

등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 거동특성 및 침하량 평가기법

An Estimation Method of Settlement and the Behaviour Characteristics of Granular Compaction Pile Reinforced with Uniformly Graded Permeable Concrete

김 정 호¹ Kim, Jeong-Ho

황 정 순² Hwang, Jeong-Soon

김 승 욱³ Kim, Seung-Wook

김 홍 택⁴ Kim, Hong-Taek

Abstract

The behaviour characteristics of Granular Compaction Pile (GCP) are mainly governed by the lateral confining pressure mobilized in the soft soil matrix to restrain the bulging failure of the granular compaction pile. The GCP method is most effective in soft soil with undrained shear strength ranging 15~50 kPa. However, the efficiency of this method reduces the more compressible soil conditions, which does not provide sufficient lateral confinement. In the present study, the GCP method reinforced with uniformly graded permeable concrete is suggested for the extension of application to the soft ground. Also, large triaxial compression tests are conducted on composite-reinforced soil samples for verification of availability of the suggested method and the settlement estimation method of the reinforced GCP is proposed. Furthermore, for the verification of the proposed method, predicted settlements by the proposed method are compared with results of 3-dimensional numerical analyses. In addition, parametric studies are performed together with detailed analyses of relevant design parameters.

요 지

조립토 다짐말뚝의 거동특성은 주로 말뚝의 횡방향 팽창을 억제하는 연약한 원지반의 횡방향 구속응력에 의해 지배된다. 따라서 조립토 다짐말뚝의 지반 보강 능력은 원지반의 비배수 전단강도가 15~50kPa 정도인 경우에 가장 효과적 인 것으로 알려지고 있으며, 보다 연약한 지반에서는 구속압력이 충분하게 발휘되지 않으므로 적용성이 크게 저하된다. 본 연구에서는 연약지반에 대한 조립토 다짐말뚝의 적용성 확대를 위해 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝 공법을 제안하였으며, 등입도 투수성 콘크리트와 쇄석 및 연약 점성토로 구성된 복합 공시체의 대형삼축압축시험을 통해 제안된 공법의 효율성을 입증하였다. 또한 본 연구에서는 제안된 공법의 실무 적용성 확보를 위해 침하량 산정기법을 제안하였으며, 제안된 침하량 산정기법의 검증에 위한 목적으로 3차원 유한요소해석을 실시하여 해석결과로 분석된 말뚝의 침하량과 제안식에 의해 산출된 침하량을 상호 비교·분석하였다. 추가적으로 본 연구에서는 다양한 변수분석을 수행하여 설계변수의 영향정도를 평가하였다.

Keywords : Large triaxial compression test, Settlement, Uniformly graded permeable concrete

1 (주)다산컨설턴트 지반공학부 부사장 (Vice President, Geotechnical Eng. Dept., Dasan Consultants Co., Ltd.)

2 두산산업개발(주) 토목터킴 과장 (Section Manager, T/K Project Team, Doosan Ind. Dev. Co., Ltd., jshwang1@doosan.com, 교신저자)

3 한국농촌공사 농어촌연구원 연구원 (Researcher, Rural Research Institute, KRC)

4 홍익대학교 토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Hong-ik Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

근래에 들어 항만공사, 단지조성공사 및 연약지반개발공사 등에 대한 환경적 측면의 고려와 재료원의 고갈로 하상골재 채취를 통한 양질의 모래 공급이 점차 어려워지는 실정이며, 이러한 현실을 반영하여 모래를 사용하는 SCP 공법을 대신하여 쇄석 등을 사용한 조립토 다짐말뚝의 적용이 점차 증가하는 추세이다. 일반적으로 조립토 다짐말뚝의 거동은 주로 원지반의 횡방향 구속응력에 의해 지배된다. 따라서, 조립토 다짐말뚝의 지반보강 능력은 원지반의 비배수 전단강도가 15~50kPa 정도인 경우에 가장 효과적인 것으로 알려지고 있으며 (Barksdale 등, 1983), 횡방향 구속압력이 충분하게 발휘되지 않는 보다 연약한 지반에 대한 적용성은 크게 저해된다. 이러한 측면들을 고려하여 보다 연약한 지반까지 공법의 적용범위를 확대하고 말뚝 성능의 개선을 위한 노력들이 여러 연구자들에 의해 수행되어왔다(Mokashi 등 ; 1976, Rao 등 ; 1977, 1985, Radhey 등 ; 2004). 본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 지지력과 변형이 말뚝 상부의 횡방향 팽창에 지배되는 측면을 고려하여 말뚝의 팽창이 주로 발생하는 말뚝직경의 1~3배 심도를 포함하는 말뚝의 상부는 물/시멘트비를 조절한 등입도 투수성 콘크리트로 구성하며, 그 이하의 심도는 기존의 골재를 이용하여 다짐말뚝을 조성하는 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝 공법을 제안하였다. 또한, 제안된 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 침하저감효과 및 파괴형태 파악을 목적으로 점성토와 조립토 및 등입도 투수성 콘크리트로 구성된 복합 공시체에 대한 대형 삼축압축시험을 수행하였으며, 시험결과로 파악된 공시체의 거동특성을 토대로 침하량 산정기법을 제안하였다. 계속해서 *Pentagon*^{3D}를 이용한 수치해석 결과 및 삼축압축시험 결과를 토대로 제안된 침하량 산정기법의 타당성을 입증하였으며, 다양한 변수분석을 시행하여 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 거동에 영향을 미치는 여러 설계변수들에 대한 고찰을 시행하였다.

2. 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝 공법의 제안

2.1 조립토 다짐말뚝의 변형거동 및 기존의 보강방안

Huges와 Withers(1974)는 모형실험을 통해 쇄석말뚝

의 주된 변형형태는 측방향으로의 팽창이며 주변지반의 구속압이 지반의 파괴점을 지난 이후에는 더 이상 증가되지 않으므로 파괴하중을 상회하는 하중이 작용하는 경우 팽창파괴가 발생된다고 제안하였다. 또한 현재까지의 여러 연구들을 통해 조립토 다짐말뚝의 횡방향 팽창 발생심도는 일반적으로 말뚝 지름의 1~3배 범위로 제한되는 것을 파악할 수 있었다. 따라서, 말뚝 지름의 1~3배 범위의 조립토 다짐말뚝 인접지반이나 조립토 다짐말뚝 자체를 적절한 방법을 통해 보강하는 경우, 극한지지력 증가 및 침하저감 효과를 유도할 수 있을 것으로 평가된다.

이러한 조립토 다짐말뚝의 변형거동을 고려하여 보다 연약한 지반까지 조립토 다짐말뚝 공법의 적용범위를 확대하고 말뚝 성능의 개선을 위한 노력들이 여러 연구자들에 의해 수행되어왔다. Mokashi 등(1976)은 모형실험을 통해, 최외곽 말뚝의 지표부근에서 팽창파괴가 억제될 경우 말뚝의 지지력은 증가하며 동시에 침하 또한 감소한다고 밝힌 바 있으며, Rao 등(1977, 1985)은 말뚝 상부를 강관스커트로 보강하거나 군말뚝의 외곽에 지중 연속벽과 유사한 현장타설 철근콘크리트 슬래브(박스 스커트)를 설치하는 보강 방안을 제시한 바 있다. 또한 Radhey 등(2004)은 실내모형실험을 통해 토목 섬유를 이용하여 말뚝 주변을 보강하는 방안에 대한 연구를 수행한 바 있다.

