

연약지반에 포설된 Geotextile 봉합인장강도를 고려한 지지력 수정방정식

Modification of Bearing Capacity Formula Considering Seam Tensile Strength of Geotextile in Soft Ground

김 선 학¹ Kim, Sun-Hak

채 유 미² Chae, Yu-Mi

김 재 홍³ Kim, Jae-Hong

Abstract

With the increasing use of geotextile mats in dredging and reclaiming work and coastal construction, the assessment of bearing capacity in soft ground has become an important evaluation index for negligent accidents. The review of the allowable bearing capacity of soft ground consisting of inhomogeneous layers by laying geotextile mats and sand mat layers for soft ground improvement is generally compared with the equation of Meyerhof (1974) and Yamanouchi (1985). Mayerhof formula results in economic loss due to underestimation of bearing capacity, and Yamanouchi (1985) formula does not take into account negligent accidents for punching shear failure, so rather high bearing capacity is evaluated. It is considered that economic feasibility and stability will be ensured by proposing a modified formula to calculate the appropriate bearing capacity by applying the seam tensile strength of the geotextile mat to the design standard of soft ground improvement.

요 지

최근 증가되고 있는 준설 및 매립지반의 해안 공사에서 토목섬유매트 활용이 많아짐에 따라 연약지반의 지지력에 대한 산정은 안전성 평가를 위한 중요한 지표이다. 지반 개량을 위해 토목섬유매트와 복토층을 포설하여 이질층으로 구성된 연약지반의 허용지지력 검토는 일반적으로 Meyerhof(1974)와 Yamanouchi(1985) 방정식을 비교한다. Meyerhof (1974) 수식 결과는 허용지지력의 과소평가로 경제적인 손실을 초래하며, Yamanouchi(1985) 수식은 펀칭전단파괴에 대한 안전사고를 고려하지 않아 다소 큰 지지력을 평가한다. 토목섬유매트의 봉합인장강도를 설계기준에 적용하여 적절한 허용지지력을 산정하는 수정방정식을 제안함으로써 경제성과 안정성을 확보할 것으로 판단된다.

Keywords : Bearing capacity, Geotextile, Seam tensile strength, Soft ground

1 정회원, 산이건설(주) 이사 (Member, Managing Director, SANI)

2 정회원, 동신대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Dongshin Univ.)

3 정회원, 동신대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongshin Univ., Tel: +82-61-330-3133, woghd@dsh.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반 개량공사는 준설·매립지반의 표층을 안정화시켜 초기 장비주행성(trafficability)을 확보하는 것이 중요하다. 준설매립 지반 내에서 간극수 또는 함수비를 저하시키는 것은 연약한 매립지반의 표층을 조기에 강화시키고, 빠른 시공과 안정성을 높이는데 도움이 된다. 최근 임해산업단지, 주택지 그리고 도로 조성의 필요성이 부각되면서 해안 일원에서 해안매립을 통한 부지개발이 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 국내에서 매립 초기에는 주로 쇄석이나 산토가 주 매립재료로 이용되었지만, 육지에서부터 운반 및 재료의 확보에 많은 비용이 필요하다. 이에 바다에서 쉽게 구할 수 있는 해성점토, 즉 점성토를 준설하여 매립하는 공법이 주로 이루어지고 있다(Jeon et al., 2008).

그러나 연약지반 개량을 위해 사용되는 점성토는 압축성이 크고 장기간에 걸쳐 압밀이 이루어지므로 지반을 안정화시키는데 장시간이 소요된다. 준설점토로 매립된 부지의 지반개량을 위한 장비 및 인력의 접근을 위해 매립지반의 표층을 조기에 처리할 수 있는 공법의 개발이 필요하다. 강가 또는 해안 저습지를 점성토로 준설 매립한 후, 일반적으로 주택지·산업단지·도로 등으로 개발할 경우 성토 재하하중에 의한 압밀탈수 촉진공법 등을 적용하여 연약지반 개량공사를 시행한다(Kim, 2003; 2005).

Fig. 1에서와 같이 연약지반 위에 토목섬유를 포설하는 것은 포화된 점토층과 복토층(sand mat)의 교반을 막아 장비 진입을 가능하게 해준다. 넓은 토목섬유매트는 공장 또는 현장에서 봉합함으로써 연약지반의 전체 면

적을 덮어 복토층의 지지력을 향상시키기 위한 도움을 준다(Fig. 1(a)). 이러한 연약지반 개량공사에서 연직배수 작업과 성토작업을 위한 각종 중장비가 사용되는데, 초기에는 점성토 준설매립지반의 지반 강도가 초 연약하여 장비 진입이 곤란하다. 따라서 점성토 준설매립지반의 표층을 일차적으로 강화시키거나 Fig. 1(b)와 같이 토사나 쇄석을 사용하여 장비무게에 따라 복토층을 0.5~2m 정도 벨트컨베이어(belt conveyor) 장비로 포설하게 된다. 적절한 복토층 두께로 포설된 이후에야 본격적인 연약지반 개량공사를 수행할 수 있다(Kim et al., 2011).

