

이암지역에 근입된 PRD강관말뚝의 지지력 보강 Reinforcement for Bearing Capacity of PRD Steel Pile at Mudstone Area

공진영*
Kong, Jin-Young

강희진**
Kang, Hee-Jin

천병식***
Chun, Byung-Sik

ABSTRACT

The cut slope sliding which has been frequently encountered in Pohang area has been reported due to the rapid reduction of shear strength in mudstone after being exposed to the air. 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 case study in this paper shows that mudstone which had enough strength in a boring stage has lost the strength after installing PRD steel pipe pile inducing an insufficient bearing capacity, which has been ascertained by the static load test. Test construction 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. From the test construction, MSG has been turned out to be the most favorable method for increasing a pile bearing capacity in mudstone, which has been confirmed by the static load test.

1. 서론

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 주택 단지, 도로 및 공업단지건설을 위해 시공된 절취사면에 예외 없이 발생하는 크고 작은 규모의 지반활동은 이암이 풍화되어 그 전단강도가 급격히 저하되기 때문이고, 이암이 풍화되는 주된 원인은 강우 또는 계절적 건습반복 작용에 의한 slaking 및 팽창에 의한 영향으로 볼

* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, 비회원

E-mail : tsofs@dreamwiz.com

TEL : (02)2220-0326 FAX : (02)2281-0378

** 한국지오택 과장

*** 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

수 있다. 또한 풍화된 점토질암 또는 틈이 많은 견고한 점토지대에서의 산사태 또는 사면붕괴는 대부분 기존의 활동면을 따라 발생하고, 이미 파괴된 여러 사면들에 대한 역 해석 결과 파괴 시에 발견되는 전단강도는 침투 강도 보다는 훨씬 작은 잔류전단강도와 같다는 사실이 판명되었다(이영희, 1996).

이암과 같이 연하고 점토성분을 많이 함유한 암석에서 환경변화에 따른 건조·습윤 반복에 의하여 그 고결력 내지 강도가 급격히 떨어져 본래의 조직이 파괴되는 현상을 Slaking이라 하는데, 이암지대에서 발생하는 사면붕괴는 대부분 Slaking현상에서 기인된다고 볼 수 있다. 습도변화가 이암의 팽창수축에 미치는 영향을 조사하는 과정에서 Van Eeckhout(1976)은 건조의 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 이암속으로 침투하기 때문에 갇혀있던 공기는 압력을 받게 된다. 이러한 slaking 과정을 통하여 암석의 골격구조에 응력이 가해지고, 여기에 건조과정이 여러 번 반복되면 내부의 불연속면이 연장되어 궁극적으로는 공기파괴에 의하여 파괴하게 되는 것이다(이영희 등, 1993).

본 연구는 slaking 및 팽창이 발생하는 이암지역에서 “○○병원-○○간 도로개설공사” 중 선 시공된 PRD파일의 소요지지력이 부족하게 평가되어 지지력 증가를 목적으로 5가지 대책을 계획하고 시험시공을 실시한 내용으로 시험시공 결과를 바탕으로 경제적이고 합리적인 강관말뚝기초의 지지력 보강대책을 수립하는데 그 목적이 있다.

3. 보강 전 정재하시험

3.1 정재하시험 개요

말뚝의 지지력을 결정하는 기본적인 방법인 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 천공하여 그의 반력을 이용하여 하중을 가하는 앵커를 이용한 방식이 있다. 이 방식은 설계하중이 높은 경우에 유리하나 앵커 천공 후 양생기간이 필요하므로 공사기간이 길어지는 단점이 있다.

3.2 사하중을 이용한 정재하 시험

원래 말뚝 지지력을 알기 위하여 사하중을 이용한 반복 재하 시험을 ○○○○교 P3-#31, P4-#44 위치에서 실시하였으며, 말뚝의 종류는 Steel Ø508mm Pile, 길이는 16m, 15m 말뚝을 이용하여 실시하였으며, 표 2와 같은 결과를 얻었다.

보강 전·후의 정재하 시험 위치는 P3의 각 PRD파일 위치에서 실시하였으며, 배치도는 다음 그림 1와 같다.