2.2 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝 공법

김 등(2006)은 조립토 다짐말뚝의 효과적인 보강을 위한 방안으로 횡방향 변형이 주로 발생하는 심도까지는 물/시멘트비를 조절한 등입도 투수성 콘크리트를 활용하고, 그 이하 심도는 골재를 이용하는 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝(이하, 보강조립토말뚝) 공법을 제안하고 수치해석을 통해 지지력 증가 및 침하저감효과를 검증한 바 있다. 그림 1(a)에 도시된 일반 조립토 다짐말뚝에 보강을 시행하는 경우 작용하중, q_d 에 대해 침하량을 저감하거나(그림 1(b)), 허용변위 만족을 위해 소요되는 말뚝 본수를 저감(그림 1(c))하는 효과를 유발할 것으로 예상된다. 따라서, 실제 현장 적용시 허용변위 및 허용지지력에 의해 결정되는 설계기준을 만족하기 위한 조립토 다짐말뚝의 소요 본수가 지나치게 과도한 경우 보강조립토말뚝은 합리적인 대안의 하나가 될 수 있을 것으로 판단된다.

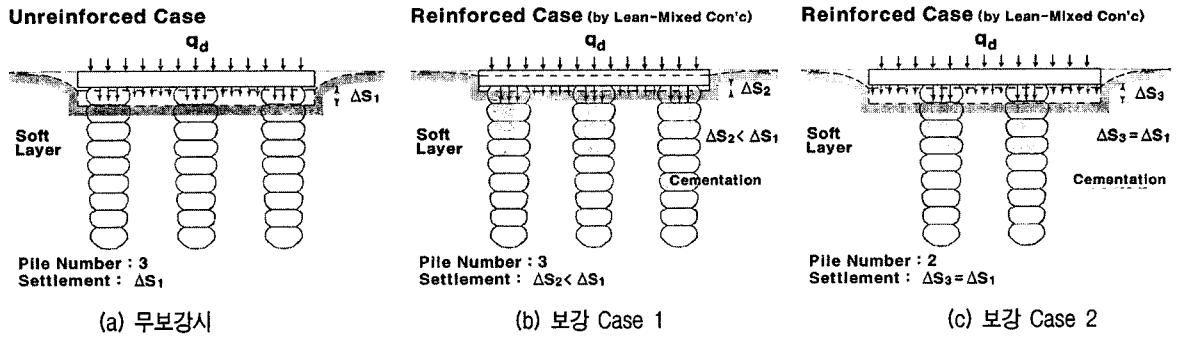


그림 1. 일반 조립토 다짐말뚝과 보강조립토말뚝의 개요 및 비교

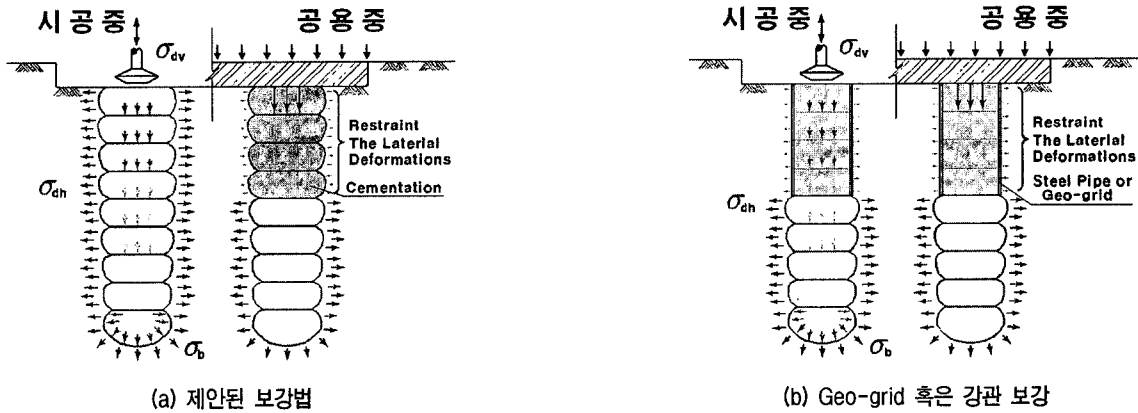


그림 2. 보강방법에 따른 시공 및 공용중 거동특성

표 1. 보강방법에 따른 거동특성 요약

보강방법	시 공 중	공 용 중
등입도 투수성 Con'c	인접지반의 밀도 증가, 시공성 양호	각 방안은 공용시 측방향 구속력 제공으로 구조물의 침하 감소 및 지지력 증대도모 * 강관보강은 횡방향 투수 불가
Geo-grid	효과적 다짐의 어려움, 시공성 저하	
강관보강	인접지반의 밀도 증가, 수평 배수기능 상실	

2.3 보강방법에 따른 조립토 다짐말뚝의 시공중 및 공용중 거동특성

그림 2는 등입도 투수성 콘크리트 보강과 기 제시되었던 전술한 기존 보강방안들과의 비교이다. 먼저 모든 보강방안들은 말뚝 상부보강에 의한 성능개선이라는 목적은 동일하다. 그러나, 각 공법은 시공중 말뚝-지반 간의 상호작용 측면에서 다소 차이를 보인다. 그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 보강조립토말뚝의 경우는 시공시 말뚝의 층다짐에 의해 유발되는 다짐에너지가 인접지반으로 전달되어 전체적으로 상부층의 밀도증가를 유발한다. 그러나, 그림 2(b)에 나타낸 바와 같이 기존의 보강방안들의 경우 말뚝의 효과적 다짐이 어렵거나 (geo-grid 보강), 다짐에 의해 유발되는 에너지의 인접지반 전파가 차단(강관 보강)되므로 말뚝 시공에 의한 인접지반의 밀도 증가 효과는 미미하다. 또한 일반 조립토

다짐말뚝과 동일한 과정으로 시공이 이루어지는 보강조립토말뚝에 비해, geo-grid 혹은 강관 보강의 경우 시공관리 측면에서도 불리한 것으로 판단된다. 표 1은 보강방법별 시공중 및 공용중 거동특성 요약이다.

