

빈배합 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝공법에 관한 기초연구

A Numerical Study on Granular Compaction Pile Method Reinforcing by Using Lean-Mixed Concrete

김승욱* · 김홍택** · 김정호*** · 백승철****

Kim, Seung-Wook · Kim, Hong-Taek · Kim, Jeong-Ho · Baek, Seung-Cheol

Abstract

Stone column or granular compaction pile have been used in widely during the several decades as a technique to reinforce soft cohesive soils and increase bearing capacity, accelerate consolidation settlement of the foundation soil. The bearing capacity of the granular compaction pile is governed mainly by the lateral confining pressure mobilized in the native soft soil to restrain bulging collapse of the granular pile. Therefore, the technique becomes unfeasible in soft, compressible clayey soils that do not provide sufficient lateral confinement. This paper presents the main results of numerical study of granular compaction pile which is partly mixed with lean concrete. 3D finite element analyses are performed with composite reinforced foundations by both granular compaction pile and partly mixed granular compaction pile with lean-mixed concrete. Finally, a regression formula for calculating settlement reduction coefficients is proposed in this study by using numerical analysis results and applicability of the proposed method is identified by a series of parametric study about settlement reduction coefficients.

Keywords : Partly mixed with lean concrete, Settlement reduction coefficient, Stone column, Granular compaction pile

요 지

쇄석말뚝과 조립토 다짐말뚝은 연약지반의 보강, 극한지지력의 증대 및 기초 지반의 압밀을 가속화시키기 위한 목적으로 지난 수십 년 동안 폭넓게 사용되고 있다. 조립토 다짐말뚝의 극한지지력은 조립토 말뚝의 팽창과괴를 억제하기 위한 지반의 횡방향 구속압에 지배된다. 한편, 조립토 다짐말뚝은 충분한 횡방향 구속압이 발휘되지 못하는 압축성 점토지반이나 연약지반에서는 그 기능을 기대하기 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 조립토 다짐말뚝과 일부 심도를 빈배합 콘크리트로 보강한 조립토 다짐말뚝에 대한 3차원 수치해석을 실시하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 또한, 본 연구에서는 수치해석결과를 바탕으로 침하저감계수에 대한 회귀분석식이 제시되었으며, 침하저감계수에 대한 변수분석을 통해 제안된 침하저감계수 회귀식의 타당성을 검증하였다.

주요어 : 빈배합 콘크리트 보강, 침하저감계수, 쇄석말뚝, 조립토다짐말뚝

* 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원

** 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정

**** 정회원, 안동대학교 토목환경공학과 교수

1. 서론

조립토 다짐말뚝공법은 비교적 강성이 크고 압축성이 작은 자갈이나 쇄석을 사용하여 지중에 다짐말뚝을 형성하여 지반을 보강하는 공법으로 최근 들어 국내에서도 그 활용빈도가 급격히 증가하고 있는 실정이다. 기초공학적인 측면에서 구조물과 지반의 거동 평가에는 두 가지 중요한 문제가 존재한다. 그중 하나가 구조물의 축조로 인해 야기되는 하중을 지반이 안정적으로 지지할 수 있는지의 여부를 고려하는 허용지지력의 문제이며, 다른 하나는 주어진 하중조건에 대해 산정되는 기초의 침하량이 허용치 이내로 수렴하는지의 여부를 고려하는 침하량 산정의 문제이다.

한편, 최근에 국내에서 이루어지고 있거나 계획중에 있는 항만공사 또는 대규모 산업단지 조성공사 등에 있어서 연약지반개량을 위해 불가피하게 소요되는 모래의 수급은 점차 원활한 재료공급이 어려운 실정이고, 앞으로도 이러한 현상은 더욱 심화될 것으로 판단된다.

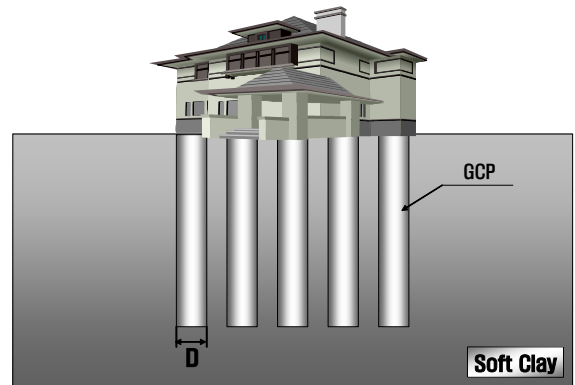
따라서, 본 연구에서는 모래의 부족현상을 해소하고 조립토 다짐말뚝의 적용범위를 보다 연약한 지반에까지 폭넓게 활용하고자 하는 목적의 일환으로 조립토 다짐말뚝의 팽창과피 심도(3~5D)까지는 물/시멘트비를 조절한 빈배합 투수성 콘크리트를 활용하고, 그 이하 심도는 골재를 이용하는 이른바 빈배합 콘크리트 활용 조립토 다짐말뚝공법의 적용가능성을 확인하기 위한 기초자료를 제공하고자 하는 목적으로 수행되었다. 이를 위해 본 연구에서는 연약지반의 보강을 위해 기존의 조립토 다짐말뚝이 적용된 경우와 조립토 다짐말뚝의 일부 심도를 빈배합 콘크리트로 보강하여 적용하는 경우에 대해 각각 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 동일한 하중이 작용하는 경우에 대한 복합지반의 침하거동을 비교함으로써 본 연구에서 제안하고자 하는 빈배합 콘크리트 활용 조립토 다짐말뚝공법의 적용성을 확인하였다.

2. 빈배합 콘크리트 활용 조립토 다짐말뚝공법의 제안

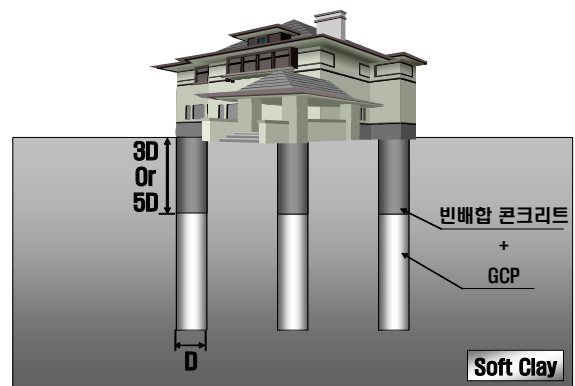
조립토 또는 모래 다짐말뚝은 연약지반을 보강하기 위한 공법으로써 기초지반의 지지력 증가, 부등침하와 총 침하량의 억제(또는 감소) 및 압밀축진을 위해 적용이 증가되어 왔다(Aboshi 등, 1979 ; Greenwood,

1970 ; Thorburn, 1975 ; Goughnour and Bayuk, 1979a ; Morgenthaler 등, 1978). 조립토 다짐말뚝으로 보강된 기초지반의 지지력 및 침하거동은 치환율, 균효과, 조립토말뚝과 원지반의 역학적 특성, 재하과정 및 속도와 컬럼을 통한 방사방향의 배수특성 등의 변수에 의존한다. 흙-컬럼간의 상호작용은 주로 조립토 다짐말뚝의 팽창을 억제하기 위한 원지반의 횡방향 구속압력의 증가에 의해 지배되므로 최적의 지반조건은 비배수전단강도가 15~50kPa 정도인 경우에 가장 효과적인 것으로 알려지고 있으며(Barksdale and Bachus, 1983 ; Juran 등, 1988), 횡방향 구속압력이 충분하게 발휘되지 않는 지반에서의 적용은 불가능하게 된다(Juran 등, 1991).

