

조립토 다짐말뚝의 침하저감방안에 관한 연구

A Study on the Settlement Restraint of the Granular Compaction Pile

김승욱*·이득원·김서룡·안재규 (농기공)

Kim, Seung Wook*·Lee, Duck Won·Kim, Seo Ryong·Ann, Jai Gyoo

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.

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

I. 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 조성 공사 등에 있어서 연약지반개량을 위해 불가피하게 소요되는 모래의 수급은 점차 원활한 재료공급이 어려운 실정이고, 앞으로도 이러한 현상은 더욱 심화될 것으로 판단된다.

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.

II. 보강된 조립토 다짐말뚝의 기본원리

본 연구에서는 모래의 부족현상을 해소하고 조립토 다짐말뚝의 적용범위를 보다 연약한 지반에까지 폭넓게 활용하고자 하는 목적의 일환으로 조립토 다짐말뚝의 팽창과괴가 발생하는 심도(3~5D)까지는 물/시멘트비를 조절한 등입도 투수성 콘크리트를 활용하고, 그 이하 심도는 골재를 이용하는 이른바 등입도 콘크리트 활용 조립토 다짐말뚝공법을 제안하였다(Fig 1). 본 공법은 Fig 1에 도시한 바와 같이 기존 조립토 다짐말뚝의 팽창과괴가 발생하는 영역에 지지력 증가 및 침하저감을 위해 말뚝직경의 3~5배 정도의 심도까지 고화처리하고, 그 하부로부터 최하단까지는 기존

의 조립토 다짐말뚝을 형성하는 방법으로써, 적절한 물/시멘트비의 도출과 투수기능유지의 확인절차 등을 통해 본 연구에서 제안하고자 하는 공법의 타당성 및 침하저감효과를 확인하였다.

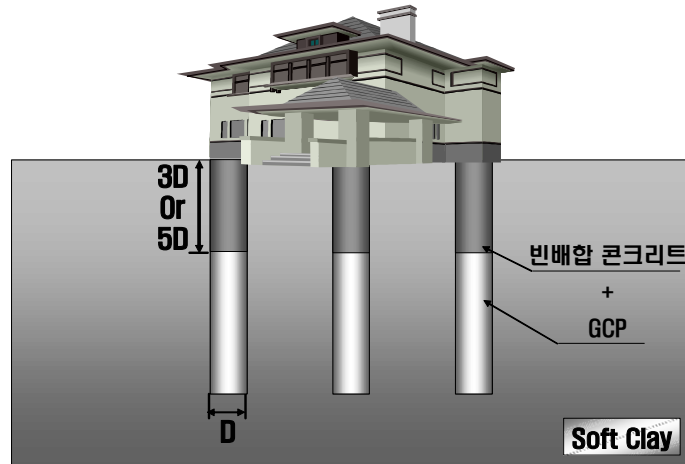


Fig 1. Schematic Diagram of Reinforced G.C.P

III. 등입도 콘크리트 보강된 GCP의 실내실험

3.1 등입도 콘크리트의 배합설계

본 연구에서는 조립토 다짐말뚝공법의 말뚝의 배수에 의한 압밀축진효과와 지진시 액상화 방지효과 등의 장점을 최대한 유지시킬 수 있는 배합비의 도출을 위해, 고속철도 노반공사 시방서(한국고속철도공단, 1997)에 명기된 필터콘크리트(filter concrete)의 배합비를 참고로 하였으며, Table 1에 정리한 바와 같다.

Table 1. Mixed Ratio of Filter Concrete

Aggregate	Water	Cement	Remark
1m ³ (8~20mm)	60 L	100 kg	

본 연구에서의 배합설계 시에는 Table 1의 내용을 참고로 하여 예비배합설계를 수행한 후, 모래를 섞지 않은 상태에서 25mm이하의 입도가 균등한 골재를 78kg, 시멘트 6kg 및 물 3.6L만을 혼합하여 직경 15cm, 높이 30cm의 공시체를 제작하였다(Fig 2).

