

조립토 다짐말뚝에 대한 현장재하시험 결과 및 간편 침하량 산정방법의 제시

Field Load Test Results and Suggestion of Simple Settlement Estimation Method for Granular Compaction Piles

황 정 순¹ Hwang, Jung-Soon

김 홍 택² Kim, Hong-Taek

김 정 호³ Kim, Jung-Ho

이 상 경⁴ Lee, Sang-Kyung

이 형 규⁵ Lee, Hyung-Kyu

Abstract

In the previous studies, settlement behaviors of granular compaction piles have generally been analyzed with an evaluation of the settlement reduction factor based on the load-sharing ratio and the replacement ratio. In this approach, however, since the reinforced ground with granular compaction piles is simplified as the composite ground, only the difference of a relative vertical strength between piles and soils is taken into account without reflecting lateral behaviors of granular compaction piles. In the companion research paper, the method of estimating the settlement of granular compaction piles was proposed by synthetically considering a vertical strength of the ground, lateral behaviors of granular compaction piles, the strength of pile materials, a pile diameter, and an installation distance of the pile. In the presented study, to validate a propriety of the previously proposed method, large scale field load tests and three dimensional numerical analyses are performed. The results are analyzed in detail and compared with the predicted settlements by the proposed method. Finally, a simple method to estimate the settlement of granular compaction piles is suggested for an easy application of the practical design.

요 지

조립토 다짐말뚝의 침하거동에 대한 현재까지의 연구성과들은 주로 응력분담비와 치환율을 토대로 한 침하저감계수의 평가를 위주로 수행되어 왔으나, 조립토 다짐말뚝이 설치된 지반을 복합지반으로 단순화하여 분석을 수행함으로써, 말뚝의 변형시 주로 발생하는 상부영역의 횡방향 거동을 반영하지 못하고 응력분담비로 표현되는 연직방향의 상대강성 차이와 치환율만을 고려한다는 제약성이 있다. 필자 등은 이러한 제약성을 보완하는 데 초점을 두어, 말뚝재료의 강성 및 직경 그리고 지반의 연직방향 강성과 함께 횡방향 변형을 종합적으로 고려하는 침하량 평가기법을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 기 제안된 기법의 적용 타당성 등을 보다 구체적으로 확인하기 위해, 현장재하시험 및 3차원 수치해석 등을 실시하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 아울러 기 제안된 침하량 평가기법 등을 활용하여, 실무에서 간편하게 수 계산으로 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정이 가능한 방법을 제안하였다.

Keywords : Granular compaction pile, Lateral deformation, Settlement, Simple estimation procedure

1 (주)한국철도기술공사 지반팀 과장 (Section Chief, Korea Railroad Technical Corporation, opt593@komet.net)

2 홍익대학교 토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

3 (주)다산컨설팅 지반공학부 부사장 (Dasan Consultant Co., Ltd.)

4 (주)동아지질 해외사업부 (DONG-A Geological Engrg. Co., Ltd.)

5 서울대학 토목과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul College)

1. 서론

조립토 다짐말뚝의 침하거동에 대한 현재까지의 연구성과들은 주로 응력분담비와 치환율을 토대로 한 침하저감계수의 평가를 위주로 수행되어 왔으나, 조립토 다짐말뚝이 설치된 지반을 복합지반으로 단순화하여 분석을 수행함으로써, 말뚝의 변형시 주로 발생하는 상부영역의 횡방향 거동을 반영하지 못하고, 응력분담비로 표현되는 연직방향의 상대강성 차이와 치환율만을 고려한다는 제약성이 있다. 필자 등은 그간 수행하여 온 조립토 다짐말뚝 관련 연구성과(강운, 김홍택, 2004; 김홍택, 강운, 2004; 김홍택 등, 1999; 김홍택 등, 1998; 신방웅 등, 2001)를 보완하고, 또한 앞서 언급한 기존 다른 연구자들(Aboshi 등, 1979; Priebe, 1976; Van Impe, 1983, 1997)에 의해 제안된 방법의 제약성을 극복하는데 초점을 두고, 말뚝재료의 강성 및 직경 그리고 지반의 연직방향 강성과 함께 횡방향 변형을 종합적으로 고려하는 침하량 평가기법을 기 제안한 바 있다. 본 연구에서는, 필자 등(2005)이 기 제안한 기법의 적용 타당성 등을 보다 구체적으로 확인하기 위해, 현장재하시험 및 3차원 수치해석 등을 실시하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 아울러 기 제안된 침하량 평가기법을 이용하여 다양한 조건하에서 수행된 조립토 다짐말뚝의 응력분담 특성 파악을 위한 변수분석 결과를 토대로, 실무에서 간편하게 수 계산으로 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정이 가능한 방법을 제시하였다.

2. 제안된 침하량 평가기법 요약

필자 등(2005)이 기 제안한 조립토 다짐말뚝의 주된 변형형태인 횡방향 변형을 고려한 침하량 평가기법 중, 주요부분을 요약, 정리하면 다음과 같다.

식 (1)은 말뚝의 횡방향 변형이 발생하는 영역(L_e)의 침하량(S_{vp}) 결정식으로서 말뚝의 횡방향 변형과 연직방향 변형을 고려한 산정식이며, 식 (2)는 횡방향 변형 발생영역 하부구역의 침하량(S_{dn}) 산정식이다.