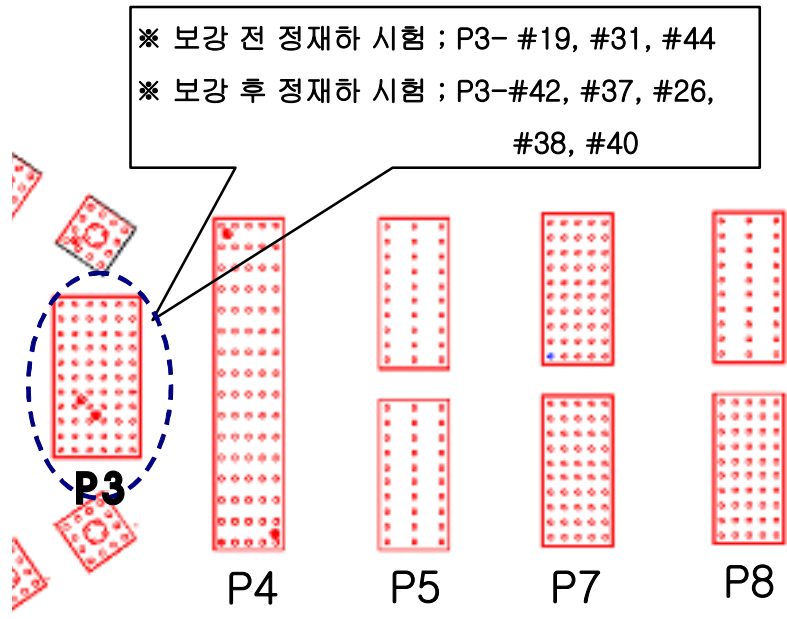


그림 1 보강 전·후 정재하 시험 배치도

표 2. 사하중을 이용한 재하시험 분석결과

분 석 방 법		P3-#31			P4-#44		
		하중 (kN)	안전율	허용지지력 (kN)	하중 (kN)	안전율	허용지지력 (kN)
항복하중 분석법	P-S Curve	-	-	-	565	2	283
극한하중 분석법	P-S Curve	595	3.0	198	605	3	202
Davisson 분석법		150	2.0	75	235	2	118
허용지지력 (항복, 극한하중 분석법, 최소값)		150	2.0	75	235	2	118

○○○○교 P3-#31, P4-#44에 대하여 정 재하시험을 실시한 결과 허용지지력은 설계 하중 보다 적게 측정이 되었다. 본 현장에서 시공된 PRD파일의 소요지지력 저하 요인으로 는 PRD 말뚝시공 시 진동에 따른 지반 교란, 작업수 및 슬라임 유입, 지하수 침투, 지중응 력조건 변화 등에 따라 말뚝 주변 및 선단부 이암층의 이완 및 연화가 진행되어 말뚝지지력 저하가 발생된 것으로 판단되었다.

4. 시험시공

4.1 개 요

연화된 이암층의 보강을 위해 5가지 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.

4.2 보강대책 방법

4.2.1 MSG공법에 의한 선단 및 주변마찰력 보강

강관파일 시공 후 장기간 시간이 흐르면 지하수에 의해 선단부가 연화될 우려가 있어 지하수 차단 및 지반 보강과 강관 주변부 지반과의 이격부에 대한 주입재의 주입, 충전 그라우팅 공법을 채택하여 강관말뚝의 선단지지력과 주변마찰력을 보강하는 데 그 목적이 있다. 보강대상은 강관말뚝 1개소(○○○○교 P3-#42) Pile이며, 보강 범위는 말뚝주변에 원형배열로 4공 말뚝 센터 1공으로 5공을 천공하여 확산반경 60cm와 천공 18m, MSG 주입 15m로 계획하여 시공하였으며, 양생 후 재하시험을 실시하였다(그림 2 및 3).