본 연구에서 제안하고자 하는 조립토 다짐말뚝의 보강방안은 기존 조립토 다짐말뚝의 팽창과피 심도(3~5D)까지는 물/시멘트비를 조절한 빈배합 투수성 콘크리트를 활용하고, 그 이하 심도는 골재를 이용하여 보강하는 이른바 빈배합 콘크리트 활용 조립토



(a) 기존 조립토 다짐말뚝



(b) 빈배합 콘크리트 보강 조립토 다짐말뚝

그림 1. 조립토 다짐말뚝공법 및 개선안 개요도

다짐말뚝공법을 제안하고자 하며, 본 공법은 그림 1에 도시한 바와 같이 기존 조립토 다짐말뚝의 지지력 증가 및 침하저감을 위해 말뚝직경의 3~5배 정도의 심도까지 보강하고, 그 하부로부터 최하단까지는 기존의 조립토 다짐말뚝을 형성하는 방법으로써, 적절한 물/시멘트비의 도출과 투수기능유지의 확인 절차 등을 통해 본 연구에서 제안하고자 하는 공법의 타당성을 확인할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 1은 빈배합 콘크리트로 보강한 조립토 다짐말뚝의 개요도이다.

3. 빈배합 콘크리트 배합설계 및 실내시험

3.1 배합설계

배합설계시에는 고속철도 노반공사 시방서(한국고속철도공단, 1997)에 명기된 필터콘크리트(filter concrete)의 배합비를 참고로 하였으며, 배합비와 시공순서는 다음 표 1에 정리된 바와 같다.

표 1. 필터콘크리트의 배합비 및 시공순서(한국고속철도공단, 1997)

골재	물	시멘트	비고
1m ³ (8~20mm)	60 ℓ	100 kg	

*시공순서

- 가) 철판을 깔고 그 위에 자갈을 올려 놓는다.
- 나) 자갈에 필요량의 물을 골고루 뿌린 후 물이 빠질 때까지 기다린다.
- 다) 물이 다 빠지고 나면 자갈에 표면수만 남는다. 이 때 필요량의 시멘트를 자갈의 표면수를 이용하여 혼합한 후 사용한다.

본 연구에서의 배합설계시에는 표 1의 내용을 참고로 하여 모래를 섞지 않고 골재, 물 및 시멘트만을 혼합하는 형태를 취하였으며, 예비배합설계를 수행한 후 시멘트의 양을 3가지로 조절하여 배합설계를 실시하였다(표 2 참조).

표 2. 본 연구에서 적용한 콘크리트 배합비

골재	물	시멘트	비고
78kg(25mm 이하)	3.6 ℓ	6 kg	Case 1
78kg(25mm 이하)	3.6 ℓ	9 kg	Case 2
78kg(25mm 이하)	3.6 ℓ	12 kg	Case 3

배합설계의 순서 및 절차는 콘크리트 표준시방서 및 표 1을 참고로 하여 수행하였으며, 골재에 물을 부은 후 물이 빠지고 나면 시료팬에 골재를 옮긴 다음 시멘트를 붓고 비빈 후 몰드를 제작하였다.

3.2 실내시험

3.2.1 압축강도시험

본 연구에서는 배합설계를 통해 제작한 후 28일 동안 습윤양생 기간을 거친 공시체에 대해 재료의 탄성계수와 최대압축강도를 확인하기 위해 압축강도시험(KS F 2405)을 수행하였다. 압축강도시험시 공시체의 지름은 0.1mm, 높이 1mm까지 측정하였으며, 지름은 공시체 높이의 중앙에서 서로 직교하는 2방향에 대하여 측정하여 평균한 것을 시료의 지름으로 하였다.

압축강도시험기는 100 ton급 만능시험기를 이용하였으며, 상하의 가압판의 크기는 공시체의 지름 이상으로 하고 두께는 25mm 이상으로 하였다.

3.2.2 투수시험

본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 일부심도를 빈배합콘크리트로 보강하는 경우 말뚝체의 지반보강기능과 함께 동시에 기대할 수 있는 배수기능의 유지 여부를 확인하기 위한 차원에서의 투수시험이 수행되었다.

콘크리트에 대한 투수시험은 크게 원주형 공시체 또는 중공형 공시체를 이용하는 out put 방법과 침투깊이를 측정하여 콘크리트 중의 물의 침투깊이를 측정하는 in put 방법이 있으며, 이들은 모두 투수계수의 정도가 매우 작은 일반적인 콘크리트의 투수특성을 평가하기 위해 사용되고 있다. 한편, 흙의 투수계수를 산정하는 대표적인 실내시험으로는 정수위 투수시험과 변수위 투수시험이 있다. 정수위 투수시험은 투수성이 비교적 큰 세립토에 적절하고, 변수위 투수시험은 투수성이 낮은 세립토에 적용한다. 본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 상부 보강영역의 빈배합 콘크리트 공시체에 대한 투수계수를 산정하기 위한 실내시험방법으로 공시체 내의 공극을 고려하여 변수위 투수시험법을 이용하여 투수계수를 산정하였다. 그림 2는 공시체, 압축강도시험 및 투수시험 전경을 도시한 그림이다.



그림 2. 공시체, 압축강도시험 및 투수시험 전경

3.3 실내시험 결과

3.3.1 압축강도시험결과

본 연구에서 수행된 배합설계를 거쳐 제작된 공시체에 대해 28일 양생기간 이후 실시된 압축강도시험 결과는 표 3에 정리하였다. 표 3에 정리된 결과는 각각의 시멘트 배합량에 따라 일반수(수돗물)로 습윤양생한 공시체와 해수의 평균염분농도 3.6%를 인위적으로 조제하여 만든 염수에서 양생한 공시체에 대한 결과이며, 최소값과 최대값으로 구분하여 도시하였다.

일반적으로 콘크리트의 양생에 영향을 미치는 여러 영향인자들 중 염분의 경우도 포함이 되는 것으로 알려지고 있으며, 특히 철근콘크리트의 경우에는 강도감소 내지는 내구성에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다. 그러나, 이를 감안하여 양생조건을 달리한 본 연구에서의 시험결과를 살펴보면, 각각의 시멘트 배합량에 따른 일반수 및 해수 양생조건에서 시멘트의 배합량이 클수록 탄성계수와 최대압축강도의 크기는 크게 나타나고 있으나, 양생조건에 따라서는 일정한 경향을 나타내지는 않는 것으로 나타나고 있다. 이러한 결과는 시험실 차원에서 인력에 의한 배합설계라 하더라도 비록 제한적이기는 하나 본 연구에서 모래를 섞지 않고 골재와 물 및 시멘트 만을 혼합한 공시체의 경우에는 염분이 시멘트의 경화에 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 유추할 수 있었다. 이를 통해 간접적으로 향후 해안에 인접한 지역에서 본 공법의 적용시에도 염분 또는 해수의 침투로 인해 말뚝체의 강성 내지는 강도가 크게 감소하지는 않을 것으로 판단할 수 있다.

