

# MSG공법에 의한 PRD강관말뚝 보강에 관한 사례 연구

## An Experimental Study on the MSG Reinforcement of Steel Pipe Pile Installed by PRD

천 병 식<sup>1)</sup> · 강 희 진<sup>2)</sup> · 공 진 영<sup>†</sup>

Chun, Byungsik · Kang, Heejin · Kong, Jinyoung

**ABSTRACT** : Mudstone has characteristics that it has high enough strength and stiffness in a dry condition, but the strength and stiffness decrease in a wet condition with groundwater infiltration. The sliding of cut slope frequently encountered in Pohang area has been reported due to the rapid reduction of shear strength in mudstone after being exposed to the air. The study in this paper shows that mudstone having enough strength in a boring stage has lost the strength after installing PRD (percussion rotary drill) steel pipe pile inducing an insufficient bearing capacity. Field test has been performed to investigate the most favorable method for increasing a pile bearing capacity in mudstone with various methods such as MSG (Micro Silica Grouting) around the tip and side of a pile, the perimeter grouting combined with Micro pile reinforcement, and concrete filling after tip reinforcing grouting. MSG has been turned out to be the most favorable method for increasing a pile bearing capacity in mudstone, confirmed by the static load test.

**Keywords** : Mudstone, PRD steel pipe pile, MSG, Static load test

**요 지** : 이암은 건조 조건에서는 일정한 강도와 강성을 가지나, 지하수 침투 등에 의한 습윤, 포화 시 고유의 강도 및 강성이 저하되어 급속히 풍화되는 특성을 가지며, 포항지역에서 자주 발생하는 절취사면의 활동은 주로 이암이 풍화되어 전단강도가 급격히 저하되는 것으로 볼 수 있다. 본 연구는 시추조사시 강성이 충분한 것으로 평가된 이암층에 PRD강관말뚝을 시공한 후 정재하 시험을 실시한 결과 소요지지력이 부족하여, 이를 보강하기 위한 가장 우수한 방법을 찾기 위하여 여러 가지 공법을 검토하였다. 말뚝지력 증대에 가장 효과적인 방법을 찾기 위해 말뚝주변 및 선단부에 MSG공법, 마이크로파일 보강후 주변그라우팅공법, 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움 등의 방법으로 시험시공을 실시하였고, 시험말뚝에 대한 정재하시험 결과 MSG공법으로 보강한 말뚝의 지지력이 가장 우수함을 알 수 있었다.

**주요어** : 이암, PRD 강관말뚝, MSG, 풍화

## 1. 서 론

암반의 강도는 암반의 상태에 좌우되는데, 건설공사시 지표부근의 풍화가 진행중이거나 토사에 가까운 암반의 경우는 암반의 상태가 시간에 따라 변하기도 하므로 암반의 강도를 결정하기가 어렵다. 암 중에서도 퇴적암은 일반적으로 환경변화에 따른 풍화의 정도가 화성암이나 변성암보다 빠르고 암석의 풍화정도가 강도에 미치는 영향이 큰데 비해, 풍화등급이 육안관찰에 의하여 정성적으로 분류되기 때문에 주관적인 기준 차이로 풍화도 결정에 혼란을 초래한다.

특히 이암은 동종의 다른 퇴적암보다 더 빠르게 풍화하

기 때문에 본 연구의 경우처럼 지반조사 결과만으로 설계를 하면 시공시 이암층이 이미 풍화되어 기대했던 지지력을 얻지 못하게 되기도 한다.

포항지역에 분포되어 있는 퇴적층은 영일만 일대를 관통하는 양산단층과 울산단층 같은 주향이동단층에 의하여 형성된 함몰지에 운반 퇴적된 해성점토가 고결되어 생성된 것으로 보고되고 있다(한중환 등, 1986). 지질학적으로 현재로부터 약 7~26백만년전인 제 3기의 마이오세(Miocene)에 생성된 포항이암 지층에서 자주 발생하는 자연사면의 활동이나 주택단지, 도로 및 공업단지건설을 위해 시공된 절취사면에 예외 없이 발생하는 크고 작은 규모의 지반활동은 이암이 풍화되어 그 전단강도가 급격히 저하되기 때

1) 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

2) 비회원, 한국지오택 과장

† 비회원, 한양대학교 대학원 석박사과정 토목공학과(E-mail : tsofs@dreamwiz.com)

문이고, 이암이 풍화되는 주된 원인은 강우 또는 계절적 건습반복 작용에 의한 슬레이킹 및 팽창에 의한 영향으로 볼 수 있다. 또한 풍화된 점토질암 또는 틈이 많은 견고한 점토지대에서의 산사태 또는 사면붕괴는 대부분 기존의 활동면을 따라 발생하고, 이미 파괴된 여러 사면들에 대한 역해석 결과 파괴 시에 발견되는 전단강도는 침투강도에 비해 훨씬 작은 잔류전단강도와 같다는 사실이 판명되었다(이영휘, 1996).