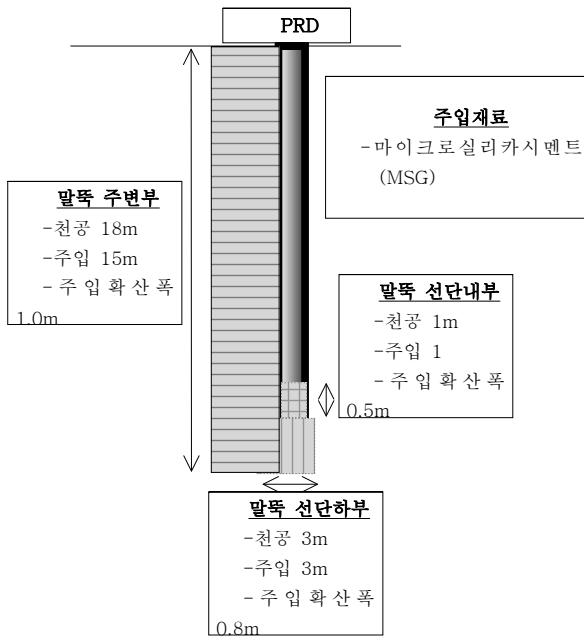


그림 2. MSG 보강단면도

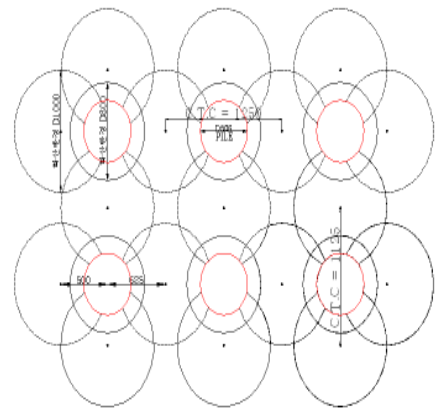


그림 3. MSG 시공평면도

4.2.2 Micro Pile 보강 + 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 증대 시켰다. 주변 그라우팅 양생 7일후 실물재하시험을 실시하였다(그림 4).

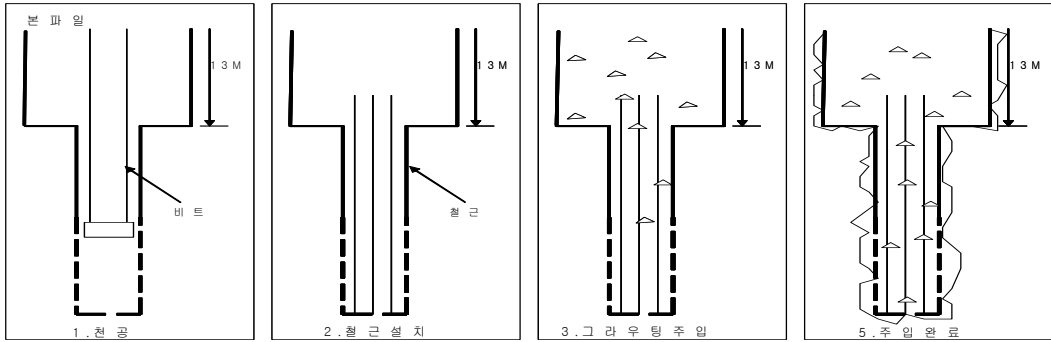


그림 4. Micro Pile 보강+주변 그라우팅 공법 시공순서

4.2.3 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움

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

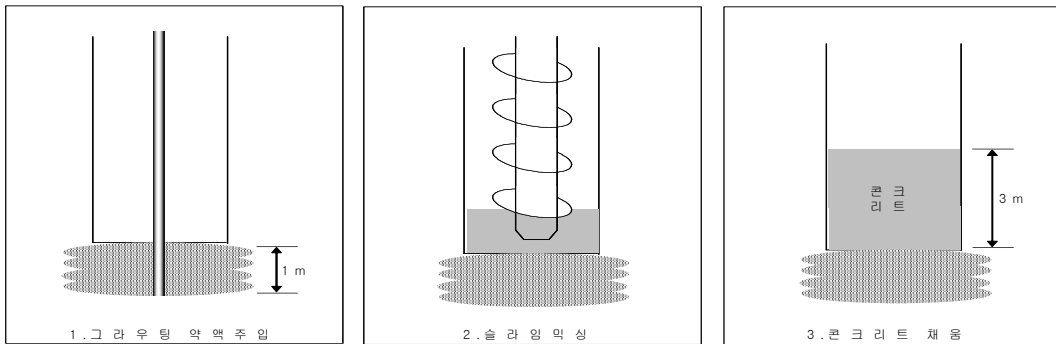


그림 5. 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움공법 시공순서

5. 시험시공결과 및 분석

5.1 보강 후 정재하시험

5.1.1 MSG공법에 의한 선단 및 주변마찰력 보강

재하시험 결과를 각종 분석 방법(전침하량 기준, 순침하량 기준, 항복하중 기준)에 따라 분석한 결과 표 3 MSG공법을 이용한 선단 및 주변마찰력 보강 분석결과를 얻었다.

표 3. MSG공법을 이용한 선단 및 주변마찰력 보강 분석결과

분석 방법		P3-#42		
		하중 (kN)	안전율	허용지지력 (kN)
항복하중 분석법	P-S Curve	1720	2	860
극한하중 분석법 (전침하량 및 잔류침하량 기준)	P-S Curve	2325	3	775
Davisson 분석법		1500	2	750
허용지지력 (항복, 극한하중분석법, 최소값 결정)		1385	2	693

본 연구에서는 P-S curve에서 항복하중을 그림 6, 그림 7과 같이 판정하였다.

