

MLPP 공법의 압밀 및 지지력 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Consolidation and Bearing Capacity Characteristics of Marine Large Pack Pile

이상익¹⁾, Sang-Ik, Lee, 박용원²⁾, Yong-Won, Park, 임철웅³⁾, Chul-Woong, Ihm, 김일곤⁴⁾, Il-Gon, Kim

¹⁾ (주)상지엔지니어링 과장, Manager, Sangjee Engineering Co., Ltd.

²⁾ 명지대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. Of Civil & Environmental Engineering, Myongji Univ.

³⁾ (주)상지엔지니어링 대표이사, President, Sangjee Engineering Co., Ltd.

⁴⁾ 초석건설산업(주) 전무, Executive Director, Chosuk Construction & Development Co., Ltd.

개요(SYNOPSIS) : This paper introduces a new method of improvement for marine soft ground, MLPP(Marine Large Pack Pile). The MLPP is a reinforcement technique for the conventional SCP or GCP piles by confining with geotextile pack. A pilot project at Busan New Port site and laboratory model tests were carried out to investigate the settlement reduction and bearing capacity enhancement effect of pack pile. The results of field and laboratory tests show that MLPP method can be a safe and economic alternative method for SCP and GCP.

Key Words : Bearing capacity, Geotextile pack, MLPP, Model tests, Settlement reduction

1. 서론

연약지반에 안벽 케이슨 또는 방파제 등의 항만시설물이 건설될 경우 종래에는 준설 치환하는 공법이 주로 사용되어 왔으나, 최근에는 준설토 처리가 어려워지면서 준설토의 처리 문제를 해소할 수 있는 모래다짐말뚝(sand compaction pile, 이하 SCP), 자갈다짐말뚝(Gravel compaction pile, 이하 GCP) 또는 쇄석기둥(Stone column) 등 지중에 골재를 다져 다짐체를 조성하여 복합지반을 조성하는 공법을 적용하는 추세에 있다. 이 중 모래를 이용하는 모래다짐말뚝 공법이 해상 공사에 주로 적용되고 있으나 예상 침하량 초과, 점토 혼입에 의한 품질 불균일 및 용기토 처리 등의 문제가 있는 것이 보고되고 있다. 이런 문제를 해결하기 위한 방안으로 모래말뚝의 외벽을 소정의 인장강도를 지닌 토목섬유로 보강함으로써 말뚝의 직경 및 치환율을 저감시킬 수 있는 공법이 대두되었다. 외국의 경우, GCC(Geotextile Coated Column) 공법이 개발되어 현장에 적용된 실적을 가지고 있으며, Nabil(1995)은 지오그리드로 쇄석말뚝을 보강한 시료에 대하여 삼축압축시험, 일축압축시험 등을 수행하였고, Raithel et al.(2000)은 수치모형 연구를 통하여 그 거동 특성을 고찰한 바 있다. 국내의 경우, 모래 자원의 부족량 고갈 및 해저 생태계 보호를 위한 준설금지 등의 상황으로 모래의 채취량이 감소되는 등의 경제적·환경적인 문제로 대체 공법이 절실히 필요한 실정이다. 이에 속채움 재료로 입도조정 쇄석을 사용하고 해저 연약지반에 말뚝을 조성하되 말뚝의 외벽을 토목섬유(PE Mat)로 껍을 만들어 보강하는 공법을 개발하여 이를 소개하고자 한다. 이 공법은 주로 해저 연약지반 개량에 적용하고자 “해상 대구경 껍 말뚝(Marine Large Pack Pile, 이하 MLPP)”이라 명하였으며, 그 적용성을 검토하기 위하여 현장에서 시험시공을 수행하고 시공된 해저 지반에서 국내에서는 최초로 해상 구조물 기초 보강지반에 대한 재하시험 시스템을 개발하여 재하시험을 실시하였다. 또한, 실내 모형시험을 실시하여 압밀 특성 및 껍 말뚝 자체의 지지력 특성을 파악하였다.