표 3에는 본 연구에서의 압축강도시험으로부터 얻은 최대 및 평균압축강도와 탄성계수 및 평균탄성계수값을 정리한 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이 시멘트의 배합량이 많아짐에 따라 압축강도와 탄성계수가 크게 나타나고 있으나 양생조건에 따라서는 이러한 경향이 일정하게 나타나지는 않고 있으며, 이들 결과를 토대로 하여 다음 절의 수치해석의 입력자료로 활용하고자 하였다.

표 3. 본 연구에서의 빈배합 콘크리트의 압축강도 및 탄성계수

		최대 압축 강도 (kgf/cm ²)	평균값 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	평균값 (kgf/cm ²)	
일반수	12kg	F ⁽¹⁾ 12-1	47.7	42.6	3.12×10 ⁴	8.49×10 ⁴
		F 12-2	48.1		21.00×10 ⁴	
		F 12-3	42.6		1.35×10 ⁴	
	9kg	F 9-1	25.1	26.7	2.69×10 ⁴	1.25×10 ⁴
		F 9-2	40.9		0.24×10 ⁴	
		F 9-3	26.7		0.81×10 ⁴	
	6kg	F 6-1	5.7	5.7	0.10×10 ⁴	0.33×10 ⁴
		F 6-2	5.7		0.72×10 ⁴	
		F 6-3	5.7		0.16×10 ⁴	
염수	12kg	S ⁽²⁾ 12-1	59.5	63.4	1.68×10 ⁴	2.55×10 ⁴
		S 12-2	69.0		3.09×10 ⁴	
		S 12-3	63.4		2.88×10 ⁴	
	9kg	S 9-1	37.8	29.7	0.74×10 ⁴	1.17×10 ⁴
		S 9-2	37.4		2.21×10 ⁴	
		S 9-3	29.7		0.55×10 ⁴	
	6kg	S 6-1	4.1	4.3	0.25×10 ⁴	0.45×10 ⁴
		S 6-2	2.9		0.68×10 ⁴	
		S 6-3	5.8		0.43×10 ⁴	

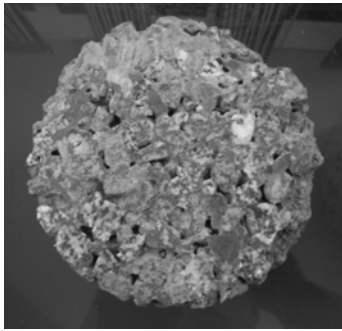
(* (1) F는 일반수, (2) S는 염수를 의미함.)

3.3.2 투수시험결과

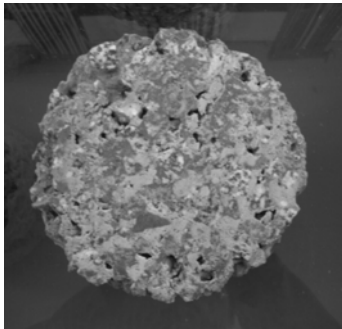
본 연구에서의 실내투수시험에 사용된 빈배합 콘크리트 공시체는 시멘트량을 각각 6kg, 9kg, 12kg를 배합비로 제작한 후 28일 동안 양생한 것을 사용하였으며, 이들 공시체를 대상으로 변수위 투수시험을 실시하였다. 공시체의 제원은 직경 15cm, 높이 30cm로 각각의 배합비에 따라 4개의 공시체를 제작

하였으며, 공시체의 대표적인 단면은 아래 그림 3에 도시하였다.

시멘트량을 각각 6kg, 9kg, 12kg 혼합한 공시체 12개에 대한 변수위 투수시험을 수행한 결과는 표 4에 정리한 바와 같으며, 각각 양생조건을 달리한 2개씩의 공시체에 대한 투수계수의 범위는 양생조건과는 무관한 결과로 나타나고 있으며, 평균값은 6kg를 배합한 공시체의 경우 $3.83 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$, 9kg를 배합한 공시체의 경우 $3.68 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$, 12kg를 배합한 공시체의 경우 $2.35 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로 나타나고 있다. 이를 통해 본 연구에서 적용하고자 하는 빈배합 콘크리트의 연약치반 내부에서의 과잉수를 외부로 배출시키기 위한 기능은 현장에서의 적용이 가능할 것으로 판단된다.



(a) 6kg



(b) 9kg



(c) 12kg

그림 3. 투수시험용 공시체

표 4. 투수시험 결과

		투수계수 (cm/sec)	평균투수계수 (cm/sec)
시 멘 트 배 합 량	6kg	F 6-1	1.18×10^{-1}
		F 6-2	3.97×10^{-1}
		S 6-1	4.81×10^{-1}
		S 6-2	3.83×10^{-1}
	9kg	F 9-1	5.84×10^{-1}
		F 9-2	3.55×10^{-1}
		S 9-1	2.81×10^{-1}
		S 9-2	3.73×10^{-1}
	12kg	F 12-1	2.73×10^{-1}
		F 12-2	2.90×10^{-1}
		S 12-1	1.36×10^{-1}
		S 12-2	2.42×10^{-1}

4. 3차원 수치해석

4.1 3차원 수치해석 개요

본 연구에서는 빈배합 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝의 변형형태를 확인하고, 빈배합 콘크리트로 보강한 말뚝의 침하저감효과를 분석하기 위해 유한요소해석 프로그램인 *Pentagon*^{3D}를 사용하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 또한, 말뚝의 직경, 보강심도, 치환율 및 배합조건을 고려한 해석결과를 바탕으로 기존의 조립토 다짐말뚝과의 침하거동을 비교, 분석하였다.

본 *Pentagon*^{3D}프로그램 수치해석에서, 지반요소는 연약 점성토의 거동을 합리적으로 모사하는 것으로 알려진 Modified Cam-Clay Model을 사용하였다. 그림 4에 도시된 바와 같이, 지반 및 말뚝은 8절점 육면체요소(hexahedral solid element)를 사용하였으며, 강성 재하판은 셸(Shell)을 사용하여 모델링하여 재하판위로 단계하중을 재하하여 해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 말뚝은 지름 1.0m, 연약층의 두께는 10m로 가정하였으며, 재하판의 지름을 치환율 20~50%에 맞게 1.41m~2.24m로 다양하게 설정하였다. 해석격자망은 말뚝의 최상단면을 X, Y평면으로 지정하고 Z방향으로 투영하여 3차원으로 모델링하여, Z축 방향을 하중작용 및 말뚝의 근입방향으로 정의하였다. 또한 원형으로 가정한 말뚝과 재

하판의 형상을 고려하여 1/4단면만을 모델링하여 해석을 수행하였다.