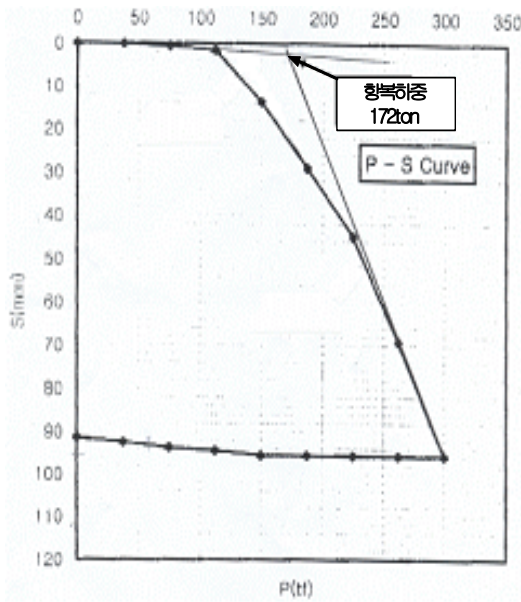


그림 6. MSG공법 P-S curve 결과

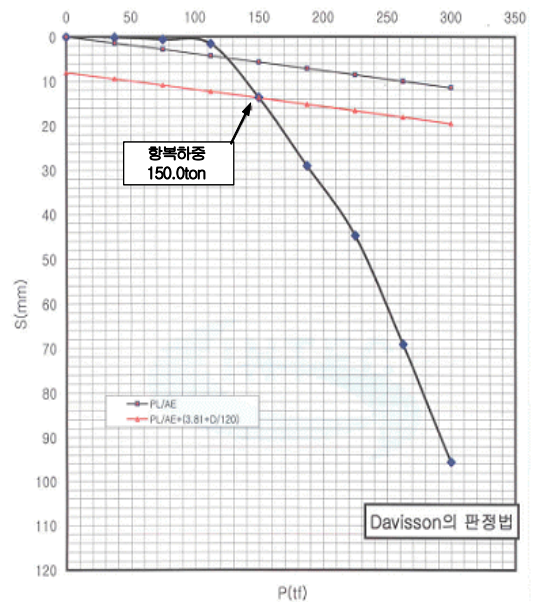


그림 7. Davisson curve

항복하중을 여러 가지 방법(P-S curve, Log P-Log S curve, Davisson 방법)중 가장 안전한(적은)값 150t(Davisson 방법)으로 가정하더라도 말뚝기초의 허용하중(안전율 2)은 750kN으로 설계하중 745.9kN 을 초과하여 안전한 것으로 사료된다(김영수, 2006).

5.1.2 Micro Pile 보강+주변 그라우팅 보강

재하시험 결과를 각종 분석 방법(전침하량 기준, 순침하량 기준, 항복하중 기준)에 따라 분석한 결과 표 4 Micro Pile 보강+주변 그라우팅 보강 분석결과를 얻었다.

표 4. Micro Pile 보강+주변 그라우팅 보강 분석결과

분석 방법		P3-#37		
		하중 (kN)	안전율	허용지지력 (kN)
항복하중 분석법	P-S Curve	1125	2	562.5
	logP-logS Curve	1130	2	565
극한하중 분석법	P-S Curve	1145	3	381.7
Davisson 분석법		645	2	322.5
허용지지력		645	2	322.5