2. MLPP 공법

2.1 MLPP 공법 개요

MLPP 공법은 고강도 토목섬유(polyester mat, 인장강도 30tf/m)로 팩을 만들고, 속채움 재료로 입도 조정 쇄석을 사용하여 해저 연약지반 속에 말뚝을 타설함으로써 복합지반을 조성하는 공법이다. 이 공법의 핵심적인 내용은 현재 적용되고 있는 해상 SCP 공법에 비해 지름이 작은 골재말뚝을 토목섬유로 보강하여 강도 및 지지력 특성을 극대화시켜, 고치환율로 적용되고 있는 기존의 공법을 저치환율로 전환하는데 있다. 이 공법의 특성은 크게 골재말뚝 보강에 사용되는 팩의 구조와 시공 방법을 들 수 있다. 이를 설명하면 다음과 같다.

2.2 토목섬유 팩의 구조

이 공법에 사용되는 토목섬유 팩은 인장강도 300kPa을 갖는 원자재로 말뚝 조성시 진동 다짐에도 견디도록 4개소 겹침 직선 이음에 6선으로 봉직하는 특수한 구조로 이루어져 있다. 팩의 직경은 f800~1000mm이며, 별징과괴를 억지하기 위해서 말뚝 상부(1~3D)를 2겹으로 보강하는 구조로 되어 있다. 그림 1에 팩의 구조도를 나타내었다.

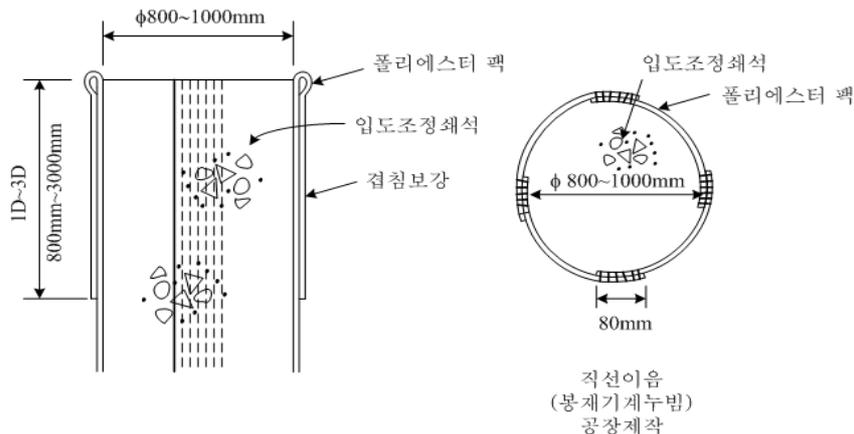


그림 1. MLPP 공법의 팩 구조

2.3 MLPP 시공방법

MLPP 시공법 중 가장 큰 장점은 기존의 팩을 이용한 공법과 달리 상·하 분리 2중관 시스템의 개발로 해저면에서 잔류 팩이 생기지 않는다는 것이다. 상·하 분리 2중관 시스템의 구성 및 시공 순서를 설명하면 다음과 같다.

- 가) 외부 케이싱은 상부관과 하부관으로 분리되며, 상·하관의 체결과 분리를 위한 원격 조정 시스템 장착
- 나) 내관은 상부관에 연결되어 있고, 길이를 조절할 수 있는 구조로 제작되었으므로 수심의 변화에 따라 총 길이를 수심과 같게 조절할 수 있으며, 내관의 선단에 팩의 체결·해체를 위한 원격 조정 시스템 장착
- 다) 하부관인 외관은 팩 말뚝 조성시 공간 확보를 위한 정적 기능
- 라) 상부관은 하부관 타입·인발의 작업 기능
- 마) 상부관에 연결된 내관은 팩의 하부관 투입, 팩 내부에 속채움 골재 투입, 골재 다짐을 위한 팩의 진동 다짐 등 동적 기능
- 바) 시공순서

