하여 식 (3)을 이용하여 인발저항강도를 산정하였다. 이와 같이, 대형인발시험을 통하여 산정된 횡방향 지지부재가 결속된 경우의 인발저항강도는 강재스트립 및 돌기형에 비하여 매우 큰 인발저항 특성이 나타나는 것으로 확인되었다.

강재스트립 및 돌기형의 경우는 인발저항영역 내에 있는 보강재의 길이(L_e)가 증가할수록 인발저항력이 증가되기 때문에, 마찰저항은 L_e 의 변화에 따른 영향을 고려하여

인발 설계정수가 산정되어야 한다. 그러나 지지저항은 L_e 의 변화와 무관하게 수직응력만의 영향을 받기 때문에, 본 연구에서 적용한 지지부재가 설치된 강재스트립 보강재는 마찰저항과 지지저항을 각각 산정하여 설계에 반영해야 한다. 따라서 인발시험결과를 통하여 지지부재가 설치된 강재스트립의 최대인발력에서 지지부재가 없는 조건에서의 최대인발력을 제외하면, 지지부재만의 지지저항력을 산정할 수 있다. 지지부재는 설계 및 시공시 횡방향으로의 연속성을 가지고 있기 때문에 앞서 산정된 지지력을 단위 폭으로 환산하여 수동지지저항력(P_{pr})으로 평가할 수 있다. 이를 통하여 지지부재 2개가 설치된 조건에서의 수동 지지저항력을 산정할 수 있으며, 지지부재에 의한 수직력에 따른 수동지지저항력의 관계를 그림 10과 표 5에 나타

내었다. 따라서 대형인발시험 결과, 지지부재 설치로 인한 인발저항강도 증가량을 지지저항 강도정수로 표현하면 지지점착력(c_{pr})과 지지저항각(δ_{pr})이 각각 23.69kN/m와 14.3°인 것으로 평가되었다.

5. 결 론

본 연구는 강재스트립 보강재에 횡방향으로 연속되는 지지부재가 결속된 새로운 형태의 보강재에 대하여 대형 인발시험을 수행하여 인발저항력을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 마찰저항만이 발현되는 강재스트립 보강재와 마찰저항과 지지저항이 동시에 발현되는 돌기형 보강재의 저항특성을 반영한 기준변위량을 참조하여 선정한 최대인발력이 큰 차이가 없는 점을 고려하여 인발저항 강도를 산정한 결과, 강재스트립 보강재에 비하여 크기가 작음에도 불구하고 돌기형 보강재의 인발저항강도가 크게 산정되었다. 이와 같은 이유는 지지저항이 수직응력에 대한 영향만을 받는 것으로 판단되었다. 또한 지지부재가 결속된 경우의 인발저항강도는 강재스트립 및 돌기형에 비해 매우 큰 인발저항 특성이 나타나는 것으로 확인되었다.
- (2) 지지저항이 수직응력만의 영향을 받는 점을 고려하여 강재스트립 보강재에 지지부재 설치로 인한 최대인발

력을 통하여 인발저항강도의 증가량을 지지저항 강도정수로 산정한 결과, 지지점착력(c_{pr})과 지지저항각(δ_{pr})이 각각 23.69kN/m와 14.3°인 것으로 평가되었다. 이는 본 실험대상 보강재가 횡방향 지지부재에 따른 수동지지저항에 의한 의존도가 매우 큰 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. 김홍택, 방윤경, 박시삼, 김현조 (2003), “버팀재 볼트 접합형 강재스트립 보강재의 인발거동특성에 관한 실험적 고찰”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제4권, 제1호, pp.67-75.
2. 홍원표, 한중근, 김진오 (2001), “강그리드보강재의 지지저항 산정”, *대한토목학회 논문집*, 제21권, 제3호, pp.225-231.
3. ASTM (2003), *ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS*, Section 4, Vol.04.13, pp.396-401
4. Elias, V., Christopher, B. R. and Berg, R. R. (2001), *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines*, Publication No. FHWA-NHI-00-043, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.
5. Jewell, R. A. (1990), “Revised Design Charts for Steep Reinforced Slopes”, *Proceedings of Symposium on Reinforced Embankments ; Theory and Practice in the British Isles*, Cambridge, September, Thomas Telford. pp.1-27.
6. Matsui, T., Nabeshima, Y., Uchihata, K. and Han, J. G. (1997), “Tensile strength of Jointed Reinforcements in the Steel Grid Reinforced Earth”, *Proc. of Soil Improvement*, Macau.

(논문접수일 2009. 10. 14, 심사완료일 2009. 12. 1)