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

$$S_{dn} = \sum_{k=1}^n q_k m_{vk} \Delta h_k \quad (2)$$

여기서 Q_p 는 말뚝 두부에 작용하는 하중이고, ε_{vp} ($= S_u/G \cdot \exp[(p-p_o)/S_u - 1]$)는 횡방향 팽창에 대한 체적변형률, a_o 는 말뚝의 초기반경, f_e 는 파괴면의 형상가정에 따른 저감계수(일반적으로 0.7)이다. 또한 α_{ch} 는 말뚝의 점착력계수이고, A_p 및 E_p 는 각각 말뚝의 단면적 및 말뚝 재료의 변형계수이며, S_u 는 원지반의 비배수 전단강도이다. 식 (1)에서 a 는 말뚝의 체적팽창 이후의 반경으로서, $a = a_o / \sqrt{1 - \varepsilon_{vp}}$ 에 의해 평가된다. 식 (2)에서 n 은 하부구역 침하량 산정을 위해 세분한 층의 개수이고, q_k 는 k 번째 지층의 중앙에 작용하는 하중으로 Boussinesq 방법이나 혹은 2:1분포법에 의해 평가한다. Δh_k 는 k 번째 지층의 두께이며, m_{vk} 는 k 번째 지층의 체적압축계수이다.

필자 등은 조립토 다짐말뚝의 말뚝 두부에 작용하는 하중의 정량적 평가를 위한 응력분담비(m) 결정법을 아울러 제안하였다. 응력분담비는, 기초하부에 설치된 말뚝의 침하량과 인접한 지반의 침하량(S_{is})은 동일하다는 가정 하에 식 (3)에 의해 산정된 지반의 침하량과 식 (1)에 의해 산정된 말뚝의 침하량을 상호 비교하여, 평가된 침하량의 차이가 허용범위 이내로 수렴할 때까지 응력분담비를 변화시켜 가며 최종 결정하게 된다.

$$S_{is} = \mu_o \mu_1 \frac{q_s B}{E_s} \quad (3)$$

여기서 q_s 는 지반의 분담응력이고 B 는 기초의 폭이며, μ_o 와 μ_1 은 침하량 산정을 위한 수정계수이며, E_s 는 지반의 변형계수이다.

3. 현장재하시험 및 3차원 수치해석

3.1 현장재하시험 개요 및 방법

현장재하시험은 경기도 화성시 송산면 전곡리 인근의 시화 대송공구 대단위 간척사업 건설현장에서 수행되었으며, 지반의 조성 및 조립토 다짐말뚝의 구성을 위한 시료는 간척지 현장의 해성점토와 사석을 사용하였다. 현장재하시험 개요도는 아래의 그림 1과 같다.

현장재하시험은 조립토 다짐말뚝을 균말뚝 형태로 구성하여 수행하였다. 현장재하시험을 위한 준비는 그림 1과 같이, 2.4×2.4×1.8m로 굴착 후 케이싱($\phi=30$ cm)을 3×3(C.T.C=2D) 형태로 설치하고 연약토사를 투기한 후 조립토 다짐말뚝의 주변을 다짐하였다. 케이싱 설치 완료 후, 조립토를 케이싱에 삽입하면서 굴삭기를 이용

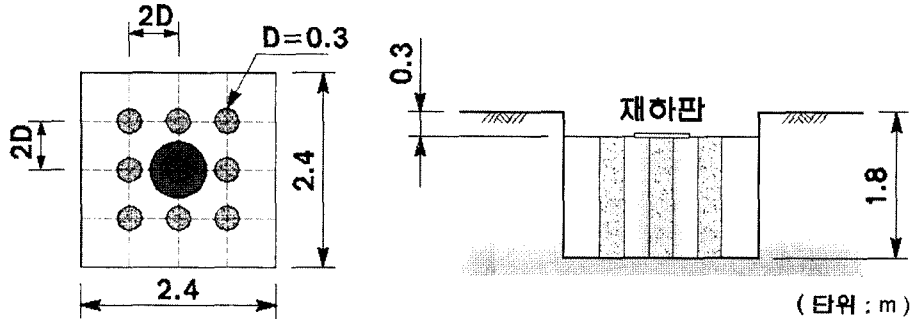


그림 1. 현장재하시험 개요도



그림 2. 현장재하시험 순서

하여 60kgf의 원통형 추를 낙하시켜 말뚝체를 다짐과 동시에 케이싱을 인발하였다. 재하시험은 지반의 조성 및 조립토 다짐말뚝의 구성 이후 1일이 경과한 시점에 재하를 시행하였다. 재하시험시 하중은 load cell에 의해, 침하량은 LVDT와 반도체형 침하계를 동시에 사용하여 data logger에 의해 수집하였다. 세부적인 현장재하시험을 위한 조립토 다짐말뚝의 시험순서는 그림 2와 같다.

3.2 3차원 수치해석 개요

본 연구에서는 현장재하시험 이외에, 조립토 다짐말뚝의 변형형태를 확인하고 또한 제안된 침하량 평가기법의 적용 타당성 등을 추가로 검증하기 위해, 유한요소해석

프로그램인 *Pentagon^{3D}*를 사용하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 해석결과를 제안된 평가기법에 의해 산정된 결과와 비교하였다. 본 *Pentagon^{3D}* 프로그램 수치해석에서, 지반요소는 일반적으로 연약지반의 거동을 합리적으로 모사하는 것으로 알려진 Modified Cam-Clay Model을 사용하였으며, 상호 비교를 위한 목적으로 Mohr-Coulomb Model을 사용한 해석을 추가적으로 수행하였다. 그림 3에 도시된 바와 같이, 지반 및 말뚝은 8절점 고체요소(solid element)를 사용하였으며, 강성 재하판을 모델링하여 재하판위로 단계하중을 재하하여 해석을 수행하였다. 수치해석에 적용된 말뚝은 지름 1.0m 및 길이 8m, 재하판은 지름 3.0m, 5.0m로 하여 해석을 수행하였고 연약층의 두께는 10.0m로 설정하였다. 해석 격자망

은 말뚝의 최상단면을 X, Y평면으로 지정하고 Z방향으로 투영하여 3차원으로 모델링하였으며, Z축 방향을 하중작용 및 말뚝의 근입방향으로 정의하였다. 또한, 원형으로 가정된 말뚝과 재하판의 형상을 고려하여 1/4 단면만을 모델링하여 해석을 수행하였다. 그림 3은 *Pentagon^{3D}* 프로그램 해석에 적용된 격자망 형상이며, 그림 4는 해석 격자망의 경계조건에 대한 개요도이다.