특히, 토목섬유(geotextile) 활용이 증대되고 전단파괴를 예방하기 위해 봉합에 의한 토목섬유 인장강도가 중요시되고 있다. 국내·외에서 토목섬유매트 재질과 봉합 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 여전히 설계기준에 제시되고 있는 연약지반 보강용 봉합인장강도 향상을 위한 연구가 부족하다. 도로 공사 시 토목섬유 설계의 주응력 방향이 아닌 경우 원단강도의 50% 봉합강도를 인정하고 있다. 그러나 넓은 연약지반 부지 조성의 경우 특정한 설계기준 없이 도로의 토목섬유 봉합 강도 기준을 따르고 있다.

An et al.(2009)은 지오그리드(geogrid)의 접점강도를 유한요소해석과 실내시험을 병행하여 비교 분석한 결과로 방향성에 대한 인장강도의 크기를 확인하였다. Jeon et al.(2008)은 봉합된 지오텍스타일 튜브의 거동을 이론적인 연구와 실험을 통하여 봉합구조의 효율성과 합리적인 설계 강도를 분석하였다. 그리고 봉합사의 강도가 유사한 경우 봉합방법이 봉합인장강도에 주요한 영향을 미치며, 지오텍스타일 튜브 봉합 이후 봉합사의



(a) Construction work covering up soft soil with crushed stone and sandy soil (KAITA, 2018)



(b) Belt conveyor equipment that covers soft soil with sandy soils (KAITA, 2018)

Fig. 1. Construction of Soft Ground Improvement

긴장상태도 실내실험 중에 영향을 미치고 있어 인장강도에 다양한 변수가 있음을 확인하였다. 복합인장강도의 중요성은 또 다른 연구에서 지오텍스타일 튜브의 장기설계허용강도로 가장 취약한 부분을 기준으로 결정하고, 튜브의 설계강도는 원단 인장강도보다는 복합인장강도를 기준으로 설정하는 것이 타당하다고 제안하였다. 또한, 복합인장강도가 지오텍스타일 튜브의 시공에서 중요한 요소인지 확인하였다(Yuu et al., 2008).

연약지반에서 시공 장비의 주행성 검토를 위하여 토목섬유매트와 복토로 보강된 연약지반에서 적용되는 방법은 Yamanouchi(1985)의 반경험적 수식과 Meyerhof(1974)의 이질층 지지력 이론을 유도한 방법이 있다. Yamanouchi(1985) 방정식은 접지압을 감소시키기 위하여 접지하중폭을 증가시키면 지지력은 감소하고 적절한 안전율을 구하기 위해서 성토 두께를 증대시켜야 하는 지지력 산정에 있어 논리적인 모순점을 갖고 있다. Ju et al.(2007)은 이러한 Yamanouchi(1985)의 제안한 식에 대한 모순점을 실내시험으로 개선하려는 새로운 지지력 식을 연구하였다. 본 연구에서는 여러 문헌들의 제안식과 비교하면서 복토층의 두께와 강도에 대한 지지력 상승분을 충분히 고려하고 편칭전단파괴에 대한 연약지반의 지지력을 적절하게 평가할 수 있는 방정식을 제안하고자 한다.

2. 복합지층에서의 다양한 지지력 방정식

2.1 Yamanouchi(1985) 이론

Yamanouchi 방법은 복토층 두께에 따른 장비의 분포 하중 및 복토층 하중에 의해 원지반상에 작용하는 하중의 크기와 토목섬유의 인장력을 고려하여 원지반 지지력의 크기를 산정한다. 연약지반 위에 토목섬유 보강 효

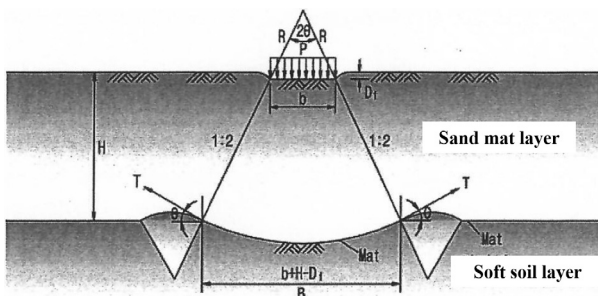


Fig. 2. Schematic design of Yamanouchi method (Yamanouchi, 1985)

과를 고려한 기초지반의 지지력 평가모델은 Fig. 2와 같으며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$q_a = \frac{1}{F_s} \cdot \left(1 + \frac{H - D_f}{b}\right) \cdot \left\{5.3 \cdot c_u + T_a \cdot \left(\frac{2 \sin \theta}{b} + \frac{1}{r}\right) + \frac{4 S_a R (1 - \cos \theta)}{b + H - D_f} + \gamma D_f\right\} \quad (1)$$

여기서, F_s 안전율, H 복토층 두께, b 시공장비의 접지폭, c_u 준설매립층의 비배수 전단강도, T_a 토목섬유의 허용인장강도, θ 보강재와 수평면이 이루는 각($\approx 15^\circ$)이다.

