

A Study on the Bearing Capacity characteristics of Stone column by Numerical Analysis

¹⁾, Byung-Sik Chun, ²⁾, Baek-Young Kim

¹⁾ , , Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

²⁾ , Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : Stone column is one of the soft ground improvement method, which enhances ground conditions through ground water draining, settlement reducing and bearing capacity increasing complexly by using crushed stone instead of sand in general vertical drain methods. In recent, general construction material, sand is in short of supply, because of the unbalance of demand and supply. Also, the bearing capacity improving effect of stone column method is needed in many cases so the bearing capacity estimation is considered as important point. Nevertheless, adequate estimation methods to predict bearing capacity of stone column considering stone column and improving ground behavior reciprocally is not yet prepared. To contribute this situation, bearing capacity behavior of stone column were simulated as numerically on various property cases of crushed stone and surrounded ground. Through the numerical analysis of simulation results, bearing capacity behavior prediction formula was suggested. This formula was verified by comparing the prediction result with in situ test.

Keywords : Stone column, Crushed stone, Bearing capacity, Numerical analysis, Prediction formula

1. 서 론

연약지반 개량공법의 하나인 쉘석말뚝공법은 일반 연직배수공법에 주로 사용되는 모래재료 대신에 쉘석재료를 사용하여 배수 및 침하량 감소, 지지력 증대의 복합 효과에 의해 지반을 개량하는 것이다.

최근 들어 대규모 토목공사에 사용되는 건설재료로서 막대한 양이 소요되는 모래는 현재 수요는 급증하고 구득(채취 및 운반)은 갈수록 어려워져 재료는 고갈상태에 이르고 있는 실정으로서 쉘석말뚝공법의 적용이 더욱 늘어나고 있는 추세이다. 특히, 최근 들어 쉘석말뚝의 지지력 보강효과를 이용하는 경향이 증가함에 따라 지지력 보강 예측이 중요한 관심사항으로 대두되었으나 아직까지 주변지반과 쉘석말뚝 구조체의 상호 거동을 합리적으로 반영한 산정식이 제시되어있지 못한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 연약지반상에 조성된 쉘석말뚝에 의한 개량효과중 지지력 증대효과를 규명하기 위해 쉘석말뚝의 지지력 거동을 수치 해석적으로 시물레이션하였다. 이렇게 함으로써 쉘석말뚝이 설치되는 원지반의 물성과 쉘석말뚝의 물성을 반영하면서 하중-침하거동을 파악하고자 하였다. 수치해석 시물레이션에 의한 지지력 거동을 원지반조건, 쉘석말뚝 조건별로 분석하여 쉘석말뚝의 지지력 거동 식을 제안하고 제안된 지지력 예측방법과 거동을 계측한 실측치와의 검증을 실시하였다.

2. 실내 시험

2.1 실내시험

쉘석말뚝 공사시 현장에서 주로 사용되는 쉘석재의 물리적 특성을 실내실험을 통해 파악하였다.

현장에서 적용될 쇄석재의 전단강도 특성을 파악하기 위하여 아스팔트, 토질 및 쇄석 등의 전단시험에 적합한 대형직접전단시험을 수행하였다. 대형직접전단시험에 관한 명확한 시험법이 정립되어 있지 않은 관계로 여러 문헌을 조사해본 결과 일반 직접전단시험의 시험과정과 같은 원리를 적용하고 있어 기본적인 개념 및 시험과정을 일반 직접전단시험으로 하여 Mohr-Coulomb의 법칙에 의해서 흙의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)을 구하고, 필요에 따라 전단 중에 생기는 체적과 형태의 변화를 측정하였다(그림 1 참조).

시험결과는 그림 2와 같이 $c = 3.7\text{kgf/cm}^2$, $\phi = 42.8^\circ$ 의 결과를 얻었다(그림 2 참조).