말뚝과 지반의 경계조건은 그림 4와 같이 원주방향의 절점을 힌지를 두어 x, y방향 변위를 모두 구속하였으며, 하단면은 롤러를 두어 y방향의 변위를 구속하고 좌측면은 x방향의 변위를 구속하였다. 3차원적인 경계조건인 z방향의 구속조건은, 지반의 최하단면을 제외하고는 모두 자유롭게 지정하였다. 재하판에 가해지는 작용하중의 경우, 지반에 대한 초기해석의 수행 이후에, 총 25단계로 점차적으로 작용하중을 증가시켜가며 재하를 시행하였다. 각 단계별 추가하중은 1단계에는 $1.96kPa$ ($0.2tf/m^2$), 2단계에는 $4.91kPa$ ($0.5tf/m^2$), 3 단계에는

$9.81kPa$ ($1.0tf/m^2$), 4단계 및 5단계에서는 $14.72kPa$ ($1.5tf/m^2$) 등을 단계별로 이전 단계하중에 추가하였으며, 6단계에서 25단계까지는 각 단계별로 $19.62kPa$ ($2.0tf/m^2$)을 이전 단계 하중에 추가하였다.

3.3 현장재하시험 결과 및 분석

3.3.1 현장재하시험 시료의 특성값

지반의 조성은 시화 대송공구 대단위 간척사업 건설 현장에서 채취한 해성점토를 사용하였으며, 시험 직후 비교란 시료를 위치별로 채취하였다. 분석에 적용된 지반 및 말뚝재료의 강도특성은 현장에서 채취한 시료를 대상으로 시행한 역학시험 및 물리시험과, 사용골재를 대상으로 시행한 대형전단시험 등을 통해 결정하였다. 표 1은 채취된 시료를 대상으로 시행한 현장시료의 특성값이며, 표 2는 분석을 위해 적용된 지반 및 말뚝의 제원과 강도특성 등을 정리한 표이다.

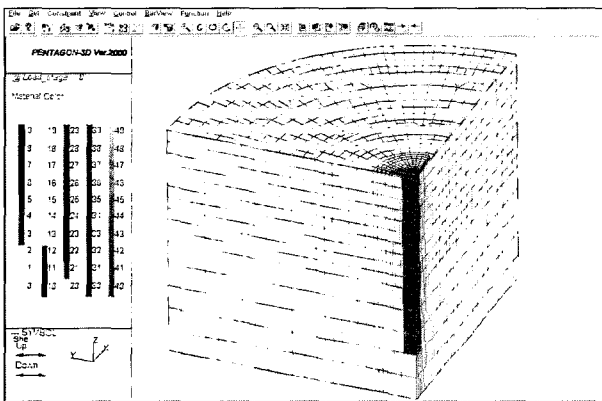


그림 3. 수치해석 격자망 형상

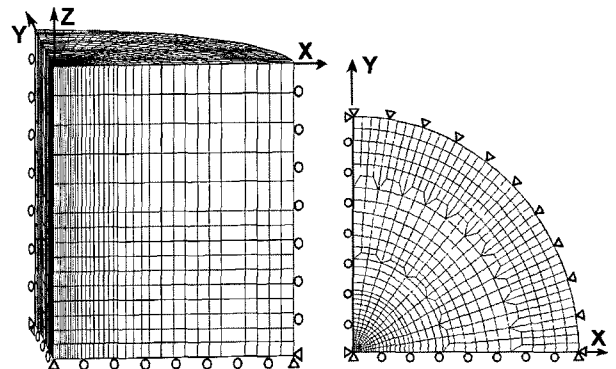


그림 4. 경계조건 개요

표 1. 역학 및 물리시험에 의한 지반 시료의 특성값

구 분	시료 1	시료 2	시료 3	시료 4	시료 5	시료 6	평균값	단위
비배수 전단강도, S_u	35.35	36.69	35.48	40.99	35.83	54.37	39.80	kPa
변형계수, E_s	2800.0	2902.0	3489.3	2459.5	3973.5	3178.3	3133.8	kPa
단위중량, γ_t							16.68	kN/m^3

표 2. 해석에 적용된 지반 및 말뚝의 제원 및 특성값

구 분	지반의 강도정수		말뚝재료의 강도정수		구 분	기타조건	
	값	단위	값	단위		값	단위
단위중량	16.7	kN/m^3	23.0	kN/m^3	말뚝길이	1.5	m
내부마찰각	0.0	°	40.0	°	말뚝직경	0.3	m
점착력	39.8	kPa	0.0	kPa	연막층두께	1.5	m
변형계수	3.1	MPa	38.0	MPa	설치간격	0.6	m
포이슨비	0.4	-	0.3	-	재하판직경	0.7	m

3.3.2 현장재하시험 결과분석 1(하중-침하 및 응력분담 특성)

그림 5는 현장에서 시험 시공한, 길이 150cm, 지름 30cm 및 설치간격 60cm(3×3)의 조립토 군말뚝에 대해 중앙 말뚝을 대상으로 실시한 재하시험의 하중-침하곡선이다. 재하시험결과를 토대로 극한하중을 산정한 바, 극한하중은 150kN 이상으로 평가되었으며, 총 극한하중 중 조립토 다짐말뚝에 의한 분담하중은 약 50kN, 지반에 의한 분담하중은 약 100kN 정도인 것으로 나타났다. 그림 6은 침하 진행에 따른 조립토 다짐말뚝과 지반 사이의 응력분담비(m) 변화 경향이다. 응력분담비는 원지반이 받는 응력(σ_s)에 대한 말뚝응력(σ_p)의 비를 의미한다. 응력분담비는 그림 6에 도시된 바와 같이 초기에는 약 27이며, 침하가 진행될수록 낮아져 파괴시에는

