

지오그리드 보강재의 인발거동특성 예측기법

Prediction of Pullout Behavior Characteristics on the Geogrid

김홍택¹⁾, Hong-Taek Kim, 박사원²⁾, Sa-Won Park, 김경모³⁾, Kyung-Mo, Kim

¹⁾ 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hong-Ik Univ.

²⁾ 홍익대학교 토목공학과 대학원 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hong-Ik Univ.

³⁾ 보강기술(주) 대리, Assistant Manager, E & S Engineering Co., Ltd.

SYNOPSIS : In the present study, laboratory pull-out tests with various geogrid shapes are carried out to investigate behavior characteristics of the geogrid. Also, an interface pullout formula is proposed for predicting and interpreting pullout test result. The analytical model is based on the assumption that the reinforcement is linear elastic during the pullout test. And then, maximum pullout force, frictional resistance and active length for each of the grid density ratio are predicted based on the interface pullout formula. The predicted results were compared with those of pullout tests, and showed in general good agreements.

Key words : Pullout Test, Active length, Grid density ratio

1. 서론

보강토벽체의 시공시 현장에서 발생한 잉여토량을 활용하기 위한 시도가 점차로 증가하고 있는 추세이나, 보강재와 주변 흙 사이의 마찰특성 평가는 보강토 옹벽의 해석, 설계 및 시공 등에 앞서 반드시 선행되어야 한다. 따라서 실내에서의 대형 직접전단시험이나 인발시험을 토대로 마찰특성 등을 평가하는 것이 일반적이며, 특히 보강재 주변 상·하층의 흙이 연속적으로 접촉되어 있는 지오그리드의 경우 실내 인발시험은 필수적이다. 이는 보강재의 인발저항력이 표면마찰력 뿐만아니라 횡방향부재에서 발휘되는 수동저항력에 의해서도 좌우되기 때문이다. 즉, 주변 흙과 지오그리드의 길이방향 부재에서 발생하는 마찰저항력 및 이에 직각으로 교차하는 횡방향 부재에서의 수동저항력이 동시에 발휘되는 형태로 나타나며, 이에 대한 마찰저항특성은 지오그리드의 종방향 및 횡방향 부재 간격(그리드밀도)에 따라 다양하게 변화한다. 특히, 횡방향 부재에서의 지지저항력을 그리드효과(grid effect)라고 정의하며, 본 연구는 이러한 그리드효과에 따른 보강재의 인발특성을 정량적으로 규명하여 대형 실내인발시험의 결과를 간접적으로 예측하는데 그 목적을 두고 있다. 본 연구에서는 다양한 그리드 밀도비(식(13) 참조)에 따른 그리드 효과를 평가하기 위해 다수의 실내인발시험이 실시되었으며 동시에 이를 정량적으로 비교·분석할 수 있는 이론식이 제시되었다.

2. 지오그리드의 마찰저항특성

2.1 축방향 표면마찰저항력(R_A)

지오그리드와 흙 사이의 마찰저항력은 그림 1과 같이 전체단면적에서 개공부의 단면적을 제외시킨 환산단면적에 대한 축방향 표면마찰저항력(R_A)을 구한 후, 여기에 횡방향 부재의 수동저항력(R_l)을 추가적으로 산정하여 이들의 합을 최대인발저항력(F_{Tmax})으로 간주할 수 있다.

$$F_{Tmax} = R_A + R_l \quad (1)$$

그림 1을 토대로 환산단면적(A)에 대한 지오그리드의 축방향 표면마찰저항력 산정식은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_A = B' \cdot L \cdot 2 \cdot (\sigma_n \cdot \alpha_b + c_a) \quad (2)$$

여기서, $B' : B - \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{(D - d_1) \cdot (B - d_1)}{D} \cdot \frac{(S - d_2) \cdot (L - d_2)}{S} \right]$