따라서 본 연구는 슬레이킹 및 팽창이 발생하는 이암지역에서 “○○병원-○○간 도로개설공사” 중 선 시공된 PRD (Percussion Rotary Drill)말뚝의 소요지지력이 부족하게 평가되어 지지력 증가를 목적으로 여러 보강대책을 계획하고 시험시공을 실시한 내용으로 시험시공 결과를 바탕으로 경제적이고 합리적인 강관말뚝기초의 지지력 보강대책을 수립하고자 한다. 본 연구의 범위는 이암지역에서 현장 PRD 말뚝의 지지력 증가를 위한 보강공법의 시험시공 및 효과 확인시험 그리고 보강 후 말뚝의 정재하시험을 통한 지지력 증가와 경제적이고 합리적인 보강대책을 논하고자 한다.

## 2. 대상지반 및 지지력 보강용 MSG공법 특성

### 2.1 지반특성

본 연구 지역의 시추조사보고서에 의하면 일반적으로 지표로부터 매립토, 퇴적토, 붕적토, 풍화암(이암)의 지층을 보이며

정리하면 다음 표 1과 같다. 이암층의 N치, TCR, RQD값을 보면 시공 전 연구지역 이암은 신선한 상태를 유지하고 있었던 것으로 추정된다.

연구지역 암의 대부분을 차지하는 이암의 강도는 풍화의 영향을 크게 받는다. 민덕기 등(2006)은 울산지역 퇴적암(사암, 셰일, 이암)의 강도 추정법을 제안하면서 이암의 풍화속도가 사암, 셰일보다 빠르며 이암의 강도 및 탄성계수는 사암, 셰일에 비해 반정도의 값이라는 시험결과를 제시하였다.

이러한 이암의 급격한 풍화현상인 슬레이킹에 의해 점토성분을 많이 함유한 암석에서 환경변화에 따른 건조·습윤 반복에 의하여 그 고결력이 급격히 떨어져 본래의 조직이 파괴된다. Van Eeckhout(1976)는 습도변화가 이암의 팽창수축에 미치는 영향을 조사하는 과정에서 건습의 반복에 의하여 진행성으로 연장된 내부의 불연속면을 통하여 암반에 함수비가 증가하게 되고, 그 결과 비교적 작은 파괴에너지 만으로도 암반은 붕괴될 수 있다는 것을 발견하였다.

또한 이암의 덩어리를 공기 중에 방치했을 때 높은 인장력으로 인하여 외측 공극부분에 공기가 유입되고, 그 후에 암석을 포화시키면 모관현상에 의하여 물이 이암 속으로 침투하기 때문에 간혀있던 공기는 압력을 받게 된다. 이러한 슬레이킹과정을 통하여 암석의 골격구조에 응력이 가해지고, 여기에 건습과정이 여러 번 반복되면 내부의 불연속면이 연장되어 궁극적으로는 공기파괴에 의하여 파괴하게 되는 것이다(이영휘 등, 1993). 이암지대에서 발생하는 사면붕괴는 대부분 슬레이킹현상에서 기인된다고 볼 수 있다.

표 1. 시추조사결과

공 번 (교 각)	심 도(m)	두 계(m)	토 질		N 치	TCR (%)	RQD (%)
BH - 5	0.0~0.5	0.5	매립토	점토질 실트	9/30	-	-
	0.5~2.3	1.7	퇴적토	실트섞인 점토	9/30	-	-
	2.3~4.5	2.2	퇴적토	실트섞인 중립질모래	27/30~50/5	-	-
	4.5~6.0	1.5	붕적토	모래섞인 자갈	50/5	-	-
	6.0~7.6	1.6	풍화암	이 암	50/5	63	5
	7.6~10.0	2.4	풍화암	이 암	50/5~50/6	57	0
	10.0~11.6	1.6	풍화암	이 암	50/6~50/4	60	15
	11.6~13.6	2.0	풍화암	이 암	50/4~50/3	43	10
	13.6~17.0	3.4	풍화암	이 암	50/3	100	23
	17.0~19.6	2.6	풍화암	이 암	50/3~50/4	100	6
	19.6~22.6	3.0	풍화암	이 암	50/4~50/3	90	21
	22.6~25.6	3.0	풍화암	이 암	50/3~50/4	100	33
	25.6~28.6	3.0	풍화암	이 암	50/4~50/5	57	3
	28.6~31.6	3.0	풍화암	이 암	50/5~50/4	83	33
	31.6~34.6	3.0	풍화암	이 암	50/4~50/3	100	22
	34.6~37.6	3.0	풍화암	이 암	50/3	97	43
37.6~40.6	3.0	풍화암	이 암	50/3~50/4	63	13	
40.6~45.0	4.4	풍화암	이 암	50/4~50/5	100	26	