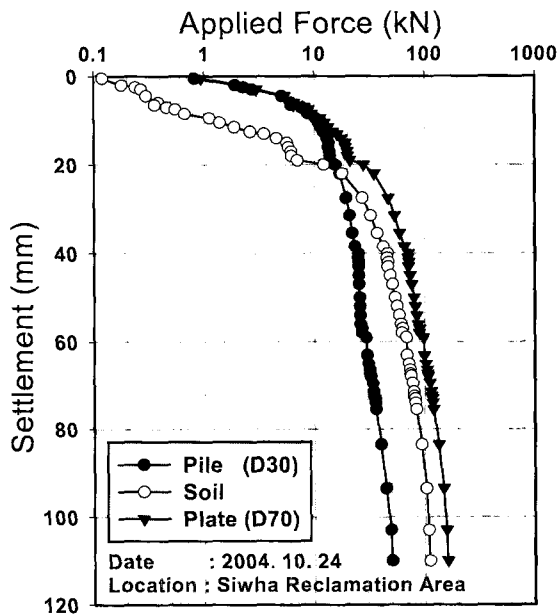


그림 5. 시험말뚝의 하중-침하곡선

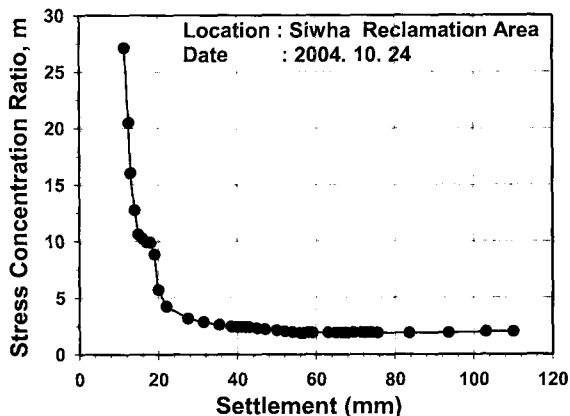


그림 6. 시험말뚝의 응력분담비

약 2.22의 응력분담비를 갖는 것으로 나타났다.

3.3.3 현장재하시험 결과분석 2(제안된 평가기법과의 비교)

현장재하시험을 통해 측정된 하중-침하관계를 토대로, 제안된 평가기법에 의해 산정된 침하량을 비교한 결과는 그림 7과 같다. 제안된 평가기법에 의한 침하량 산정은 현장재하시험 결과 측정된 단계별 재하응력을 입력값으로 하여 단계별로 침하량을 산정하였다. 그림 7에 도시된 바와 같이, 제안된 평가기법에 의한 침하량 산정값과 측정값이 하중재하 초기에 다소의 오차가 발생할 뿐 매우 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 재하시험에 의한 침하량은 다소 불규칙한 경향을 보이는 것에 반하여, 제안된 평가기법에 의해 산정된 침하량은 일정한 경향을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 현장재하시험의 경우 재하초기 일정 정도의 침하가 진행되기 이전에는 재하판과 지반 접촉부의 불균일성이 크게 영향을 미치는 것에 기인한 결과라 판단된다. 그러나 지반의 침하량이 약 2cm 발생한 재하압력 100kPa 이후 단계에서는, 재하시험결과 역시 일정한 경향을 보이는 것으로 확인하였다. 그림 8은 현장재하시험에 의해 측정된 응력분담비와 제안된 평가기법에 의해 산정된 응력분담비의 비교이다. 그림 6의 침하단계별 응력분담비를, 응력수준별 응력분담비로 변환하여 비교를 수행한 이유는, 제안된 평가기법의 경우 작용하중을 입력값으로 하여 침하량과 응력분담비를 산정하기 때문이다. 그림 8에 도시된 바와 같이 재하압력이