L : 지오그리드의 부설길이, B : 지오그리드의 부설폭

σ_n : 지오그리드에 작용하는 연직응력, α_b : 결속계수

c_a : 지오그리드-주변흙 사이의 부착력

D : 지오그리드 종부재의 간격, d_1 : 종부재의 폭

S : 지오그리드 횡부재의 간격, d_2 : 횡부재의 폭

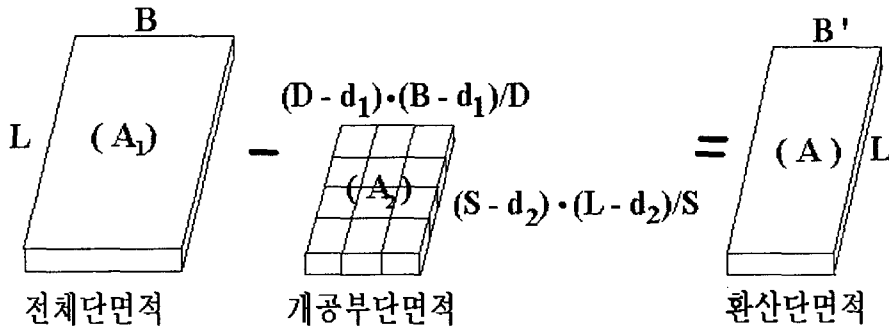


그림 1. 환산단면적에 대한 축방향 표면마찰저항력 산정개요도

개공부가 없는 지오텍스타일의 경우, 횡방향 수동저항을 고려하지 않는 마찰계수($f = \tan \delta$)를 사용하여 표면마찰력(τ)을 산정하는 것이 보편화되었으나, 지오그리드와 같이 횡방향 수동저항 메커니즘이 명확한 보강재에 대해서는 흙과 보강재 사이의 상호작용계수로 마찰계수 대신 결속계수(α_b)의 사용을 권장하고 있다. Jewel(1996)은 이러한 결속계수를 다음과 같이 제안하고 있다.

$$\alpha_b = 0.6 \cdot \overline{a_s} + F_1 \cdot F_2 \cdot \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_n} \right) \cdot \left(\frac{\overline{a_b} \cdot t_l}{S} \right) \cdot \frac{1}{\tan \phi} \quad (3)$$

여기서, $\overline{a_s}$: 보강재와 흙이 접하는 면적비(부직포인 경우 $\overline{a_s}=1.0$)

$\overline{a_b}$: 전체면적에 대한 개공부의 면적비, F_1 : scale factor, F_2 : shape factor

σ_b : 그리드의 횡부재에 작용하는 수평방향응력, t_l : 종방향 부재의 두께

2.2 횡방향 수동저항력(R_A)

본 연구에서는 지오그리드에 대한 횡방향부재의 수동저항력을 식(4)와 같이 정의하였다. 식(4)는 그리드의 수평 및 수직간격(그리드밀도)에 따른 영향을 반영하고 있으며 결국 식(2)와 합하여 최대인발저항력(F_{Tmax})이 산정된다.

$$R_l = \sigma_b \cdot t_l \cdot (D - d_1) \cdot \left(\frac{B - d_1}{D} \right) \cdot \left(\frac{L - d_2}{S} \right) \quad (4)$$

그러나, 축방향 표면마찰저항력과 더불어 횡방향 부재의 수동저항력을 독립적으로 평가하기 위한 많은 연구들이 진행되어 왔지만, 적용조건에서 다소의 차이를 보이고 있다. 횡방향부재의 수동저항력은 적절한 수평방향응력 결정이 중요한 요소로 작용하며, 이는 일반적으로 실험을 통해 결정할 수 있다. 즉, 기본형(횡부재 및 종부재가 모두 존재하는 형태) 지오그리드에 대한 인발시험 결과와 횡부재가 전혀 없는 경우의 인발시험 결과를 서로 비교하여 이들의 차이로 횡방향부재의 수동저항력을 산출할 수 있으며, 산출된 수동저항력을 토대로 수평응력의 값을 추정할 수 있다. 한편, 수평방향응력과 연직응력의 비(ratio)를 이론적으로 추정하고자 할 경우 근사적인 예측이 가능하나(Jewel, 1996), 실험결과에 의하면 적절한 보정계수($\beta=0.6\sim0.8$)의 적용이 필요한 것으로 나타났다(김승욱, 1998).

$$\frac{\sigma_b}{\sigma_n} = \beta \cdot \left[\tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (5)$$

3. 지오그리드의 인장특성

지중에 부설된 지오그리드의 선단에 인발력이 가해지면 흙-보강재의 마찰특성 및 인장특성 등에 의하여 변위가 발생하게 되며, 이러한 변위의 크기는 인발선단과 후미에서 그 차이가 두드러진다. 이는 보강재에 발휘되는 인장력의 크기가 길이방향으로 동일하지 않기 때문이다. 여기서, 지오그리드에 발휘되는 인장력은 축방향 표면마찰력에 의한 인장력과 수동저항력에 의한 환산인장력 등으로 구성되며 이를 요약·정리하면 다음과 같다.