## 2.2 MSG(Micro Silica Grouting)공법

본 연구의 원 설계는 PRD강관말뚝을 단단한 지지층에 관입시켜 지지력을 얻는 것이나, 말뚝 시공후 정재하시험 결과 지지력은 10~20tonf으로서 설계값에 크게 미달하여 보강이 필요하였다. 말뚝의 소요지지력 저하 요인으로는 PRD말뚝시공 시 진동에 따른 지반 교란, 작업수 및 슬라임 유입, 지하수 침투, 지중응력조건 변화 등에 따라 말뚝 주변 및 선단부 이암층의 이완 및 풍화현상인 것으로 판단된다.

PRD로 시공된 강관말뚝을 보강하는 대표적인 방법으로 말뚝 선단부를 시멘트풀 또는 몰탈로 충전하는 것이 있지만, 지지력 보강보다는 암반지지층이 오랜 기간에 걸쳐 풍화되어 침하가 발생하는 것을 억제하는 것이 주목적이다.

또한 시멘트풀이나 몰탈, 시멘트계 약액주입에서 주입재로 사용하는 보통시멘트의 경우 평균입경 15~20 $\mu$ m, 최대입경 80~100 $\mu$ m로 입자가 굵기 때문에 침투주입의 영역이 매우 제한적이다. 모래 및 모래섞인 실트질 영역에서는 주입효과가 양호하지만, 점성토지반에서는 주입효과가 불량하다.

이에 비해 MSG공법은 마이크로화된 주입재를 사용하기 때문에 보통시멘트를 사용하는 기존의 공법과 비교해서 침투성이 우수하다. MSG공법은 경화재 및 응결조절재와 주입선단장치로 구성되어 있으며, 경화재는 평균입경 3~7 $\mu$ m, 분말도 8,000cm<sup>2</sup>/g 이상의 마이크로 복합실리카를 주성분으로 사용

하기 때문에 고침투성, 고강도성, 고내구성, 환경친화성 및 저압침투주입성을 특징으로 하며, 모든 조성물이 혼합되어 같은 포대에 포장되어 있기 때문에 품질관리가 매우 용이하다.

또한, 실리카 함량과 겔타임 조절제를 이용해서 3~5초의 초급결형, 7~15초의 급결형, 40~90초의 완결형 및 5~7분의 초완결형까지 겔타임을 폭넓게 조정할 수 있다. 응결조절제는 저알카리형의 특수규산으로 반응속도가 빠르기 때문에 유수중의 겔타임 지연을 방지할 수 있으며 경화후 알카리 용탈량이 현저히 저감되므로 내구성이 향상되며 환경적으로도 안전하다.

MSG공법의 주입방식은 2.0shot방식 또는 1.5shot방식의 주입선단장치를 선택적으로 사용할 수 있기 때문에 복잡한 출수상황과 호층지반에서도 효과적으로 대응할 수 있는 맞춤형 그라우팅이다. 2.0shot 주입방식의 경우 룯드주입 방식의 종래의 주입선단장치를 이용하여 현탁액을 주입할 경우 막힘현상이 많이 발생되어 주입공정이 중단되는 현상이 빈번히 발생하였는데 MSG공법에서는 주입재료의 특성에 적합하게 주입선단장치를 개량하여 현장 트러블 발생을 현저히 저감시킬 수 있다.

표 2는 시멘트계 주입재의 물리적 특성치를 비교하였고(천병식 등, 2002), 그림 1은 대상토질별 침투성에 대한 시험결과로 보통시멘트보다 침투주입이 좋은 것을 볼 수 있다(한국지오텍, 2005).

표 2. 시멘트계 주입재의 물리적 특성치

		KS규격 제한값	초미립자시멘트 (MSG-N형)	콜로이드 시멘트	보통 시멘트
비 중		-	2.94	3.02	3.15
비표면적(cm <sup>2</sup> /g)		2,800 이상	8,150	6,620	3,250
길모아 응 결	W/C(%)	-	30.5	29.3	28.7
	초결(분)	60 이상	205	195	1700
	종결(시:분)	10 이하	8:05	7:45	7:30
압축강도	W/C(%)	-	50.7	49.4	48.50
	3일(kg/cm <sup>2</sup> )	110 이상	356	299	202
	7일(kg/cm <sup>2</sup> )	190 이상	535	480	264
	28일(kg/cm <sup>2</sup> )	290 이상	689	570	405