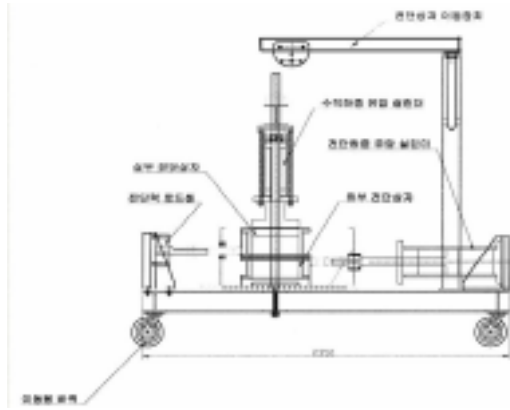


그림 1. 대형 직접전단시험기

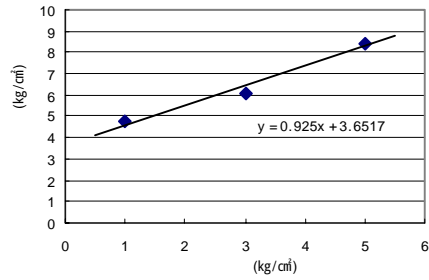


그림 2. 대형직접전단시험 결과

2.2 현장시험

쇄석말뚝공법의 주변지반강도증대, 침하량 감소효과를 검토하기 위하여 실내시험과 현장시험시공을 실시하였다. 현장시험시공현장은 고속도로 현장으로서 상부에 5.4m~12.5m두께의 연약한 점토질 실트(MC)내지 실트질 점토(CL)의 충적층이 존재하고, 그 하부로 충적모래층, 자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암층이 순차적으로 구성되어 있으며, 지하수위는 지표면 부근 내지는 GL(-)2.4m 이내에 존재하고 있다. 연약한 충적토의 배인전단시험 결과는 $0.24 \sim 0.29\text{kg/cm}^2$ 이고, 소성지수(I_p)는 8~33%, 액성한계(W_L)는 32~64%이며, 자연함수비는 27~55%, SPT의 N치가 1~4정도이다. 일축압축시험에 의한 변형계수는 약 15,000kPa 정도였다. 그 외 원지반 시료를 채취하여 실내시험을 통하여 여러 물성치를 측정된 결과의 대표적인 값은 다음과 같다.

현장시험시공후 쇄석말뚝의 지지력 특성을 평가하기 위하여 깊이 11.5m로 시공된 단일 쇄석말뚝(직경 약 500mm) 직상부 위에서 재하판 거치하고 재하시험을 실시하였다. 그 결과는 다음 표 2와 같다.

표 1. 쇄석말뚝 원지반의 시험 결과

심도 (m)	점착력 (kg/cm ²)	내부 마찰각(°)	함수비 (%)	통일 분류
1.2	0.32	22.6	53.2	CH
2.5	0.19	21.1	53.6	CH
5.0	0.20	21.4	52.7	CL
10.0	0.28	21.1	49.4	CL

표 2. 현장 평판재하시험 결과

시험위치	시험번호	재하최대 하중(t/m ²)	항복하중에 의한 분석법						극한하중 (t/m ²)	극한하중에 의한 허용지내력 (t/m ²)
			P - S			log P - log S				
			항복하중 (t/m ²)	허용지지력 (t/m ²)	침하량 (mm)	항복하중 (t/m ²)	허용지지력 (t/m ²)	침하량 (mm)		
쇄석말뚝 (원지반)	PBT-3	19.75	14.8	7.40	21.0	15.0	7.5	22.0	17.3	5.8
쇄석말뚝 (직상부)	PBT-3	55.30	42.5	21.3	30.0	43.0	21.5	31.0	48.5	16.2

3. 쇄석말뚝의 지지력 특성 분석

3.1 쇄석말뚝의 거동 분석

실내 모형실험과 현장 재하시험 결과에 의하면 쇄석말뚝 말뚝의 하중-침하 특성은 그림 3에서와 같이 비선형·탄소성 거동을 한다. 이러한 하중침하 관계곡선으로부터 항복하중이나 극한하중을 산정하여 쇄석말뚝의 지지력을 추정하게 된다.

설계 단계에서는 지지력을 산정식에 의해 예측하게 되는데 여러 연구자들이 문제의 단순화를 위한 여러 가정과 이론을 도입하여 지지력 산정식이 제안되어있다. 이러한 지지력 예측 제안식들은 단순히 쇄석말뚝은 조립질 재료로 보고 내부마찰각만을 가지는 토질재료로 상정하며 주변지반은 점성토 지반으로 상정하여 내부마찰각은 0 이고 점착력만 있는 지반으로 가정하여 문제를 전개해 나가고 있다. 그럼에도 불구하고 다양한 지층조건에 고려와 지지력 추정 및 산정의 편차를 고려할 때, 실무적으로는 단순히 원지반 점성토의 강도정수 C에 임의의 경험적 계수를 곱하여 지지력을 산정하는 경험식이 간편성 때문이 자주 쓰이고 있는 실정이다.

그러나 실제로 원지반의 경우 점착력과 내부마찰각 성분을 가지는 경우에 적용되는 사례가 자주 발생하고 있으며, 쇄석말뚝 재료 자체도 내부마찰각과 아울러 점착력 성분을 가지는 것은 널리 알려진 사실이다.

따라서 본 연구에서는 원지반 흙과 쇄석말뚝 재료의 물성을 그대로 반영하고, 다양한 조건에서의 쇄석말뚝 말뚝의 지지력 경향을 분석하여 합리적인 지지력 산정식을 제시하고자 하였다.

이를 위하여 하중-침하거동을 다양한 조건에서 수치해석적으로 시뮬레이션 하여 거동을 파악하고 상관관계를 분석하였다.