3.1 축방향 표면마찰력에 의한 인장력

지오그리드 개공부의 단면적을 제외시킨 환산단면적에 대해서, 인발력이 가해질 경우 미소요소에 작용하는 힘들을 나타내면 그림 2와 같다. 단, 지오그리드의 두께는 매우 작으므로, 보강재 상·하부의 연직응력은 동일하다고 가정하며, 보강재는 파괴를 일으키기 전까지 선형탄성적으로 거동한다고 간주한다(Sobhi & Wu, 1996).

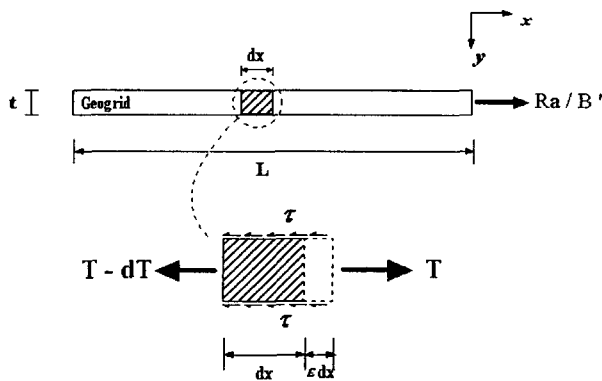


그림 2. 보강재의 미소요소에 작용하는 힘들

이상과 같은 가정사항을 토대로 보강재의 미소요소에 작용하는 모든 힘들의 정적평형조건에 의해 다음과 같은 식을 세울 수 있다.

$$T - 2 \cdot \tau \cdot (dx + \epsilon dx) - (T - dT) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{1}{2 \cdot (\sigma_n \cdot a_b + c_a)} \cdot \frac{dT}{dx} = 1 + \epsilon \quad (7)$$

그러므로, 식(7)과 $\epsilon = T / (E \cdot t)$ 라는 두 식을 연립하면 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$k_1 T'(x) - k_2 \cdot T(x) - 1 = 0 \quad (8)$$

여기서, $k_1 = \frac{1}{2 \cdot (\sigma_n \cdot \alpha_b + c_a)}$, $k_2 = \frac{1}{E \cdot t}$, $m = \frac{k_2}{k_1}$ 을 의미하며, 식(8)의 경계조건 $x = 0$ 에서 $T(x) = R_a/B'$ 을 이용하여 미분방정식의 해를 구하면 결국, 임의의 지점 x 에서 축방향 마찰저항력에 의해서만 발생하는 보강재의 인장력(tensile force)은 식(9)와 같다.

$$T(x) = (R_a/B' + E \cdot t) e^{\frac{2 \cdot (\sigma_n \cdot \alpha_b + c_a) \cdot x}{E \cdot t}} - E \cdot t \quad (9)$$

3.2 수동저항력에 의한 환산인장력

횡방향 부재의 수동저항력(R_l , 식(3))으로 인해 보강재에 발휘되는 단위폭당 환산인장력($\bar{T}(x)$)은 수동저항력을 외력으로 처리한 후, 앞서 언급했던 절차를 준용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{T}(x) = (R_l/B' + E \cdot t) e^{\frac{2 \cdot (\sigma_n \cdot \alpha_b + c_a) \cdot x}{E \cdot t}} - E \cdot t \quad (10)$$

따라서, 횡방향부재의 수동저항까지 고려된 지오그리드의 단위폭당 인장력은 식(9)와 식(10)의 합으로 나타낼 수 있다.

