

등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 거동특성 및 침하량 평가기법 A Estimation Method of Settlement and The Behaviour Characteristics of Granular Compaction Pile Reinforced with Uniformly Graded Permissible Concrete

김정호¹⁾, Jeong-Ho Kim, 황정순²⁾, Jung-Soon Hwang, 김승욱³⁾, Seung-Wook Kim, 김종민⁴⁾, Jong-Min Kim, 김홍택⁵⁾, Hong-Taek Kim

- 1) (주)다산컨설턴트 지반공학부 부사장, Vice President, Geotechnical Eng. Dept., Dasan Consultants Co., Ltd.
- 2) 두산산업개발(주) 토목터키팀 과장, Section Manger, T/K Project Term, Doosan Ind. Dev. Co., Ltd.
- 3) 농업기반공사 농어촌연구원 연구원, Researcher, Rural Research Institute, KARICO
- 4) (주)도화종합기술공사 지반부 사원, Engineer, Geotechnical Dept., Dowha Consulting Engineers Co., Ltd.
- 5) 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hong-Ik University

SYNOPSIS : The behaviour characteristics of Granular Compaction Pile(GCP) are mainly governed by the lateral confining pressure mobilized in the matrix soft soil to restrain the bulging failure of the granular compaction pile. The GCP method is most effective in soft soil with undrained shear strength ranging from 15~50 kPa. However, the efficiency of this method is falling down in the more compressible soil conditions, which does not provide sufficient lateral confinement. In the present study, the GCP method reinforced with uniformly graded permissible 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. Further, for the verification of a validity of the proposed method, predicted settlements are compared with results of numerical analyses. In addition, parametric studies are performed together with detailed analyses of relevant design parameters.

Key words : GCP, Uniformly graded permissible concrete, Large triaxial compression test, Settlement

1. 서 론

근래에 들어 항만, 단지조성 및 연약지반개량 공사 등에 환경적인 측면의 고려와 재료원의 고갈로 양질의 모래 수급이 점차 어려워지는 실정이며, 이러한 현실을 반영하여 모래에 대한 대체 재료로서 쇄석 등을 사용한 조립토 다짐말뚝의 적용이 점차 증가하는 추세이다. 일반적으로 조립토 다짐말뚝의 거동은 주로 원지반의 횡방향 구속압력에 의해 지배되므로, 횡방향 구속압력이 충분하게 발휘되지 않는 지반에 대한 적용성은 크게 저하된다. 이러한 측면들을 고려하여 보다 연약한 지반까지 공법의 적용범위를 확대하고 말뚝 성능의 개선을 위한 노력들이 여러 연구자들에 의해 수행되어왔다. 본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 지지력과 변형이 말뚝 상부의 횡방향 팽창에 지배되는 측면을 고려하여 말뚝의 팽창이 주로 발생하는 말뚝 상부는 물/시멘트비를 조절한 등입도 투수성 콘크리트로 구성하며, 하부는 골재를 이용하여 다짐말뚝을 조성하는 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝(이하, 보강조립토말뚝) 공법을 제안하였다. 또한, 제안공법의 침하저감효과 및 파괴형태 파악을 위한 목적으로 점성토와 조립토 및 등

입도 투수성 콘크리트로 구성된 복합 공시체에 대한 대형삼축압축시험을 수행하였으며, 시험결과로 파악된 공시체의 거동특성을 토대로 침하량 산정기법을 제안하였다. 계속해서 *Pentagon^{3D}*를 이용한 수치해석 결과와 제안식에 의한 산출결과를 비교하여 제안기법의 타당성을 입증하였으며, 다양한 변수분석을 통해 보강조립토말뚝의 거동에 영향을 미치는 여러 설계변수들에 대한 고찰을 시행하였다.

2. 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝 공법의 제안

Huges와 Withers(1974)는 모형실험을 통해 쇄석말뚝의 주된 변형형태는 말뚝상부에서 측방향 팽창의 형태로 발생하며, 주변지반의 구속압이 지반의 파괴점을 지난 이후에는 더 이상 증가되지 않으므로 파괴하중을 상회하는 하중이 작용하는 경우 팽창과파괴가 발생된다고 제안하였다. 따라서, 조립토 다짐말뚝 상부의 인접지반이나 조립토 다짐말뚝 자체를 적절한 방법을 통해 보강하는 경우, 극한지지력 증가 및 침하 저감 효과를 유도할 수 있을 것으로 평가된다. 현재까지 조립토 다짐말뚝의 적용범위 확대와 성능개선을 위한 여러 연구들(Mokashi 등, 1976 ; Rao 등, 1977, 1985 ; Radhey 등, 2004)이 수행된 바 있다. 또한 국내의 관련 연구로서는 필자 등(1999, 2005)에 의해 수행된 강관 스키투를 이용한 조립토 다짐 말뚝의 보강 방안에 관한 연구와 조립토 다짐말뚝의 보강을 위해서 횡방향 변형이 주로 발생하는 심도까지는 물/시멘트비를 조절한 등입도 투수성 콘크리트를 활용하고, 그 이하 심도는 골재를 이용하는 보강조립토말뚝 공법을 제안하고 수치해석을 통해 지지력 증가 및 침하저감효과를 검증한 바 있다.