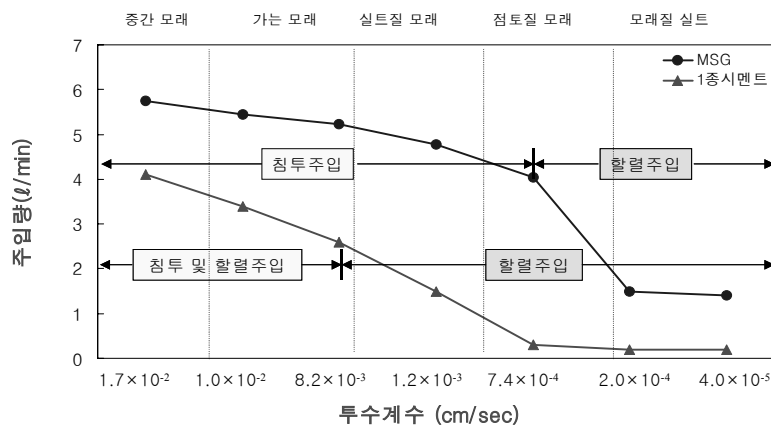


그림 1. 대상토질별 침투성시험 결과

### 3. 보강 전후 정재하시험

말뚝의 지지력을 결정하는 기본적인 일반적인 방법은 정재하시험이다. 정재하 시험은 현장에서 타설된 말뚝의 연직, 인발 및 수평력에 대한 거동해석과 설계하중의 타당성을 검토하여 구조물의 기초 자료로 사용하기 위해 실시된다. 정재하 시험은 실시목적에 따라 압축재하, 인발재하, 수평재하 시험으로 분류된다.

압축재하 시험은 KS F 2445 및 ASTM D 1143 규정에 준하여 실시하는데 시험방법 중 표준 재하시험에 의한 재하시험이 주로 사용되고 있다. 압축재하시험은 시험말뚝의 선단에 재하대를 설치하고 재하단 상단에 실주량물(철근이나 콘크리트블록)을 적재하여 시험하는 실재하중방식과 시험말뚝주변에 앵커를 설치하여 그의 반력을 이용하여 하중을 가하는 앵커를 이용한 방식이 있다.

#### 3.1 보강전 정재하시험

말뚝의 지지력 증가를 위한 보강대책 시험시공에 앞서 원래의 말뚝 지지력을 알기 위하여 주변마찰력을 이용한 정재하시험(반력말뚝 6개를 이용)을 ○○○교 P3-#19 위치에서 실시하였으며, 말뚝의 종류는 Steel Ø508 Pile, 길이는 16m 말뚝을 이용하였다. 재하시험 결과, 재하 하중인 78ton에 이르기까지 말뚝의 전체 침하량은 42.84mm로 나타났으며, 말

뚝의 항복하중이나 극한파괴현상이 인지되었다. 시험분석 결과, 말뚝의 항복하중은 78ton 이하로 판정하였으며, 안전율(F.S=2.0)을 고려한 허용하중은 39ton/본으로 나타났다. 반력말뚝의 지지력이 부족하여 실물재하방법(사하중)으로 시험방법을 변경하였다.

사하중을 이용한 반복 재하 시험을 P3-#31, P4-#44 위치에서 실시하였으며, 말뚝의 종류는 Steel Ø508mm Pile, 길이는 16m, 15m 말뚝을 이용하여 실시하였으며, 표 3과 같은 결과를 얻었다. 정재하시험을 실시한 결과 허용지지력은 20tonf 미만으로 설계하중 보다 적게 측정이 되었다.

#### 3.2 MSG공법에 의한 선단 및 주변마찰력 보강

연화된 이암층의 보강을 위해 크게 3가지 보강방법으로 시험시공을 실시하였으며, ① 말뚝의 선단부와 주변부에 MSG(Micro Silica Grouting)공법을 이용한 방법, ② Micro Pile보강+주변 그라우팅방법, ③ 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속 채움 등으로 시험시공을 시행하였으며, 시험말뚝에 대한 보강 후 정재하시험을 통하여 지지력 증가를 관찰하였다(김영수, 2006).

보강대상은 강관말뚝 1개소(P3-#42) Pile이며, 보강 범위는 말뚝주변에 원형배열로 4공 말뚝 센터 1공으로 5공을 천공하여 확산반경 60cm와 천공 18m, MSG 주입 15m로 계획하여 시공하였으며, 7일 양생 후 재하시험을 실시하였다(그림 2 및 3).