2.2 Ju et al.(2007)의 지지력 수정방정식

많은 연구자들이 연약지반 지지력을 적절하게 평가하기 위해서 많은 실내시험으로 검증을 하고 있다. 특히 Ju et al.(2007)는 Yamanouchi(1985)의 제안식에서 접지압을 감소시킬 목적으로 실내시험으로 Fig. 3과 같이 하중 장치를 설치하였다. 실내시험에서 접지폭원을 증대시키면 오히려 지지력은 감소하고 적절한 안전율을 얻기 위해서는 성토두께를 증가해야 하는 등 토목섬유를 포함한 지지력 산정에 있어서 Yamanouchi 수식은 논리적인 모순점을 내포하고 있다. 이러한 국내에서 많이 사용하는 Yamanouchi가 제안한 식이 갖는 모순점을 보완하기 위한 새로운 지지력식을 제안하였다(Ju et al., 2007).

이렇게 수정된 제안식에서는 지표면에 작용하는 접지하중은 지표면에서 큰 값이 되나, 지중으로 깊어질수록 하중은 분산되면서 결국 크기는 사라진다. 복토층(sand mat)의 두께가 크면 클수록 하중분산효과가 크며,

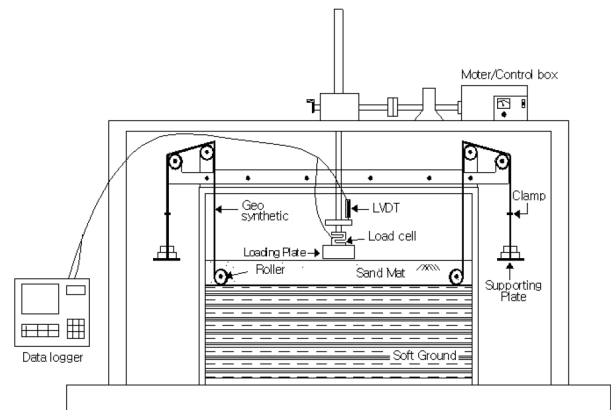


Fig. 3. Scheme of model test of bearing capacity in soft soil (Ju et al., 2007)

보통 간략한 설계에서 지중의 하중분산각의 확산은 깊 이 2, 분산 1 비율로 적용하며 일반적으로 분산각은 26.57°로 하여 사용하고 있다. 이러한 하중분산각은 재 하중의 폭과 복토층의 두께에 의해 영향을 받을 수 있 다. 연약지반, 토목섬유 그리고 복토층으로 구성되는 실 내시험 시스템에서는 하중을 받으면 토목섬유가 인장 력을 발휘하지만 현장에서 작용되는 인장력보다 훨씬 크다. 기존 수식에서는 언제나 일정하게 2:1 비율로 적 용되지만, 실내시험에서 수정되는 하중분산각은 하중크 기에 따라 다른 분산각 개념을 사용하게 된다.

실내시험에서 분산각을 하중재하폭 b 와 복토층 두께 d 의 함수로 본다면 Yamanouchi가 제안했던 식에 대입 하여 식 (2)와 같이 수정한 허용지지력 방정식을 제안하 였다(Ju et al., 2007).

$$q_a = \frac{1}{F_s} \cdot \left(1 + \frac{2d \tan \theta_1 - D_f}{b} \right) \cdot \left\{ 5.3 \cdot c_u + T_a \cdot \left(\frac{2 \sin \theta}{b} + \frac{1}{r} \right) + \frac{4 S_a R (1 - \cos \theta_2)}{b + 2d \tan \theta_1 - D_f} + \gamma D_f \right\} \quad (2)$$

2.3 편칭전단파괴를 고려한 Meyerhof(1974) 이론

연약지반의 지지력을 평가할 때 가장 중요한 요인 중 하나는 시공 중 안전사고가 편칭전단파괴로 발생된 다는 것이다. 다양한 전단파괴를 고려한 단층이나 이질 층 지반에서 얇은 기초를 적용할 수 있는 조건 중 하나 는 하중이 작용하는 지반이 충분한 강도를 확보하는지 가 중요하다. 문헌에 제시되고 있는 지지력산정 방법은 균질한 지반상태를 대상으로 기술되었으나, 본 연구의 경우는 복합지반이나 층상지반과 같이 여러 재료들을

고려해야하는 불균질한 지반상태도 빈번히 나타날 수 있다.

Meyerhof(1974) 이론에 의하면, 상부의 견고한 지반, 하부는 연약한 지반이 존재하는 층상지반에서 상부의 충분한 견고한 지반층 깊이가 확보된 경우(Fig. 4(a))와 그렇지 못한 경우(Fig. 4(b))로 가정 할 수 있다. 기초하 중에 의한 이질층 지반의 전단파괴면은 상부층에서 발 생하게 되어 지지력 산정방법을 적용할 수 있다. 연약지 반 개량을 위한 시공 조건은 Fig. 4(a)와 같이, 상부지층 의 깊이가 충분치 못한 경우 상부층에서 관입전단파괴 가 나타나며, 전단파괴면은 하부 연약지반층에서 발생 하게 된다.

Fig. 4(a)의 경우, 일반적인 기준으로 기초나 하중 폭 (B)이 기초저면에서 하부 연약층까지의 깊이(H)보다 큰 경우로 예를 들 수 있다. 이런 이질층의 지지력을 평가 하기 위해서 포화된 연약점토층 위에 단단한 모래층이 형성된 이질 층상지반의 경우에는 점토층의 비배수 조 건에 따른 마찰각을 0으로 간주할 수 있으며 지지력은 다음 식 (3), (4)와 같이 구할 수 있다.

$$q_b = \left(1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) 5.14 C_2 + \gamma_1 (D_f + H) \quad (3)$$

$$q_t = \gamma_1 D_f N_{q(1)} F_{qs(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma(1)} F_{\gamma(1)} \quad (4)$$

여기에서 q_b 는 아래층의 지지력, q_t 는 윗층의 지지력 을 산정한 것이다. 그러므로 연약지반 파괴가 되는 지지 력을 평가하기 위해서는 윗층보다는 아래층이 지지력 이 작은 조건으로 수식 (5)와 같이 식을 정리할 수 있다.