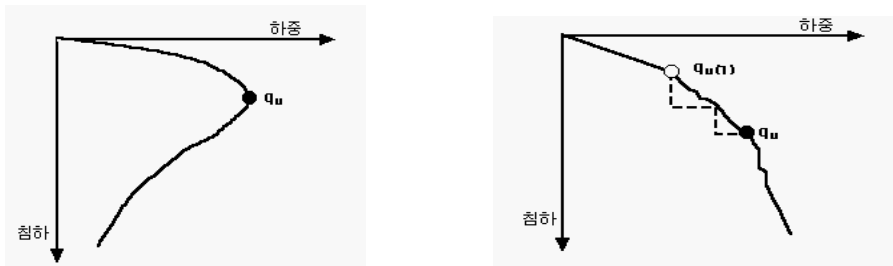


그림 3. (쇄석)말뚝의 하중-침하 거동

3.2. 쇄석말뚝 지지력 거동 분석을 위한 수치해석

쇄석말뚝 설치지반에서 쇄석말뚝의 하중-침하 거동을 다양한 조건에서 분석해 보고자 지반 범용 수치해석 프로그램을 사용하였다.

검토 조건은 원지반과 쇄석말뚝을 그림 4에 표시된 바와 같이 묘사하였으며, 다양한 지반 물성과 말뚝직경, 길이에 대하여 하중-침하 거동이 시뮬레이션 되었다.

본 연구의 지반 모델 해석에 사용된 프로그램은 2차원 Explicit 유한차분 프로그램으로서 유한차분법은 초기치와 경계치를 이용하여 미분방정식을 푸는 수치해석 방법이다. 유한차분법에서는 모든 지배방정식의 도함수들이 공간내 임의의 불연속점에서 현장변수(field variable) 형태의 대수적 표현으로 대치된다.

사용된 프로그램의 특징은 모델링되는 물리적 현상이 불안정 할 때라도 수치해석적 구조는 안정적이도록 하기

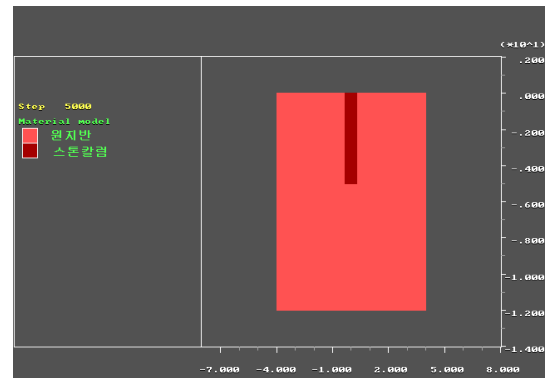


그림 4. (쇄석)말뚝의 모델링 개요

위하여 정적 해석 문제에 있어서도 동적 운동방정식이 포함되게 된다. 이 기법은 특히 물리적 불안정 가능성을 내재하고 있는 비선형 재료의 해석 등에 효과적이다.

3.3. 해석조건 및 적용 물성치

쇄석말뚝 설치시 말뚝의 지지력에 대한 거동을 분석하기 위하여 말뚝 중심으로부터 주변 4m, 5m 반경 영역까지를 그림 4와 같이 모델링 하였다.

경계조건의 설정은 좌, 우측경계조건에 대하여 X방향 변위를 억제하고, Y방향 변위를 허용하는 Roller 단으로 하였으며, 하부의 경계조건은 X방향 변위와 Y방향 변위를 억제하는 경계조건을 설정하였다.

안정성 해석을 위한 유한요소망은 그림 4의 안정성 해석모델과 같이 절점수 연속체 요소수 2,400개로 분할하였으며, 중앙부로 갈수록 말뚝 상부로 갈수록 요소망은 촘촘하고 중앙 외곽과 말뚝 하부로 갈수록 넓어지게 구성하였다.

수치해석 적용 물성치는 실내실험 자료와 기존 연구문헌에서의 자료를 토대로 결정되었다. 원지반은 전체가 균질한 지반과 선단부 지반조건에 대하여 검토되었으며 쇄석말뚝도 조성체의 물성에 따라 여러 조건에 대하여 검토가 이루어졌다. 그 구분을 표 3에 나타내었다. 위와 같이 쇄석말뚝과 원지반의 물성치 변화 이외에 쇄석말뚝의 길이와 직경 변화에 대한 거동 변화도 검토되었다. 쇄석말뚝 길이는 3m, 5m, 8m, 12m 직경은 0.5m, 0.7m, 1.0m 경우에 대하여 검토되었다.