표 3. 사하중을 이용한 재하시험 분석결과

분 석 방 법		P3-#31			P4-#44		
		하중(tonf)	안전율	허용지지력(tonf)	하중(tonf)	안전율	허용지지력(tonf)
항복하중분석법	P-S Curve	-	-	-	56.5	2	28.3
극한하중분석법	P-S Curve	59.5	3.0	19.8	60.5	3	20.2
Davisson 분석법		15.0	2.0	7.5	23.5	2	11.8
허용지지력(위 값들 중 최소값)		15.0	2.0	7.5	23.5	2	11.8

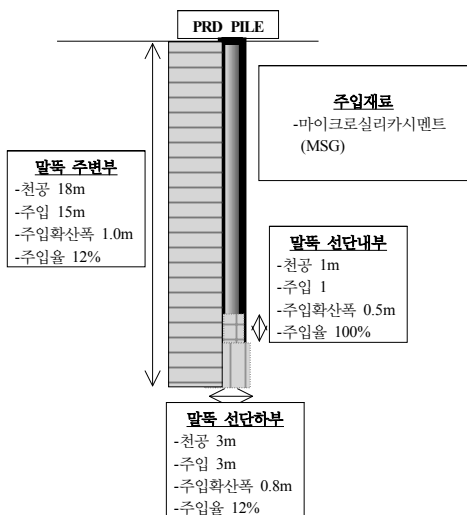


그림 2. MSG 보강단면도

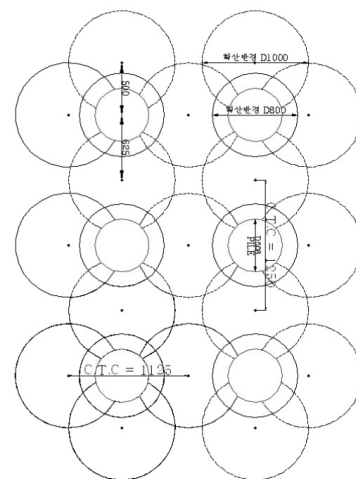


그림 3. MSG 시공평면도

### 3.3 Micro Pile 보강 및 주변그라우팅

천공(H=8m) 지지기반의 양호한 부위까지 슬라임을 제거한 후 철근망을 설치(D22mm \* 6본)하였다. 보통 포트랜드 시멘트 주입재를 이용하여 Micro Pile 주변에 그라우팅을 하였으며, 본 파일 내부에도 보통 시멘트액으로 속채움하여 내부마찰력을 증대시켰다. 주변 그라우팅 양생 7일후 실물재하시험을 실시하였다(그림 4).

### 3.4 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움

PRD말뚝 선단부로부터 깊이 1m를 보통포트랜드 시멘트로 그라우팅 주입을 실시하여 보강한 후 슬라임 믹싱기를 이용하여 PRD파일 내부 3m를 속채움 콘크리트로 타설하여 보강한다(그림 5).

## 4. 시험결과 및 분석

### 4.1 MSG공법에 의한 선단 및 주변마찰력 보강

극한상태란 하중의 증가없이 변위량이 무한대로 증가하는 상태를 말한다. 하중-침하량곡선을 그려볼 때 특정하중에서 변위가 갑자기 증가한다. 그러나 본 연구의 경우는 그림 6에서 보듯이 이론적인 극한상태를 규명하기 곤란하다. 극한하중이 분명하지 않은 경우에 사용될 수 있는 방법들, S-logt 분석법, dS/d(logt)-P분석법, logP-logS 분석법, Davisson 판정법 등을 이용하여 항복하중을 구하였다(박종배 외, 2004).

그림 6에서 항복하중은 172tonf, 극한하중(전침하량0.1D 기준)은 232.5tonf으로, 그림 7에서 Davisson 판정법에 따른 항복하중은 150tonf으로 결정할 수 있겠다. 가장 안전한 값인 150tonf을 항복하중으로 볼 수 있다.