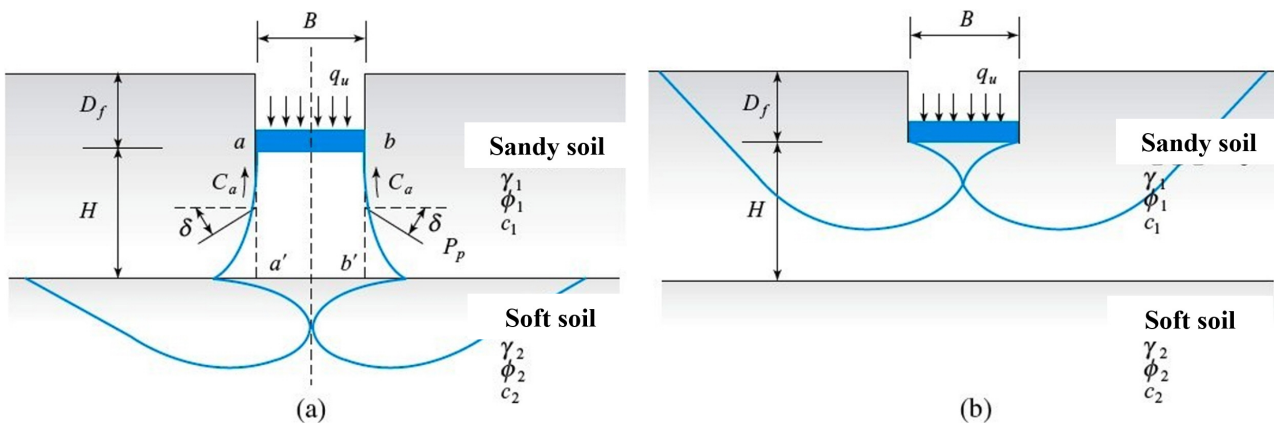


Fig. 4. Punching shear failure of Meyerhof formula in inhomogeneous soil layers (Kim, 2010)

$$q_a = \frac{1}{F_s} \left(1 + 0.2 \frac{B}{L} \right) 5.14 C_2 + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(1 + \frac{2D_f}{H} \right) \frac{K_s \tan \theta_1}{B} + \gamma_1 D_f \quad (5)$$

Yamanouchi(1985)경험식과 달리 원지반 내의 이질층을 고려하며 윗층의 편칭전단파괴와 토목섬유 인장력을 계산할 수 있는 수식으로 Meyerhof 방법을 사용할 수 있으며 Fig. 4(a)와 같이 설명할 수 있다. 따라서 Meyerhof의 얽은기초 지지력 공식을 수정하여 복토층과 토목섬유, 그리고 연약지반의 지지력을 산정하는 비율과 정수들을 수식에 포함시켜 식 (6)과 같이 유도할 수 있다.

$$q_a = \frac{1}{F_s} \left[\left(1 + 0.2 \frac{b}{L} \right) \cdot 5.14 c_u + \gamma H^2 \left(1 + \frac{b}{L} \right) \left(1 + \frac{2D_f}{H} \right) \frac{K_s \tan \phi}{b} + \gamma D_f + \frac{2 T_a \sin \theta}{b} \right] \quad (6)$$

여기서, F_s 안전율, c_u 연약매립층의 비배수 전단강도, b 시공장비의 접지폭, H 복토층(sand mat) 두께, T_a 시공시 손상을 고려한 토목섬유의 봉합인장강도, θ 보강재와 수평면이 이루는 각($\approx 15^\circ$), K_s 편칭전단계수, ϕ 복토층의 내부마찰각이며 일반적으로 편칭전단계수는 Meyerhof(1974)가 제안했던 Table 1과 같다.

3. 이론 방정식들의 허용지지력 비교분석

연약지반 개량을 위한 초기 작업으로 장비추행성을 확보하기 위해 토목섬유를 깔고 그 위에 토사나 쇄석을 포설하여 지반의 지지력을 강화한다. 강도를 갖고 있는 복토층과 연약지반이 섞이지 않게 토목섬유가 이러한 지층을 구별시켜주기 때문에 장비 하중으로 인한 큰 인

Table 1. Punching shear factors with the soil friction angle (Meyerhof, 1974)

Soil friction angle ($^\circ$)	Punching shear factor (K_s)
20	1.89
25	2.22
30	3.06
35	4.45
40	6.95
45	11.12
50	19.15

장강도를 발휘해야한다. 일반적으로 토목섬유 포설은 개량하고자 하는 넓은 연약지반 위 현장에서 봉합시킨다. 그 위에 적절한 두께로 포설되는 토사 또는 쇄석의 복토층으로 지지력을 강화하여 진입하는 장비가 결정된다. 포설된 토목섬유와 복토층으로 구성되는 이질층의 허용지지력을 계산하기 위해서 Yamanouchi(1985), Meyerhof(1974), Ju et al.(2008) 그리고 본 연구에서 제안하는 수정방정식으로 비교분석을 Fig. 5와 같은 조건으로 수행하였다.