표 3. 수치해석시의 물성변화 기본 조건

구 분	쇄석말뚝		원지반		비 고
	C(kPa)	∅	C(kPa)	∅	
M1	0	45	30	0	
M2	0	45	20	0	
M3	0	45	10	0	
M4	0	45	10	10	
M5	0	45	20	10	
M6	0	45	30	10	
M7	0	45	30	20	
M8	0	45	20	20	
M9	0	45	10	20	
N1	10	45	30	0	
N2	10	45	20	0	
N3	10	45	10	0	
N4	10	45	10	10	
N5	10	45	20	10	
N6	10	45	30	10	
N7	10	45	30	20	
N8	10	45	20	20	
N9	10	45	10	20	
S1	20	45	30	0	
S2	20	45	20	0	
S3	20	45	10	0	
S4	20	45	10	10	
S5	20	45	20	10	
S6	20	45	30	10	
S7	20	45	30	20	
S8	20	45	20	20	
S9	20	45	10	20	

4. 수치해석 결과

쇄석말뚝의 지지력 거동은 설치되는 쇄석말뚝의 크기, 물성치와 주변지반의 물성치에 영향을 받게 된다. 따라서 다양한 조건에서의 쇄석말뚝 하중-침하거동을 시뮬레이션하여 지지력을 산정하여 경향을 파악한다. 이 결과를 토대로 쇄석말뚝의 지지력 예측식을 제안하고자 한다.

이를 위해 먼저 각 경우에 쇄석말뚝의 하중-침하 특성을 살펴보면 다음과 같다.

4.1. 원지반 물성변화에 따른 쇄석말뚝의 하중-침하 거동

점성토 지반에 설치된 쇄석말뚝의 지지력 거동을 나타내는 하중-침하곡선의 가장 큰 특성은 지반의 도정수가 적어서 항복하중이 작은 경우에는 전형적인 탄소성 거동을 보이거나 항복 하중이 큰 경우는 완만한 증가 곡선을 나타내어 뚜렷한 항복 기준점을 나타내지 않는다(그림 5, 6 참조). 특히 원지반의 물성중 점착력과 내부마찰각의 변화 모두가 하중-침하 거동에 크게 영향을 주는 것으로 나타났다(그림 7, 8 참조). 따라서 현재 사용되는 대부분의 지지력 산정식과는 달리 쇄석말뚝의 지지력 산정시에는 원지반의 점착력과 내부마찰각 모두를 정확하게 고려해야 할 것으로 판단된다.

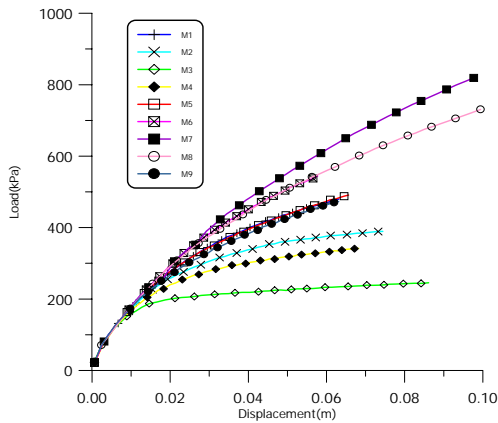


그림 5. 하중-침하 거동 I (L=5m, D=0.5m)

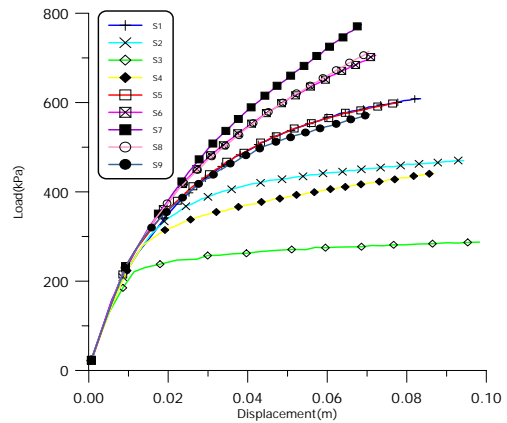


그림 6. 하중-침하 거동 II (L=5m, D=0.5m)