3.2 공시체의 압축강도시험 및 투수시험

본 연구에서는 공시체의 탄성계수와 최대압축강도를 확인하기 위해 배합설계를 통해 양생조건을 달리하여 습윤양생(28일)한 공시체에 대한 압축강도시험(KS F 2405)을 수행하였다. 압축강도시험은 100ton급 만능시험기를 통해 공시체의 지름 0.1mm, 높이 1mm까지 측정하였으며, 지름은 공시체 높이의 중앙에서 서로 직교하는 2방향에 대하여 측정하여 평균한 것을 시료의 지름으로 하였다(Fig 3). 또한, 일반적인 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 투수계수가 매우 작은 일반적인 콘크리트의 투수 특성을 평가하는 방법으로 본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 상부 보강영역의 등입도 콘크리트 공시체에 대한 투수

계수를 산정하기 위한 실내시험방법으로 공시체 내의 공극을 고려하여 변수위 투수시험법을 이용하여 투수계수를 산정하였다(Fig 4).



Fig 2. Concrete Sample



Fig 3. Compression Test



Fig 4. Permeability Test

3.3 실내시험 결과분석

본 연구에서 수행된 공시체(28일 습윤양생)의 압축강도시험 및 해수의 평균염분농도 3.6%를 인위적으로 조제하여 만든 염수에서 양생한 공시체에 대한 결과는 Table 2와 같다.

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 달리해 시험한 결과를 살펴보면, 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.

Table 2. Compression Strength and Elastic Modulus of the Con'c Sample

	Max. Compression Strength (kgf/cm ²)	Mean Value (kgf/cm ²)	Elastic Modulus (kgf/cm ²)	Mean Value (kgf/cm ²)
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	
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	

또한, 6kg의 시멘트가 함유된 공시체에 대한 변수위 투수시험을 수행한 결과는 Table 3과 같으며, 결과를 살펴보면, 양생조건을 달리한 2개씩의 공시체에 대한 투수계수의 범위는 양생조건과는 무관한 결과로 나타나고 있으며, 각각의 공시체에 대한 투수계수의 평균값은 $3.83 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ 로

나타났다. 이를 통해 본 연구에서 적용하고자 하는 등입도 콘크리트를 이용해 연약지반 내부에서 발생하는 과잉수를 외부로 배출시키기 위한 기능은 현장에서의 적용이 가능할 것으로 평가된다.

Table 3. Results of the Permeability Test

	Permeability(cm/sec)	Mean Value(cm/sec)
F 6-1	1.18×10^{-1}	3.83×10^{-1}
F 6-2	3.97×10^{-1}	
S 6-1	4.81×10^{-1}	
S 6-2	3.83×10^{-1}	

IV. 3차원 유한요소해석

4.1 개요

본 연구에서는 등입도 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝의 변형형태 및 침하저감효과를 분석하기 위해 유한요소해석 프로그램인 *Pentagon^{3D}*를 사용하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 등입도 콘크리트의 보강심도, 치환율 및 배합조건을 고려한 해석결과를 바탕으로 기존의 조립토 다짐말뚝과의 침하거동을 비교하였다. 본 *Pentagon^{3D}* 프로그램 수치해석에서, 지반요소는 일반적으로 연약지반의 거동을 합리적으로 모사하는 것으로 알려진 Modified Cam-Clay Model을 사용하였다. 그림 5에 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, 재하판의 지름은 치환율 20%~50%인 1.41m~2.24m로 하여 해석을 수행하였고, 연약층의 두께는 10.0m로 설정하였다. 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. Fig 5는 *Pentagon^{3D}* 프로그램 해석에 적용된 격자망 형상이며, Fig 6은 해석격자망의 경계조건에 대한 개요도이다.

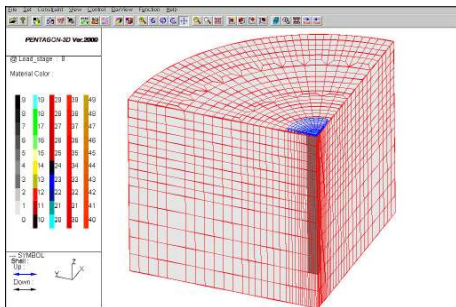


Fig 5. Mesh of Numerical Analyses

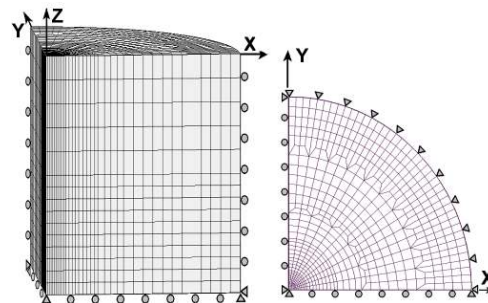


Fig 6. Boundary Condition

말뚝과 지반의 경계조건은 Fig 6과 같이 원주방향의 절점은 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 초기해석을 수행한 후에 Table 4와

같이 점차적으로 작용하중을 증가시켜가며 재하를 시행하였다. 또한, 등입도 콘크리트의 보강조건은 하부로부터 조립토 다짐말뚝이 설치된 이후, 소정의 심도부터 등입도 콘크리트 보강하는 조건으로, 보강심도에 따른 침하량 감소효과를 파악하기 위하여 0.0D ~ 5.0D로 보강심도를 변화시키면서 해석을 시행하였다.