3. 대형삼축압축시험을 통한 보강조립토말뚝의 거동 특성 평가

3.1 대형삼축압축시험 개요

본 연구에서는 연약지반에 대한 보강조립토말뚝의 적용성과 거동특성을 파악하고, 이를 반영한 침하량 산정기법을 제시하기 위해 대형삼축압축시험을 수행하였다. 시험은 직경(D) 10cm, 높이(H) 20cm인 점성토로 구성된 공시체의 중앙에 등입도 투수성 콘크리트와 조립토로 구성된 보강체를 삽입하여 압밀비배수시험(CU)

을 실시하였다. 이때, 보강체의 직경(d)은 20mm, 30mm, 40mm로 전길이 중 등입도 투수성 콘크리트 보강길이를 직경의 3배까지로 변화시켜가며 복합공시체를 제작하였으며, 측압조건을 150, 200, 250kPa의 3가지로 변화시켜가며 등방압밀을 진행하였다. 전단시험은 0.5mm/min 속도의 변형률제어 방식으로 시행하였고 소성변형구간의 정확한 파악을 위해 시료가 완전히 파괴되도록 축변형율이 25%에 도달 할 때까지 시험을 지속하였다.

3.2 등입도 투수성 콘크리트 보강체 및 복합 공시체의 제작

등입도 투수성 콘크리트 보강체의 성형을 위해 그림 3과 같은 아크릴 몰드를 제작하였으며, 필터콘크리트의 배합순서를 참고로 골재 13kg(5mm 이하), 물 600ml, 시멘트 2kg을 혼합하여 빈배합 투수성 콘크리트를 성형하였다. 그림 4는 몰드에서 1일 실온양생 후 27일간 습윤양생한 보강체의 모습이다. 본 연구에서 사용된 복합지반의 점성토는 인천 송도해안에서 채취한 통일분류상 CL에 해당하는 시료를 재성형하여 사용하였으며, 색색은 #4체를 통과하고 #10체에 남는 시료만을 선별하여 사용하였다.

실험대상 시료는 시료내에 포함된 불순물을 제거한 후 직경(D)=10cm, 높이(H)=20cm인 몰드를 이용해 점토지반을 조성하였다. 조성된 몰드 상부에 49kPa의 상

재압력을 가해서 72시간 동안 정규압밀 점토를 재형성한 후 본 실험에 사용될 복합지반을 형성하였다. 예비압밀이 종료된 공시체 몰드는 그림 5에 도시된 casing들을 이용하여 천공한 후 특수 제작된 오거를 통해 pipe내의 점성토를 제거하였다. 다음으로 미리 선별된 조립토를 다짐봉을 이용하여 소정의 높이까지 층다짐으로 설치하고 상부 보강부는 미리 제작된 등입도 콘크리트 공시체를 삽입하여 복합 공시체를 조성하였다. 또한, 천공시 유출되는 시료를 통해 재성형 지반의 함수비(ω)와 비중(G_s)을 측정하였고, 복합 공시체의 길이(L)와 무게(W)를 측정하였다. 그림 6은 조성된 복합공시체 형상 및 대형삼축압축 시험기에 안치된 형상이다.

3.3 대형삼축압축 시험 결과

3.3.1 복합공시체의 파괴형태 검증

대형삼축압축시험을 통해 등입도 투수성 콘크리트 공시체의 파괴형태 확인 결과를 그림 7에 도시하였으며, 보다 자세한 공시체의 변형형상분석을 위해 시험완료 후 공시체를 절단하여 육안으로 확인하였다.

그림 8은 보강체의 직경이 20mm인 경우의 보강 심도별 변형형태를 일례로서 파괴형태 확인결과, 등입도 투수성 콘크리트 보강에 의해 복합공시체의 상부에서는 팽창이 억제되며 팽창 발생 심도는 보강체의 길이증가에 따라 점차 깊어지는 것을 확인하였다. 또한, 이러한

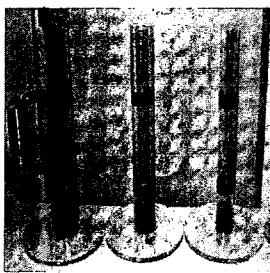


그림 3. 아크릴 몰드

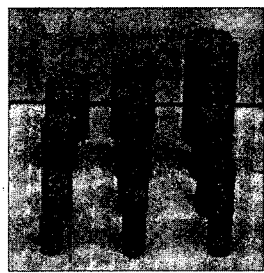


그림 4. 보강체 양생

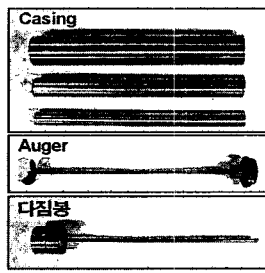


그림 5. 공시체 성형장비

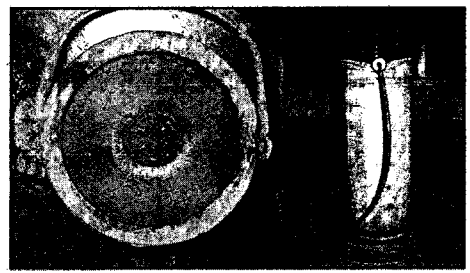


그림 6. 복합공시체 및 삼축기 안치

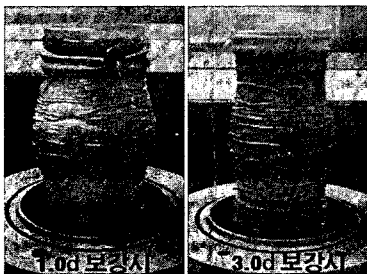


그림 7. 시험 종료시 형상

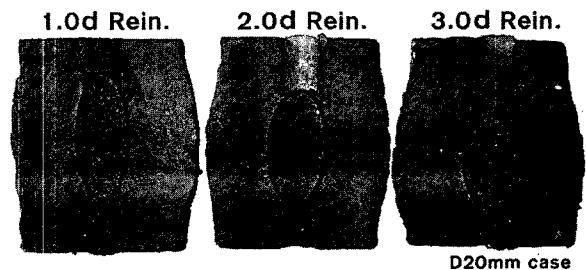


그림 8. 20mm 보강체의 보강 심도별 변형형태

경향은 보강체의 직경과는 무관하게 발생하는 것으로 확인되었다.

3.3.2 보강 직경 및 심도 변화에 따른 침하거동

그림 9 및 그림 10은 구속압력이 150kPa과 250kPa인 경우에 대한 등입도 투수성 콘크리트 공시체의 보강길이 변화(무보강~3.0d보강)에 따른 하중-침하곡선이다.

그림 9 및 그림 10에 도시된 바와 같이 무보강 공시체를 대상으로 수행된 재하시험 결과에 비해 보강 공시체의 경우 동일 침하량을 유발하기 위한 소요하중의 크기가 증가하며, 최대하중에 도달한 후에는 급격히 변형이 증가하는 취성재료의 거동특성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 9와 그림 10을 통해 일반적으로 보강체의 직경이 증가할수록 침하저감효과 역시 증가함을 확인할 수 있었다. 추가적으로 그림 9(a)와 그림 10(a), 그림 9(b)와 그림 10(b) 및 그림 9(c)와 그림 10(c)의 비교를 통해 동일한 직경의 경우에도 구속압이 증가하는 경우 보강심도 변화에 따른 침하저감효과가 증가함을 확인하였다.