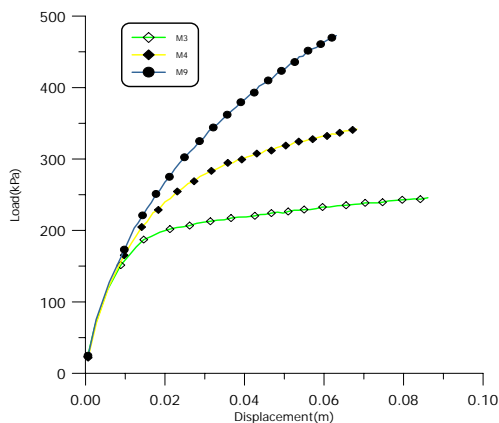


그림 7. 원지반 내부마찰각 변화에 따른 하중-침하 거동

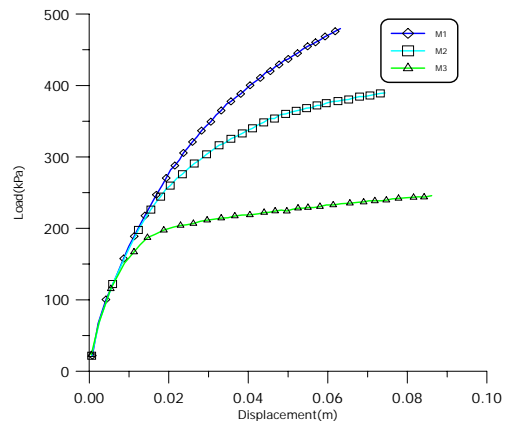


그림 8. 원지반 점착력 변화에 따른 하중-침하 거동

4.2. 쇄석말뚝 물성변화에 따른 쇄석말뚝의 하중-침하 거동

그림 9에서와 같이 쇄석말뚝 물성 변화에 따른 말뚝의 하중-침하 거동을 살펴보면 쇄석말뚝의 점착력 변화에 따른 하중-침하 거동은 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 통상적으로 쇄석말뚝 재료의 물성이 큰 내부마찰각을 가지며 이 값만을 고려하여 지지력 산정에 적용하는 기존의 방법이 크게 문제가 없음을 알 수 있다. 이 그림에서도 쇄석말뚝의 물성 보다는 주변 원지반의 물성치 변화에 의해 말뚝의 하중-침하 거동이 더 크게 영향을 받을 수 있다.

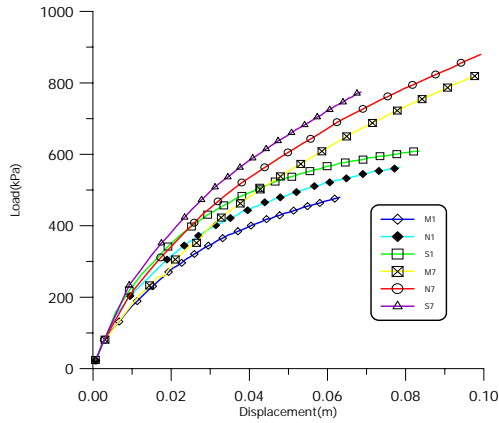


그림 9. 쇄석말뚝 물성 변화에 의한 하중-침하 거동

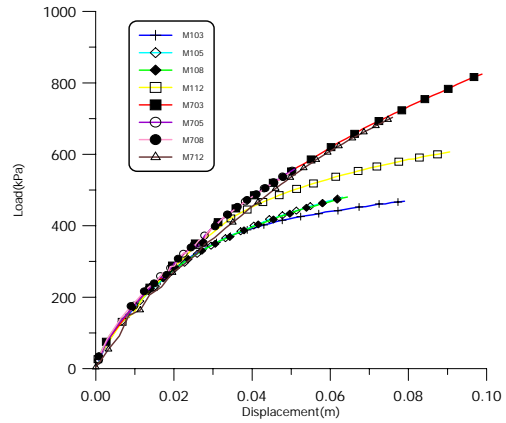


그림 10. 쇄석말뚝 길이 변화에 의한 하중-침하 거동(I)(직경 0.5M)

4.3. 쇄석말뚝 길이 변화에 따른 쇄석말뚝의 하중-침하 거동

그림 10, 그림 11은 각 지반 조건에서 말뚝의 길이 변화에 따른 하중-침하 거동을 나타낸 것이다. 예를 들어 범례의 S103이 의미하는 것은 S1 물성 조건에서 말뚝의 길이 3M 일 때의 하중-침하 거동을 의미한다.

위의 결과를 살펴보면 의미 있는 결과를 제시하고 있다. 첫째로 주변 지반이 양호한 경우(M703 ~ M712, S703 ~ S712) 쇄석말뚝 길이 변화에 의한 하중-침하 거동은 차이가 미미한 반면 주변 지반이 약한 경우(M103 ~ M112, S103 ~ S112)에는 쇄석말뚝 길이 변화에 따른 말뚝의 하중-침하 거동은 차이를 나타내게 된다.

특히 차이가 나는 경우에도 말뚝 길이 8M와 5M에서의 차이는 거의 나타나지 않고 있다. 다시 말해 일정 길이 이외의 쇄석말뚝 설치의 의미가 없게 된다는 결과를 보여주고 있다.

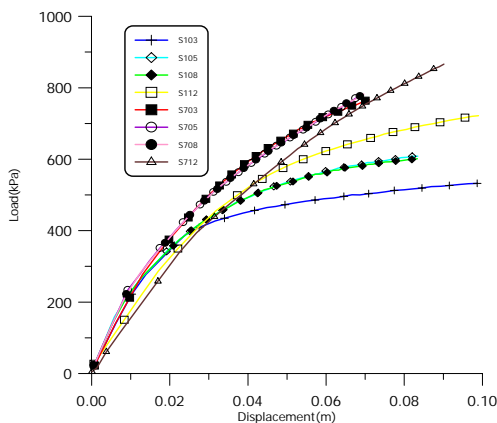


그림 11. 쇄석말뚝 길이 변화에 의한 하중-침하 거동(II)(직경 0.5M)