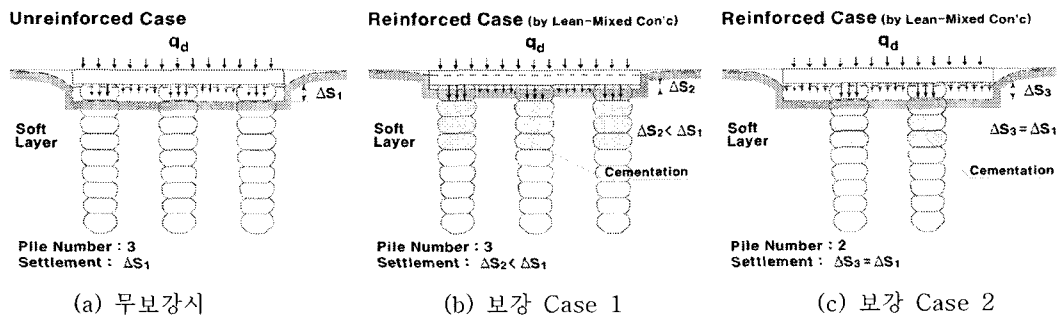


그림 1. 일반 조립토 다짐말뚝과 보강조립토말뚝의 개요 및 비교

그림 1은 본 연구에서 제시한 보강조립토말뚝의 거동 개요로서, 일반 조립토 다짐말뚝(그림 1 (a))의 보강에 의해 작용하중, q_d 에 대한 침하량을 저감시키거나(그림 1 (b)), 허용변위 만족을 위해 소요되는 말뚝 본수를 저감(그림 1 (c))시키는 효과를 유발할 것으로 예상된다. 따라서, 실제 현장 적용시 허용변위를 만족하기 위한 조립토 다짐말뚝의 소요 본수가 지나치게 과도한 경우 보강조립토말뚝이 합리적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

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 압밀비 배수시험(CU)을 실시하였다. 이때, 20, 30, 및 40mm의 직경(d)을 지나는 말뚝의 상부를 직경의 3배까지 변화시켜가며 보강을 시행하는 복합공시체를 제작하였으며, 축압조건을 3가지로(150, 200, 250kPa) 변화시켜가며 등방압밀을 진행하였다. 전단시험은 0.5mm/min의 속도의 변형률제어 방식으로 소성변형

구간의 정확한 파악을 위해 시료가 완전히 파괴되도록 축변형율이 25%에 도달 할 때까지 지속하였다.