4. 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정기법

4.1 기본접근

본 연구에서는 보강조립토말뚝의 침하량 산정기법 제시를 위해, 그림 11에 도시된 대형삼축압축시험결과와 김 등의 수치해석결과를 토대로 등입도 투수성 콘크리트 보강이 이루어진 경우의 해석모델을 그림 12와 같이 제안하였다. 그림 12는 황 등(2005)이 제안한 바 있는 조립토 다짐말뚝의 횡방향 거동특성을 반영한 침하량 평가기법의 해석모델에 추가적으로 등입도 투수성 콘크리트 설치에 의한 보강구역을 반영한 모델이다. 본 연구에서는 등입도 투수성 콘크리트에 의해 보강이 이루어진 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정을 위해 최상부 보강구역과 말뚝의 횡방향 변형이 크게 발생하는 소성구역 및 하부 탄성구역으로 구분하여 각 구역별로 독립적으로 침하량을 산정한 후, 구역별 침하량의 합을 보강조립토말뚝의 침하량으로 정의하였다.

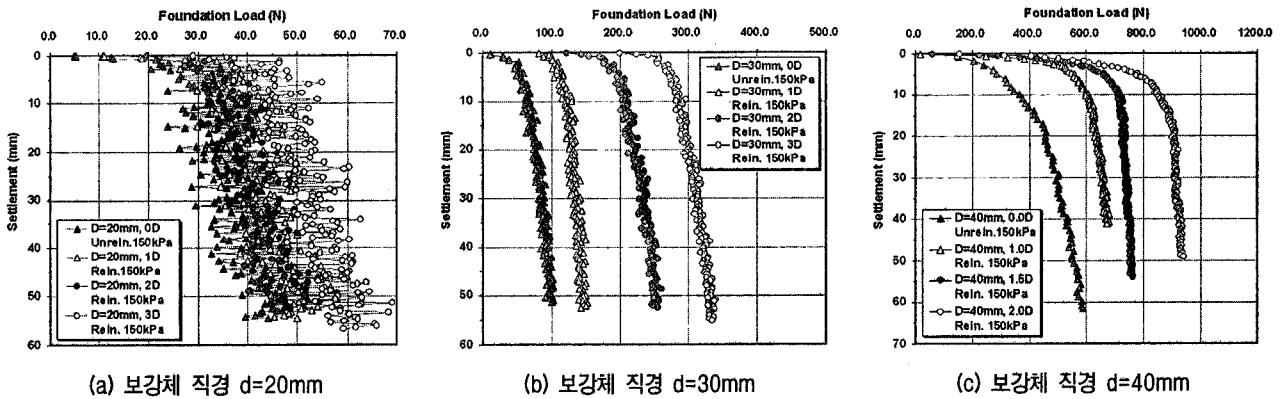


그림 9. 보강심도에 따른 하중 - 침하 거동분석(구속압 150kPa case)

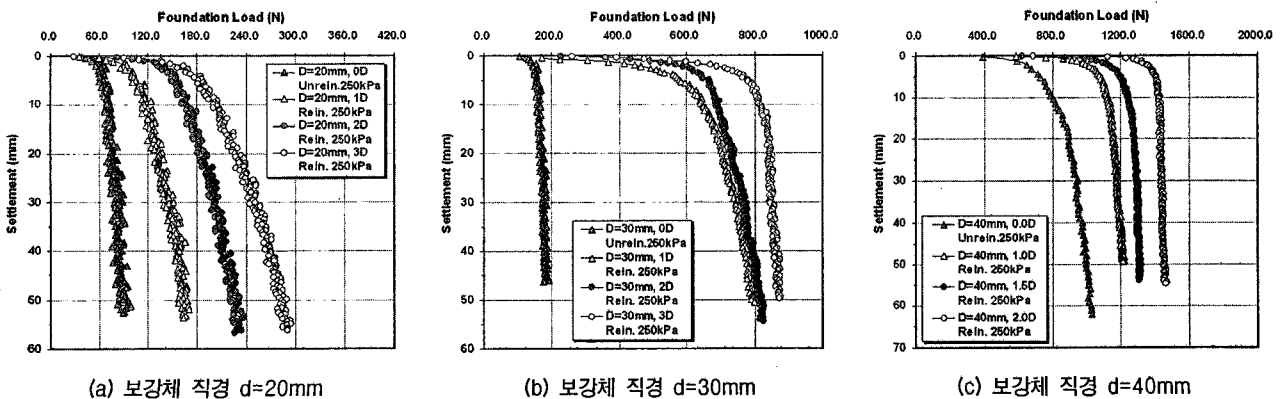
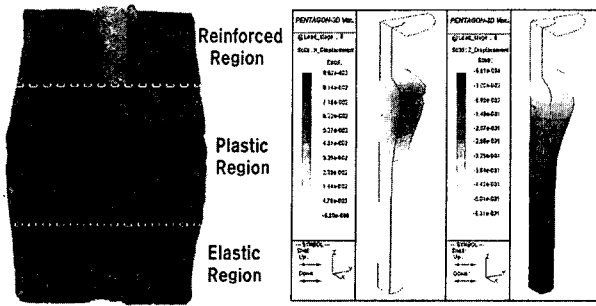


그림 10. 보강심도에 따른 하중 - 침하 거동분석(구속압 250kPa case)



(a) 삼축시험결과(본 연구) (b) 수치해석결과(김, 2006)

그림 11. 보강조립토말뚝의 삼축시험 및 수치해석

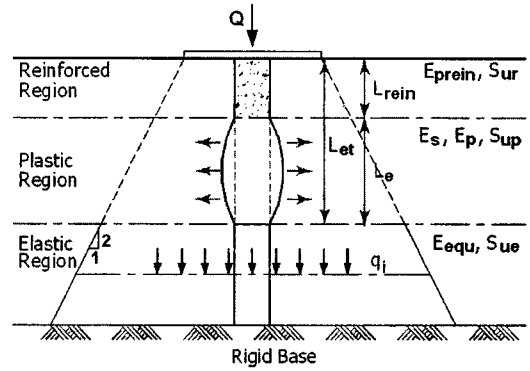


그림 12. 침하량 평가를 위한 구역 구분

4.2 상부 보강구역을 고려한 침하량 산정기법

보강조립토말뚝의 침하량 산정시 그림 12에 도시된 소성구역과 탄성구역의 침하량 산정식은 황 등(2005)이 기 제안한 침하량 산정식과 동일하나, 등입도 투수성 콘크리트 보강에 의해 발생하는 상부 보강구역의 침하량을 추가적으로 고려한다. 등입도 투수성 콘크리트 보강이 시행된 상부 보강구역의 침하량(S_{ur})은 말뚝을 단순한 축방향 부재로 가정하여 식 (1)과 같이 간단하게 평가할 수 있다.

$$S_{ur} = Q_p L_{rein} / A_p E_{prein} \quad (1)$$

여기서, L_{rein} 은 등입도 투수성 콘크리트에 의해 보강된 길이이고, E_{prein} 은 등입도 투수성 콘크리트의 탄성계수이다. 또한 Q_p 는 말뚝 두부에 작용하는 하중이고 A_p 는 말뚝의 단면적이다. 말뚝의 횡방향 변형 및 연직방향 변형을 고려한 소성구역의 침하량(S_{up}) 및 탄성구역의 침하량(S_{ue})은 필자 등이 기 제안한 식 (2)와 식 (3)에 의해 산정되며, 결과적으로 말뚝의 침하량(S_{tp})은 식 (1)을 고려하여 식 (4)와 같이 결정된다.