Table 4. Applied Load Stage of Numerical Analyses

Stage	1	2	3	4	5	6	7	8
Additional load	0	10	20	30	40	50	100	150
Total load	0	10	30	60	100	150	250	400
Unit	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa

4.2 수치해석에 적용된 입력 특성값

3차원 수치해석의 수행은 해석 유형별로, 경상남도 김해시 인근에서 채취된 불교란 시료 중 총 11개소에 대해 취득된 동일 심도의 압밀시험과 압밀비배수(\bar{c}_v) 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 황 등(2005)이 기 제안한 평가기법에 적용되는 지반변형계수 추정을 위한 응력-변형 특성곡선에 대해서는, 삼축압축시험 자료 중 구속압력이 $49.05kPa(0.5kgf/cm^2)$ 인 경우와 $98.10kPa(1.0kgf/cm^2)$ 인 두 가지 경우를 각 시료별로 수집하여 총 10개 자료의 평균값을 분석에 적용하였다. Table 6은 압밀시험, 삼축압축시험 및 기타 물리적 성질 평가 등을 통해 결정된 지반 특성값을 토대로 결정된 Modified Cam-Clay Model과 Mohr-Coulomb Model의 지반 특성값과 말뚝 및 재하판 재료 등의 입력값이다.

Table 5. Applied Properties of the 3D Finite Element Analyses

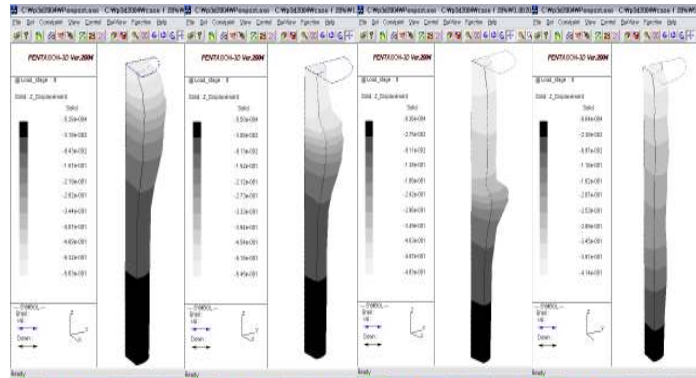
Classification	γ	E	ϕ	C'	ν	λ	κ	M	Length	Diameter	Constitutive Model
Ground	16.55	1794.2	20.4	14.42	0.400	0.239	0.043	0.788	10	-	MCC
G.C.P	22.56	30411.0	39.0	0.00	0.300	-	-	-	8	1	MC
Reinforced G.C.P	22.56	441299	40	210.8	0.300	-	-	-	-	1	MC
Load Plate	77.01	2.06e8	-	-	0.167	-	-	-	t=0.3	3	Elastic
Unit	kN/m^3	kPa	$^\circ$	kPa					m	m	

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

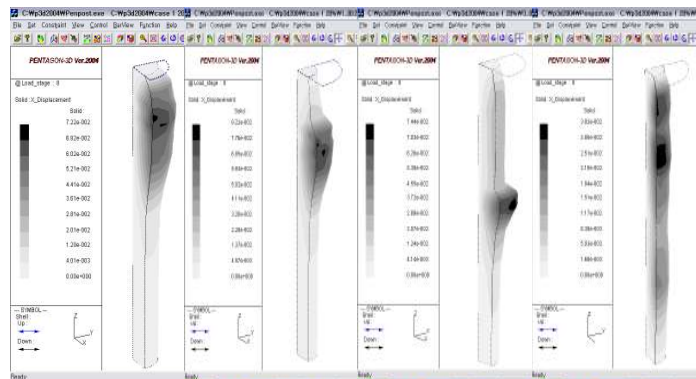
V. 3차원 유한요소해석 결과 및 분석

5.1 변형거동 분석

등입도 콘크리트 보강에 따른 치환율 50%인 경우의 조립토 다짐말뚝의 침하 및 횡방향 거동 등을 파악하기 위해 *Pentagon*^{3D} 프로그램 해석결과를 도시하면 Fig 7, 8과 같다. Fig 7은 등입도 콘크리트의 보강심도별 연직변위, Fig 8은 등입도 콘크리트의 보강심도별 수평변위의 형상을 나타낸다.