Yamanouchi(1985) 및 Ju et al.(2007) 제안식은 쇄석이나 사질토로 포설되는 이질층에 대한 강도를 허용지지력 수식에 고려하지 않았으며, 원지반의 강도, 하중분산각 그리고 토목섬유의 인장강도를 고려하였다. 또한 Meyerhof(1974) 수식은 연약지반에서 쉽게 발생하는 안전사고의 원인인 편칭전단파괴를 고려하며, 하중의 폭(b)과 길이(L) 방향을 고려하여 허용지지력이 과소평가되는 경향을 보인다.

본 연구에서는 복토층 위에 작용하는 하중의 폭과 길이, 복토층의 강도, 토목섬유의 봉합인장강도, 연약지반의 편칭전단계수 등 복토층의 두께에 따라 적절한 허용지지력 크기를 계산할 수 있게 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$q_a = \frac{1}{F_s} \cdot \left[\left(1 + \frac{H}{b} \right) \cdot \left(5.14 c_u + \frac{2 T_a \cdot \sin \theta}{H+b} \right) + \cdot 0.7 \gamma_1 H^2 \frac{K_s \cdot \tan \phi_1}{L} \right] \quad (7)$$

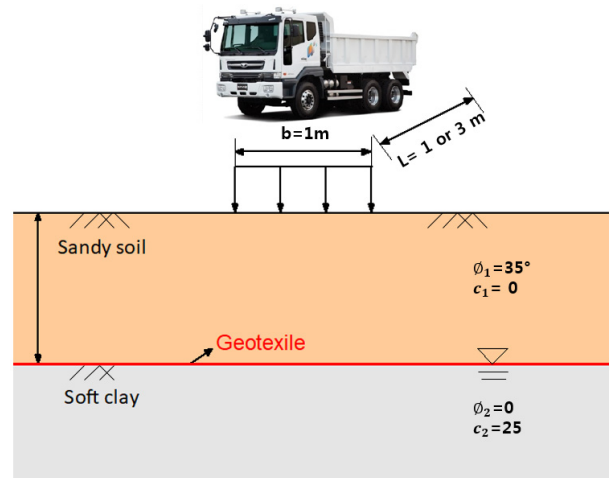


Fig. 5. Geometry conditions for implementation of bearing capacity formula

여기서, ϕ 복토층의 내부 마찰각, k_s 편칭전단계수이며 식 (4)에서 적용된 편칭전단계수와 마찬가지로 문헌에서 제시한 복토층 내부마찰각 35° 에 해당하는 편칭전단계수 k_s 는 4.45이다. 수식 (7)의 결과는 연약지반 위에 포설되는 쇄석과 토사를 구분하여 복토층(Sand Mat) 두께에 따른 허용지지력을 비교할 때, Meyerhof 수식과 Yamanouchi 수식 결과를 적절하게 보완할 수 있는 제안식이다. Yamanouchi(1985)의 이론적 전개의 단점을 보완하기 위해서 Ju et al.(2007)는 연약지반을 대상으로 하중재하 실내시험으로 얻은 하중분산각에 대한 새로운 개념을 방정식에 적용하여 방정식을 수정·보완하였다.

4가지의 토목섬유를 고려한 연약지반의 지지력 방정식을 비교하고자 단위중량과 하중 조건을 다르게 적용하여 지지력의 차이를 분석하였다. Table 2는 이론 방정식에 적용한 지반재료의 물리적·역학적 특성과 하중분산각(θ), 토목섬유의 봉합인장강도(T_a), 편칭전단강도 계수(k_s)와 안전율($F_s = 4$) 적용에 대한 크기를 나열하였다.

복토층의 단위중량을 $17kN/m^3$ 으로 적용할 때 수정 방정식은 Meyerhof 수식(eq. (6)) 결과와 Yamanouchi 수식(eq. (1))의 결과의 중간 값을 통과하고 있는 모습을 보여주고 있다. 일반적으로 기존 이론방정식은 복토층이 2m 근처에서 서로 겹쳐 지지력의 최대와 최저값들이 교차하는 경향을 보여주고 있다. Yamanouchi 이론

에서는 주행장비의 분포하중으로 폭(b) 1m로만 적용될 수 있지만, Meyerhof의 이론에서는 2차원적인 하중 형상을 고려할 수 있어서 폭(b)과 길이(L)방향으로 수식 적용이 가능하다. Fig. 6에서는 단위중량 $17kN/m^3$ 일 때, 폭과 길이방향을 각각 달리 적용하면 허용지지력 차이를 보여주고 있다. 본 연구에서 제안한 수정방정식(eq. (7)) 또한 폭과 길이방향으로 모두 고려할 수 있으며 Meyerhof의 허용지지력이 저하되는 경향을 감안하여 기존의 두 이론방정식의 결과들을 적절히 수정되고 있음을 확인할 수 있다. Ju et al.(2007) 수식(eq. (2))은 Yamanouchi 결과보다 높은 값을 보여주고 있어 제일 큰 지지력을 평가하고 있다.