말뚝과 지반의 경계조건은 그림 5와 같이 원주방

향의 절점은 힌지를 두어 x, y방향 변위를 모두 구속하였으며, 하단면은 풀리를 두어 y방향의 변위를 구속하고 좌측면은 x방향의 변위를 구속하였다. 3차

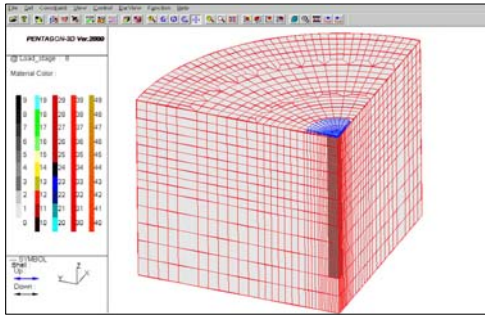


그림 4. 수치해석 격자망 형상

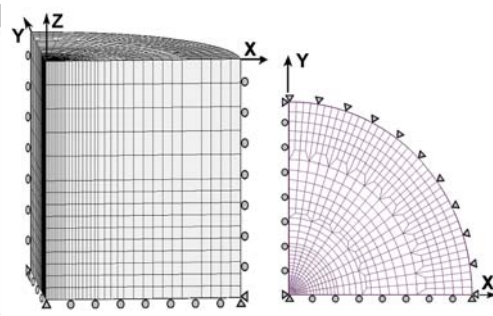


그림 5. 경계조건 개요

표 5. 수치해석에 적용된 하중단계

단 계	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계	7단계	8단계	비 고
추가하중	0	10	20	30	40	50	100	150	재하판 상부에 단위응력으로 입력
총 하 중	0	10	30	60	100	150	250	400	
단 위	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	

표 6. 지반구성모델의 입력정수 결정을 위한 시험자료

구 분	γ (kN/m ³)	E_s (kPa)	ϕ' (°)	C' (kPa)	비 고
입력정수 결정을 위한 평균값	16.55	1794.2	20.4	14.42	E_s : 총 10개 자료의 평균 이외는 총 5개 자료의 평균 포이슨비는 가정값
자료들의 표준편차	0.67	588.9	3.7	3.96	
구 분	ν	C_c	C_r	e_o	
입력정수 결정을 위한 평균값	0.400	0.550	0.099	1.454	
자료들의 표준편차	-	0.076	0.030	0.212	

표 7. 수치해석에 적용된 빈배합 콘크리트의 입력물성치

구 분	γ (kN/m ³)	E_s (kPa)	q_u (kPa)	ν	비 고	
입력정수 결정을 위한 평균값	Case 1	23.0	441,299	421.69	0.30	각각의 케이스별로 실험자료의 평균값 적용
	Case 2	23.0	1,225,831	2,618.38	0.30	
	Case 3	23.0	8,325,846	4,177.63	0.30	

표 8. 수치해석에 적용된 입력정수

구분	γ (kN/m ³)	E (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ν	λ	κ	M	길이 (m)	직경 (m)	구성모델
모형지반	16.55	1794.2	20.4	14.42	0.400	0.239	0.043	0.788	10	-	MCC
말뚝	22.56	30411.0	39.0	0.00	0.300	-	-	-	8	1	MC
빈배합 말뚝	Case 1	22.56	441299	40	210.8	0.300	-	-	-	1	MC
	Case 2	22.56	1225831	40	1309.2	0.300	-	-	-	1	MC
	Case 3	22.56	8325846	40	2088.8	0.300	-	-	-	1	MC
재하판	77.01	2.06e8	-	-	0.167	-	-	-	t=0.3	3	Elastic

MCC : Modified Cam-Clay Model MC : Mohr-Coulomb Model

원적인 경계조건인 z방향의 구속조건은 모형지반의 최하단면을 제외하고는 모두 자유롭게 지정하였다. 기존의 조립토 다짐말뚝을 빈배합 콘크리트로 보강하는 조건은 하부로부터 조립토 다짐말뚝이 설치된 이후에 소정의 심도부터 빈배합콘크리트로 보강되는 조건으로 하였으며, 보강심도에 따른 침하량 감소 등을 알아보기 위하여 보강되는 심도를 0.0D(기존의 조립토 다짐말뚝)~5.0D로 변화시키면서 해석을 시행하였다. 또한 작용하중의 경우, 원지반에 대한 초기해석의 수행 이후에 표 5와 같이 점차적으로 작용하중을 증가시켜가며 재하를 시행하였다.

4.2 3차원 수치해석의 입력변수

수치해석 수행에서 해석유형별로 입력된 지반특성은 경상남도 김해시 인근에서 채취된 불교란 시료 중 총 11개소에 대해 취득된 동일 심도의 압밀시험과 압밀비배수(\overline{CU}) 삼축압축시험 자료들을 분석하여, 압밀시험 결과가 서로 유사한 값을 보이는 5개소 값을 선별하여 Modified Cam-Clay Model과 Mohr-Coulomb Model의 입력특성값을 결정하기 위한 자료로 활용하였으며, λ 와 κ 등 Modified Cam-Clay Model의 입력정수 결정을 위한 압밀시험 및 삼축시험결과들은 총 5개 자료의 평균값을 적용하였다. Mohr-Coulomb Model과 본 연구에서 제안된 제안식에 적용되는 지반의 변형계수 추정을 위한 응력-변형률 관계곡선은 삼축압축시험결과 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.

또한, 수치해석 수행시 조립토 다짐말뚝과 관련된 변수는 황(2004)의 연구결과를 참고하였으며, 빈배합 콘크리트로 보강되는 부분과 관련된 변수는 앞서 수행된 실내시험결과를 토대로 하여 Mohr-Coulomb Model의 입력변수로 활용하였다.

표 8은 표 6과 표 7을 토대로 결정된 Modified Cam-Clay Model과 Mohr-Coulomb Model의 입력 특성값 및 말뚝과 재하판 재료의 입력값이다.

5. 3차원 수치해석 결과 및 분석

5.1 조립토 다짐말뚝의 변형거동 분석

본 분석은 기존 조립토 다짐말뚝 및 빈배합 콘크리트로 보강되는 심도를 다양하게 가정한 경우에 대한 유한요소해석결과를 통해 조립토 다짐말뚝의 거동특성을 파악하고자 하는 목적으로 수행되었다. 하중작용시 보강깊이변화에 따른 조립토 말뚝의 연직 변위 및 수평변위를 도시한 결과는 그림 6에 나타낸 바와 같다.

3가지 배합비(Case 1, Case 2 및 Case 3)에 대해 보강깊이를 0.0D, 0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D, 4.0D 및 5.0D로 변화시키는 조건에서 치환율을 각각 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 및 50%로 변화시켜가며 수행된 분석결과들중 보강깊이는 0.0D, 1.0D, 3.0D 및 5.0D인 경우에 치환율을 20%로 가정한 경우에 한하여 도시한 그림 6의 결과를 살펴보면, 최종하중 단계(400kPa)에서 나타난 연직 및 수평변위는 조립토 다짐말뚝의 상부를 빈배합 콘크리트로 보강할 경우 보강깊이의 증가에 따라 팽창과피심도가 점차 지

반하부로 이동함을 보여주고 있다. 또한 보강심도가 5D인 경우의 분석에서는 말뚝의 횡방향 변형거동이 거의 나타나지 않는 것으로 분석되어 일반적으로 팽창과괴 심도를 말뚝직경의 5배정도로 한정하는 기존의 연구성과들에 부합하는 결과를 보이고 있다. 말뚝의 상부에 작용하는 하중으로 인해 발생하는 횡방향으로의 팽창과괴가 발생하는 심도가 점차 지반 하부쪽으로 유발되는 본 해석결과를 통해 빈배합 콘크리트 보강에 의해 침하량이 점차 감소하며 지지력 또한 증가한다는 결론을 유추할 수 있다. 또한, 치환율이 증가함에 따라서도 이와 유사한 경향이 나타나고 있으므로, 빈배합콘크리트를 활용한 조립토 다짐 말뚝의 최적의 물/시멘트비를 조절할 수 있다면 말뚝의 배수기능과 보강기능을 동시에 기대할 수 있는 개선방안이 마련되어 보다 적극적인 침하감소효과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 배합강도별 침하저감효과 분석

본 분석에서는 유한요소해석 프로그램인 *Pentagon*^{3D}를 이용하여 기존의 조립토 다짐말뚝과 비교하여 일부심도를 빈배합 콘크리트로 보강한 경우 각각의 배합비에 따른 상대적인 침하저감효과를 파악하였으며, 본 수치해석 결과를 배합강도, 치환율 및 보강심도에 따라 정리하였다.