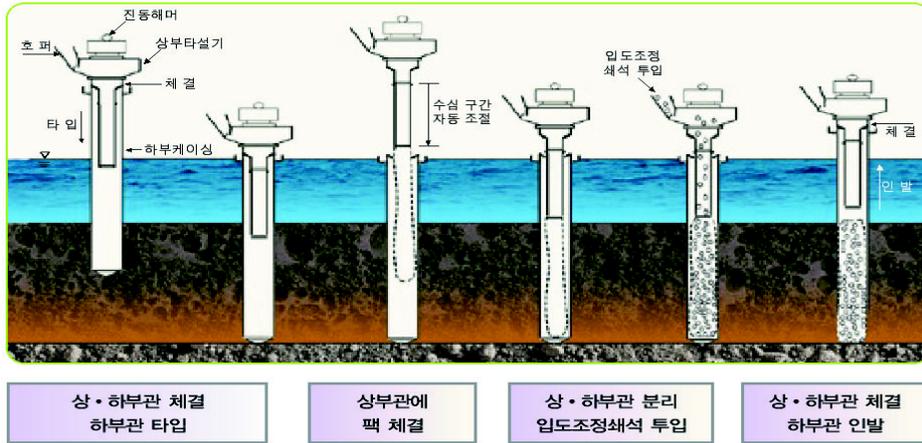


그림 2. MLPP 시공순서

3. 실내 모형시험 및 현장 재하시험

3.1 실내 모형시험

3.1.1 시험에 사용된 재료의 특성

점토는 부산 지역에서 채취한 시료를 사용하였는데 입도분석결과 CH로 분류되었다. SCP와 GCP의 말뚝 재료로 사용된 모래와 쇄석은 시험에 적당하도록 모래는 2mm이하, 쇄석은 15mm이하의 시료를 사용하였다. MLPP의 속채움재는 쇄석과 모래를 8:2의 비율로 섞은 입도조정 쇄석을 사용하였다. 시험에 사용한 재료들의 특성치를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 시험에 사용된 재료의 특성치

	Specific gravity, G_s	Atterberg limit		Coefficient of Consolidation, c_v (cm ² /sec)	Max. Dry Unit Weight, γ_{dmax} (kN/m ³)	Min. Dry Unit Weight, γ_{dmin} (kN/m ³)	USCS
		LL(%)	PI(%)				
점토	2.72	63.8	35	1.3×10^{-4}	-	-	CH
모래	2.68	-	-	-	18.2	12.5	SP
쇄석	2.65	-	-	-	17.0	13.2	GP

3.1.1 팩 말뚝 자체 지지력 시험(일축압축시험)

팩 말뚝 자체의 강도 및 변형 특성을 파악하기 위하여 팩 말뚝 일축압축시험을 실시하였다. 이 때 적용된 팩 제원은 재하시험 장비를 고려하여 지름 10cm, 길이 100cm의 크기에 상대밀도를 60, 70, 80%로 바꾸어가며 실시하였다. 또한, 팩 말뚝과 상부 5D 까지 2점으로 보강한 팩 말뚝을 제작하여, 팩 구조에 따른 강도 특성을 비교하였는데, 이 시험의 경우 속채움 골재의 상대밀도는 80%를 적용하였다. 사진 1에 팩 말뚝 일축압축시험에 사용된 시험 전경을 나타내었다.

표 2. 팩 말뚝 자체 지지력 시험 조건

상대밀도에 따른 시험	팩 보강 방법에 따른 시험	
상대밀도, $D_r = 60, 70, 80\%$	직선 봉합 팩 말뚝	상대밀도, $D_r=80\%$ 로 제작
	상부 5D 두겹 보강	



사진 1. 재하시험 전경

팩 말뚝 자체 지지력 시험은 제작된 팩 안에 소정의 상대밀도로 시료를 다짐하여 채운 후, 사진 1에 보는 재하프레임 장치를 이용하여 팩 말뚝 재하시험을 실시하였다.

3.1.2 원심력 압밀 시험

원심력 압밀시험은 SCP, GCP, MLPP 공법의 각 적용 치환율에 대하여 동일한 길이의 복합지반을 형성하고 원심력 압밀시험을 실시하고 침하량을 측정하였다. 또한 측정된 침하량의 비(처리 지반 / 무처리지반)를 이용하여 침하저감계수를 구하고, 응력분담비를 추정하여 각 공법의 응력분담 특성을 파악하고자 하였다. 각 공법 및 치환율에 따른 시험조건은 표 3과 같다.

표 3. 원심력 압밀시험 조건

공법	치환율, a_s (%)	말뚝 직경 (cm)	말뚝 길이 (cm)	압밀압력 (kPa)	
SCP	40	6.32	25	100	
	71	8.43			
GCP	40	6.32			
	71	8.43			
MLPP	30	5.48			200
	50	7.07			

압밀 시험은 명지대학교 지반공학연구실에 보유한 원심력 압밀 시험기를 이용하여 수행하였다.