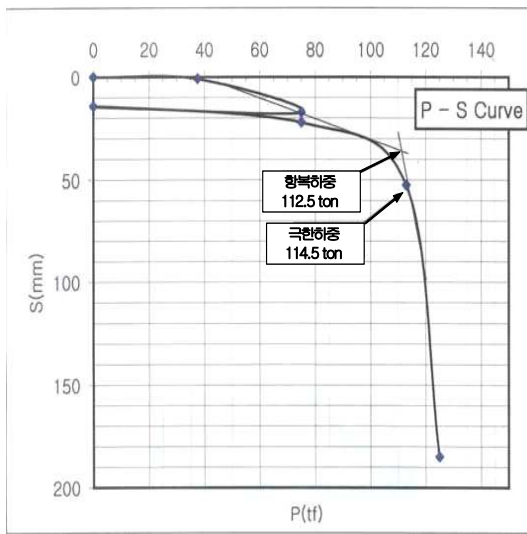


그림 8. P-S curve

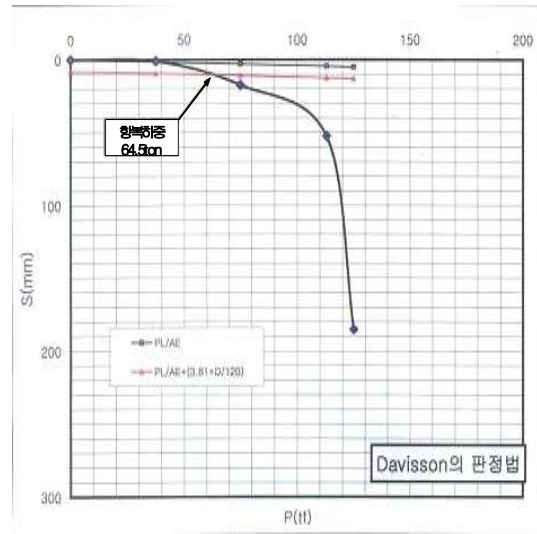


그림 9. Davisson curve

5.1.3 선단부 그라우팅 및 콘크리트 속채움

재하시험 결과를 각종 분석 방법(전침하량 기준, 순침하량 기준, 항복하중 기준)에 따라 분석한 결과 표 5 선단부 그라우팅 및 콘크리트 속채움 분석결과를 얻었다.

표 5. 선단부 그라우팅 및 콘크리트 속채움 분석결과

분석 방법		P6-#26		
		하중 (kN)	안전율	허용지지력 (kN)
항복하중 분석법	P-S Curve	425	2	2125
	logP-logS Curve	300	2	150
극한하중 분석법	P-S Curve	550	3	183
Davisson 분석법		375	2	188
허용지지력		300	2	150

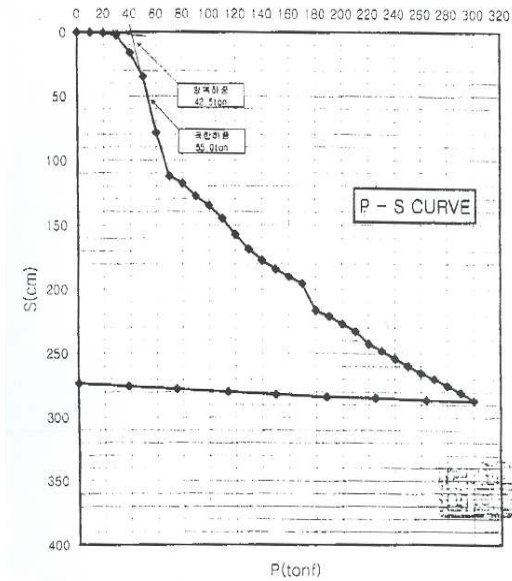


그림 10. P-S curve

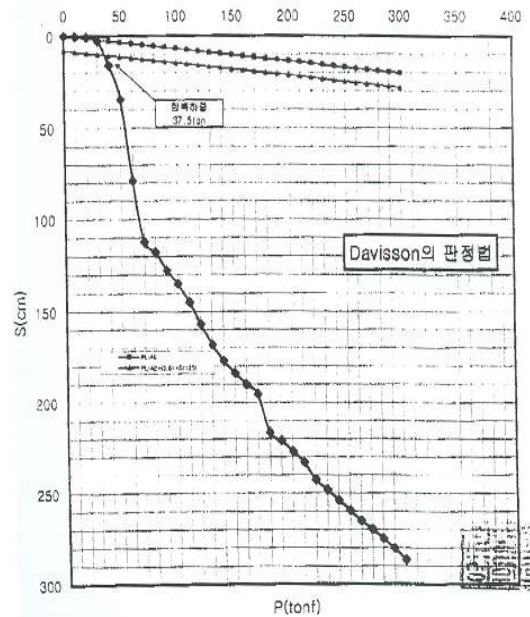


그림 11. Davisson curve

5.1.4 시험시공 결과

Micro Pile 보강+ 주변 그라우팅 공법(P3-#37)과 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속 채움(4D)(P6-#26) 그리고 선단보강 그라우팅을 실시하여 정 재하시험을 실시한 결과 모두 허용지지력은 설계하중 보다 적게 나타났으며 침하량은 크게 발생하였다. 이에 연화된 이암층의 보강을 위해 말뚝주변 및 선단부에 MSG공법을 적용하여 그림 1과 같이 공배치를 한 후 시험시공을 시행하였으며, 양생 후 시험말뚝에 대한 정재하 시험 결과 소요지지력이 확보됨을 확인하였다. 이는 그라우팅 시공에 따른 주변마찰력 및 선단지지력 증가에 기인한 것으로 판단된다.