본 연구에서 배합강도에 따라 보강심도 및 치환율의 변화에 따른 침하감소 특성을 평가하기 위해 수행된 유한요소해석결과들은 표 9에 정리한 바와 같다. 표 9에 정리된 배합강도 및 치환율의 변화를 고려하여 빈배합 콘크리트 보강심도의 변화에 따른 하중 10kPa과 400kPa일때의 침하량을 살펴보면, 빈배합 콘크리트의 입력자료인 강도 및 강성이 크고 치환율이 커질수록 침하감소의 효과가 크게 나타나고 있다. 보강심도의 변화에 따른 침하량을 기존의 조립토 다짐말뚝의 침하량과 비교하여 침하감소율로 나

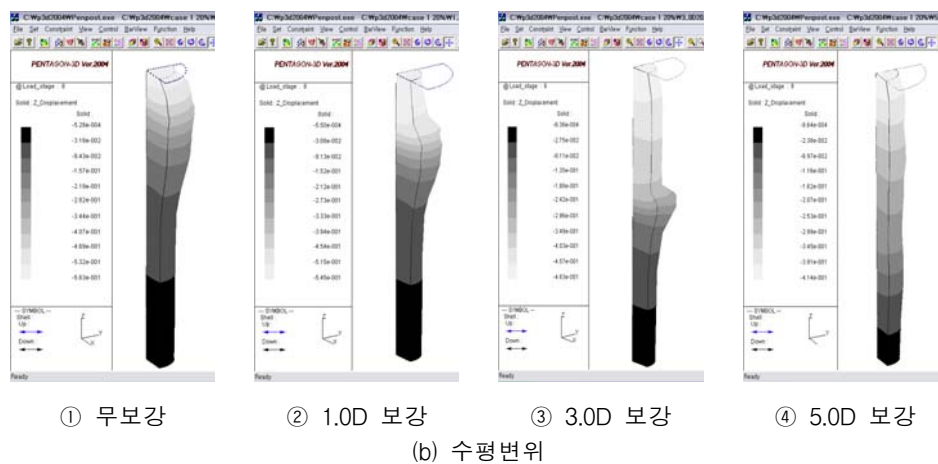
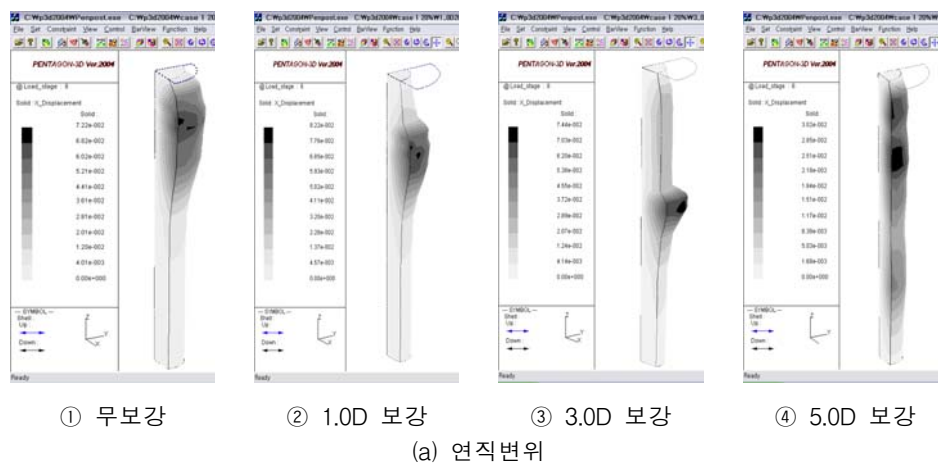


그림 6. 보강심도에 따른 연직 및 수평변위(Case 1, 치환율 20%)

타낸 결과, 실내시험으로부터 도출된 배합강도를 최소값으로 적용하고 치환율을 20%로 가정한 경우 침하감소율은 99.6%로 나타났으며, 최대의 배합강도를 적용하고 치환율을 50%로 가정한 경우 침하감소율은 29.4%로써 침하감소에 대해 가장 효과가 있는 것으로 나타나고 있다.

5.3 보강심도에 따른 침하거동 분석

그림 7~그림 9는 빈배합 콘크리트 조립토 다짐 말뚝의 보강심도를 변화시켜가는 조건하에서 수행된 수치해석결과로부터 산정된 침하량이다. 빈배합 콘크리트 조립토 다짐말뚝의 보강심도를 0.5D~5.0D로

표 9. 빈배합 콘크리트 보강심도의 변화에 따른 하중단계별 침하량

구분	보강심도	case1		case2		case3		
		10kPa	400kPa	10kPa	400kPa	10kPa	400kPa	
침하량(cm)	치환율 20%	0.0D	1.728	56.318	1.728	56.318	1.728	56.318
		1.0D	1.626	54.497	1.593	53.552	1.587	53.087
		3.0D	1.396	48.333	1.269	42.060	1.243	41.308
		5.0D	1.210	41.396	0.983	26.788	0.933	25.333
	치환율 30%	0.0D	1.443	47.751	1.443	47.751	1.443	47.751
		1.0D	1.347	43.308	1.316	42.230	1.310	42.021
		3.0D	1.154	35.888	1.049	30.182	1.028	29.680
		5.0D	1.017	30.062	0.848	18.289	0.811	16.822
	치환율 40%	0.0D	1.269	39.737	1.269	39.737	1.269	39.737
		1.0D	1.179	35.576	1.151	34.089	1.145	33.799
		3.0D	1.018	27.363	0.934	23.35	0.917	22.932
		5.0D	0.914	21.046	0.779	13.776	0.750	12.572
치환율 50%	0.0D	1.153	33.847	1.153	33.847	1.153	33.847	
	1.0D	1.071	29.920	1.046	28.499	1.041	28.095	
	3.0D	0.934	21.770	0.865	18.721	0.851	18.269	
	5.0D	0.851	16.811	0.739	11.040	0.715	9.939	

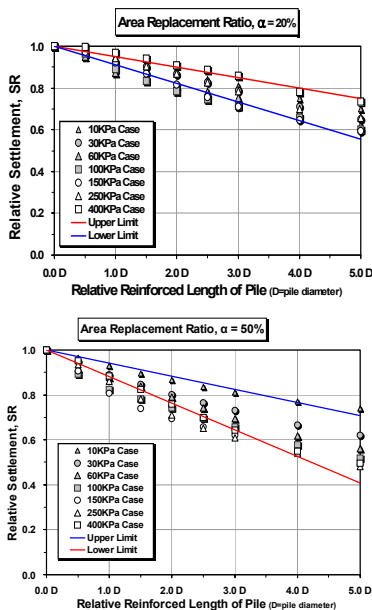


그림 7. 상대침하비-보강심도 관계(Case 1)