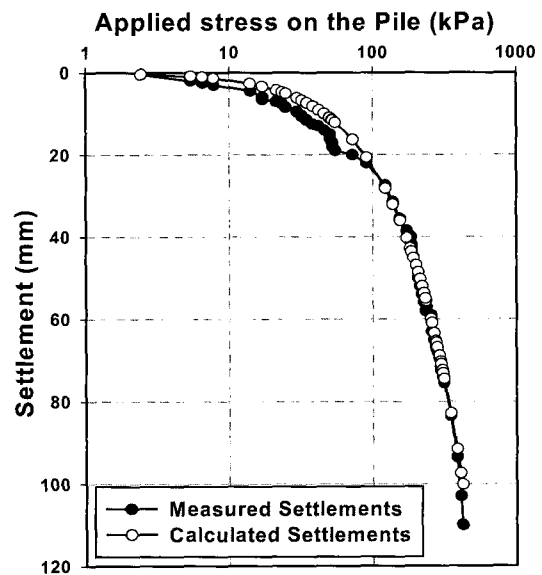


그림 7. 현장재하시험과 제안된 평가기법의 침하량 비교

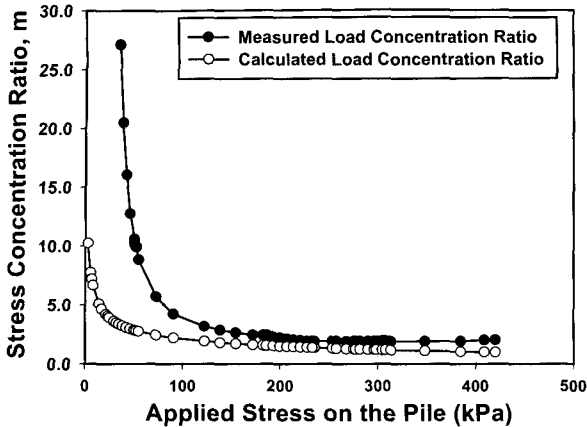


그림 8. 현장재하시험과 제안된 평가기법의 응력분담비 비교

100kPa 이전의 단계에서는, 시험결과와 산정값의 차이가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 현상 역시 현장재하시험시 발생하는 초기오차에 기인한 결과라 생각된다. 응력분담비 분석을 토대로, 본 현장재하시험의 경우 말뚝 구성시 지반의 표면높이에 비해 말뚝 두부가 다소 높아 재하 초기에는 말뚝이 재하판에 의해 전달되는 응력의 대부분을 부담하고 있다는 것을 알 수 있다. 만약 지반의 높이가 말뚝에 비해 높다면 반대의 현상이 발생할 것이다. 응력분담비 분석의 경우 역시 침하량 분석과 유사하게, 재하압력 100kPa 단계에 해당하는 2cm 가량의 침하 발생 이후에는 말뚝과 지반의 응력 분담이 정상적으로 발생하는 것으로 판단되며, 이 단계 이후의 응력분담비 측정값과 산정값은 상호 유사한 결과를 보임을 확인하였다.

3.4 3차원 수치해석 결과 및 분석

3.4.1 수치해석에 적용된 입력 특성값

3차원 수치해석의 수행은 해석 유형별로, 경상남도 김해시 인근에서 채취된 불교란 시료 중 총 11개소에

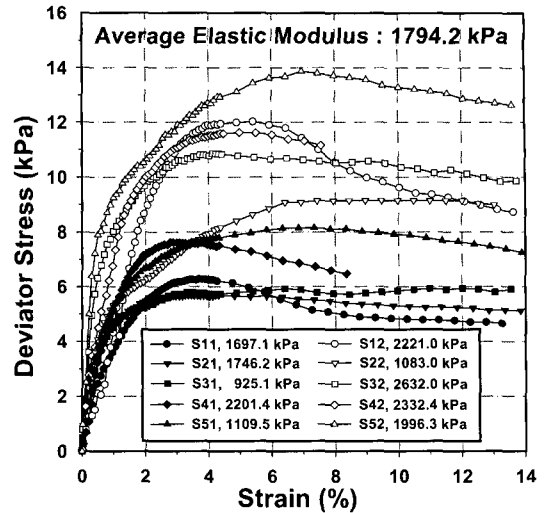


그림 9. 삼축압축시험 자료

대해 취득된 동일 심도의 압밀시험과 압밀비배수(CU) 삼축압축시험 등의 자료들을 분석하여, 시료의 공학적 특성이 유사한 5개소를 선별하여, Modified Cam-Clay Model과 Mohr-Coulomb Model의 지반 특성값 결정을 위한 자료로 활용하였다.

Modified Cam-Clay Model의 지반 특성값은 압밀시험 및 삼축압축시험 관련 총 5개 자료의 평균값을 적용하였으며, Mohr-Coulomb Model과 필자 등(2005)이 제안한 평가기법에 적용되는 지반변형계수 추정을 위한 응력-변형 특성곡선에 대해서는, 삼축압축시험 자료 중 구속압력이 49.05kPa(0.5kgf/cm²)인 경우와 98.10kPa(1.0kgf/cm²)인 두 가지 경우를 각 시료별로 수집하여 총 10개 자료의 평균값을 분석에 적용하였다. 그림 9는 삼축압축시험 자료에 의해 결정한 응력-변형 특성곡선과 이를 토대로 추정된 지반변형계수이다. 그림 9에 표기된 S_{ij} 에서 i 는 1에서 5까지의 선정된 시료 번호를 의미하며, j 는 구속압에 따른 구분으로 $j=1$ 은 구속압력이 49.05kPa인 경우이고, $j=2$ 는 구속압력이 98.10

표 3. 지반 구성모델의 입력 특성값 결정을 위한 시험자료

구분	γ (kN/m ³)	E_s (kPa)	ϕ (°)	C' (kPa)	비고
입력 특성값 결정을 위한 평균값	16.55	1794.2	20.4	14.42	E_s : 10개 자료의 평균값이며, 이외에는 5개 자료의 평균값
자료들의 표준편차	0.67	588.9	3.7	3.96	
구분	ν	C_c	C_r	e_0	포아손비는 가정한 값
입력 특성값 결정을 위한 평균값	0.400	0.550	0.099	1.454	
자료들의 표준편차	-	0.076	0.030	0.212	

표 4. 3차원 수치해석에 적용된 입력 특성값

구분	γ	E	ϕ	C'	ν	λ	κ	M	길이	직경	구성모델
지반	16.55	1794.2	20.4	14.42	0.40	0.239	0.043	0.788	10.0	-	MCC, MC
말뚝	22.56	30411.0	39.0	0.0	0.30	-	-	-	8.0	1.0	MC
재하판	77.01	2.06e8	-	-	0.167	-	-	-	t=0.3	3.0	Elastic
단위	kN/m^3	kPa	$^\circ$	kPa					m	m	

* MCC : Modified Cam Clay Model, MC : Mohr Coulomb Model

kPa 인 경우이다. 표 3은 압밀시험, 삼축압축시험 및 물리적 성질 평가 등을 통해 결정된 지반 특성값으로, 3차원 수치해석 및 제안된 평가기법 등에 의한 침하량 산정을 위해 적용된 자료들이다. 또한 표 4는, 표 3을 토대로 결정된 Modified Cam-Clay Model과 Mohr-Coulomb Model의 지반 특성값과 말뚝 및 재하판 재료 등의 입력 값이다.