연약지반 개량을 위한 복토층 재료는 시공현장의 주변 환경에 따라 좌우된다. 토사와 쇄석을 사용하여 복토를 수행하지만, 주변에서 쉽게 얻을 수 있다면 지지력을 향상시킬 수 있는 쇄석으로 복토를 수행하기도 한다. Fig. 7에서는 쇄석을 사용하였을 때 단위중량 $21kN/m^3$ 으로 증가시켜 기존의 두 가지 이론과 수정된 방정식에 대한 허용지지력을 비교하였다. 하중 폭과 길이가 1m로 같은 조건에서는 단위중량이 $17kN/m^3$ 일 때 보다 허용 지지력이 증가하고 있으며, 특히 Meyerhof 수식의 허용 지지력 결과는 복토층 2m를 기준으로 대략 $17kN/m^3$ 이 증가되었다. 하중의 길이(L) 방향이 3m로 증가되면 $17kN/m^3$ 와 같은 경향으로 Meyerhof 수식의 허용지지력

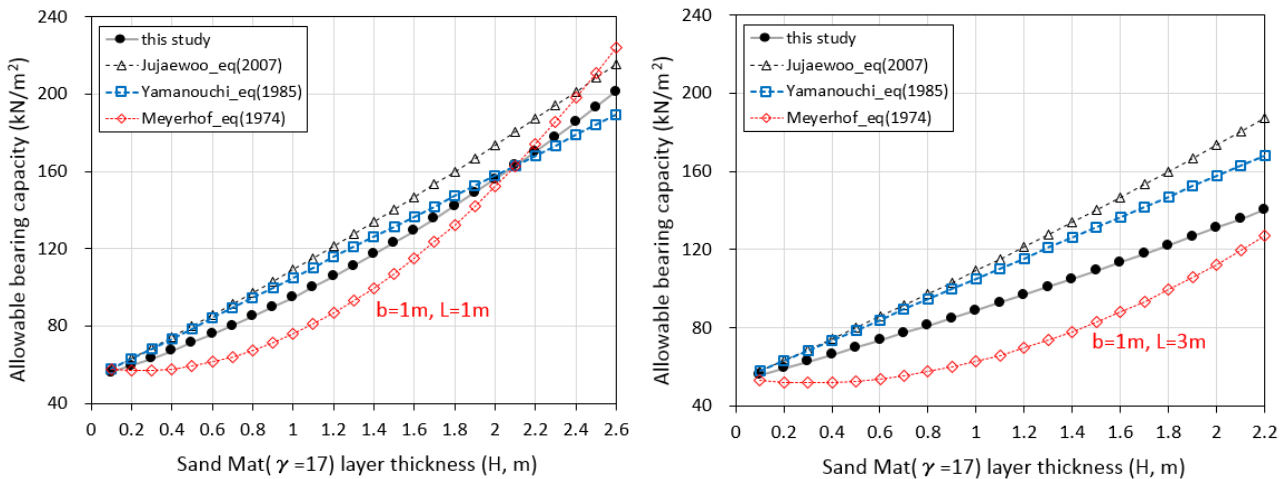


Fig. 6. Allowable bearing capacity of modified equation by thickness of sand mat layer

Table 2. Soil properties and parameters applied to various formula

	γ_1 (kN/m ³)	b (m)	L (m)	c_u (kN/m ²)	k_s	θ (°)	T_a (kN/m ²)	ϕ_1' (°)	F_s	D_f (m)
Values	17 or 21	1	1 or 3	25	4.45	15	150	35	4	0

이 복토층 2m를 기준으로 $48kN/m^3$ 가 감소됨을 확인할 수 있었다.

토목섬유와 복토층을 포설하여 계산된 연약지반의 허용지지력은 복토층의 두께에 가장 크게 영향을 미치고 있지만, 펀칭파괴로 인한 안전사고는 토목섬유의 봉합인장강도의 크기에 따라 좌우된다. 시공의 경제적인 조건으로 복토층의 두께가 얇을 때는 토목섬유들 사이의 봉합인장강도는 장비주행성에 중요한 안정 요소가 된다. 넓은 연약지반 개량공사에서는 봉합인장강도 크기에 대한 규정이 없기 때문에 원단 강도의 50%인 최소 강도로 계산하여 안정성을 평가한다. 본 연구에서는 다양한 봉합기술로 인한 여러 봉합인장강도에 따른 허용지지력을 계산하여 비교해 보았다. 봉합인장강도가 원단 강도의 50%에서 80%까지로 변화함에 따라 강도증가를 Fig. 8에 본 연구의 수정된 제안식을 사용하여 평

가하였다.

Fig. 7은 토목섬유 봉합인장강도의 크기에 따라 변화되는 연약지반의 허용지지력을 보여주고 있다. 하중으로 작용하는 폭(b)과 길이(L) 방향으로 구분하여 Yamanouchi 수식과 Meyerhof 수식에서 적용되는 허용지지력의 경향을 보여주고 있다.