3.2 등입도 투수성 콘크리트 및 복합 공시체의 제작

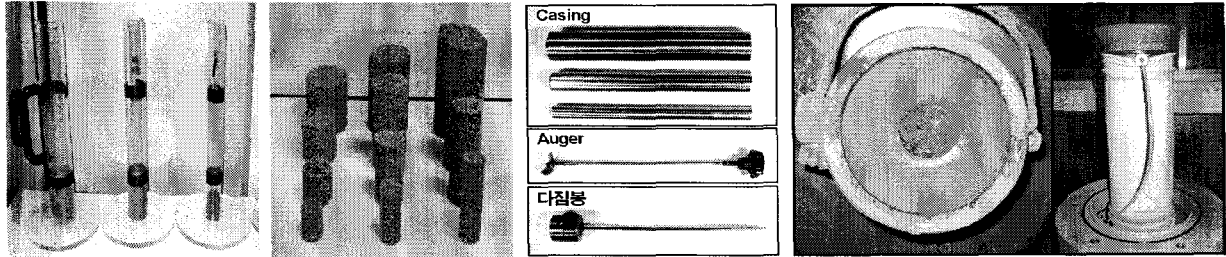


그림 2. 아크릴 몰드 그림 3. 양생 후 공시체 그림 4. 시료성형장비 그림 5. 복합공시체 및 삼축기 안치

등입도 투수성 콘크리트 보강체의 성형을 위해 그림 2와 같은 아크릴 몰드를 제작하였으며, 골재 13kg중(5mm 이하), 물 600ml, 시멘트 2kg중을 혼합하여 빈배합 투수성 콘크리트를 성형하였다. 그림 3은 몰드에서 1일간 실온양생 후 28일간 습윤양생한 공시체의 모습이다. 본 연구에서 사용된 점성토는 인천 송도해안에서 채취한 시료(CL)를 재성형하여 사용하였으며, 쇄석은 #4체를 통과하고 #10체에 남는 시료만을 선별하여 사용하였다. 재성형시료는 시료내의 불순물을 제거한 후 직경 10cm, 높이 20cm인 몰드를 이용해 점토지반을 조성하였으며, 몰드 상부에 50kPa의 상재압력을 가해서 72시간 동안 방치한 후 복합 공시체를 형성하였다. 시험용 공시체는 그림 4에 도시한 steel pipe를 이용하여 천공한 후, pipe 내의 점성토를 오거로 제거하고 다짐봉을 이용하여 소정의 높이까지 층다짐으로 설치하고, 보강부는 미리 제작된 등입도 투수성 콘크리트 공시체를 삽입하여 조성하였다. 또한, 천공시 유출되는 시료를 통해 재성형 지반의 함수비(w)와 비중(G_s)을 측정하였고, 복합 공시체의 길이(L)와 무게(W)를 측정하였다. 그림 5는 조성된 복합공시체 형상 및 대형삼축압축 시험기에 안치된 형상이다.

3.3 대형삼축압축 시험 결과

본 연구에서는 보강조립토말뚝의 지지력 증가 및 침하저감효과를 평가하기 위해 대형삼축압축시험을 수행하였으며, 삼축압축시험을 통해 파악된 복합공시체의 응력-변형 거동특성 및 파괴형상을 토대로 보강조립토말뚝의 침하량 산정기법을 제안하고 제안된 기법의 적정성을 입증하였다.

3.3.1 복합공시체의 파괴형태 검증

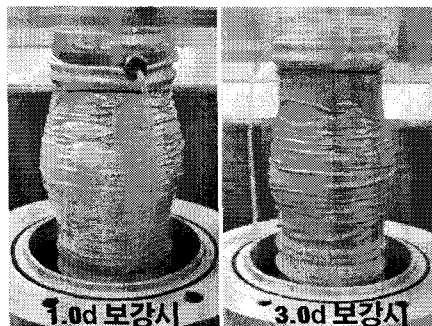


그림 6. 시험 종료시 형상

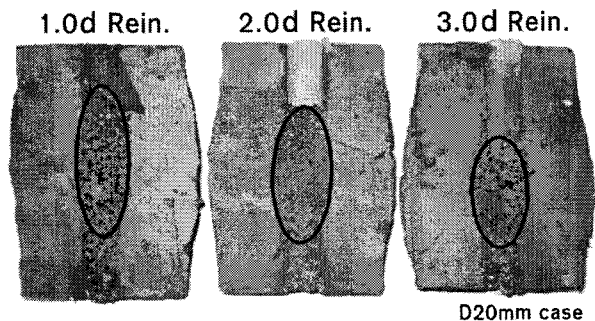


그림 7. 20mm 보강체의 보강 심도별 변형형태

등입도 투수성 콘크리트 공시체의 파괴형태 확인 결과를 그림 6에 도시하였으며, 그림 7은 공시체를 절단하여 육안으로 확인한 결과들 중에 보강체의 직경(d)이 20mm인 경우를 대표적으로 예시한 결과이다.

공시체의 파괴형태 확인결과 콘크리트 보강에 의해 말뚝상부에서는 팽창이 억제되어 복합공시체의 파괴가 보강심도 이하로 유도되는 경향을 확인하였다. 또한, 보강 길이의 증가에 따라 복합 공시체의 횡방향 변형에 의해 발생하는 팽창과 파괴 발생심도가 점차 깊어지는 것을 확인하였으며, 이러한 경향은 보강체 직경과는 무관하게 공통적으로 발생됨을 확인하였다. 추가적으로 보강심도의 증가에 따라 횡방향 변형이 발생하는 범위와 공시체의 측방향 팽창량은 점차 감소하는 경향을 보임을 확인하였다.

3.3.2 보강 직경 및 심도 변화에 따른 침하거동

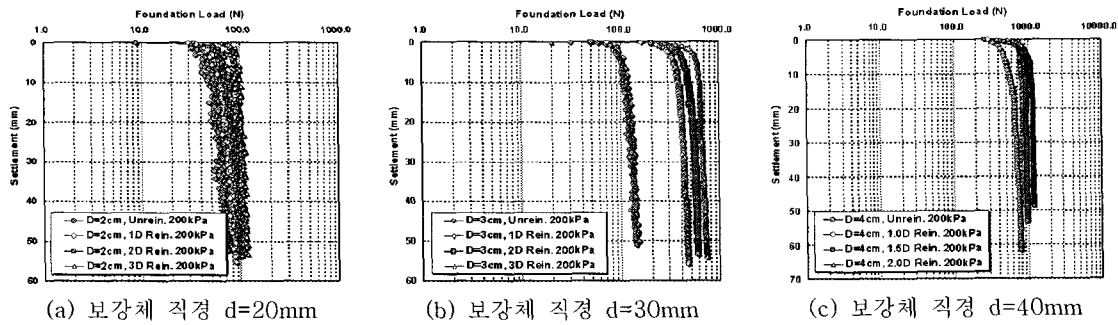
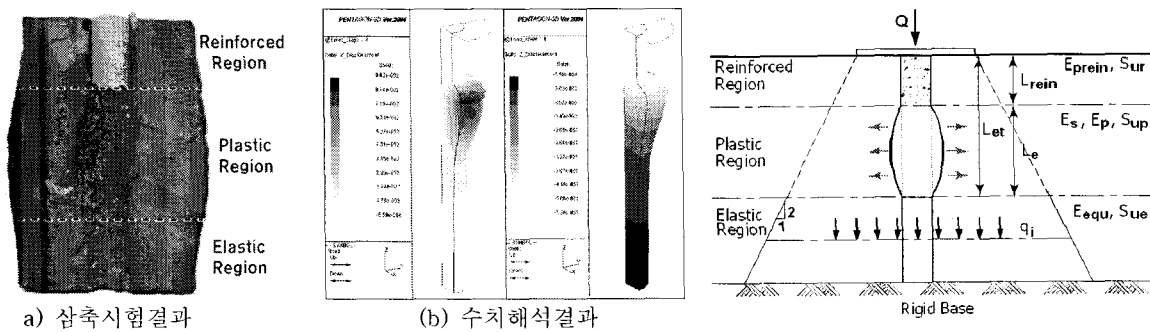