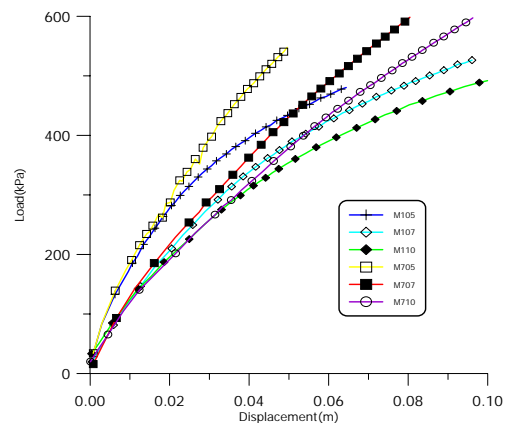


그림 12. 쇄석말뚝 직경 변화에 의한 하중-침하 거동(I)(길이 8M)

4.4. 쇠석말뚝 직경 변화에 따른 쇠석말뚝의 하중-침하 거동

그림 12, 그림 13은 각 지반 조건에서 쇠석말뚝의 직경 변화에 따른 하중-침하 거동을 나타낸 것이다. 예를 들어 범례의 M105가 의미하는 것은 M1 물성 조건에서 말뚝의 직경 5M, 길이 8M 일 때의 하중-

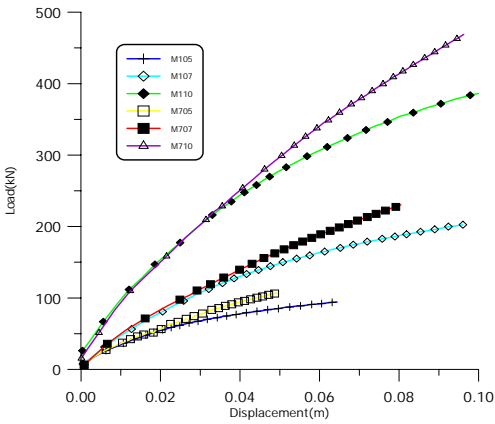


그림 13. 쇠석말뚝 직경 변화에 의한 하중-침하 거동(II)(길이 8M)

침하 거동을 의미한다. 위의 결과를 살펴보면 쇠석말뚝 직경 변화에 따른 말뚝의 단위하중-침하 거동은 큰 차이가 없다는 것을 나타내고 있다.

특히 초기부와 중반부 곡선에 접선을 그어 접선의 교차점을 항복하중으로 결정하는 규칙에 의한 항복하중은 말뚝 직경이 커질수록 오히려 작아지는 결과를 나타내기도 한다.

그러나 쇠석말뚝 한 본당 하중과 침하 거동을 살펴보면 단면적이 커짐에 따라 말뚝 직경이 커질수록 본당 지지하중은 커지게 된다.

즉 말뚝 단면적당 지지효율은 단면적이 작은 말뚝이 유리함을 알 수 있다.

4.5. 쇠석말뚝의 하중-침하 거동 함수식 제안

위에서 살펴본 바와 같이 쇠석말뚝의 하중-침하 거동은 주로 쇠석말뚝이 설치되는 지반의 점착력과 내부마찰각에 영향을 받음을 알 수 있다. 지금까지의 쇠석말뚝 지지력 산정 제안식은 쇠석말뚝의 하중-침하 거동은 알 수 없으며, 단순히 극한 또는 항복 지지력을 산정하여 그 값에 안전율을 고려하여 허용 지지력을 산정하고 있다. 따라서 산정된 해당 지지력 하중하에서의 쇠석말뚝의 침하량을 알 수 없고 지지력 산정시 고려되는 인자도 힘의 한계평형식에 근거하여 주변지반과 쇠석말뚝 자체의 저항능력을 부분적으로 고려하고 있는 실정이다.

그러나 실제적으로 쇠석말뚝은 연약지반에 설치되는 경우가 많아 침하가 많으며, 최근 들어 점착력과 내부마찰각 성분을 모두 가지는 일반 느슨한 토사 지반에도 보강체로서 조성되는 경우가 많아, 모든 여건을 고려한 쇠석말뚝의 하중-침하 거동을 정확히 산정하여 허용 지지력을 결정해 주는 것이 가장 바람직하다.

이를 위하여, 위에서 나타낸 바와 같이 수치해석적으로 여러 지반조건에 따라 쇠석말뚝의 재하시험을 시뮬레이션하여 쇠석말뚝의 하중-침하 곡선을 찾아내고 통계 분석을 통하여 이 하중-침하 거동을 수학적으로 가장 잘 묘사할 수 있는 함수식을 선정하였다. 선정된 함수식은 식 (1)과 같으며 이 함수식의 특성은 그림 14, 그림 15와 같다.