$$S_{up} = Q_p \cdot \left[\frac{\varepsilon_{vp} \cdot f_e}{2\alpha_o \alpha_{ch} S_u \{(1-f_e)(a_o/a)^2 + f_e\}} + \frac{L_e}{A_p E_p} \right] \quad (2)$$

$$S_{ue} = \sum_{k=1}^n q_k m_{vk} \Delta h_k \quad (3)$$

$$S_{tp} = S_{ur} + S_{up} + S_{ue} \quad (4)$$

여기서 $\varepsilon_{vp} (= S_u/G \cdot \exp[(p-p_o)/S_u - 1])$ 는 횡방향 팽창에 대한 체적변형률, a_o 는 말뚝 초기반경, f_e 는 파괴면 형상가정에 따른 저감계수(일반적으로 0.7)이다. 또한 α_{ch} 는 말뚝의 점착력계수이고, A_p 및 E_p 는 각각 말뚝

의 단면적 및 재료의 변형계수이며, S_u 는 원지반의 비배수전단강도이다. 식 (2)의 a 는 말뚝의 체적팽창 이후의 반경으로서, $a = a_o / \sqrt{1 - \varepsilon_{vp}}$ 에 의해 평가된다. 식 (3)에서 n 은 하부구역 침하량 산정을 위해 세분한 층의 개수이고, q_k 는 k 번째 지층의 중앙에 작용하는 하중으로 Boussinesq 방법이나 혹은 2 : 1 분포법에 의해 평가한다. Δh_k 는 k 번째 지층의 두께이며, m_{vk} 는 조립토에 의한 원지반 치환효과를 고려한 k 번째 지층의 환산 체적압축계수이다. 또한 본 연구에서 체적압축계수와 변형계수와의 관계는 Poulos 등(1975)에 의해 제안된 관계식을 적용하였다.

4.3 지반침하를 고려한 응력분담비 결정방법

황 등(2005)은 말뚝에 작용하는 하중의 정량적 평가를 위한 응력분담비(m) 결정법을 아울러 제안한 바 있으며, 그 과정을 간단하게 정리하면 다음과 같다. 응력분담비는 말뚝의 침하량(S_{tp})과 인접 지반의 침하량(S_{is})이 동일하다는 가정 하에 식 (5)에 의해 산정된 지반 침하량과 식 (4)에 의해 산정된 말뚝 침하량을 상호 비교하여, 평가된 침하량의 차이가 허용범위 이내로 수렴할 때까지 응력분담비와 이에 따른 말뚝과 지반에 작용하는 하중을 변화시켜가며 결정한다.

$$S_{is} = \mu_o \mu_1 q_s B / E_s \quad (5)$$

여기서 q_s 는 지반의 분담응력이고, E_s 는 지반의 변형계수이며, B 는 기초의 폭, μ_o 와 μ_1 은 침하량 산정을 위한 수정계수이다.

5. 제안식의 검증 및 분석

5.1 수치해석을 통한 제안식의 검증

5.1.1 수치해석에 적용된 지반 및 말뚝의 강도정수

본 연구에서 제안한 보강조립토말뚝의 침하량 평가 기법의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석 프로그램인 *Pentagon^{3D}*를 사용한 3차원 수치해석을 수행하였으며, 해석결과를 제안기법에 의한 침하량 예측 결과와 비교하였다. 수치해석은 지반요소를 Modified Cam-Clay Model로 적용한 경우와 Mohr Coulomb Model을 적용한 경우의 두가지 조건으로 수행하였으며, 지반강도정수는 황 등이 일반 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정식의 검증을 위해 적용한 강도정수와 동일한 값을 적용하였다. 즉, 경상남도 김해시 인근에서 채취된 불교란 시료 중 총 11개소에 대해 취득된 동일 심도의 압밀시험과 압밀 비배수(\bar{C}_U) 삼축압축시험 등의 자료들을 분석하고 시료의 공학적 특성이 유사한 5개소를 선별하여, Modified Cam-Clay Model과 Mohr-Coulomb Model의 지반 특성 값 결정을 위한 자료로 활용하였다. 다만 등입도 투수성 콘크리트의 강도정수는 김 등(2006)이 실험을 통해 제

시한 값을 적용하였다. 표 2는 3차원 해석에 적용된 지반, 말뚝, 보강체 및 재하판 등의 입력 특성값이다.

해석시 지반 및 말뚝은 8절점 고체요소(solid element)를 사용하였으며, 강성 재하판을 모델링하여 표 3과 같이 재하판위로 총 23단계로 하중을 가하여 응력-변형거동을 고찰하였다. 수치해석에 적용된 말뚝은 지름 1.0m 및 길이 10m, 연약층 두께는 10.0m이며 재하판 직경은 3.0m 및 5.0m로 정의하였다. 해석 격자망은 말뚝의 최상단면을 X, Y평면으로 지정하고 Z방향으로 투영하여 3차원으로 모델링 하여 Z축 방향을 하중작용 및 말뚝의 근입방향으로 정의하였다. 또한, 원형으로 가정한 말뚝과 재하판의 형상을 고려하여 1/4 단면만을 모델링하여 해석을 수행하였다. 그림 13은 *Pentagon^{3D}* 프로그램 해석에 적용된 격자망 형상이며, 그림 14는 해석격자망의 경계조건에 대한 개요도이다. 해석에 적용된 각 해석 단계별 하중값은 표 3과 같다.

5.1.2 수치해석을 통한 변형거동 분석

그림 15는 보강조립토말뚝의 침하 및 횡방향 거동에 대한 해석결과이다. 그림에 도시된바와 같이 등입도 투수성 콘크리트로 말뚝의 상부를 보강하는 경우, 연직 및 수평변형 발생심도가 보강부분 하부로 이동됨을 확인할 수 있었다. 말뚝의 상부에 작용하는 하중으로 인해 발생하는 연직방향 압축 및 수평방향 팽창의 발생 심도가 점차 지반 하부쪽으로 유발되는 본 해석결과를 통해, 등입도 콘크리트 보강에 의해 조립토 다짐말뚝의 침하 저감 및 지지력 증가가 가능하다는 결론을 유추할 수 있다.