그림 8. 보강심도에 따른 하중-침하 거동분석(구속압 200kPa case)

그림 8은 등입도 투수성 콘크리트 공시체의 보강길이 변화(무보강~3.0d보강)에 따른 하중-침하곡선이며, 구속압이 200kPa인 경우를 일례로 도시한 결과이다. 그래프에 도시된 바와 같이 무보강인 경우에 비해 보강 공시체의 경우 재하에 따른 변위 발생량이 미소하며, 최대하중에 도달한 후에는 급격히 변형이 증가하는 취성재료의 거동특성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 추가적으로 실험을 통해 보강 길이 증가에 따른 지지하중의 증가 정도는 구속압력이 작은 경우 더 큰 것을 확인하여 구속압력 증가에 따라 점차 보강길이 변화에 따른 영향은 감소됨을 확인할 수 있었다.

4. 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정기법

4.1 기본접근



a) 삼축시험결과

(b) 수치해석결과

그림 10. 침하량 평가를 위한 구역 구분

필자 등(2005)은 조립토 다짐말뚝의 횡방향 거동특성을 반영한 침하량 평가기법의 제시를 위해 상부 소성구역과 하부탄성구역으로 구분한 해석모델을 기 제안한 바 있다. 그러나 상기한 침하량 산정기법은 일반적인 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정기법으로서, 본 연구와 같이 등입도 투수성 콘크리트로 보강된 경우에는 보강구역의 거동에 따른 영향을 고려하여야 한다. 그림 9 (a)는 복합공시체에 대해 수행된 삼축압축시험결과이며, (b)는 수치해석 결과이다. 그림에 도시된 바와 같이 보강조립토다짐말뚝에 하중이 작용

하는 경우, 소성구역과 탄성구역 외에 등입도 투수성 콘크리트 보강에 의한 보강구역이 추가된다.

본 연구에서는 등입도 투수성 콘크리트 보강에 대한 대형삼축압축실험 및 전산해석결과 등을 토대로 그림 10과 같은 침하량 평가를 위한 구역을 구분하였다. 그림 10에 나타난 바와 같이, 등입도 투수성 콘크리트에 의해 보강이 이루어진 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정은 최상부 보강구역과 말뚝의 횡방향 변형이 크게 발생하는 소성구역 및 하부탄성구역으로 구분하고, 각 구역별로 독립적으로 침하량을 산정한 후 구역별 침하량의 합을 보강조립토말뚝의 침하량으로 정의하였다.

4.2 상부 보강구역을 고려한 침하량 산정

보강조립토말뚝의 침하량 산정시 소성구역과 탄성구역의 침하량 산정식은 필자 등(2005)이 기 제안한 침하량 산정식과 동일하나, 그림 10에 도시된 등입도 투수성 콘크리트 보강에 의해 추가적으로 발생하는 구역의 침하량을 고려하여야 한다. 등입도 투수성 콘크리트 보강이 시행된 보강구역의 침하량(S_{ur})은 말뚝을 단순한 축방향 부재로 가정하여 식 1과 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 2와 식 3에 의해 산정되며, 결과적으로 말뚝의 침하량(S_p)은 식 1을 고려하여 식 4와 같이 결정된다.

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

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

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

여기서 $\epsilon_{vp}(= S_u/G \cdot \exp[(p-p_o)/S_u-1])$ 는 횡방향 팽창에 대한 체적변형율, 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 말뚝의 단면적 및 재료의 변형계수이며, S_u 는 원지반의 비배수전단강도이다. 식 2의 a 는 말뚝의 체적팽창 이후의 반경으로서, $a = a_o/\sqrt{1-\epsilon_{vp}}$ 에 의해 평가된다. 식 3에서 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_{rk} 는 k 번째 지층의 체적압축계수이다.