불순물이 제거된 액성한계 이상의 함수비 상태로 만든 점토시료를 끓여 기포를 제거한 후 원통형 압밀 상자에 담는다. 이때 슬러리 상태인 점토의 평균 함수비는 $72 \pm 2\%$ 로 유지하였다. 복합지반 조성시 발생할 수 있는 시료 교란을 줄이고자 조성된 모래 및 쇄석말뚝을 냉동고에 얼려 사용하였다(사진 2). 소정의 상대밀도로 조성된 팩 말뚝, 모래말뚝과 쇄석말뚝을 설치하여 복합지반을 조성한 후, 원심력 압밀 시험기에서 200rpm, 250rpm, 300rpm의 회전 원심력을 증가시켜가며 압밀시험을 실시하였다. 이 때, 압밀압력은 회전원심력에 따라 각각 100kPa, 150kPa, 200kPa에 해당된다. 침하량 측정은 침하판에 부착된 측정자를



(a) 조성된 말뚝



(b) GCP(unreinforced MLPP) 50%



(c) MLPP 50%



(d) SCP 71%

사진 2. 조성된 말뚝 및 복합지반 조성

이용하여 압밀상자의 덮개의 구멍을 통해 측정하였으며, 각 단계마다 침하량을 측정하여 치환율 및 압밀 압력에 대한 침하저감효과를 파악하였다.

3.1.3 MLPP 시공 지반 재하시험

시험시공은 2003년 8월 19일~10월 6일에 걸쳐 부산 신항 북 컨테이너 부두 1.1km 구간 후면 해상에서 수행되었다. 시험시공의 주요 내용은 직경 f800mm의 팩 말뚝을 팩의 봉합(직선, 나선) 형태, 치환율(31%, 39%, 45%) 및 속채움 재료(모래, 자갈, 혼합골재) 등을 바꾸어가며 시공하여 공법의 시공성을 검토하였으며, 대형 평판재하시험을 실시하여 팩 말뚝의 지지력을 측정하였다. 재하장치는 해상 SCP 타설선의 중앙 케이싱에 설치하고 양측 두 케이싱을 지중에 타입하여 이들의 인발 저항과 배의 자중을 활용하도록 하였다. 시험말뚝의 직경은 f800mm이고, 재하판은 이보다 여유폭을 두어 f1,000mm로 하였다. 재하시험은 모래 31%와 45%의 치환율 각 1개소 씩 2개소, 혼합골재 31%, 39% 및 45%의 치환율 1개소 씩 3개소, 자갈 31% 치환율 1개소에 대하여 단일재하로 실시하였다.

3.2 시험 결과 및 분석

3.2.1 말뚝 자체 지지력 시험(일축압축강도)

(1) 상대밀도와 팩 말뚝 지지력의 관계

시험으로 측정된 팩 말뚝의 지지력을 표 4에 정리하였다. 그리고, 상대밀도 60, 70, 80%에 따른 시험 결과를 그림 3에 나타내었다. 시험결과 속채움재의 상대밀도에 따라 지지력이 증가하는 것으로 나타나, 속채움재의 다짐정도가 팩 말뚝 지지력에 상당한 영향을 미치고 있음을 보여주었다.

(2) 팩 구조에 따른 팩 말뚝 지지력의 관계

직선 봉합 팩 말뚝과 상부 5D까지 덧씌워 2겹 보강한 팩에 입도조정 쇄석을 상대밀도 80%로 다져 넣

고 시험을 실시하여 팩 구조에 따른 강도를 비교하였다. 그 결과를 표 5에 정리하였으며, 시험결과를 그림 4에 나타내었다. 상부 5D 까지 덧씌워 2겹 보강한 팩의 지지력이 직선 봉합 팩에 비해 약 15%이상 강도가 증가하는 것으로 나타났다.