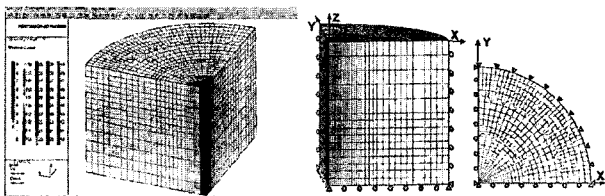


그림 13. 해석격자망의 형상

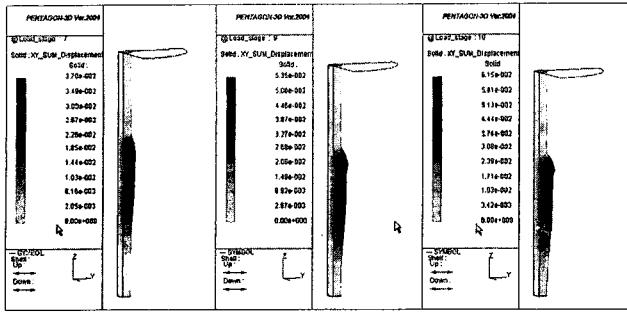
그림 14. 경계조건 개요

표 2. 3차원 유한요소해석에 적용된 입력 특성값

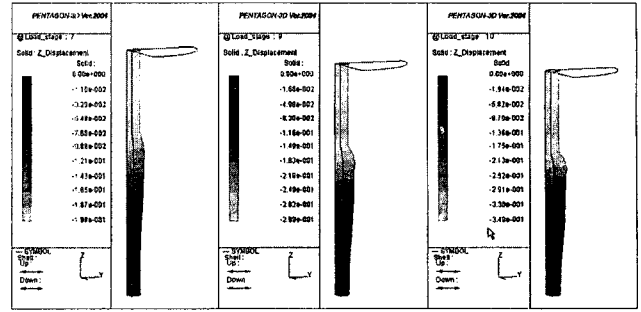
구분	γ	E	ϕ	C'	ν	λ	κ	M	길이	직경	구성모델
원지반	16.55	1794.2	20.4	14.42	0.400	0.239	0.043	0.788	10	-	MCC
조립토말뚝	22.56	30411.0	39.0	0.00	0.300	-	-	-	7.0	1	MC
보강체	22.56	441299	40	210.8	0.300	-	-	-	3.0	1	MC
재하판	77.01	2.06e8	-	-	0.167	-	-	-	t=0.3	3, 5	Elastic
단위	kN/m^3	kPa	°	kPa					m	m	

표 3. 해석을 위한 하중조건(kPa)

하중단계	1	2	3	4	5	6	7	8
작용하중	10	15	20	30	40	60	80	100
하중단계	9	10	11	12	13	14	15	16
작용하중	120	140	160	180	200	220	240	260
하중단계	17	18	19	20	21	22	23	
작용하중	280	300	320	340	360	380	400	

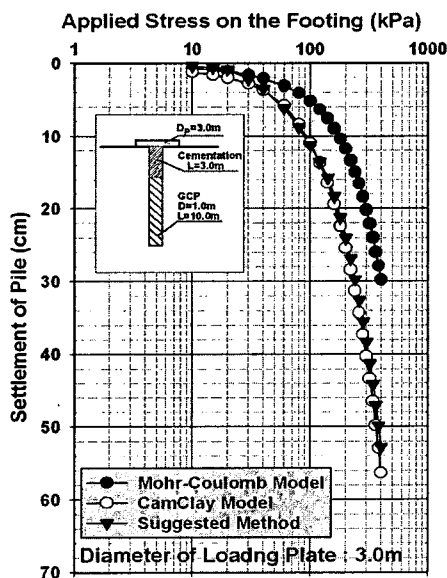


(a) 수평변위 발생형태

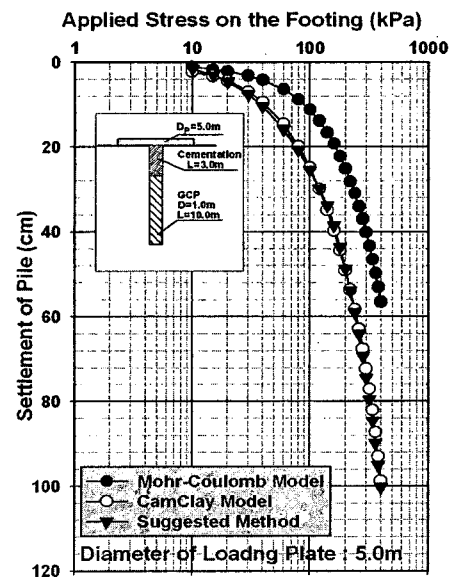


(b) 연직변위 발생형태

그림 15. 보강조립토말뚝의 연직 및 횡방향 거동



(a) 재하판 크기가 3.0m인 경우



(b) 재하판 크기가 5.0m인 경우

그림 16. 3차원 수치해석과 제안된 평가기법의 결과 비교

5.1.3 수치해석결과와 제안기법의 침하량 비교

수치해석을 통해 분석된 보강조립토말뚝의 침하량과 제안된 침하량 평가기법을 통해 산정된 침하량의 비교는 그림 16과 같다. 그림 16에 도시된 바와 같이 전체적인 하중-변위 특성곡선과 비교하여 보면, 본 연구에서 제안한 기법은 Modified Cam-Clay Model을 토대로 해석된 침하량과 크기 및 변화경향 등의 측면에서 매우 유사한 결과를 보이는 것을 확인하였으나 Mohr-Coulomb Model을 토대로 해석된 침하량과는 차이를 보이는 것으로 평가되었다. 일반적으로 점성토의 응력-변형 거동 특성을 Modified Cam-Clay Model이 Mohr-Coulomb Model 보다 효과적으로 모사한다는 측면을 고려할 때, 제안된 침하량 평가기법은 효과적으로 조립토 다짐말뚝의 침하량을 예측하고 있다고 볼 수 있다.

이와 같은 결과는 조립토 다짐말뚝의 주된 변형거동

인 수평방향의 팽창을 침하량 산정에 반영한 측면(그림 12 참조)과 수평방향 변형거동을 점성토의 비배수 거동 평가에 유용한 기법인 Tresca 파괴규준을 적용하여 평가한 측면(황 등, 2005 참조)에 기인한 결과로 판단된다.

아울러 본 절에서 수행된 분석을 통해, 연약한 점성토 지반에 설치되는 조립토 다짐말뚝의 거동특성 평가 등을 위해 수치해석을 실시할 경우에는 Modified Cam-Clay Model을 적용하는 것이 보다 합리적인 분석 방법이라는 사실과 Mohr-Coulomb Model의 경우에는 지반의 변형 거동 특성 등을 과소평가하는 경향을 확인할 수 있었다.