4.3 인접지반의 변형을 고려한 침하량 산정

필자 등은 말뚝에 작용하는 하중의 정량적 평가를 위한 응력분담비(m) 결정법을 기 제안한 바 있다. 응력분담비는 기초하부에 설치된 말뚝의 침하량과 인접한 지반의 침하량(S_{is})은 동일하다는 가정 하에 식 5에 의해 산정된 지반의 침하량과 식 4에 의해 산정된 말뚝의 침하량을 상호 비교하여, 평가된 침하량의 차이가 허용범위 이내로 수렴할 때까지 응력분담비와 작용하중을 변화시켜 가며 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_0 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 연구에서는 보강조립토말뚝의 변형형태 확인과 침하량 평가기법의 타당성 검증을 위해 *Pentagon^{3D}*를 사용한 3차원 수치해석을 수행하였으며, 해석결과를 제안기법에 의해 산정된 결과와 비교하였다. 해석시 지반요소는 일반적으로 연약지반의 거동을 효과적으로 모사하는 것으로 알려진 Modified Cam-Clay(MCC)모델을 사용하였으며, 상호 비교를 위한 목적으로 Mohr Coulomb(MC)모델을 사용한 해석을 추가적으로 수행하였다. 3차원 수치해석에 적용된 지반강도정수는 필자 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 압밀비배수(\bar{C}_U) 삼축압축 시험 등의 자료들을 분석하여, 시료의 공학적 특성이 유사한 5개소를 선별하여, MCC모델과 MC모델의 지반 특성값 결정을 위한 자료로 활용하였다(황 등, 2005). 다만 지반강도정수 중 등압도 투수성 콘크리트의 강도정수는 김 등(2005)에 의해 제시된 값을 적용하였다. 표 1은 수치해석에 적용된 특성값들이다.

표 1. 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
빈배합말뚝	22.56	441299	40	210.8	0.300	-	-	-	3.0	1	MC
재하판	77.01	2.06×10^8	-	-	0.167	-	-	-	t=0.3	3, 5	Elastic
단위	kN/m^3	kPa	$^\circ$	kPa					m	m	

해석수행을 위한 격자망 생성시 지반 및 말뚝은 8절점 고체요소를 사용하였으며, 강성 재하판을 모델링하여 표 2에 기술한 바와 같이 재하판위로 총 23단계로 하중을 가하여 응력-변형거동을 고찰하였다.

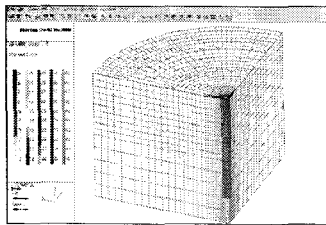


그림 11. 해석격자망의 형상

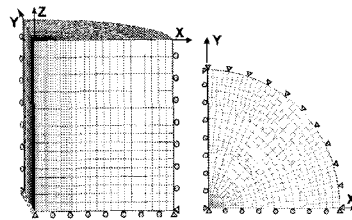


그림 12. 경계조건 개요

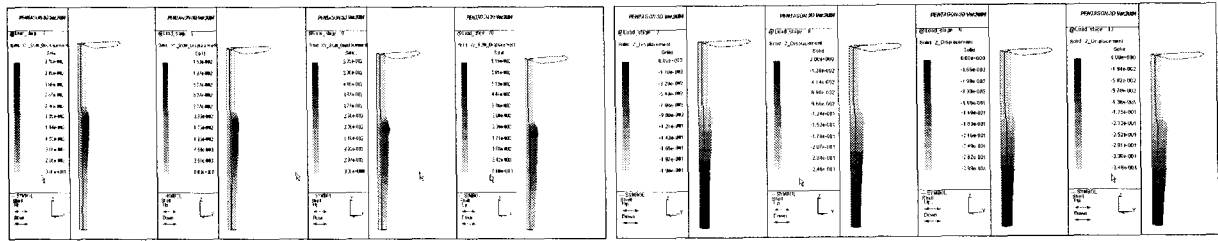
표 2. 해석을 위한 하중조건 (kPa)

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	

해석에 적용된 말뚝은 지름 1.0m 및 길이 10m, 연약층 두께는 10.0m이며 재하판 직경은 3.0m 및 5.0m로 정의하였다. 격자망은 말뚝의 최상단면을 X, Y평면으로 지정하고 Z방향으로 투영하여 -Z축 방향을 하중작용 및 말뚝의 근입방향으로 정의하였다. 또한, 원형으로 가정한 말뚝과 재하판의 형상을 고려하여 1/4 단면만을 모델링하여 해석을 수행하였다. 그림 11은 격자망의 형상이며, 그림 12는 경계조건에 대한 개요도이다.