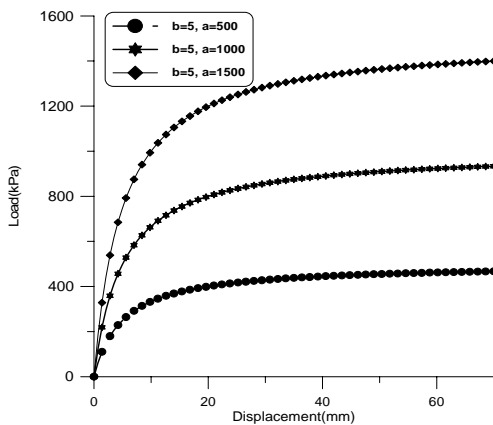


그림 14. 함수식의 계수 a 특성

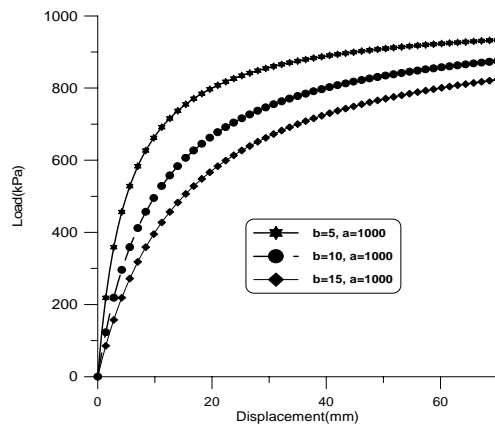


그림 15. 함수식의 계수 b 특성

$$\sigma = \frac{ax}{b+x} \quad (1)$$

여기서, σ : 쇄석말뚝에 작용하는 하중 강도(kPa)
 x : 쇄석말뚝 두부의 침하량(mm)
 a, b : 계수

쇄석말뚝 재하시험 시물레이션 결과를 이 함수식에 대하여 회귀분석을 실시하고 각 경우에 있어서의 계수를 산정하면 표 4와 같다.

표 4. 하중-침하 곡선의 회귀분석 결과

구 분	쇄석말뚝		원지반		계 수	
	C(kPa)	Φ	C(kPa)	Φ	a	b
M1	0	45	30	0	709.05	31.09
M2	0	45	20	0	485.51	17.6
M3	0	45	10	0	256.71	6.16
M4	0	45	10	10	410.23	14.27
M5	0	45	20	10	710.48	31.24
M6	0	45	30	10	966.62	45.51
M7	0	45	30	20	1532.1	87.02
M8	0	45	20	20	1184.44	64.9
M9	0	45	10	20	698.22	32.04
N1	10	45	30	0	763.73	28.2
N2	10	45	20	0	504.33	13.49
N3	10	45	10	0	285.09	5.74
N4	10	45	10	10	441.32	11.58
N5	10	45	20	10	759.1	27.55
N6	10	45	30	10	992.11	38.77
N7	10	45	30	20	1525.72	73.87
N8	10	45	20	20	1026.21	41.72
N9	10	45	10	20	729.52	26.4
S1	20	45	30	0	797.73	24.93
S2	20	45	20	0	532.66	12
S3	20	45	10	0	304.64	5.82
S4	20	45	10	10	490.61	12.04
S5	20	45	20	10	783.99	23.49
S6	20	45	30	10	1040.3	35.43
S7	20	45	30	20	1300.19	48.48
S8	20	45	20	20	1080.48	38.37
S9	20	45	10	20	741.94	21.34

원지반의 물성치에 의해 쇄석말뚝의 하중-침하 거동 곡선을 산정하기 위하여 계수 a, b와 지반물성과의 상관성을 분석해 본 결과 쇄석말뚝의 하중-침하 거동을 묘사하는 함수식의 계수는 원지반의 강도정수에 대해 그림 16, 그림 17과 같은 관계를 나타내었다.

이 관계를 통계 분석하여 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a &= -93.47 + 29.27C + 28.77\Phi \\ b &= -16.61 + 1.54C + 1.60\Phi \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, C : 원지반의 점착력(kPa)
 ϕ : 원지반의 내부마찰각(°)