3.4.2 수치해석 결과분석 1(조립토 다짐말뚝의 변형 형태)

하중재하에 따른 조립토 다짐말뚝의 연직변위(침하) 및 횡방향 변형 거동 등의 파악을 위해, Modified Cam-Clay Model을 적용한 해석결과를 도시하면 그림 10 및 11과 같다. 그림 10은 조립토 다짐말뚝의 하중재하에 따른 수평방향 변위도이며, 그림 11은 하중재하시의 연직방향 변위도이다.

그림 10을 통해, 조립토 다짐말뚝의 하중재하시 변형 거동은 팽창의 형태라는 것을 확연히 알 수 있으며, 조립토 다짐말뚝의 상부구역의 경우 말뚝의 팽창에 따른 두부 침하가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 추가적으로 그림 10과 11을 통해, 팽창영역의 하부에서는 수평변위량과 연직변위량이 크게 감소하는 결과를 보

여, 유효깊이를 가상의 지지지반으로 가정하여, 그 상부와 하부의 연직변위량(침하량)을 독립적으로 산정하는 필자 등이 기 제안한 침하량 산정기법의 합리성 등을 입증하고 있다.

3.4.3 수치해석 결과분석 2(제안된 평가기법과의 침하량 비교)

3차원 수치해석을 통해 분석된 조립토 다짐말뚝의 침하량과, 제안된 침하량 평가기법을 통해 산정된 침하량의 비교는 그림 12와 같다. 그림 12에 도시된 결과와 같이, 제안된 침하량 평가기법의 경우 일반적으로 재하 초기 낮은 압력하에서는 Modified Cam-Clay Model 및 Mohr-Coulomb Model에 의한 결과보다는 다소 큰 침하량을 보이고 있다. 그러나 점차 재하압력이 증가함에 따라, 최종단계에서는 Modified Cam-Clay Model에 의한 결과보다는 다소 작은 침하량을 나타내고 있다. 또한 전체적인 하중-변위 특성곡선과 비교하여 보면, 필자 등이 기 제안한 기법은 Modified Cam-Clay Model을 토대로 해석된 침하량과는 크기 및 변화경향 등이 매우 유사한 결과를 보이는 것을 확인하였으나, Mohr-Coulomb Model에 의거한 침하량과는 차이가 있는 것으로 평가되었다. 일반적으로 점성토의 응력-변형 거동특성을 Modified Cam-Clay

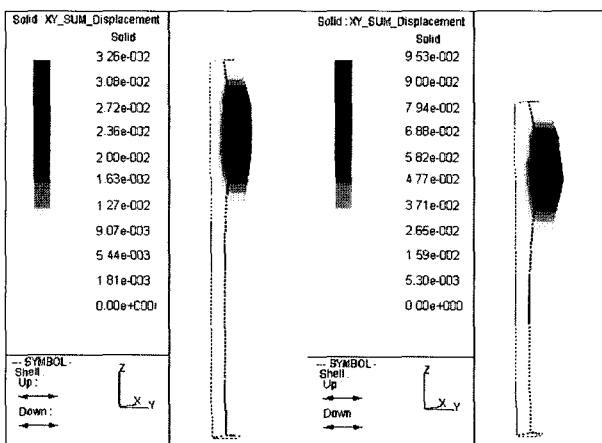


그림 10. 말뚝의 수평변위 발생형태

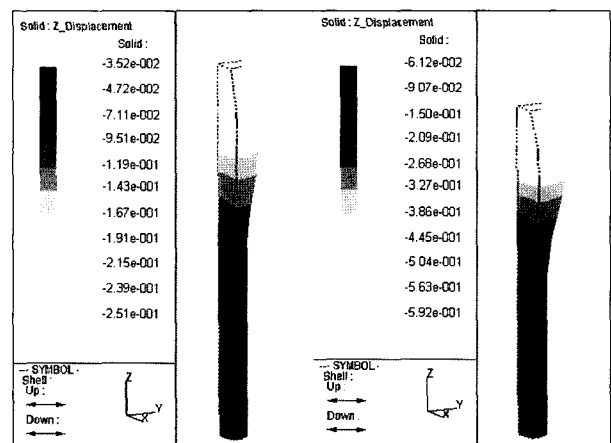
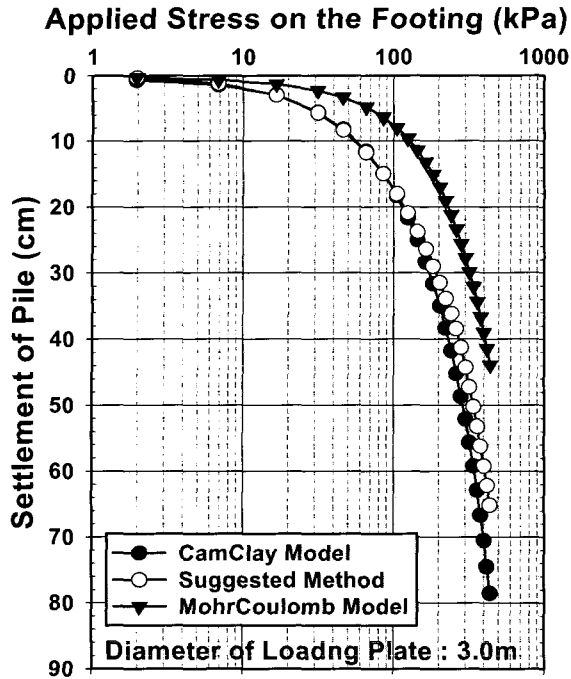
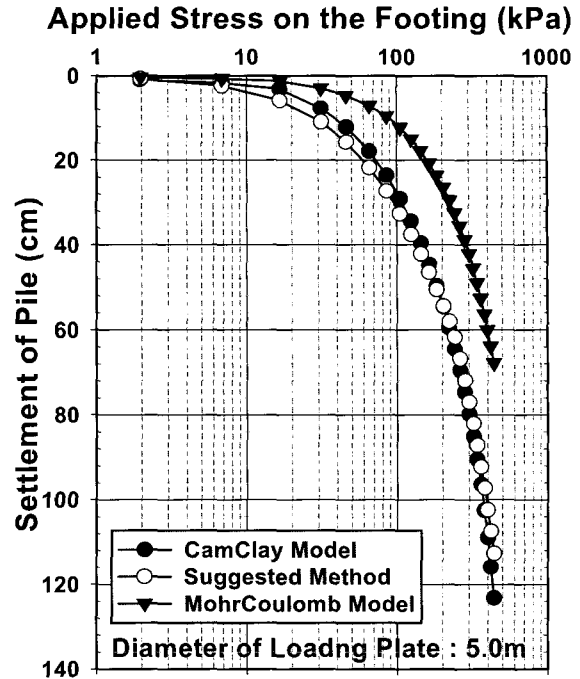