5.1.2 수치해석을 통한 변형거동 분석

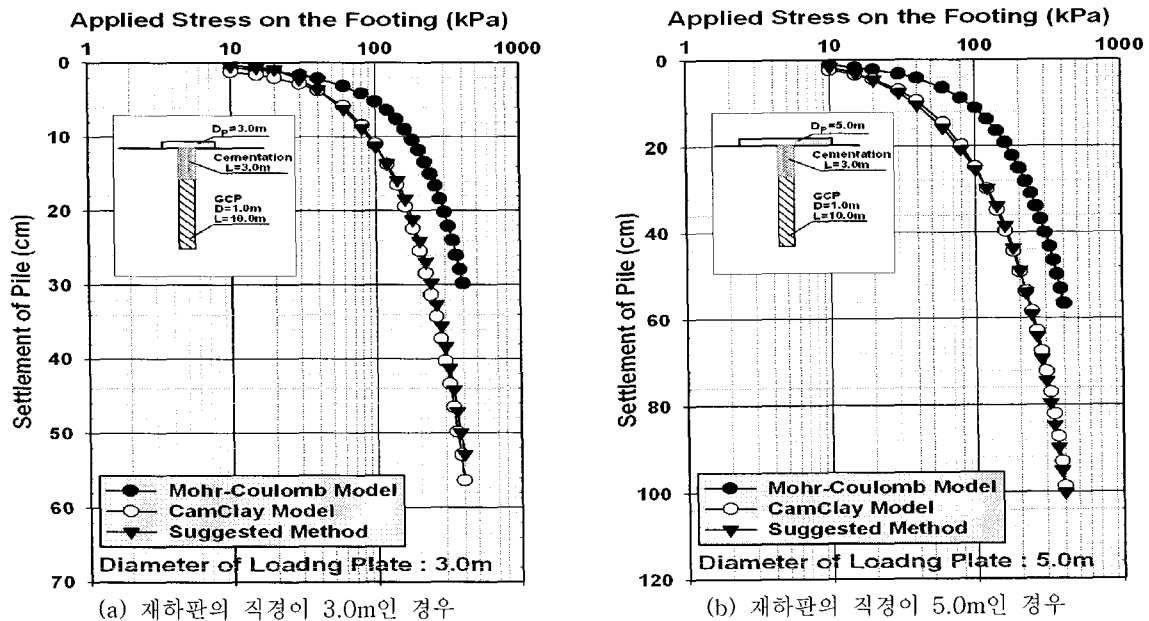
등입도 투수성 콘크리트 보강시 조립토 다짐말뚝의 침하 및 횡방향 거동 등을 파악하기 위한 해석결과를 도시하면 그림 13과 같다. 그림에 도시된 바와 같이 등입도 투수성 콘크리트 보강한 경우 연직 및 수평변위의 발생심도가 보강부분 하부로 이동됨을 확인할 수 있었다. 말뚝의 상부에 작용하는 하중으로 인해 발생하는 측방향 변형의 발생 심도가 점차 지반 하부쪽으로 유발되는 본 해석결과를 통해, 등입도 콘크리트 보강에 의해 침하량이 점차 감소하며 지지력 또한 증가한다는 결론을 유추할 수 있다.



(a) 수평변위 발생형태 (b) 연직변위 발생형태
 그림 13. 보강조립토말뚝의 연직 및 횡방향 거동

5.1.3 수치해석결과와 제안기법의 침하량 비교

3차원 수치해석을 통해 분석된 보강조립토말뚝의 침하량과, 제안된 침하량 평가기법을 통해 산정된 침하량의 비교는 그림 14와 같다. 그림 14에 도시된 결과와 같이, 전체적인 하중-변위 특성곡선과 비교하여 보면, 본 연구에서 제안한 기법에 의한 분석결과는 Modified Cam-Clay Model을 토대로 수행된 해석결과와의 비교결과 침하량의 발생크기 및 변화경향 등에서 매우 유사한 크기와 경향을 보이는 것을 확인하였으나, Mohr-Coulomb Model에 의거한 침하량과는 차이가 있는 것으로 평가되었다.



(a) 재하판의 직경이 3.0m인 경우 (b) 재하판의 직경이 5.0m인 경우
 그림 14. 수치해석과 제안기법의 결과 비교

이러한 결과는 일반적으로 점성토의 응력-변형 거동을 Modified Cam-Clay Model이 Mohr-Coulomb Model보다 효과적으로 모사한다는 측면을 고려할 때, 제안된 침하량 평가기법이 보강조립토말뚝의 응

력-변형 거동을 효과적으로 예측하고 있음을 입증하는 결과로 평가된다. 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 변형거동 특성을 과소평가하고 있다는 사실을 확인하였다.

5.2 제안식에 의한 변수분석

5.2.1 변수분석개요

본 분석에서는 보강조립토말뚝의 침하량 산정을 위한 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 표3와 같다.