3.3 보강재의 유효저항장 결정

인발력이 가해진 경우에 보강재의 전체길이 중 실질적인 저항능력을 발휘하는 보강재의 유효길이를 유효저항장(active length, x_0)이라 정의하며, 외력(인발력)에 의해 보강재 내부에 발생하는 인장력은 유효저항장 내에서만 발휘된다. 즉, 보강재의 전체길이 가운데 유효저항장 이외의 부분에서는 인장력이 발휘되지 않는다고 간주하며, 따라서 변위도 발생하지 않는다. 보강재의 유효저항장은 대형 실내인발시험을 토대로 확인하는 것이 일반적이지만, 이 역시 각 측정위치마다 변위계(LVDT)를 설치해야 하는 번거로움이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 그림 3과 같이 적절한 경계조건과 파괴시까지 보강재는 탄성거동을 한다는 가정하에 유효저항장의 길이를 평가하였다(Sobhi & Wu, 1996).

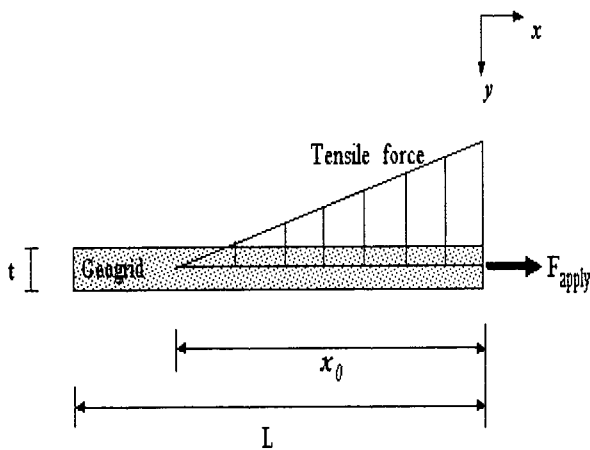


그림 3. 보강재의 유효저항장

그림 3에서 $x = -x_0$ 일 때 $T = 0$ 이라는 경계조건을 이용하여 미분방정식의 해를 구한 후, 이를 정리하면 다음과 같다.

$$x_0 = - \frac{E \cdot t}{2 \cdot (\sigma_n \cdot \alpha_b + c_a)} \ln \left[\frac{E \cdot t}{F_{appls} + E \cdot t} \right] \quad (11)$$

3.4 인발변위 예측

가해진 인발력에 대응하는 임의의 지점(x)에서의 인발변위는 식(12)와 같이 표현할 수 있다. 인발변위를 예측하기 위해서는 앞서 언급했던 식(11)에 의해 유효저항장(x_0)이 우선 결정되어야 하며, 이러한 유효저항장 내부에서 발휘가 예상되는 보강재의 인장력이 산정되어야 한다.

$$u = \int_{-x_0}^{-x} \frac{T(x) + \bar{T}(x)}{E \cdot t} dx \quad (12)$$

여기서, 식 (12)에 의해 산정되는 인발변위는 인장력으로 유발되는 보강재의 신장(elongation)만을 고려한 변위이며, 보강재-흙 사이의 미끄러짐 등으로 유발되는 변위는 고려할 수 없는 단점이 있다. 그러나, 연직응력이 증가할수록 보강재에 유발되는 변위는 보강재의 신장에 의한 변위가 더 지배적이므로 식 (12)에 의한 인발변위 예측은 그 적용가능성을 지닌다고 판단된다.

4. 실내인발시험

4.1 개요

본 연구에서 제시한 해석기법의 예측결과를 인발시험을 토대로 얻어진 실험결과와 비교·검토하기 위한 목적으로 실내 인발시험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 실내인발시험 장치는 인발상자, 인발장치(로드셀), 변위계(LVDT) 및 자료수집기 등으로 구성되어 있으며, 인발상자의 크기는 60×60×130 cm 로 제작되었다. 또한 인발시험장치 내부의 흙시료 및 실험용 지오그리드의 재료특성은 표 1 및 표 2와 같으며, 본 연구에서 사용한 인발시험장치의 구성, 인발시험기의 제원 및 변위 측정위치 등은 김홍택 등 (1996)에 구체적으로 명시되어 있다.