표 4. 상대밀도와 지지력 관계

상대밀도(D_r , %)	팩 말뚝 자체 지지력(kPa)
60	163
70	408
80	720

표 5. 팩 구조와 지지력 관계

팩 제작 방법에 따른 시험	팩 말뚝 자체 지지력(kPa)
직선 봉합 팩 말뚝	720
상부 5D 2겹 보강 팩 말뚝	827

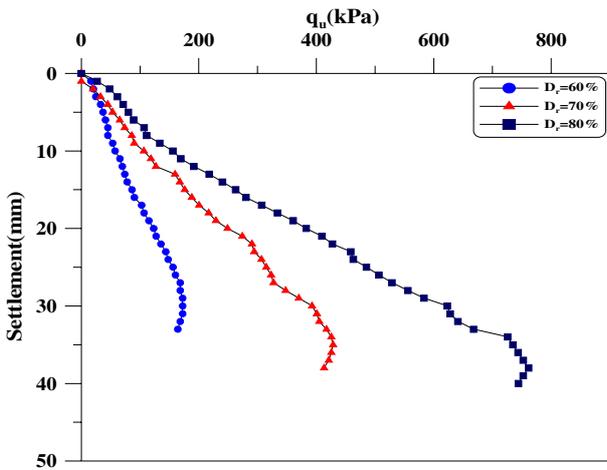
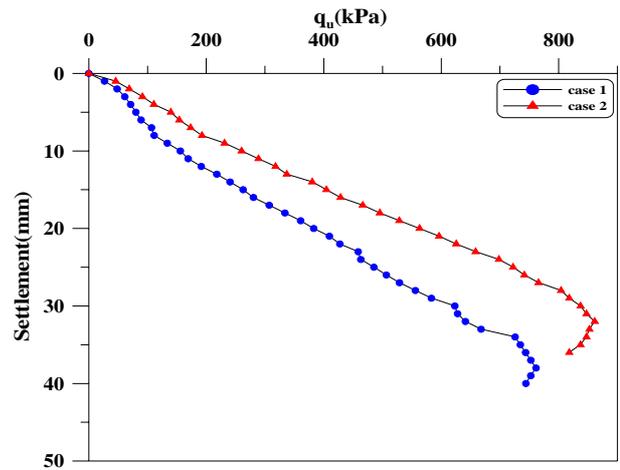


그림 3. 상대밀도와 지지력 관계



주) * case 1 : 직선 봉합, case 2 : 상부 5D 2겹 보강

그림 4. 팩 구조와 지지력 관계

3.2.2 현장 재하시험 결과

현장 재하시험에 대한 자세한 내용은 대한토목학회와 섬유학회 학술발표회 논문집을 통하여 이미 소개한바 있으므로(임철웅 외, 2004; 이상익 외, 2004), 그 결과를 간략히 소개하면 현장 재하시험 결과 MLPP의 지지력은 모래로 속채움한 경우 240kPa로 가장 작게 나타났으며, 전단저항이 큰 혼합골재로 속채움한 경우 700kPa로 가장 크게 측정되었었다. 현장 원지반의 경우, 시공 시 교란 또는 자체 지반 강도가 없는 상태이므로 전질의 팩 말뚝 자체 지지력 측정 시험 결과와 비교하였을 경우 두 시험결과가 거의 비슷한 지지력을 가지는 것으로 나타났다.

3.2.3 원심력 압밀 시험

(1) 침하량 측정

시험결과 얻은 침하량을 표 6에 정리하였다. MLPP 공법의 침하량은 SCP 공법에 비해 대략 1/2 이하로 작게 발생하였으며, GCP 공법에 비해서는 1/3 이하로 작게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 압밀압력이 높아짐에 따라 세 공법 모두 침하량은 증가하나 증가폭은 줄어드는 것으로 나타났다.

(2) 침하저감계수(β)

복합지반은 팩(모래, 쇠석) 말뚝과 점토의 응력분담 특성으로 인한 침하저감효과가 나타나게 되는데, 복합지반의 침하저감효과는 침하저감계수로 평가되며, 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta = \frac{S_0}{S_{of}} = \frac{1}{1 + (m-1)a_s} = \mu_c \quad (1)$$

여기서, S_0 : 무처리 지반의 침하량, S_{of} : 처리 지반의 침하량, m : 응력분담비(σ_s/σ_c)
 μ_c : 점토지반의 응력감소계수, a_s : 치환율(A_s/A)