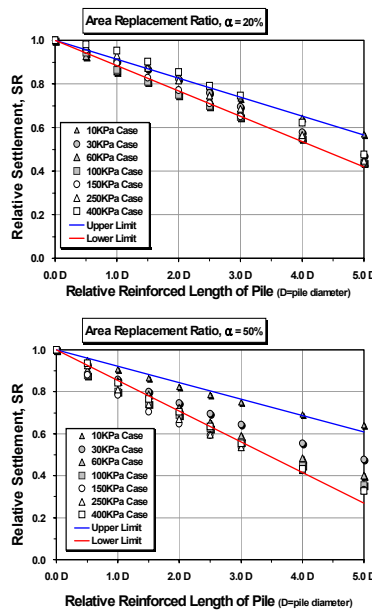


그림 8. 상대침하비-보강심도 관계(Case 2)

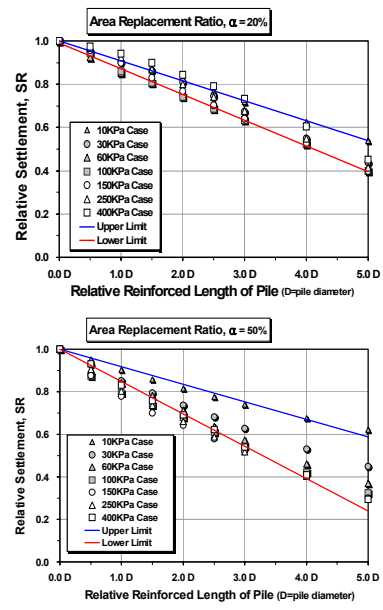


그림 9. 상대침하비-보강심도 관계(Case 3)

변화시켰으며, 빈배합 콘크리트의 배합비를 Case 1, Case 2 및 Case 3으로 변화시켜가며 분석을 수행하였다. 본 결과분석에 나타난 상대침하량은 각각의 수치해석으로 얻어진 침하량을 무보강 조립토 다짐말뚝의 침하량으로 정규화시킨 결과로 도시하였으며, 본 분석에서는 각각의 배합강도별 치환율을 20%인 경우와 50%로 가정한 경우에 대하여 나타내었다.

빈배합 콘크리트의 배합강도 및 치환율 20%와 50%를 가정한 경우의 수치해석결과를 분석한 결과, 빈배합 콘크리트의 보강심도가 증가함에 따라서 대체로 상대침하비가 감소하는 것으로 나타났다. 치환율이 20%인 조건에서 작용하중이 10kPa에서 400kPa로 증가하는 경우에 대하여 수치해석결과를 토대로 기존의 조립토 다짐말뚝 침하량과 비교한 결과 치환율 20%인 조건에서는 각 배합강도별 일반 조립토 다짐말뚝 침하량의 59.2%~99.7%, 43.7%~98.1% 및 39.8%~97.4%에 해당하는 것으로 나타났으며, 치환율 50%인 조건에서는 각 배합강도별 일반 조립토 다짐말뚝 침하량의 48.2%~96.5%, 32.6%~95.3% 및 29.4%~95.1%에 해당하는 것으로 나타났다. 따라서, 빈배합 콘크리트의 입력자료인 강도 및 강성이 크고 치환율이 커질수록 상대침하비가 작게 나타남으로써 침하감소에 효과적임을 알 수 있다. 보

강심도의 변화에 따른 침하량을 기존의 조립토 다짐말뚝의 침하량과 비교하여 상대침하비로 나타낸 결과, 실내시험으로부터 도출된 배합강도를 최소값으로 적용하고 치환율을 20%로 가정한 경우 상대침하비는 0.592~0.997로 나타났으며, 최대의 배합강도를 적용하고 치환율을 50%로 가정한 경우 상대침하비는 0.294~0.951로써 침하감소에 대해 가장 효과가 있는 것으로 나타나고 있다.

6. 회귀분석에 의한 침하저감계수 산정식 제안

본 연구에서는 하중작용에 의해 발생하는 조립토 다짐말뚝의 침하를 저감시키기 위한 목적으로 빈배합 콘크리트를 이용한 조립토 다짐말뚝 공법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 공법의 시공에 따른 침하저감효과를 정량적으로 산정하기 위한 목적으로, 수치해석 결과로부터 구한 조립토 다짐말뚝의 침하량과 빈배합 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝의 상대적인 침하비를 의미하는 침하저감계수(S_R)값의 평균값을 토대로 회귀분석을 시행하였으며, 회귀분석을 통해 말뚝의 직경, 지반 치환율, 보강깊이 및 배합조건 등을 종합적으로 고려할 수 있는 빈배합 콘크리트를 활용한 조립토 다짐말뚝의 침하량 산정식을 제시하였다.

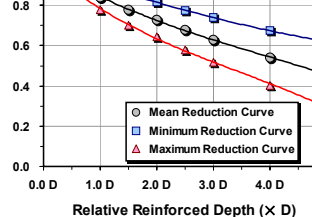
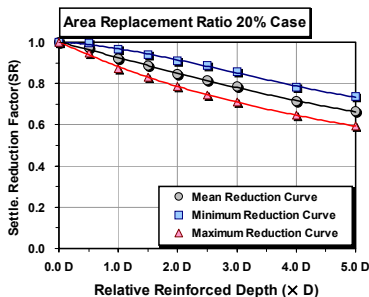


그림 10. 보강심도-침하저감 계수의 정규화(Case 1)

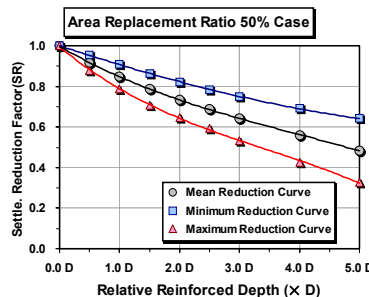
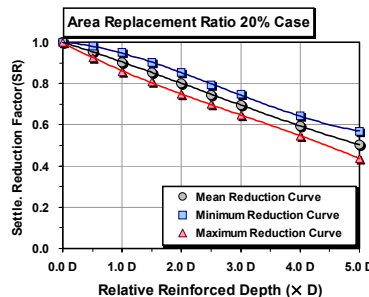


그림 11. 보강심도-침하저감 계수의 정규화(Case 2)

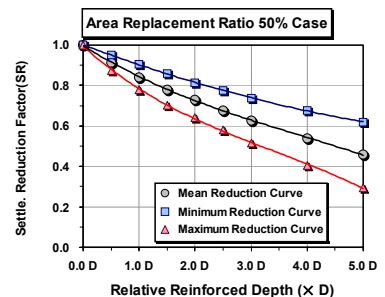
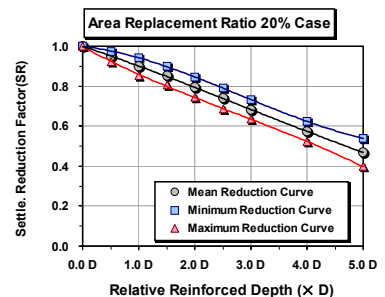


그림 12. 보강심도-침하저감 계수의 정규화(Case 3)

6.1 수치해석에 의한 침하량의 변화경향 분석

본 연구에서는 수치해석 결과로부터 분석된 침하저감 정도의 변화경향을 토대로 침하저감계수(S_R)의 산정식을 제안하였다. 침하저감계수 산정식의 제안을 위해 먼저 수치해석에 의해 분석된 보강깊이별 하중-침하량관계를 무보강시의 하중-침하량의 비로 정규화하여 보강깊이 변화에 따른 침하저감정도를 분석하였다.