표 1. 흙시료의 특성

구분	시료종류	화강풍화토 (SM)
	강도정수	$\phi (^{\circ})$
	$c (kg/cm^2)$	0.2
입도	D_{10}	0.0096~0.0150
	D_{30}	0.057~0.140
	D_{60}	1.0~1.2
	균등계수, C_u	80~104.7
연경도	액성한계(%)	25.4
	최적함수비(%)	16.3
다짐특성 (A 다짐)	최대건조밀도 (t/m^3)	1.783

표 2. 실험용 지오그리드의 재료특성

종류	지오그리드
항목	폴리에스터 섬유 (PVC 코팅)
재질	폴리에스터 섬유 (PVC 코팅)
극한강도시 변형률(%)	10.5
극한인장강도	304.08 kgf/리브
초기탄성계수	2000 kg/cm ²
리브간격(mm)	26.0 by 22.0
리브폭(mm)	7.0 by 5.5
두께(mm)	1.37

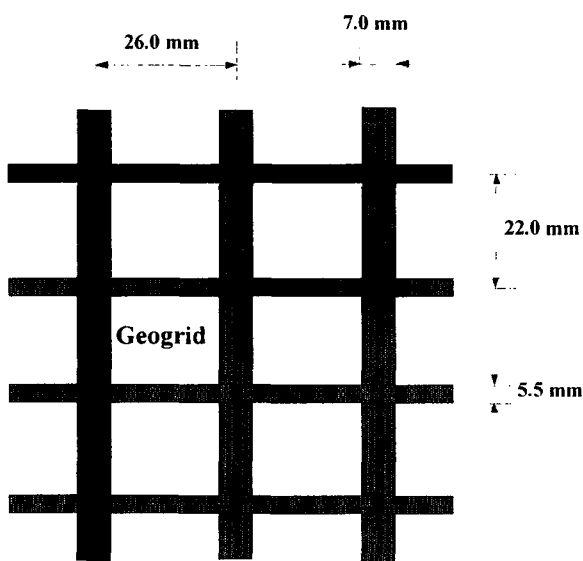


그림 4. 지오그리드의 형상 및 규격

4.2 그리드 밀도비

그리드 밀도비(DR)는 기본형 지오그리드를 기준으로, 수평·수직간격이 다른 임의의 지오그리드에 대한 개공부면적의 상대비율로써 정의된다. 이를 수식화 하면 식 (13)과 같이 정의할 수 있으며 그리드 밀도비는 수평 및 수직방향 간격에 따라 $0 < DR \leq 1.0$ 의 범위내에서 변화한다.

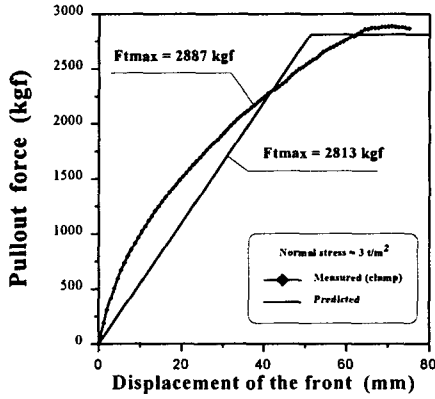
$$DR = \frac{[(D - d_1) \cdot (S - d_2)]_{origin}}{[(D - d_1) \cdot (S - d_2)]_{random}} \quad (13)$$

본 연구에서는 횡방향 부재의 간격을 달리하여 그리드 밀도비를 1.0, 0.45, 0.29의 3가지 종류에 대해서 각각의 인발시험을 수행하고 본 연구에서 제시한 해석기법에 근거한 예측치와의 비교·검토를 실시하였다.

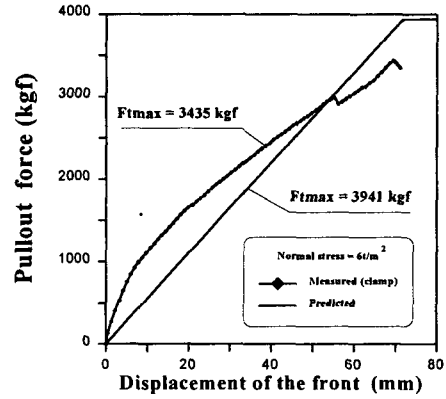
5. 분석 및 고찰

5.1 최대인발력 및 선단인발변위

그림 5 ~그림 7에는 지오그리드 보강재의 인발시험 진행과정 동안에 측정된 인발력과 선단변위가 연직응력 조건 및 그리드 밀도비에 따라 명시되어 있으며, 또한 최대인발력 값에 대한 예측치와 실험치가 비교·도시되어 있다.