식 (1)을 이용하여 침하저감계수를 구한 결과를 표 6과 그림 5에 각각 나타내었다. SCP 공법과 MLPP공법에서 치환율 40%와 30%인 경우를 비교하면, 각 압밀압력에서 평균 2.6배 정도 MLPP공법이 침하저감효과가 좋은 것으로 나타났다. 그리고, 치환율 71%와 50%의 경우에 평균 2배 정도 MLPP공법의 침하저감효과가 좋은 것으로 나타났다. 압밀압력이 높아질수록 침하저감계수의 감소폭은 줄어들어 침하저감효과의 증가 비율이 낮아짐을 알 수 있다. 팩 효과에 관련하여 MLPP 공법과 GCP 공법의 치환율 30%와 치환율 50%에서 동일하게 평균 3배 정도 MLPP 공법이 침하저감효과가 좋은 것으로 나타났다.

(3) 응력분담비(m)

원심력 압밀시험을 이용하여 구한 침하저감계수로부터 응력분담비를 역산하기 위하여 식 (1)을 응력분담비에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$m = \frac{1 - \mu_c(1 - a_s)}{\mu_c a_s} \quad (2)$$

표 6. 원심력 압밀시험의 침하량, 침하저감계수 및 응력분담비

적용 공법	치환율 (%)	압밀침하량(cm)			침하저감계수(β)			응력분담비(m)		
		압밀압력			압밀압력			압밀압력		
		100kPa	150kPa	200kPa	100kPa	150kPa	200kPa	100kPa	150kPa	200kPa
무처리 지반	0	87.0	92.0	95.0	-	-	-	-	-	-
SCP	40	45.0	49.0	52.0	0.517	0.533	0.547	3.33	3.19	3.07
	71	18.5	21.5	22.5	0.213	0.234	0.237	6.22	5.62	5.54
GCP (unreinforced MLPP)	30	52.5	58.5	61.0	0.603	0.636	0.642	3.19	2.91	2.86
	50	26.5	31.0	32.5	0.305	0.337	0.342	5.57	4.94	4.85
MLPP	30	17.0	19.0	20.0	0.195	0.207	0.211	14.73	13.81	12.50
	50	8.5	11.5	13.5	0.098	0.125	0.142	19.47	15.00	13.07

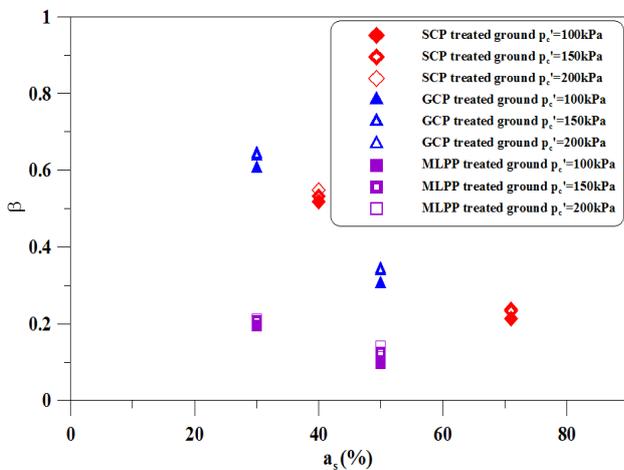


그림 5. 원심력 압밀시험에 의한 침하저감계수(β)

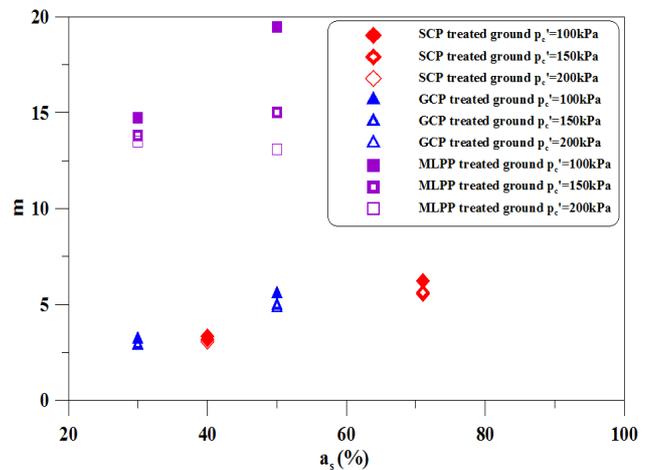


그림 6. 역산하여 추정된 응력분담비(m)

식 (2)를 이용하여 응력분담비를 역산하고 그 결과를 표 6과 그림 6에 나타내었다. SCP 공법과 MLPP공법의 치환율 40%와 30%인 경우를 비교하면 각 압밀압력에서 응력분담비가 평균 4.5배 정도 MLPP공법이 높은 것으로 나타났다. 그리고 71%와 50%인 경우 평균 2.7배 정도 MLPP공법의 응력분담비가 높은 것으로 나타났다. 또한, 압밀압력이 높아질수록 말뚝 주변 점토의 강도가 증가되어 응력분담비가 감소하였다.