표 3. 조립토 다짐말뚝의 침하거동 분석에 적용된 입력 특성값들

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
점착력	2.0, 5.0	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	-	치환율	30	%

5.2.2 지반 및 보강체의 강도변화에 따른 분석

그림 15는 지반의 변형계수비(E_s/S_u) 변화에 따른 보강조립토말뚝의 거동분석결과이다. 분석은 표 3에 제시된 특성값을 기본으로 원지반의 비배수전단강도(S_u)를 20~50kPa까지 변화시켜가며 시행하였으며, 분석결과 중에서 비배수전단강도가 20kPa와 50kPa인 경우로 한정하여 그림 15에 도시하였다. 지반 변형계수비 변화에 따른 분석결과, 침하량은 지반의 변형계수비 증가에 따라 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 지반 점착력이 동일한 경우에는 보강길이 증가에 따른 침하량의 감소 정도가 지반변형계수 변화에 큰 영향을 받지 않음을 확인하였다. 추가적으로 조립토 다짐말뚝의 보강에 따른 효과는 지반의 점착력이 크며 변형계수가 작은 경우가 가장 큰 것으로 분석되었다.

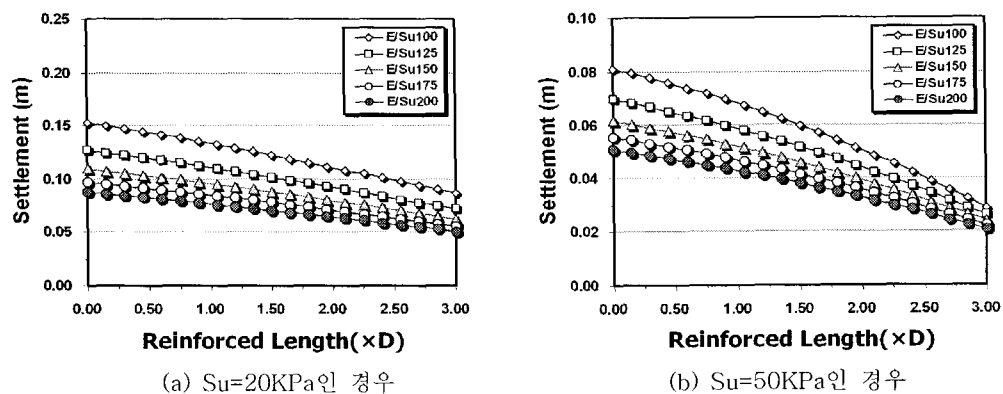


그림 15. 지반 변형계수비 변화에 따른 거동

그림 16은 등입도 투수성 콘크리트 보강체의 변형계수 변화에 따른 보강조립토말뚝의 거동분석결과이다. 분석은 표 3에 제시된 특성값을 기본적으로 적용하여 시행하였으나, 다만 지반의 비배수전단강도 (S_u)를 20~50kPa까지 보강체의 변형계수를 4.0GPa과 0.4GPa로 변화시키며 침하량을 산정하였다.

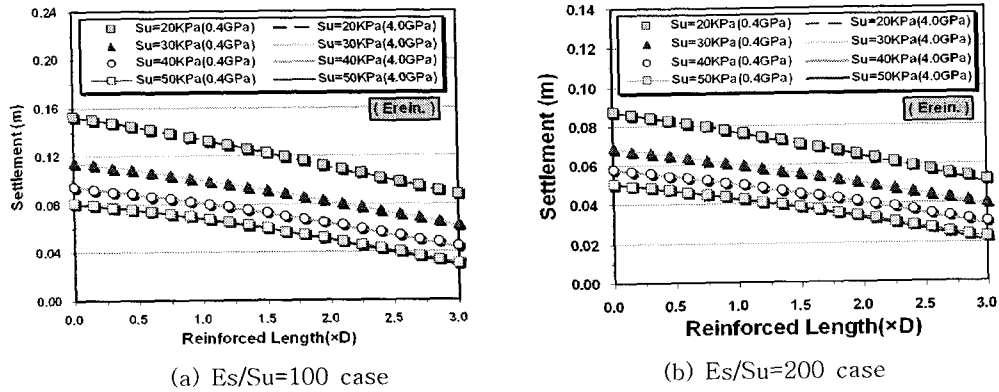


그림 16. 보강체 변형계수 변화에 따른 거동

보강체의 변형계수 변화에 따른 분석결과 보강체의 변형계수가 4.0GPa에서 0.4GPa로 감소하여도 산정되는 침하량의 크기 변화는 매우 미소한 것으로 분석되었으며, 가장 큰 변화를 보이는 비배수전단강도 50kPa의 경우도 변형계수비가 100인 경우에는 약 5.2%, 200인 경우는 9.6%가량의 변화만을 보였다.