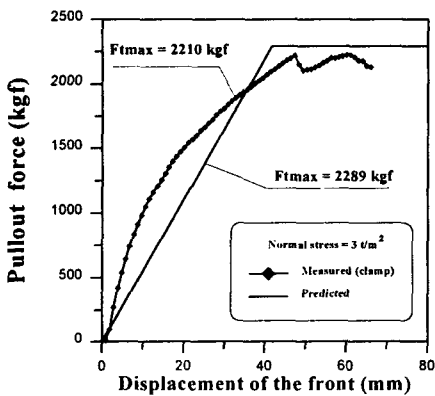


a) 연직응력 3 t/m²

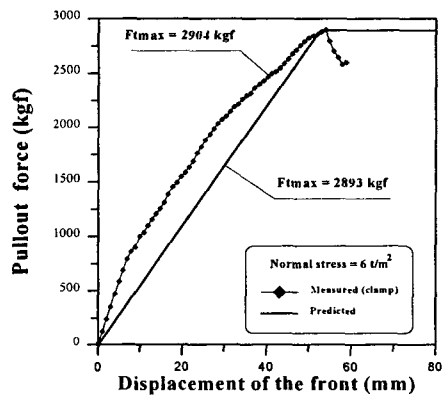


b) 연직응력 6 t/m²

그림 5. 지오그리드의 인발력-선단인발변위 관계 ($DR=1.0$)

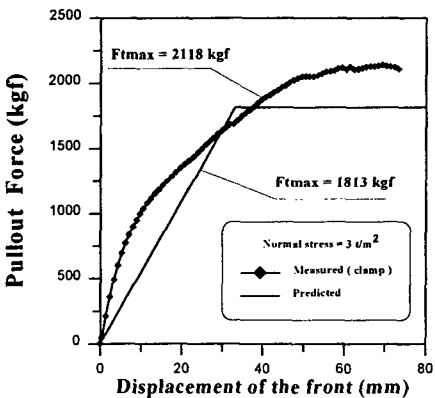


a) 연직응력 3 t/m²

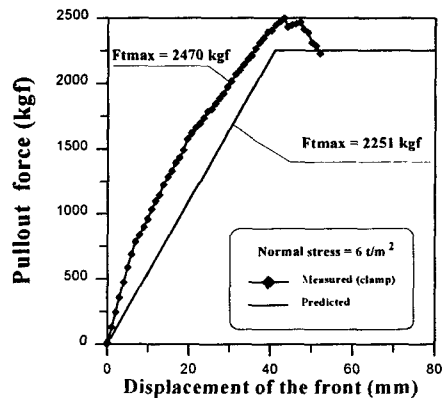


b) 연직응력 6 t/m²

그림 6. 지오그리드의 인발력-선단인발변위 관계 ($DR=0.45$)



a) 연직응력 3 t/m²



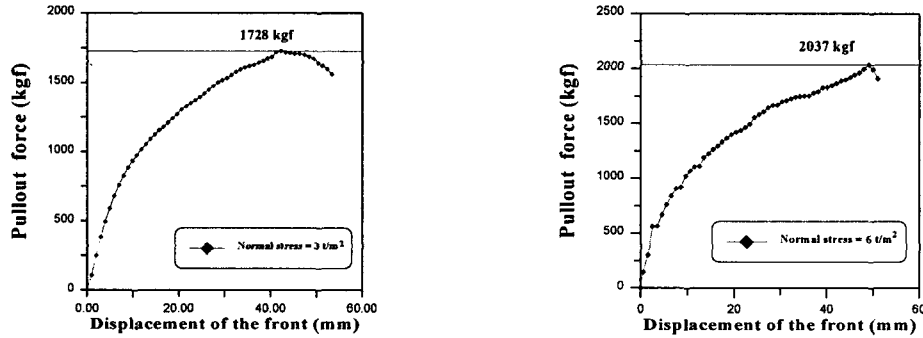
b) 연직응력 6 t/m²

그림 7. 지오그리드의 인발력-선단인발변위 관계 ($DR=0.29$)