Table 3은 Yamanouchi(1985) 수식인 하중 폭(b)만 고려했을 때와 Meyerhof(1974) 수식에서 적용한 폭(b)과 길이(L) 방향으로 고려했을 때를 구분하여 허용지지력을 비교하여 보여준다. 복토층이 1m일 때, 봉합인장강도가 50%에서 80%로 증가한다면 12.3%의 허용지지력 상승효과가 있으며, 복토층 2m일 때 7.5%의 허용지지력이 상승하여 연약지반 개량시 시공에 대한 안정성을 향상시킬 수 있으리라 판단된다.

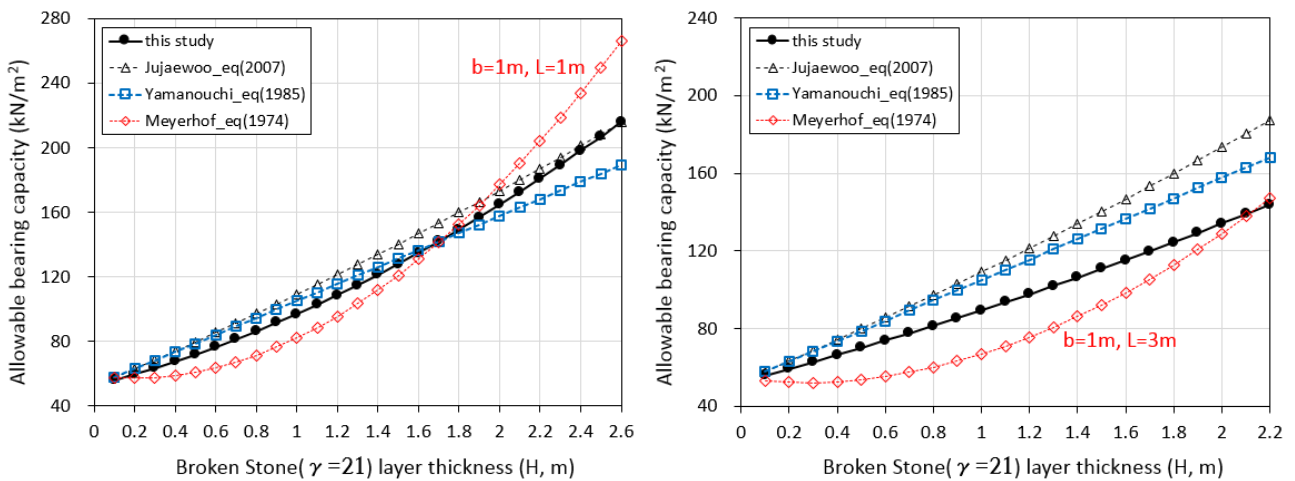


Fig. 7. Allowable bearing capacity of modified equation by thickness of sand mat layer

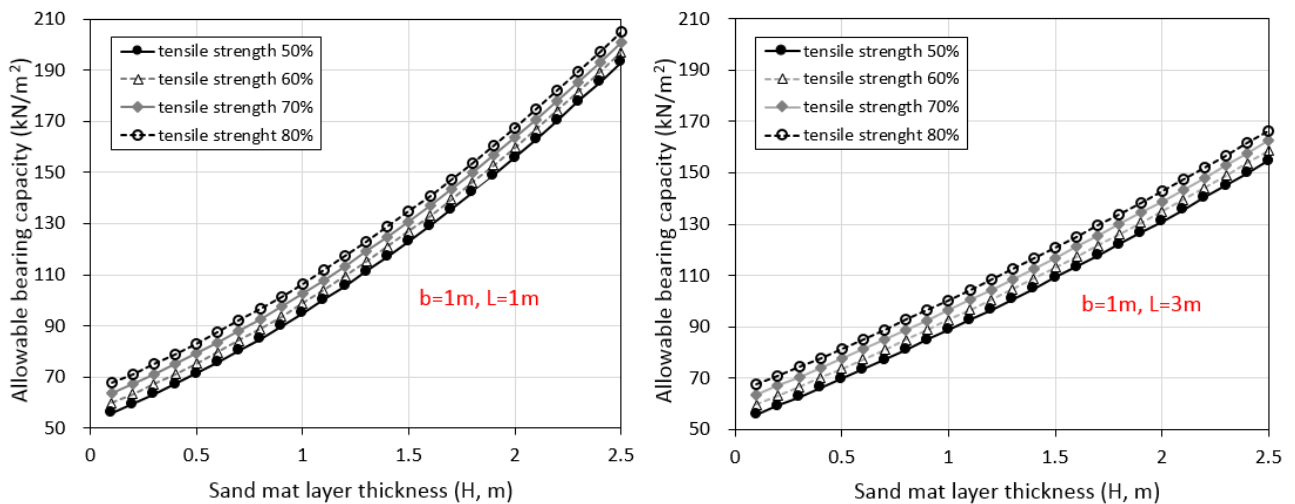


Fig. 8. Allowable bearing capacity of modified equation by thickness of sand mat layer

Table 3. Allowable bearing capacity by thickness (H) of Sand Mat Layer and seam tensile strength

Seam tensile strength	Allowable bearing capacity (L = 1 / 3m), (kN/m ²)			
	H=0.5m	H=1.0m	H=1.5m	H=2.0m
50%	71.4/69.9	94.9/88.8	123.1/109.2	155.9/131.2
60%	75.3/73.8	98.8/92.6	127.0/113.1	163.6/135.0
70%	79.2/77.6	102.7/96.5	130.9/116.9	163.6/138.9
80%	83.1/81.5	106.6/100.4	134.7/120.8	167.5/142.8

5. 결론

서해안과 남해안의 넓은 연약지반 개량을 위해 복토층과 토목섬유(geotextile mat)를 포설한 허용지지력 계산은 Meyerhof(1974) 방정식과 Yamanouchi(1985) 방정식이 주로 사용된다. 이러한 방정식들에 대한 검증은 위해 문헌 비교(Ju et al., 2007)를 수행하여 본 연구는 적절한 허용지지력을 평가할 수 있는 수정방정식을 제안하였다.