그림 11. 말뚝의 연직변위 발생형태



(a) 재하판 크기가 3.0m인 경우



(b) 재하판 크기가 5.0m인 경우

그림 12. 3차원 수치해석과 제안된 평가기법의 결과 비교

Model이 Mohr-Coulomb Model 보다 효과적으로 모사한다는 측면을 고려할 때, 제안된 침하량 평가기법은 효과적으로 조립토 다짐말뚝의 침하량을 예측하고 있다고 볼 수 있다.

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 특성 등을 과소평가하는 경향을 확인할 수 있었다.

4. 조립토 다짐말뚝의 간편 침하량 산정방법

필자 등(2005)이 기 제안한 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가기법(앞의 2장 참조)은, 기초의 재하하중은 지반과 말뚝에 의해 분담되며 지표면에서 말뚝과 지반의 침하량은 동일하다는 가정 하에, 이를 만족하기 위한 응력분담비를 일정한 규칙 하에 변화시켜가며 침하량을 최종 결정하는 과정을 거친다. 따라서 본 침하량 평가기법을 실무에 적용하기 위해서는 수치해석적 기법이 동원된 코드화가 요구된다. 그러나 만약 합리적인 수준의 응력분담비 결정이 가능하다면, 제안된 평가기법을 이용

하여 간단한 수계산 만으로도 침하량의 산정이 가능하며, 실무에서는 이 방법의 폭넓은 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4.1 작용응력 수준 및 치환율을 고려한 응력분담비

앞서 언급한 바와 같이, 본 연구를 통해 제시하고자 하는 간편 침하량 산정방법을 실무에 용이하게 적용하기 위해서는 먼저 응력분담비를 결정하여야 한다. 다양한 조건하에서 수행된 조립토 다짐말뚝의 응력분담 특성 파악을 위한 변수분석 결과를 토대로, 본 연구를 통해 제시하고자 하는 간편 침하량 산정방법에 적용 가능한 응력분담비를 작용응력 수준과 치환율에 따라 평가하여 보았으며, 그림 13은 말뚝에 의한 지반 치환율을 3개 구역으로 구분하여 수행된, 작용응력 수준별 조립토 다짐말뚝의 응력분담비 변화경향 분석결과이다. 또한 그림 13에 도시된 결과를 토대로, 간편 침하량 산정방법에 적용 가능한 응력분담비를 작용응력 수준과 말뚝의 치환율 범위에 따라 정리하면 표 5와 같다.

본 연구를 통해 제시한 응력분담비는, 지반의 비배수전단강도가 $50.0kPa$ 이하이며, 지반의 변형계수비 (E_s/S_u)가 200이하인 경우에 제한적으로 적용이 가능하나, 조립토 다짐말뚝이 설치되는 대부분의 지반특성

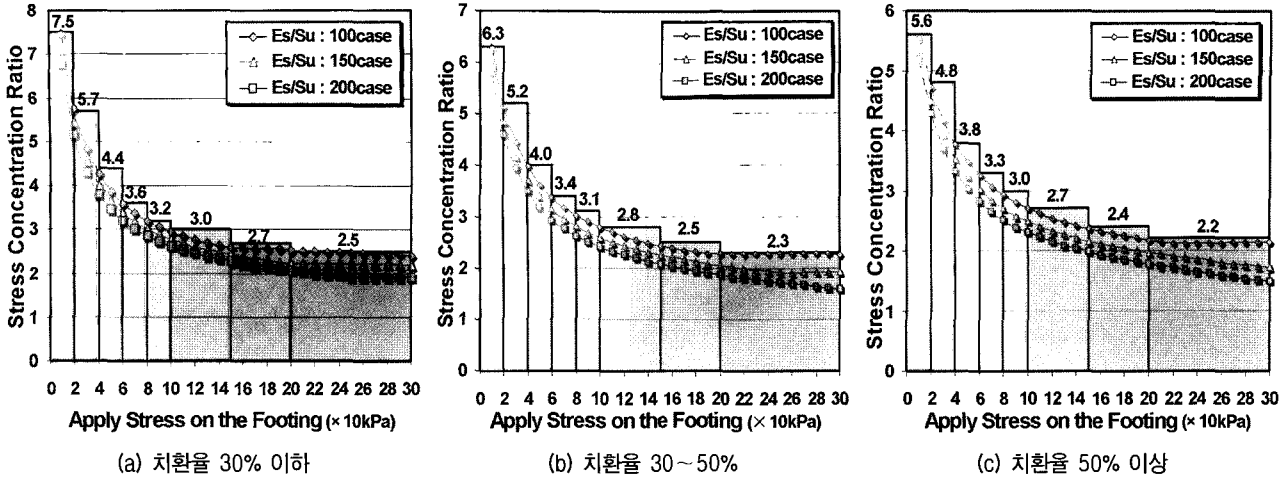


그림 13. 응력분담비 분석결과

표 5. 간편 침하량 산정방법에 적용되는 응력분담비

치 환 율	작용응력 수준 (kPa)							
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~150	150~200	200 이상
30% 이하	7.5	5.7	4.4	3.6	3.2	3.0	2.7	2.5
30~50%	6.3	5.2	4.0	3.4	3.1	2.8	2.5	2.3
50% 이상	5.6	4.8	3.8	3.3	3.0	2.7	2.4	2.2

이 이 범위 내에 존재할 것으로 판단된다.