5.2 제안식에 의한 변수분석

5.2.1 변수분석개요

본 분석에서는 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정을 위

표 4. 보강조립토말뚝의 침하거동 분석에 적용된 입력 특성값

구 분	원지반의 강도정수		말뚝재료의 강도정수		구 분	기타 분석조건	
	값	단위	값	단위		값	단위
단위중량	16.0	kN/m^3	23.0	kN/m^3	보강부 변형계수	4.0	GPa
내부마찰각	0.0	°	30.0	°	말뚝길이, 원지반 두께	10.0	m
접착력	20.0, 50.0	kN/m^2	0.0	kN/m^2	말뚝 직경	1.0	m
변형계수	4000	kN/m^2	30000	kN/m^2	작용하중	200	kN/m^2
포이슨비	0.4	-	0.3	-	치 환 율	30	%

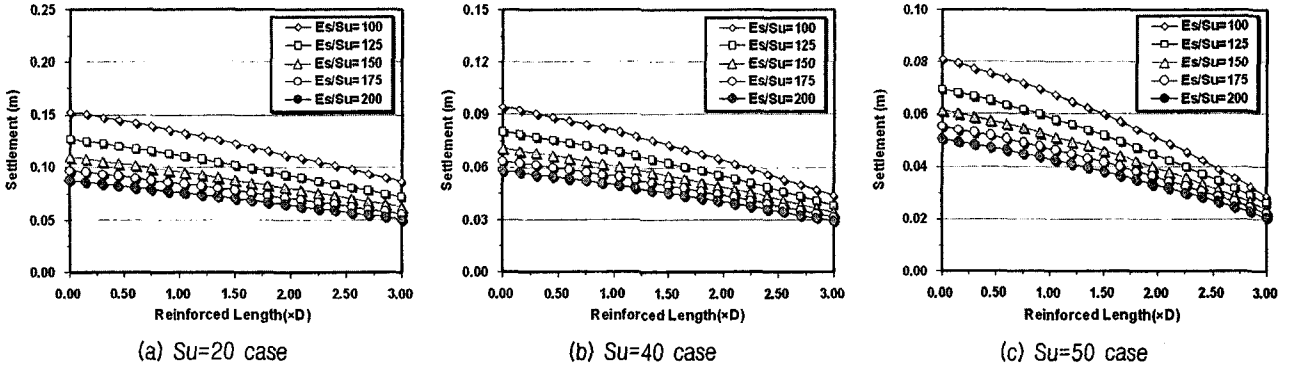


그림 17. 지반의 변형계수비 변화에 따른 침하거동

해 제안된 제안식에 의해 지반조건, 말뚝조건 및 말뚝의 설치형태들을 변화시켜가며 설계인자들이 조립토 다짐 말뚝의 침하에 미치는 영향에 대한 다양한 분석을 수행하였다. 본 분석을 위해 가정된 입력 특성치들을 정리하면 표 4와 같다.

5.2.2 지반의 강도변화에 따른 분석

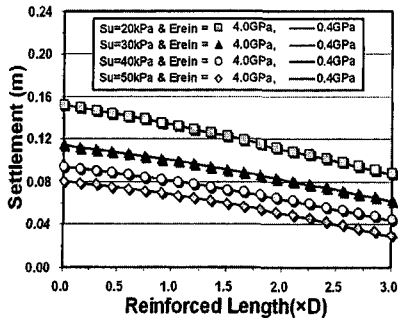
그림 17은 지반의 변형계수비(E_s/S_u) 변화에 따른 보강조립토말뚝의 거동분석결과이다. 분석은 표 4에 제시된 특성값을 기본적으로 적용하였으나, 지반의 비배수전단강도(S_u)는 20~50kPa까지 변화시켜가며 분석을 시행하였다. 분석결과 보강조립토말뚝의 침하량은 지반의 변형계수비 증가 및 보강길이 증가에 따라 감소하는 것을 확인하였다. 또한 지반의 비배수 전단강도가 동일한 경우, 보강길이 증가에 따른 침하량의 감소 정도는 지반의 변형계수 변화에 큰 영향을 받지 않음을 확인하였다. 그림 17(a)와 같이 원지반의 비배수전단강도가 20kPa인 경우 보강심도가 3.0d까지 증가됨에 따라 E_s/S_u 가 100일 경우에는 약 43.1%의 침하량 감소가, E_s/S_u 가 200인 경우에는 약 42.1%의 침하 감소가 유발되어 큰 차이가 없었으며, 그림 17(b)와 같이 원지반의 비배수전단강도가 40kPa인 경우에는 E_s/S_u 가 100인 경

우 53.6%, E_s/S_u 가 200인 경우 49.7%의 침하량 감소효과를 보였다. 또한 가장 큰차이를 보이는 그림 17(c)의 원지반의 비배수전단강도가 50kPa인 경우에는 E_s/S_u 가 100일 경우 약 64%, E_s/S_u 가 200인 경우에는 약 59%의 침하량 감소가 유발되어 5% 내외의 미소한 차이를 보였다. 추가적으로 조립토 다짐말뚝의 보강에 따른 효과는 그림 17(c)의 E_s/S_u 가 100인 경우와 같이, 지반의 비배수전단강도가 크며 변형계수가 작은 경우가 가장 큰 것으로 분석되었다.

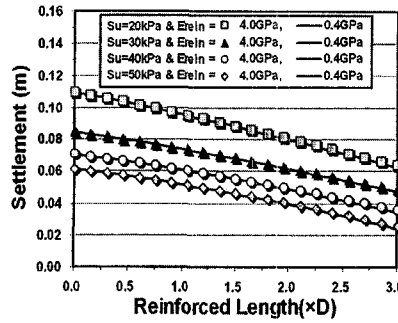
5.2.3 보강체의 강도변화에 따른 분석

그림 18은 보강체의 변형계수 변화에 따른 보강조립토말뚝의 거동분석결과이다. 분석은 전절과 동일하게 표 4에 제시된 특성값을 기본적으로 적용하여 시행하였으며, 다만 지반의 변형계수비(E_s/S_u)를 100~200까지 변화시키고 보강체의 변형계수는 0.4GPa과 4.0GPa의 두가지 경우로 가정하여 분석을 시행하였다.

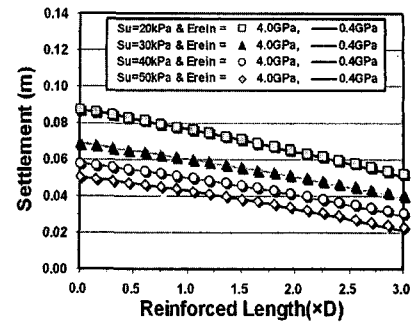
보강체의 변형계수 변화에 따른 분석결과 보강체의 변형계수(E_{rein})가 4.0GPa에서 0.4GPa로 감소하여도 산정되는 침하량의 크기 변화는 미소한 것으로 분석되었으며, 가장 큰 변화를 보이는 지반의 비배수전단강도 50kPa의 경우도 변형계수비가 100(그림 18(a))에서 200