팩 효과에 관련하여 MLPP 공법과 GCP 공법의 치환율 30%에서는 평균 4.7배, 치환율 50%에서는 평균 3배 정도 MLPP 공법이 응력분담비가 높은 것으로 나타났다.

4. 결론

이 논문에서는 골재말뚝의 외벽을 토목섬유로 보강하여 해저 연약지반을 개량하는 MLPP 공법을 소개하였으며, 공법의 현장 적용성 검토를 위하여 시험시공을 실시하고 시공 방법 및 시공 능력을 검토하였다. 또한, 시험시공 완료된 지반에서 독자적으로 개발한 재하 시스템을 이용하여 대형 평판재하시험 및 실내 시험을 실시하여 팩 말뚝의 지지력을 측정하였다. 그리고 인위적으로 조성된 MLPP, GCP (unreinforced MLPP), SCP 복합지반에 대하여 원심력 압밀시험을 실시하여 침하저감효과를 파악하였다. 이로부터 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. MLPP 공법의 시험시공을 실시하여 팩 자재의 구조 개선, 시공 방법 및 시공 능력이 충분히 검토되었다.
2. MLPP의 지지력은 모래로 속채움한 경우 가장 작게 나타났으며, 전단 저항이 큰 혼합골재로 속채움한 경우 700kPa로 가장 크게 측정되었다. 또한 팩 말뚝 자체 지지력 시험과 현장 재하시험 결과에서 말뚝 지지력이 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 팩 말뚝을 5D 깊이까지 두 겹으로 보강하였을 경우 약 15% 정도의 강도 증가가 있는 것으로 나타났다.
3. 팩의 유무에 따라 적용된 MLPP 공법과 GCP 공법의 치환율 30%와 50% 비교 시험 결과, MLPP 공법은 GCP 공법에 비해 약 2.15배 작은 침하량, 3.9배의 침하저감효과가 있는 것으로 나타났으며, MLPP 공법 치환율 30%와 50%는 SCP 공법 40%와 71%에 비해 치환율을 작게 적용하여 시험을 하였음에도 1.34배 작은 침하량과 2.3배의 침하저감효과를 갖는 것으로 나타났다. 이로부터 팩의 유무로 인한 효과가 매우 큼을 알 수 있었으며, 침하저감 측면에서 현재 SCP 공법에서 주로 적용되고 있는 치환율 보다 치환율을 저감할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 역산된 응력분담비 산출 결과 기존 공법에 비하여 말뚝의 응력분담효과가 매우 높아짐을 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 이상익, 임철웅, 김일곤(2004), “해상 대구경 팩 말뚝 공법의 현장 적용성 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집
2. 임철웅, 이상익, 김일곤(2004), “시험시공을 통한 MLPP 공법의 현장 적용성 연구” 2004 가을 토목섬유학회 학술발표회 논문집, pp. 83~88
3. 초석건설산업(주)·(주)상지엔지니어링, 신기술지정신청 보고서(2004)
4. Nabil M. A. Al-Joulani(1995), "*Laboratory and Analytical Investigation of Sleeve Reinforced Stone Column*", Carleton University(Ottawa, Canada), Ph. D. Dissertation
5. Raithel, M. & Kempfert, H. G.(2000), "Calculation Models for Dam Foundation with Geotextile Coated Sand Columns", *International Conference on Geotechnical & Geological Engineering GeoEng. 2000*, Melbourne
6. Raithel, M. & Henne, J.(2000), "Design and Numerical Calculation of a Dam Foundation with Geotextile Coated Sand Columns ", *Proceeding of the 4th International Conference on Ground Improvement Geosystems*, Helsinki, pp. 413~420