이때 분석은 시멘트 6kg 배합시, 9kg 배합시 및 12kg 배합시의 총 3가지 배합비에 대해 보강깊이를 0.0D, 0.5D, 1.0D, 1.5D, 2.0D, 2.5D, 3.0D, 4.0D 및 5.0D로 변화시켰으며, 치환율은 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 및 50%로 변화시켜가며 수행된 분석결과를 반영하였다.

또한 작용하중의 경우 조립토 다짐말뚝의 적용이 가능한 합리적인 범위라고 판단되는 10kPa($\approx 1.0\text{tf}/\text{m}^2$)~400kPa($\approx 40.0\text{tf}/\text{m}^2$)을 적용하였다. 이는 일반적인 구조물의 작용하중이 300kPa 내외이며 교량의 교대나 교각과 같이 큰 하중이 작용하는 경우 400kPa 내외로 설계되며 이 경우 조립토 다짐말뚝의 적용이 현실적으로 어렵다는 측면을 고려할 때 합리적인 분석범위로 판단된다.

그림 10, 그림 11 및 그림 12는 각 배합강도별 조립토 다짐말뚝의 수치해석 결과들 중 침하저감계수(S_R) 산정식의 제안을 위한 작용하중별 침하저감율의 최대값과 최소값 및 평균값의 변화경향을 보강심도별로 도시한 그림이다. 치환율은 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 및 50%로 변화시켜가며 총 6가지 경우에

대해 분석을 시행하였으며, 분석결과는 치환율 20%와 50%에 한정하여 도시하였다.

분석결과 치환율이 비교적 작은 경우에는 작용하중의 변화에 대한 침하저감율의 변화가 작은 것으로 평가되었으나 치환율이 큰 경우에는 작용하중의 변화에 대한 침하저감율의 변화가 증가하는 것으로 평가되었다. 일반적으로 작용하중이 작은 경우 그림에 도시한 minimum reduction curve에 근접하며 하중이 클수록 maximum reduction curve에 근접하는 것으로 분석되었다. 또한, 전체적인 침하저감율은 배합강도가 클수록 침하저감효과가 커지는 것으로 평가되었다.

표 10은 시멘트 배합량에 따른 수치해석을 통해 분석된 최대 침하저감계수와 최소 침하저감계수를 평균화한 침하저감계수(S_R)의 결과들을 표로 정리하였다.

6.2 침하저감계수(S_R) 산정식의 제안

침하저감계수 산정식은 먼저 표 10에 기술된 보강심도 및 작용하중 변화에 따른 침하저감율 분석결과를 토대로 회귀분석을 실시하여 지반치환율별로 제시하였으며, 지반치환율별로 제시된 회귀식의 계수값에 대한 분석을 추가적으로 실시하여 제안하였다. 즉, 침하저감계수 산정식은 수치해석을 통해 분석된 결과를 보강심도 및 작용하중 변화에 대한 자료로 분류하여 1차 회귀분석을 시행하였으며, 지반치환율 변화에 따른 영향을 반영하기 위한 2차 회귀분석을 실시하여 이들의 조합으로서 회귀식을 제안하였다.

표 10. 배합강도별 침하저감율 평가결과

보강심도	Case 1		Case 2		Case 3	
	치환율 20%	치환율 50%	치환율 20%	치환율 50%	치환율 20%	치환율 50%
	Ave	Ave	Ave	Ave	Ave	Ave
0.00D	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.50D	0.97	0.93	0.95	0.92	0.95	0.91
1.00D	0.92	0.87	0.90	0.85	0.90	0.84
1.50D	0.89	0.82	0.86	0.79	0.85	0.78
2.00D	0.85	0.78	0.80	0.74	0.79	0.73
2.50D	0.82	0.74	0.74	0.69	0.74	0.68
3.00D	0.78	0.71	0.70	0.64	0.68	0.63
4.00D	0.71	0.65	0.60	0.56	0.57	0.54
5.00D	0.66	0.61	0.50	0.48	0.47	0.46

표 11. 회귀분석에 의해 구한 상수 a, f(α)의 값

치환율 (%)	Case 1			Case 2			Case 3		
	a	f(α)	오차	a	f(α)	오차	a	f(α)	오차
20	1.000	0.0853	0.470	1.000	0.1323	1.922	1.000	0.1432	2.400
25	1.000	0.0943	0.582	1.000	0.1384	0.888	1.000	0.1480	1.284
30	1.000	0.0984	1.279	1.000	0.1428	0.593	1.000	0.1528	1.095
35	1.000	0.0993	1.377	1.000	0.1433	0.529	1.000	0.1537	0.588
40	1.000	0.1029	1.271	1.000	0.1467	0.355	1.000	0.1557	0.604
50	1.000	0.1033	2.036	1.000	0.1469	0.674	1.000	0.1557	0.851

6.2.1 보강심도 및 작용하중 변화를 고려하기 위한 회귀분석

표 10에 기술된 침하저감율 분석결과를 토대로 지반치환율별로 회귀분석을 시행하였다. 침하저감계수 (S_R)의 회귀분석은 식 (1)과 같은 형태를 지니는 Exponential 함수를 모함수로 하는 Non-linear fitting 을 시행하였다.

$$S_R = a \cdot \exp(f(\alpha) \times L_{rein} / D) \quad (1)$$

여기서, 침하저감계수(S_R)은 조립토 다짐말뚝의 보강심도(L_{rein}), 말뚝의 직경(D), 치환율(α) 및 배합 조건을 고려한 빈배합 콘크리트 보강시의 침하저감 정도를 의미한다. 또한, 식 (1)의 a 는 1.0이며 $f(\alpha)$ 는 회귀분석결과 제안되는 매개변수로서 치환율(α)에 대한 함수이다. 표 11은 1차 회귀분석에 의한 상수 a 및 $f(\alpha)$ 의 산정값이다.

6.2.2 치환율의 변화를 고려하기 위한 회귀분석

수치해석을 통해 분석된 결과를 보강심도 및 작용하중 변화에 대한 자료로 분류하여 수행된 1차 회귀분석결과는 지반치환율의 변화를 연속적인 함수의 형태로 고려하지는 못한다. 따라서 지반치환율 변화에 따른 침하저감 계수의 변화를 함수의 형태로 고려하기 위해 2차 회귀분석을 시행하였다.

지반치환율 변화에 따른 영향을 고려하기 위한 함수인 $f(\alpha)$ 는 표 11에 제시된 값들에 대한 회귀분석을 통해 제안되었으며, 식 (2)와 같은 형태를 지니는 Power fit Model을 회귀분석의 모함수로 적용

하였다.

$$f(\alpha) = a\alpha^b \quad (2)$$

2차 회귀분석 결과로서 제안된 시멘트 배합량 변화에 따른 함수는 식 (3), 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

시멘트 6kg 배합,

$$f(\alpha) = 0.1240 \cdot \alpha^{0.2113} \quad (3)$$

시멘트 9kg 배합,

$$f(\alpha) = 0.1597 \cdot \alpha^{0.1108} \quad (4)$$

시멘트 12kg 배합,

$$f(\alpha) = 0.1668 \cdot \alpha^{0.0830} \quad (5)$$

결과적으로 빈배합콘크리트를 적용한 조립토 다짐말뚝의 침하저감효과는 시멘트 배합량에 따라 식 (6), 식 (7) 및 식 (8)에 의해 결정된다.