5.2.3 작용응력 변화에 대한 조립토 다짐말뚝의 침하 거동 분석

그림 17은 작용응력을 10~300kPa까지 변화시켜가며 보강조립토말뚝의 침하거동을 분석한 결과이다. 분석결과 보강길이의 증가에 따라 침하량이 감소하는 전형적인 경향을 보였다. 또한, 보강길이 증가에 따른 보강조립토말뚝의 하중-침하 특성곡선의 형태분석결과, 무보강시에는 항복점이 확연히 드러나지 않고 침하가 진행되는 연성거동을 나타내나 보강길이의 증가에 따라 점차 하중-침하 특성곡선의 항복점이 확연히 나타나는 강성체의 거동특성을 보이는 것으로 나타났다. 즉, 보강이 이루어지지 않은 경우 하중-침하곡선의 변형형태가 완만하나 보강의 증가에 따라 점차 곡선의 초기 기울기는 급해지며 변곡점 전후의 기울기가 급변하는 경향을 확인하였다. 이는 보강심도가 증가할수록 점차 취성재료의 거동특성을 보이는 삼축실험결과와 유사한 경향으로 제안기법의 적절성을 입증하는 결과로 판단된다.

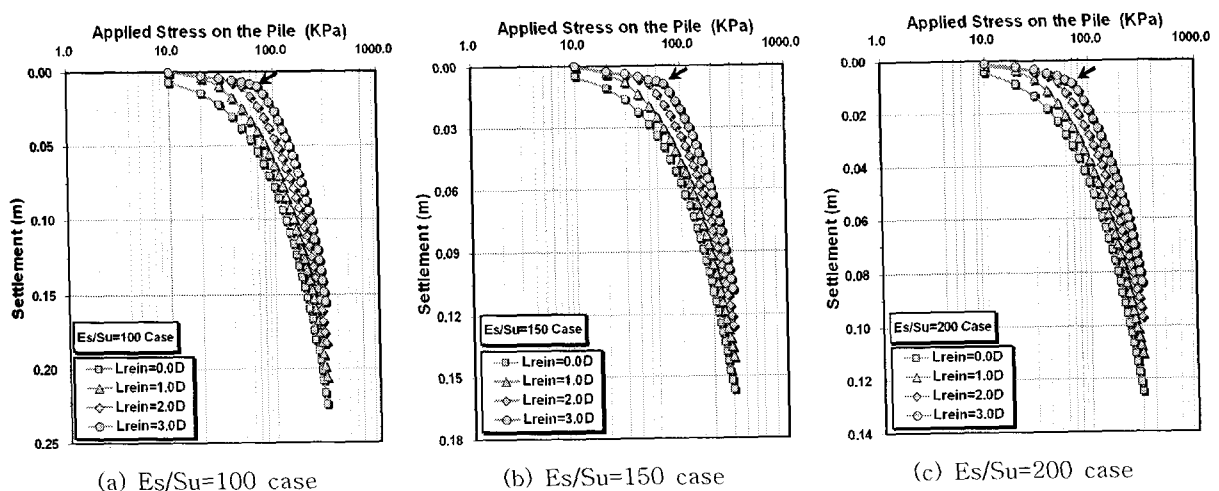


그림 17. 작용응력에 따른 보강조립토말뚝의 거동특성

6. 결 론

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 육안으로 관찰한 결과, 팽창과파괴가 발생하는 것으로 확인하였으며, 보강길이 증가에 따라 측방향 변형발생심도가 점차 깊어지는 것을 확인하였다.
- ② 등입도 투수성 콘크리트의 보강심도, 구속응력 및 치환율이 증가할수록 조립토 다짐말뚝의 하중전달 능력이 증가하고 취성거동 특성이 더욱 확연히 나타나는 것을 확인하였다.
- ③ 등입도 투수성 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝의 정량적인 침하량 산정기법을 대형삼축압축시험과 수치해석 결과 등의 분석을 통해 파악된 거동특성을 반영하여 제시하였다.
- ④ 유한요소해석을 통해 제안된 침하량 산정기법의 타당성 검토를 시행하였으며, 이를 통해 제안기법이 보강조립토말뚝의 하중-침하 거동을 효과적으로 예측하고 있음을 확인하였다.
- ⑤ 다양한 변수분석을 통해 설계변수들이 침하 저감효과에 미치는 영향을 고찰하였다.
- ⑥ 하중-침하 특성 분석결과, 삼축압축시험 결과와 유사하게 보강길이의 증가에 따라 점차적으로 하중-침하곡선의 변곡점이 확연히 드러나는 강성체의 거동특성에 근접하는 것으로 분석되었다.

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

참 고 문 헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일(1999), "강관스커트 보강 조립토 다짐말뚝의 극한 지지력 평가에 관한 연구," *한국지반공학회 논문집*, 제15권, 제1호, pp. 79~98.
2. 김홍택, 김종민, 김승욱, 황정순, 방운경 (2005), "등입도 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝 공법의 침하저감효과에 관한 연구," *한국지반환경공학회 2005 학술발표회 논문집*, pp. 85~95.
3. 황정순, 김홍택, 김승욱, 고용일 (2005), "횡방향 변형을 고려한 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가기법 제안," *한국지반공학회 논문집*, 제21권, 제3호, pp. 149~157.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.