본 연구에서 제시한 기법을 토대로 평가한 예측치는 수평방향응력 결정시 적절한 보정계수(β , 식(5) 참조)를 적용하였으며 연직응력이 3t/m^2 일 때 0.7을 6t/m^2 인 경우는 0.6의 값을 적용하였다(김승욱, 1998). 우선, 연직응력에 따른 경향을 살펴보면 예측치와 실측치 모두 연직응력이 증가할수록 최대인발력의 크기가 증가하는 현상을 보이고 있다. 또한, 그리드 밀도비의 감소에 따라 예측치와 실측치 모두 최대인발력의 크기는 감소경향을 나타내고 있다. 여기서, 이론적으로 예측되는 인발변위(식(12) 참조)는 보강재의 신장(elongation)만을 고려한 변위이지만, 연직응력이 증가할수록 보강재에 유발되는 변위는 보강재의 신장에 의한 변위가 더 지배적이며, 실제로 최대인발력에서의 선단변위 값을 비교해보면, 연직응력이 3t/m^2 인 경우보다 6t/m^2 인 경우가 예측치-실측치 간의 오차가 작은 것을 확인할 수 있다.

5.2 횡방향 부재의 수동저항력

지오그리드의 구성 부재중 횡방향 부재에 의해 발휘가 예상되는 수동저항형태의 지지저항력을 그리드 효과라고 정의하며, 이와같은 그리드효과에 관한 연구는 여러 연구자에 의해 이미 진행된 바 있다. 그러나 이들의 연구는 대부분 강성재료의 그리드에 초점을 둔 것으로서 연성의 지오그리드로 구성되는 본 연구의 경우와는 다소 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 연성의 지오그리드에 대한 그리드효과와 정도를 살펴보고 수동저항형태의 지지저항력을 평가하기 위한 노력의 일환으로 횡방향 부재를 모두 제거한 지오그리드를 대상으로 실내인발시험을 실시하였으며, 그 결과를 정리하면 그림 8과 같다.



a) 연직응력 3 t/m^2

b) 연직응력 6 t/m^2

그림 8. 횡방향 부재가 없는 지오그리드의 인발력-선단인발변위 관계(실험결과)

표 3. 횡방향 부재의 수동저항력(실험결과)

연직응력	기본형 지오그리드의 최대인발력	횡부재가 없는 지오그리드의 최대인발력	잘려나간 횡부재의 표면마찰력(면적 $\times 2 \times \tau$)	횡방향 부재의 수동저항력
3 t/m^2	2887 kgf	1728 kgf	102 kgf	1057 kgf
6 t/m^2	3435 kgf	2037 kgf	173 kgf	1225 kgf
비 고	①	②	③	①-(②+③)

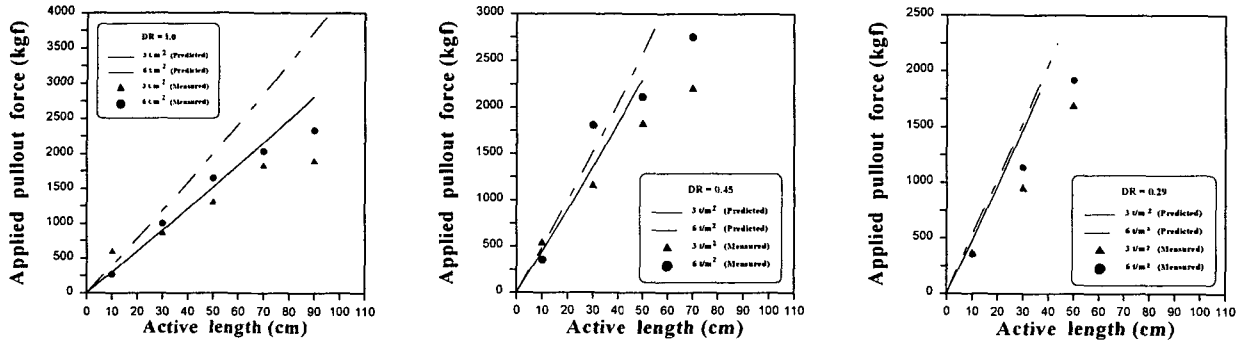
표 3에는 횡방향 부재의 수동저항력 산정에 관한 분석결과가 요약·정리되어 있다. 횡방향 부재의 표면마찰력은 잘려나간 부재의 면적을 산출하여 근사적으로 얻을 수 있다. 또한, 횡방향 부재의 수동저항력이 최종적으로 산출되면 이 값을 식(4)에 대입하여 보정계수의 값을 역으로 유추할 수 있다. 참고로 산출된 보정계수의 값은 0.67, 0.52로써, 5.1절에서 가정한 값(0.7, 0.6)과 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