4.2 간편 침하량 산정방법의 절차

간편 침하량 산정방법의 절차는 다음과 같다.

먼저 위에 제시된 표 5를 이용하여, 작용응력 수준과 치환율에 부합하는 응력분담비를 결정한다. 계속해서 결정된 응력분담비와 아래의 식 (4)를 이용하여 말뚝에 작용하는 하중을 결정한다. 또한 식 (4)에 의해 결정된 작용하중을 아래의 식 (5)에 대입하여 유효깊이(L_c)를 결정한 다음, 앞의 2장 식 (1) 및 (2)에 의해 침하량을 최종 산정한다.

$$Q_p = q_p \cdot A_p = A_p m \sigma / [1 + (m-1) a_s] \quad (4)$$

$$L_c = Q_p / 2 a_o \alpha_{ch} S_u \quad (5)$$

여기서, q_p 는 말뚝두부에 작용하는 응력이고, a_s 는 말뚝에 의한 지반 치환율이다.

5. 요약 및 결론

말뚝재료의 강성 및 직경 그리고 지반의 연직방향 강성과 함께 횡방향 변형을 종합적으로 고려하는 침하량

평가기법을 필자 등(2005)은 기 제안한 바 있다. 본 연구에서는, 필자 등이 기 제안한 기법의 적용 타당성 등을 보다 구체적으로 확인하기 위해, 현장재하시험 및 3차원 수치해석을 실시하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 아울러 기 제안된 침하량 평가기법을 이용하여 다양한 조건하에서 수행된 조립토 다짐말뚝의 응력분담 특성 파악을 위한 변수분석 결과를 토대로, 실무에서 간편하게 수 계산으로 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정이 가능한 방법을 제시하였다.

이외에, 본 연구를 통해 얻어진 비교, 분석 결과 중 주요내용을 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 현장재하시험 결과와의 비교, 분석을 통해, 필자 등이 기 제안한 침하량 평가기법이 조립토 다짐말뚝의 침하거동 및 응력분담 특성 등을 비교적 합리적으로 예측하고 있음을 확인하였다.
- (2) 3차원 수치해석 결과와의 비교, 분석을 통해, 기 제안된 평가기법에 의해 산정된 침하량이 Modified Cam-Clay Model을 토대로 해석된 침하량과는 크기 및 변화경향 등이 매우 유사한 결과를 보이는 것을 확인하였으나, Mohr-Coulomb Model에 의거한 침하량과는 차이가 있는 것으로 평가되었다. 일반적으로 점성토의 응력-변형 거동특성을 Modified Cam-Clay

Model이 Mohr-Coulomb Model 보다 효과적으로 묘사한다는 측면을 고려할 때, 제안된 침하량 평가기법은 비교적 효과적으로 조립토 다짐말뚝의 침하량을 예측하고 있다고 생각되며, Mohr-Coulomb Model의 경우에는 지반의 변형거동 특성 등을 과소평가하는 경향을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 강윤, 김홍택(2004), “조립토 다짐말뚝의 지지력 특성 분석-모형토조실험 결과를 중심으로”, 한국지반환경공학회 논문집, Vol.5, No.2, pp.51-62.
2. 김홍택, 강윤(2004), “모형실험에 의한 조립토 다짐말뚝의 하중-침하 관련 거동특성 분석”, 한국지반환경공학회 논문집, Vol.5, No.4, pp.33-45.
3. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일(1999), “강관스쿠트 보강 조립토 군말뚝의 극한 지지력 평가에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집 Vol.15, No.1, pp.79-98.
4. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙(1998), “조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구”, 한국지반공학회 논문집, Vol.14, No.5, pp.143-162.
5. 신방웅, 채현식, 김홍택(2001), “임의의 배치형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 극한지지력의 평가”, 한국지반공학회 논문집, Vol.17, No.6, pp.181-192.
6. 황정순, 김홍택, 김승욱, 고용일(2005), “횡방향 변형을 고려한 침하량 평가기법의 제안”, 한국지반공학회 논문집, Vol.21, No.3, pp.149-157.
7. Aboshi, H., Ichimoto, E., Enoki, M., and Harada, K. (1979), “The Compozer, a Method to Improve Characteristics of Soft Clays by Inclusion of LargeDiameter Sand Columns”, *Proceeding of International Conference on Soil Reinforcement*, Paris, France, Vol.1, pp.211-216.
8. Priebe, H. (1976), “Estimating Settlements in a Gravel Column Consolidated Soil”, *Die Bautechnik* 53, pp.160-162.
9. Van Impe, W. F., and De Beer, E.(1983), “Improvement of Settlement Behavior of Soft Layers by Means of Stone Columns”, *Proceedings of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, pp.309-312.
10. Van Impe, W. F., De Cock, F. D., and Maertens, J. (1997), “Vibro - Compactions and Stone Columns”, *Ground Improvement*, Vol.1, No.3, pp.148-157.

(접수일자 2005. 3. 11, 심사완료일 2005. 4. 19)