Not Reinforced 1.0D Reinforced 3.0D Reinforced 5.0D Reinforced
 Fig 7. Vertical Displacement According to Reinforced Depth(Replacement Ratio 50%)



Not Reinforced 1.0D Reinforced 3.0D Reinforced 5.0D Reinforced
 Fig 8. Radial Displacement According to Reinforced Depth(Replacement Ratio 50%)

Fig 7, 8의 결과를 살펴보면, 최종하중단계(400kPa)에서 나타난 연직 및 수평변위는 등입도 콘크리트로 보강한 경우 보강심도의 증가에 따라 팽창과괴심도가 점차 지반하부로 이동함을 보여주고 있다. 또한 보강심도가 5D인 경우, 말뚝의 횡방향 팽창거동이 거의 나타나지 않는 것으로 나타난다. 따라서, 팽창과괴 심도를 말뚝직경의 5배 정도로 한정하는 기존의 연구성과들에 부합되는 것으로 판단되며, 말뚝의 상부에 작용하는 하중으로 인해 발생하는 횡방향으로의 팽창과괴가 발생하는 심도가 점차 지반 하부쪽으로 유발되는 본 해석결과를 통해, 등입도 콘크리트 보강에 의해 침하량이 점차 감소하며 지지력 또한 증가한다는 결론을 유추할 수 있다. 또한, 저치환율에서도 유사한 경향을 나타내므로, 등입도 콘크리트를 활용한 조립토 다짐말뚝의 최적화된 물/시멘트비를 조절할 수 있다면 말뚝의 배수기능과 보강기능을 동시에 기대할 수 있는 개선방안이 마련되어 보다 적극적인 침하감소효과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 치환율 및 보강심도에 따른 침하저감효과 분석

치환율의 변화에 따른 보강심도별 작용하중이 10kPa, 400kPa일 경우의 침하감소 특성을 평가하기 위해 수행한 유한요소해석 결과, 치환율 및 등입도 콘크리트의 보강심도가 깊어질수록 침하량이 작아지는 경향을 나타내고 있다(Table 6).

Table 6. Settlement at Load Stage According to Reinforced Depth

Applied Load	Reinforced Depth	Settlement(cm)			
		$\alpha : 20\%$	$\alpha : 30\%$	$\alpha : 40\%$	$\alpha : 50\%$
10kPa	0.0D	1.728	1.443	1.269	1.153
	1.0D	1.626	1.347	1.179	1.071
	3.0D	1.396	1.154	1.018	0.934
	5.0D	1.210	1.017	0.914	0.851
400kPa	0.0D	56.318	47.751	39.737	33.847
	1.0D	54.497	43.308	35.576	29.920
	3.0D	48.333	35.888	27.363	21.770
	5.0D	41.396	30.062	21.046	16.811

(α : Replacement Ratio)

VI. 요약

본 연구에서는 조립토 다짐말뚝의 적용범위를 보다 연약한 지반에까지 폭넓게 활용하고자 하는 목적의 일환으로 등입도 콘크리트로 보강한 조립토 다짐말뚝공법의 적용가능성을 확인하였으며, 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 등입도 콘크리트에 대한 배합설계를 실시하고, 압축강도시험을 통한 강성 및 강도 특성의 규명과 변수위 투수시험을 통해 빈배합 콘크리트 공시체의 배수기능이 유지될 수 있음을 확인하였다.
- (2) 등입도 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 대한 침하억제효과가 커짐을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구를 통해 등입도 콘크리트로 보강한 조립토 다짐말뚝의 적용가능성과 아울러 침하감소효과를 파악하였으며, 기존 조립토 다짐말뚝의 침하량에 비해 보강심도, 치환율 등을 고려한 등입도 콘크리트로 보강된 조립토 다짐말뚝의 침하량이 억제되는 효과를 확인하였다. 향후에는 현장여건을 감안한 등입도 콘크리트의 다양한 배합비별 침하감소효과에 대한 규명과 함께 본 연구에서 제안된 공법의 현장적용성을 파악하기 위한 실물모형시험 또는 시험시공 등이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

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.
4. Hughes, J. M. O., and Withers, N. J.(1974), "Reinforcing Soft Cohesive Soil with Stone Columns," Ground Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 42~49.
5. 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.
6. 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.