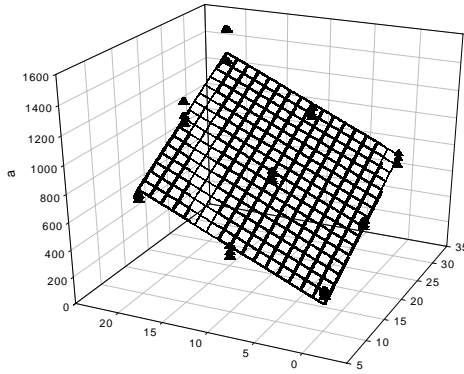


그림 16. 함수식의 계수 a 경향

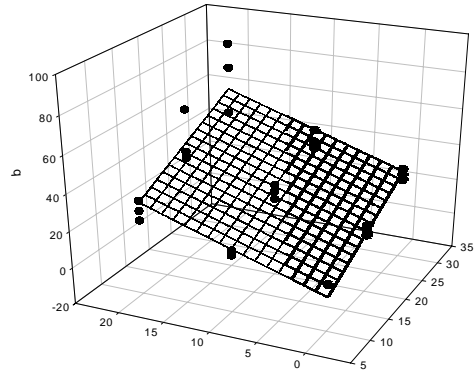


그림 17. 함수식의 계수 b 경향

4.6. 실측치와 예측치의 비교

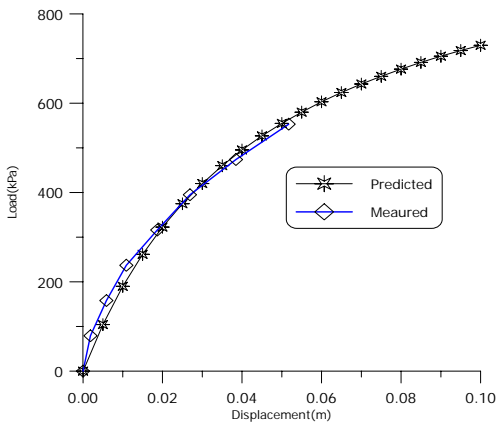


그림 18. 실측치와 예측치의 비교

위에서와 같은 분석 결과를 토대로 쇄석말뚝의 지지력 즉, 하중-침하 거동을 예측하는 방법으로 기존의 제안방법들은 단순히 쇄석말뚝의 지지력만을 산정하는 것에 반해, 원지반의 물성을 알면 설치된 쇄석말뚝의 하중-침하 거동을 알 수 있도록 하는 예측식을 제시하였다.

이 예측식을 표 1에서 나타난 원지반 물성에서 쇄석말뚝을 설치하고 재하시험을 실시한 결과와 비교해 보았다. 예측식에 적용된 원지반 물성은 표 1을 토대로 점착력 $C = 20\text{kPa}$, 내부마찰각 $\phi = 20^\circ$ 를 적용하여 산정하였다. 비교 결과는 그림 18와 같이 거의 유사한 경향을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 연약지반상에 조성된 쇄석말뚝에 의한 개량효과중 지지력 증대효과를 규명하기 위해 쇄석말뚝의 지지력 거동에 대한 수치해석을 실시하였다. 수치해석시 원지반조건, 쇄석말뚝 조건별로 분석하였으며, 쇄석말뚝의 지지력 거동 함수식의 제안 및 제안된 지지력 예측방법과 거동을 계측한 실측치와의 검증을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 점성토 지반에 설치된 쇄석말뚝의 지지력 거동을 나타내는 하중-침하곡선의 가장 큰 특성은 지반의 강도 정수가 작아서 항복하중이 작은 경우에는 전형적인 탄소성 거동을 보이나 지반의 강도정수가 커짐에 따라 하중-침하 거동은 완만한 증가 곡선을 나타내어 뚜렷한 항복 기준점을 나타내지 않는다.
- 2) 원지반의 경우 점착력과 내부마찰각은 모두 쇄석말뚝의 하중-침하 거동에 크게 영향을 준다. 한편 쇄석말뚝의 점착력 변화에 따른 항복하중에 미치는 영향은 적다.

- 3) 주변 지반이 양호할수록 쇄석말뚝 길이 변화에 의한 하중-침하 거동은 차이가 미미하나 주변지반이 약한 경우 쇄석말뚝 길이 변화에 따른 말뚝의 하중-침하 거동은 차이를 나타내게 되며 이 경우에도 일정길이 이상에서는 차이가 거의 없다.
- 4) 쇄석말뚝의 직경 변화에 따른 단위하중-침하 거동은 큰 차이가 없어 말뚝 단면적당 지지효율은 단면적이 작은 말뚝이 유리하다.
- 5) 분석 결과를 토대로 점성토 지반에 설치된 쇄석말뚝의 탄소성 거동을 묘사하는 적합한 함수식을 결정하고 해당 계수와 원지반 물성과의 상관관계식을 제시하였다.

참고문헌

1. 석정건설(2000), “진동쇄석말뚝공법의 설계와 시공”, 신기술지정 신청자료, pp. 95~141.
2. 천병식, 여유현, 고용일, 김백영, 최현석(2000), “Gravel Pile에 의한 연약지반 개량 시험시공 사례연구”, 한국지반공학회 '2000학술발표회 논문집, pp. 223~230.
3. 천병식, 최현석, 이용한(2000), “Gravel Pile의 지지력 특성에 관한 연구”, 대한토목학회 2000 학술발표회 논문집, pp. 493~496
4. ITASCA CONSULTING GROUP, INC.(1993), “FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua), Version 3.3, Volume I,III
5. University of California Pavement Research Center(2002), “Stiffness Strength and Performance of Unbound Aggregate Material”, pp. 39~56.