(a) $E_s/S_u=100$ case

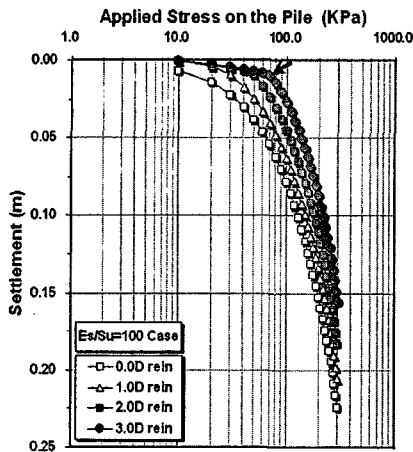


(b) $E_s/S_u=150$ case

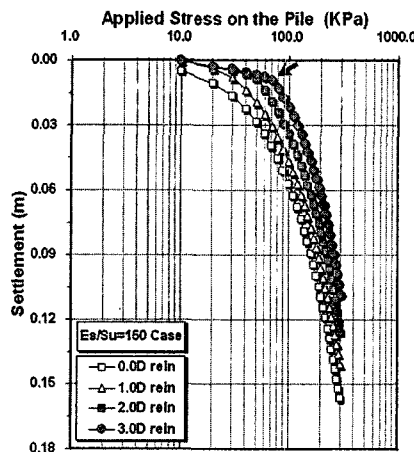


(c) $E_s/S_u=200$ case

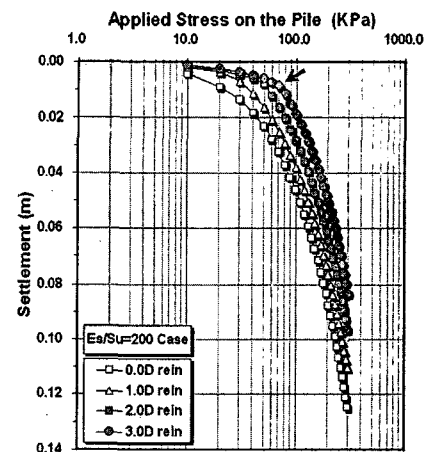
그림 18. 보강체 변형계수 변화에 따른 거동



(a) $E_s/S_u=100$ case



(b) $E_s/S_u=150$ case



(c) $E_s/S_u=200$ case

그림 19. 작용응력에 따른 보강조립토말뚝의 거동특성

(그림 18(b))까지 변화함에 따라 약 5.3%~9.6%가량의 변화를 보였다. 추가적으로 보강체의 변형계수 증가에 따른 침하 저감 효과는 지반의 비배수 전단강도와 변형계수가 클수록 증가하는 것으로 분석되었다.

5.2.4 작용응력 변화에 대한 조립토 다짐말뚝의 침하 거동 분석

그림 19는 작용응력을 10~300kPa까지 점진적으로 변화시켜가며 침하거동을 분석한 결과이다. 분석결과 보강길이의 증가에 따라 침하량이 감소하는 전형적인 경향을 보였다. 또한, 보강길이 증가에 따른 보강 조립토 다짐말뚝의 하중-침하곡선의 변화경향이 점차 강성체의 거동특성을 보이는 것으로 나타났다. 즉, 보강이 이루어지지 않은 경우 하중-침하곡선의 변형형태가 완만하나 보강의 증가에 따라 점차 곡선의 초기 기울기는 완만해지며 변곡점 전후의 기울기가 급변하는 경향(그림 19(a), (b) 및 (c)의 화살표 참조)을 확인하였다. 이는 보강길이가 증가할수록 점차 취성재료의 거동특성

을 보이는 삼축압축시험 결과와 동일한 거동으로서 이를 통해 본 제안기법이 조립토 다짐 말뚝의 보강에 따른 거동특성을 적절하게 반영하고 있음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 활용범위 확대와 성능개선을 위해 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝공법을 제안하였다. 또한, 제안공법의 효율성을 대형삼축압축시험을 통해 평가하였으며, 시험결과로 파악된 공시체의 거동특성을 토대로 침하량 산정기법을 제안하였다. 계속해서 수치해석을 통해 제안기법의 타당성을 입증하였으며, 다양한 변수분석을 시행하여 보강조립토말뚝의 설계변수들이 말뚝의 침하에 미치는 영향을 분석하였다. 이상의 연구결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

(1) 삼축압축시험 후 복합공시체의 변형형태를 육안으

로 관찰한 결과, 팽창파괴가 발생하는 것으로 확인하였으며, 보강길이 증가에 따라 측방향 변형발생 심도가 점차 깊어지는 것을 확인하였다.

- (2) 등입도 투수성 콘크리트의 보강심도, 구속응력 및 치환율이 증가할수록 조립토 다짐말뚝의 하중전달 능력이 증가하고 하중-침하거동이 취성거동으로 변화하는 것을 확인하였다.
- (3) 본 연구에서는 대형삼축압축시험과 수치해석 결과 등의 분석을 통해 파악된 등입도 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 거동특성을 반영한 정량적인 침하량 산정기법을 제시하였다.
- (4) 본 연구를 통해 제안된 등입도 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정기법의 타당성 검토를 위해 유한요소해석을 시행하였으며, 이를 통해 본 연구에서 제안한 침하량 산정기법이 등입도 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 하중-침하 거동을 효과적으로 예측할 수 있다는 것을 입증하였다.
- (5) 제안된 침하량 산정기법에 의한 다양한 변수분석을 통해 여러 설계변수들이 보강에 의한 침하저감 효과에 미치는 영향성을 고찰하였다. 이 과정에서 조립토 다짐말뚝의 보강길이 증가에 의해 말뚝의 하중-침하곡선의 변화경향이 점차 강성체의 거동특성을 보이는 것으로 분석되었다.

이외에 향후 연구과제로서는 현장실험 등을 통한 본 연구성과의 보완 및 검증 작업의 시행이 요구되는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김승욱, 김홍택, 김정호, 백승철 (2006), “빈배합 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝공법에 관한 기초 연구”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제7권, 제1호, pp.5-18.
2. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일 (1999), “강관스커트 보강 조립토 다짐말뚝의 극한 지지력 평가에 관한 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제15권, 제1호, pp.79-98.
3. 황정순, 김홍택, 김승욱, 고용일 (2005), “횡방향 변형을 고려한 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가기법 제안”, *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 제3호, pp.149-157.
4. Barksdale, R. D. and Poulos, H. G. (1983), *Design and Construction of Stone Columns*, Report No. FHWA/RD-83/026., National Technical Information Service.
5. Hughes, J. M. O., and Withers, N. J. (1974), “Reinforcing Soft Cohesive Soil with Stone Columns”, *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, pp.42-29.
6. Mokashi, S. L. et al. (1976), “Use of Stone Columns for Strengthening Soft Foundation Clay”, *Proceedings of Central Board of Irrigation and Power, 45th Annual Research Session*, Vol. III-Soils and Concrete, pp.61-68.
7. Poulos, H. G., and Davis, E. H. (1975), “Prediction of Downdrag Forces in End-Bearing Piles”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.101, No.GT2, pp.189-204.
8. Radhey, S. Sharma, B. R. Kumar, P. and Nagendra, G. (2004), “Compressive load response of granular piles reinforced with geogrids”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, pp.187-192.
9. Rao, B. G. and Bhandari, R. K. (1977), “Reinforcing of Non-Cohesive Soil by Granular Piles”, *Proceedings 6th ARC Soil Mechanics and Foundation Engineering, Singapore*, Vol.1, pp.175-178.
10. Rao, B. G. and Ranjan, G. (1985), “Settlement Analysis of Skirted Granular Piles”, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol.111, No.11, pp.1264-1282.

(접수일자 2006. 4. 28, 심사완료일 2006. 7. 19)