5.3 유효저항장(active length)의 변화

그림 9는 연직응력-인발력-그리드 밀도비에 따른 유효저항장의 변화를 비교·도시하고 있다. 실내 인발시험시의 지점별 변위측정은 인발 선단으로부터 각각 0, 10, 30, 50, 70, 90 cm 지점별로 고정되어 측정되므로 각 지점에서 변위가 발생했는지의 여부로 유효저항장을 평가할 수 있다. 단, 90cm 이상의

지점에는 LVDT가 설치되어 있지 않으므로 변위가 유발되는 지의 여부는 확인이 불가능하였다.

분석결과를 살펴보면 실험결과와 예측치 모두가 동일한 경향을 보이고 있으며, 그리드 밀도가 감소함에 따라 유효저항장의 크기는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 연직응력이 증가함에 따라서도 역시 유효저항장의 크기는 감소하는 것으로 확인되었는데, 이는 김홍택(1999) 등의 연구결과와도 잘 일치하고 있음을 의미한다.



a) $DR = 1.0$

b) $DR = 0.45$

c) $DR = 0.29$

그림 9. 그리드 밀도비에 따른 인발력-유효저항장 관계

6. 결론

본 연구를 통해 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 연직응력이 증가할수록 예측치와 실험치 모두 최대인발력의 크기가 증가하는 현상을 보이고 있으며, 그리드 밀도비의 감소에 따라 최대인발력의 크기는 감소하는 경향을 나타내고 있다.
- (2) 최대인발력에서의 선단변위 값을 비교해보면, 연직응력이 증가할수록 예측치-실험치 간의 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 그리드 밀도가 감소함에 따라 예측치와 실험치 모두 유효저항장의 크기는 감소하는 것으로 나타났으며, 또한 연직응력이 증가함에 따라서도 역시 유효저항장의 크기는 감소하는 것으로 확인되었다.
- (4) 본 연구에 의한 예측치 및 실내시험결과를 종합적으로 비교해보면, 인발시험에서 얻어진 인발력-변위 관계와 대체로 오차가 존재하는 것으로 나타났으나, 연직응력 조건의 변화에 따라 본 연구에 의한 인발거동특성 예측의 활용가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구는 지오그리드의 인발거동 특성을 예측하기 위한 기초적인 연구성격을 지니고 있으며 향후 적용가능성을 검증하기 위해선 보다 다양한 종류의 보강재에 대해서 추가적인 실내인발시험을 실시하고 이를 토대로 지속적인 검증작업을 실시하는 것이 추후 연구과제이다.

참고문헌

1. 김승욱(1998), "독립형 보강토 조립식 옹벽의 복합보강재 및 전면블록의 마찰특성에 관한 연구", 홍익대학교 석사학위논문, pp.41~45.
2. 김홍택 등(1996), "지오그리드-폐 EPS 조각 혼합경량토의 마찰특성", 한국지반공학회지, 제 12 권, 제 6 호, pp.163~183.
3. 김홍택 등(1999), "화강풍화토 뒤채움흙 내부 토목섬유 복합보강재의 거동특성에 관한 기초연구", 한국지반공학회지, 제 15 권, 제 5 호, pp.171~191.
4. Jewel, R. A.(1996), *Soil Reinforcement with Geotextiles*, Special Publication 123, CIRIA, London.
5. Sobhi, S. and Wu, J.T.H.(1996), "An Interface Pullout Formula for Extensible Sheet Reinforcement", *Geosynthetics International*, Vol. 3, No. 5, pp.565~582.