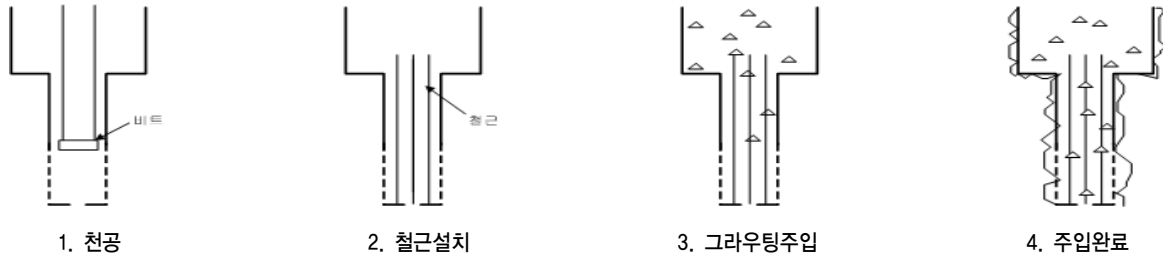


그림 4. Micro Pile 보강+주변 그라우팅 공법 시공순서

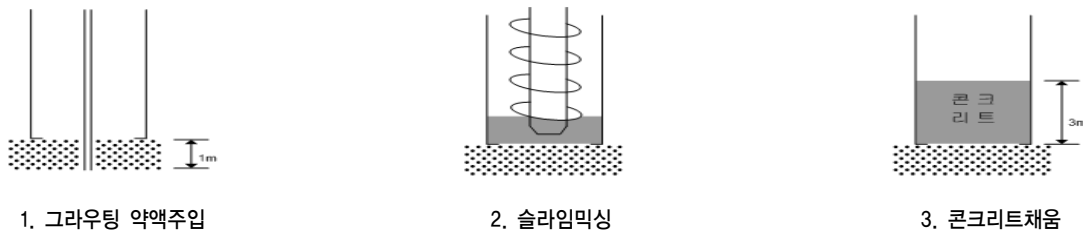


그림 5. 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움공법 시공순서

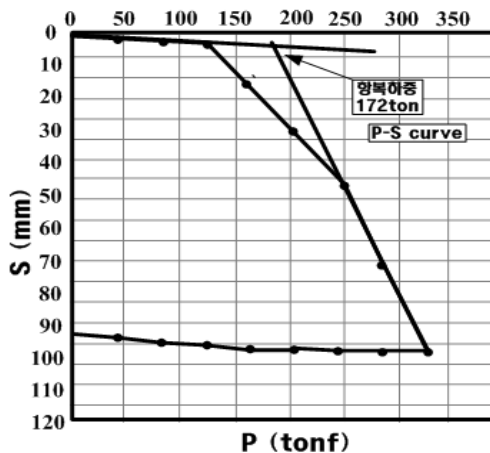


그림 6. 하중침하량곡선

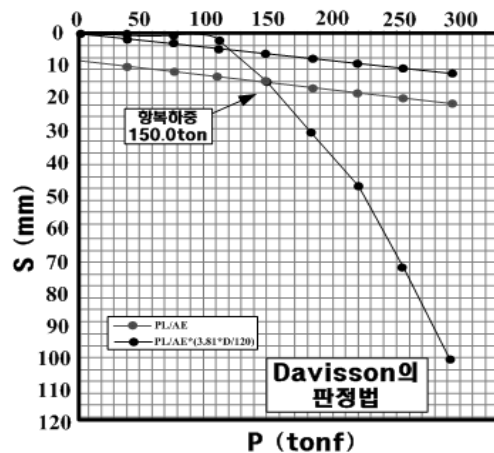


그림 7. Davisson curve

표 4. MSG공법을 이용한 선단 및 주변마찰력 보강 분석결과

분석 방법		P3-#42		
		하중(tonf)	안전율	허용지지력(tonf)
항복하중 분석법	P-S Curve	172.0	2	86.0
극한하중 분석법	P-S Curve	232.5	3	77.5
Davisson 판정법		150.0	2	75.0
허용지지력(위 값 중 최소값)		150	2	75

#### 4.2 Micro Pile 보강 및 주변 그라우팅 보강

그림 8에서 항복하중은 112.5tonf, 극한하중(전침하량 0.1D기준)은 114.5tonf으로, 그림 7에서 Davisson 판정법에 따른 항복하중은 64.5tonf으로 결정할 수 있겠다. 가장 안전한 값인 64.5tonf을 항복하중으로 볼 수 있다.

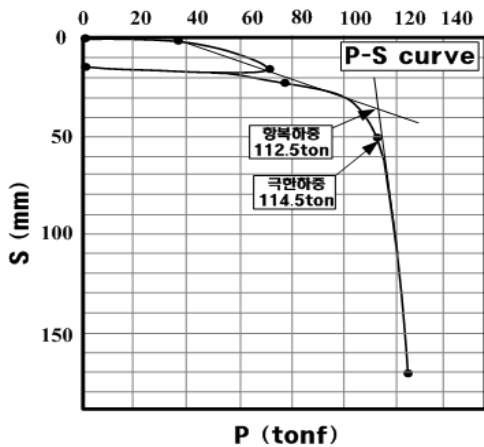


그림 8. 하중침하량곡선

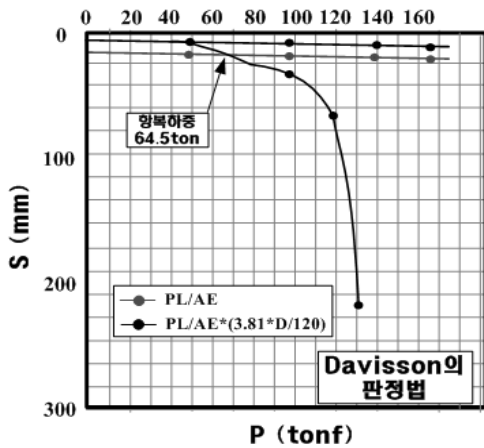


그림 9. Davisson curve

표 5. Micro Pile 보강+주변 그라우팅 보강 분석결과

분석 방법		P3-#37		
		하중(tonf)	안전율	허용지지력(tonf)
항복하중 분석법	P-S Curve	112.5	2	56.25
극한하중 분석법	P-S Curve	114.5	3	38.17
Davisson 분석법		64.5	2	32.25
허용지지력(위 값 중 최소값)		64.5	2	32.25

#### 4.3 선단부 그라우팅 및 콘크리트 속채움

그림 10에서 항복하중은 42.5tonf, 극한하중(전침하량0.1D 기준)은 55.0tonf으로, 그림 11에서 Davisson 판정법에 따른 항복하중은 37.5tonf으로 결정할 수 있겠다. 가장 안전한 값인 37.5tonf을 항복하중으로 볼 수 있다.