Meyerhof 수식에서 고려되고 있는 편칭전단계수에 대한 개념과 복토층의 강도정수를 활용하였으며, Yamanouchi 수식에서는 하중 폭과 복토층의 비율, 그리고 연약지반의 점착력 적용 방법에 대한 부분을 활용하였다. 이러한 두 가지 이론을 상호 보완하여 결과적으로 평균값을 산정할 수 있는 수정방정식을 아래와 같이 제안하였다.

$$q_a = \frac{1}{F_s} \cdot \left[\left(1 + \frac{H}{b} \right) \cdot \left(5.14 c_u + \frac{2 T_a \cdot \sin \theta}{H+b} \right) + 0.7 \gamma_1 H^2 \frac{K_s \cdot \tan \phi_1}{L} \right]$$

이러한 이론적인 방정식은 하중 조건에 따라 Meyerhof (1974) 방정식으로 얻은 결과들이 허용지지력의 크기가 너무 과소평가가 되어 연약지반을 보강하기 위해서는 경제적인 투입이 많아진다. 특히 연약지반 공사에 맞는 토목섬유 봉합인장강도의 설계기준이 따로 결정되지 않은 조건에서 안정적인 시공을 위해 가장 작게 평가하고 있는 방정식을 사용하고 있다. 기존에 어떠한 봉합기술에서도 원단강도의 50% 강도만을 유효하게 평가하고 있는 기준에서 봉합인장강도의 설계기준 활용이 필요하다.

일반적으로 연약지반 위에 포설되는 1~2m 복토층으로 장비주행성을 확보할 때, 허용지지력은 최대 12.3%까지 상승하기 때문에 토목섬유의 봉합인장강도 기술만으로 큰 경제적인 장점을 얻을 수 있다. 따라서 효율

적인 연약지반 개량공사를 위해서 토목섬유 봉합인장강도의 설계기준과 적절한 허용지지력을 평가하는 방정식을 사용한다면 경제성, 시공성과 안전성을 확보할 수 있는 공사 진행이 되리라 판단된다.

감사의 글

This research was supported by a grant (18RDRP-B076564-05) from Regional Development Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government

참고문헌 (References)

- An, B.W., Lim, D.Y., Lee, K.Y., Chung, C.G., and Jeon, H.Y. (2009), "Interpretation on Geogrids Junction and Tensile Behaviors by Finite Element Analysis", *Textile Science and Engineering*, 46(4), 239-244.
- Ju, J.W., Seo, K.W., and Jang, M.H. (2007), "Bearing Capacity of Soft Ground Reinforced by Geosynthetics and Sand Mat", *Korean Geosynthetics Society*, 2007(1), 1-7.
- Jeon, H.Y., Yuu, J.J., and Chang, Y.C. (2008), "Seaming Behaviors Interpretation of Geotextile Tube", *Fall Geotechnical Engineering Conference*, 2008, 1593-1603.
- Kim, J.M. (2003), "The Effect of Displacement Rate on Shear Characteristics of Geotextile-involved Geosynthetic Interfaces", *Journal of Korean Geotechnical Society*, 2003(19), 173-180.
- Kim, J.M. (2005), "Dynamic Frictional Properties of Geosynthetic Interfaces Involving Only Non-geotextiles", *Journal of Korean Geotechnical Society*, 2005(21), 81-90.
- Kim, S.I (2010), "Foundation Engineering", Kyobo book center, Seoul, pp.111-113.
- KAITA (2018), "Development of Sealing Technology and Efficient Installation Method for Increasing Joint Strength of Geotextile in Soft Ground", Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, R&D Report, 18RDRP-B076564-05, South Korea.
- Leshchinsky, D. (2004), "Design software for soft soils", *Geotechnical Fabrics Report*, March, 22(2), 18-23.
- Meyerhof, G.G. (1974), "Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 11(2), 224-229.
- Yamanouchi, T. (1985), "Recent development in the used synthetic

geofabrics and geogrids”, *Symposium on Recent Developments in Ground improvement techniques*, Bangkok, 205-224.

11. Yuu, J.J., Oh, Y.I., and Jeon, H.Y. (2007), “A Comprehensive Consideration on the Seam Strength of Geotextile Tubes: (1) Failure behaviors and the Required Strength”, *Korean Geosynthetics Society*, 2007(11), 241-246.
12. Yuu, J.J., Oh, Y.I., and Jeon, H.Y. (2008), “A Comprehensive

Consideration on the Seam Strength of Geotextile Tubes: (2) Basics of the Stitching Seam”, *Korean Geosynthetics Society*, 2008(4), 215-210.

Received : October 14th, 2019
Revised : November 18th, 2019
Accepted : December 8th, 2019