시멘트 6kg 배합,

$$S_R = \exp\left(0.1240\alpha^{0.2113} \times \frac{L_{rein}}{D}\right) \quad (6)$$

시멘트 9kg 배합,

$$S_R = \exp\left(0.1597\alpha^{0.1108} \times \frac{L_{rein}}{D}\right) \quad (7)$$

시멘트 12kg 배합,

$$S_R = \exp\left(0.1668\alpha^{0.0830} \times \frac{L_{rein}}{D}\right) \quad (8)$$

6.3 제안된 회귀식의 검증

다층 회귀분석을 통해 제안된 침하저감계수 산정식의 검증을 위한 목적으로 수치해석을 통해 산정된 침하저감계수(S_R)와 제안된 회귀식에 의해 산정된 침하저감계수의 비교·분석을 시행하였다. 그림 13~그림 15는 배합조건별로 수치해석결과와 제안한 산정식에 의해 산정된 침하저감계수(S_R)를 도시한 그림이다.

그림 13~그림 15에 도시된 것처럼, 각 배합조건별로 수치해석 결과와 회귀분석을 통해 제안된 침하저감계수(S_R) 산정 값이 상호 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 수치해석결과와 제안한 회귀식에 의해 산정된 침하저감계수(S_R)값의 비교결과, 배합량이 6kg인 Case 1의 경우 96%, 배합량이 9kg인 Case 2의 경우 98% 및 배합량이 12kg인 Case 3의 경우 97%이상의 높은 상관성을 보이는 것을 확인하였으며, 제안된 회귀식이 해석결과를 충실하게 반영하고 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

6.4 빈배합 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝의 간편 침하량 산정방법

빈배합 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝의 추정된 침하저감계수(S_R)의 산정식을 바탕으로 한 침하량 산정식은 식 (9)와 같다.

$$S_{rein} = S_R \cdot S_{non} \quad (9)$$

빈배합 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝의 침하량 결정은 본 연구에서 제안한 조립토 다짐말뚝의 침하량 기법에 회귀분석을 통해 제안된 침하저감계수(S_R)를 곱하여 산출할 수 있다. 또한, 식 (9)의 침

하량 산정식은 말뚝의 직경, 보강심도, 치환율 및 배합조건을 모두 반영한 것이다.

결론적으로 빈배합 콘크리트로 보강이 이루어진 조립토 다짐말뚝의 침하량은 지반의 강도, 말뚝의 설치형태 및 말뚝구성재료의 특성을 고려하여 산정된 침하량과 보강방법, 보강깊이, 치환율 및 말뚝직경 등을 고려하여 회귀식에 의해 산정된 침하저감계수의 곱으로 결정된다.

7. 요약 및 결론

본 연구를 통해 도출된 연구결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 조립토 다짐말뚝의 합리적인 침하량 산정을 위해 주변지반의 변형계수와 간극비 및 강도변화를 고려한 해석기법을 제시하였다.
- (2) 조립토 다짐말뚝의 침하억제를 위해 빈배합 콘크리트를 활용하여 팽창과괴 심도까지 보강하는 공법을 제안하였다.
- (3) 빈배합 콘크리트에 대한 배합설계를 실시하고, 압축강도시험을 통한 강성 및 강도 특성의 규명 및 변수위 투수시험을 통해 빈배합 콘크리트 공시체의 배수기능이 유지될 수 있음을 확인하였다.
- (4) 빈배합 콘크리트에 대한 실내시험으로부터 도출된 강성 및 강도특성을 고려하고, 보강심도 및 치환율을 다양하게 가정한 조건하에서의 유한요소해석을 수행하여 각각의 조건에 따른 침하저감효과를 확인한 결과, 보강심도가 깊어지고 치환율이 커질수록 기존 조립토 다짐말뚝에

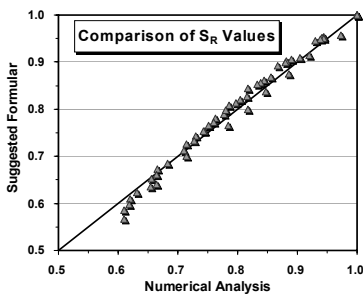


그림 13. 수치해석-제안식의 침하저감계수 비교(Case 3)

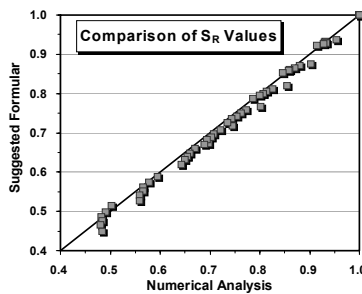


그림 14. 수치해석-제안식의 침하저감계수 비교(Case 3)

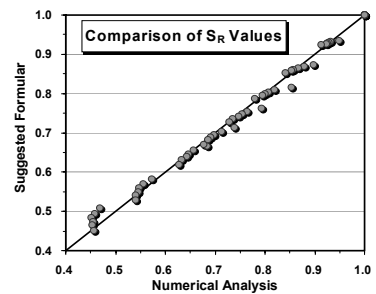


그림 15. 수치해석-제안식의 침하저감계수 비교(Case 3)

대한 침하억제효과가 커짐을 알 수 있었다.

(5) 침하저감계수 산정식은 유한요소해석 범용프로그램 *Pentagon*^{3D}를 이용한 수치해석을 통해 분석된 결과들과의 비교를 통해, 보강심도 및 작용하중 변화에 대한 자료로 분류하여 1차 회귀분석을 시행하였으며, 지반치환율 변화에 따른 영향을 반영하기 위한 2차 회귀분석을 실시하여 이들을 조합한 침하저감계수 산정식의 효율성과 정확성을 입증하였다.

(6) 최종적으로 제안된 침하저감계수 산정식을 바탕으로 빈배합 콘크리트로 보강한 조립토 다

짐말뚝의 침하량 평가기법을 제시하였으며, 기존 조립토 다짐말뚝의 침하량에 비해 보강심도, 치환율 및 배합량을 고려한 빈배합 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝의 침하량이 억제되는 효과를 확인하였다.

본 연구를 통해 조립토 다짐말뚝의 침하억제를 위한 방안으로써 빈배합 콘크리트를 활용하여 보강하는 공법을 제안하였으며, 향후에는 본 공법의 현장 적용을 위한 실물규모의 현장실험 또는 시험시공 등이 필요할 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2005년 6월 10일)

참 고 문 헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 고용일(1999), 강관스커트 보강 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구. 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제1호, pp. 79~98.
2. 황정순, 김홍택, 김승욱, 고용일(2005), 횡방향 변형을 고려한 조립토 다짐말뚝의 침하량 평가기법 제안. 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제3호, pp. 149~157.
3. 황정순, 김홍택, 김정호, 이상경, 이형규(2005), 조립토 다짐말뚝에 대한 현장재하시험 결과 및 간편 침하량 산정방법의 제시. 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제3호, pp. 159~168.
3. Hughes, J. M. O., and Withers, N. J.(1974), Reinforcing Soft Cohesive Soil with Stone Columns. *Ground Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 42~49.
4. Juran, I., and Guermazi, A.(1988), Settlement Response of Soft Soils Reinforced by Compacted Sand Columns. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 930~943.
5. Juran, I., and Riccobono, O.(1991), Reinforcing Soft Soils with Artificially Cemented Compacted-Sand Columns. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 7, pp. 1042~1060.