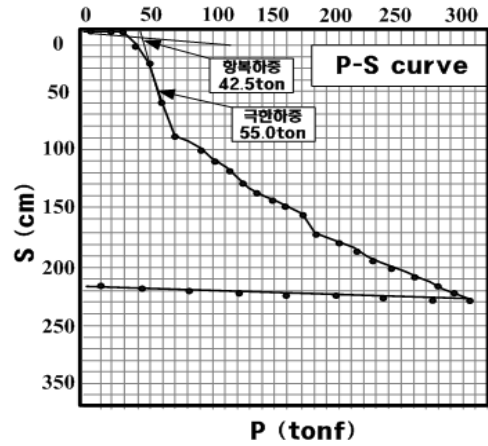


그림 10. 하중침하량곡선

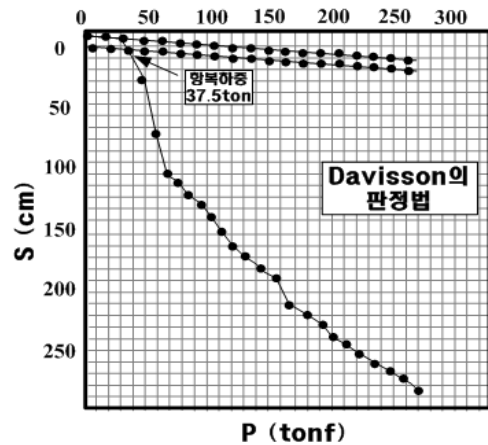


그림 11. Davisson curve

표 6. 선단부 그라우팅 및 콘크리트 속채움 분석결과

분석 방법		P6-#26		
		하중(tonf)	안전율	허용지지력(tonf)
항복하중 분석법	P-S Curve	42.5	2	21.25
극한하중 분석법	P-S Curve	55.0	3	18.3
Davisson 분석법		37.5	2	18.8
허용지지력(위 값 중 최소값)		37.5	2	18.8

#### 4.4 결과 분석

말뚝주변 및 선단부에 MSG공법, Micro Pile 보강+주변 그라우팅 공법(P3-#37)과 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움(P6-#26) 등을 실시하여 정재하시험을 실시한 결과 MSG를 사용한 경우가 가장 지지력이 우수했다.

보강전 6개의 반력말뚝(주면마찰력)을 이용하여 정재하

시험(P3-#19)을 실시하였다. 그 결과 78tonf에 반력말뚝이 인발되었으므로 1개당 13tonf을 최대 인발저항력 T로 간주할 수 있다. 즉,

$$T = f_{s1} * U * L * n \quad (1)$$

여기서, T : 인발저항력(=78tonf)  
 $f_{s1}$  : 보강전 주면마찰력  
 U : 말뚝둘레(= $\pi * 0.508m = 1.596m$ )  
 L : 말뚝길이(=15.5m)  
 n : 말뚝개수(=6개)

(1)에서  $f_{s1} = T / U * L * n$   
 $= 78tonf / 1.596m * 15.5m * 6$   
 $= 0.525tonf/m^2$

MSG공법에 의한 선단 및 주면 마찰력 보강 후 말뚝 정재시험(P3-#42)결과, 하중침하량곡선에서 120tonf까지 단지 2~3mm정도의 수직변위가 발생하였고 그 이상의 하중에서 침하가 크게 발생하였으므로, 주면마찰력이 선단지지력보다 먼저 발현된다는 것을 고려하면 120tonf을 최대주면마찰력,  $Q_s$ 로 간주할 수 있다. 보강후 주면마찰력을  $f_{s2}$ 라 하면,

$$Q_s = f_{s2} * U * L \quad (2)$$

(2)에서  $f_{s2} = Q_s / U * L$   
 $= 120tonf / 1.596m * 15.5m$   
 $= 4.85tonf/m^2$

이는 보강전 주면마찰력보다 9배 증가한 수치이다. 보강후 정재하 시험에서 Davisson 판정법에 의한 항복하중이 150tonf이었고 최대주면마찰력이 120tonf이므로 선단지지력은 30tonf이다. 상기의 결과를 정리해서 보강 전과 후 지지력은 표 7과 같다.

표 7. 보강 전과 후 지지력 비교

보강전		보강후	
주면마찰력(tonf)	선단지지력(tonf)	주면마찰력(tonf)	선단지지력(tonf)
13	2	120	30

그라우팅 보강공법의 경우 주입재의 선정이 매우 중요하다. 본 연구의 경우 주입 대상지층이 침투효율이 낮은 이암층이므로 침투성이 우수하고 강도 및 내구성이 양호한 MSG주입재로 그라우팅한 경우가 나머지 경우보다 더 우수한 결과를 얻을 수 있었던 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구의 대상지반인 이암층의 경우, 건조 조건에서는 일정 정도의 강도와 강성을 가지는 지층이나 지하수 침투

등에 의한 습윤, 포화 조건 시에는 고유의 강도가 저하되는 특성을 가진다. 지반조사시 이암은 신선한 상태였으나 PRD말뚝 시공진동에 따른 지반교란, 작업수 및 슬라임 유입, 지하수 침투, 지중응력조건 변화 등에 따라 말뚝 주변 및 선단부 이암층의 이완 및 풍화가 급격히 진행되어 말뚝 지지력 저하가 발생된 것으로 판단된다.

이에 연화된 이암층의 보강을 위해 말뚝주변 및 선단부에 MSG공법, Micro Pile보강 및 주변 그라우팅공법, 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움 등의 보강대책을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 시험말뚝에 대한 정재하시험 결과 MSG공법이 가장 우수한 항복하중 150tonf을 확보함을 확인하였다. Micro Pile 보강 및 주변 그라우팅 공법이 64.5tonf으로서 두 번째였으며, 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움에 의한 경우 37.5tonf로서 세 번째였다. 항복(극한)하중 결정은 전침하량 0.1D기준과 Davisson 판정법 등을 사용하였다.
- (2) PRD공법으로 시공시 말뚝의 설계하중은 주면마찰력은 무시하고 선단지지력에 의해 지지된다고 보지만 본 연구에서처럼 암반층이 풍화되어 선단지지력을 기대하기 어려운 경우, 그라우팅에 의해서 주면마찰력과 선단지지력을 증가시킬 수 있었다. 보강 전후의 시험결과를 분석해 본 결과(항복하중기준) MSG공법으로 보강한 경우의 주면마찰력은 13tonf에서 120tonf으로 9배 증가하였고 선단지지력은 2tonf에서 30tonf으로 약 15배 증가하였다.
- (3) 이암지역에 시공된 강관말뚝은 시공 후 장기간 경과하면 지하수에 의해 선단부가 연화될 우려가 있어 지하수 차단 및 지반 보강과 강관 주변부 지반과의 이격부에 대한 주입재의 주입, 충전 그라우팅 공법을 채택하여 강관말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 보강하는 점이 가장 중요하였다. 주입 대상지층이 침투효율이 낮은 이암층이기 때문에 MSG를 제외한 공법들의 보강 효과가 기대에 미치지 못한 반면, MSG의 경우는 주입재로 사용된 Micro Silica Cement의 침투성이 우수하고 강도 및 내구성이 양호하기 때문에 주면마찰력 및 선단지지력이 크게 증가한 것으로 판단 된다.

## 참 고 문 헌

1. 김영수(2006), ○○○○교 강관말뚝 기초의 지지력 보강대책 연구보고서, 경북대학교산업기술연구소, pp. 71~120.
2. 민덕기, 문종규(2006), “울산지역 퇴적암의 강도추정법 연구 - 점 하중 강도지수로 일축 압축강도 추정 -”, 한국지반공학회

- 논문집, 제22권 제8호, pp. 63~76.
3. 박종배, 김정수, 임해식(2004), “개선된 기준으로 시공된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구”, *한국지반환경공학회 논문집* 제5권 제3호, pp. 5~15.
  4. 이영휘(1996), “포항 이암층의 Slaking, 팽창 및 전단강도 특성”, *한국지반공학회 학회지*. Vol. 12, No. 2, pp. 33-42.
  5. 이영휘, 우문정, 정운태(1993), “포항이암의 Slaking 및 팽창 특성”, *1993년 학술발표회 논문집(II)*, 한국지반공학회, pp. 153-165.
  6. (주)한국지오테크(2005), “MSG공법 설계·시공지침서”, pp. 4~10.
  7. 천병식, 김진춘, 이준우(2002), “MSG 주입재의 침투특성”, *대한토목학회 논문집*, 제22권 제2-C호, pp. 161~171.
  8. 한중환, 광영훈, 손진담, 손병국(1986), “한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체 구조발달 및 퇴적환경연구”, 과학기술처, 연구보고서, KR-86-2-(B)-4, pp. 20~49.
  9. Van Eeckhout, L.(1976), “The mechanisms of strength reduction due to moisture in coal mine shales”, *Int. J1. Rock Mechanics and Mining Science*, Vol. 13, pp. 61~67.

(접수일: 2007. 1. 3 심사일: 2007. 1. 12 심사완료일: 2007. 11. 8)