5.2 말뚝기초의 보강대책

본 연구대상 말뚝기초의 경우 이암 층에 설치되는 특성상 단기적인 지지력 저하 이외에도 장기적인 지지력 저하가 가능하므로 시험시공을 통해 그 효과가 검증된 그라우팅 보강공법을 적용하여 말뚝의 단기 및 장기적인 지지력 확보가 필요할 것으로 판단된다.

그라우팅 보강공법의 경우 주입재의 선정이 매우 중요하다. 본 현장의 경우 주입 대상 지층이 침투효율이 낮은 이암층이며, 보강 대상구조물이 영구 구조물임을 고려하여 침투성이 우수하고 강도 및 내구성이 양호한 MSG주입재 또는 MSG이상의 품질이 확보되는 주입재를 적용하여야 할 것으로 판단된다.

본 말뚝기초의 보강은 표 8와 같이 그라우팅 적용기준을 가지고 공 배치 및 입면도는 아래 그림 12과 같이 시공함이 타당하다고 판단된다.

표 8. 그라우팅 적용기준

W/C(%)	MSG(kg)	Water(ℓ)	적용기준
150	546	818	이완상태가 보통으로 주입압력이 3~5kg/cm ² 로 지속되는 경우 MSG를 주입하는 것을 원칙으로 한다.
200	429	857	이완상태가 거의 없고 주입압력이 5~7kg/cm ² 로 지속되는 경우 MSG를 주입하는 것을 원칙으로 한다.
250	353	882	충분히 충전되어 주입압력이 7kg/cm ² 이상으로 10분 이상 지속됨으로서 주입을 종료해야 할 경우 MSG를 주입하는 것을 원칙으로 한다.

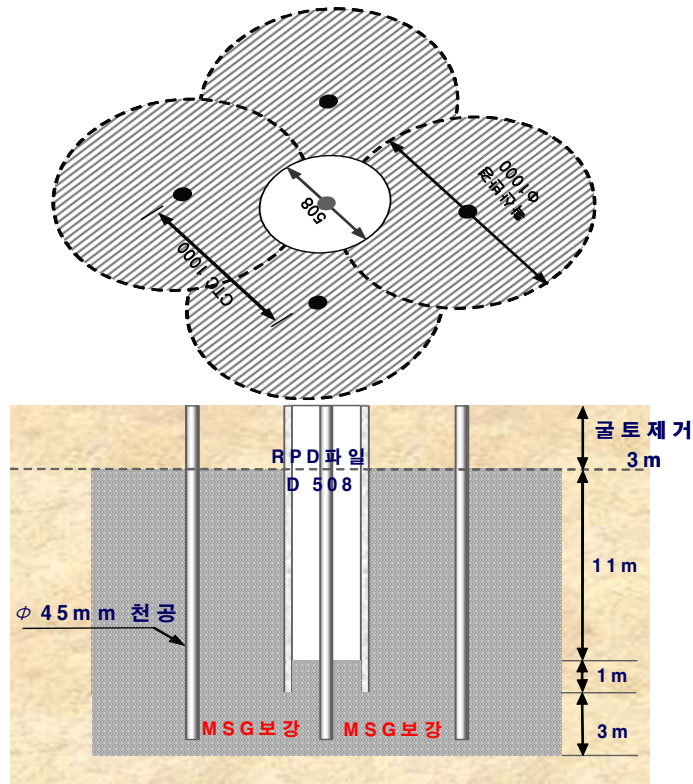


그림 12. MSG공법 보강단면도(김영수, 2006)

6. 결론

본 연구대상 지층은 이암층이 분포하였다. 이암층의 경우 건조 조건에서는 일정 정도의 강도와 강성을 가지는 지층이나 지하수 침투 등에 의한 습윤, 포화 조건시에는 고유의 강도 및 강성이 저하되는 특성을 가진다.

PRD 말뚝시공 시 시공진동에 따른 지반 교란, 작업수 및 슬라임 유입, 지하수 침투, 지중응력조건 변화 등에 따라 말뚝 주변 및 선단부 이암층의 이완 및 연화가 진행되어 말뚝지 지력 저하가 발생된 것으로 판단된다.

이에 연화된 이암층의 보강을 위해 말뚝주변 및 선단부에 MSG(Micro Silica Grouting) 공법, Micro Pile보강+ 주변 그라우팅공법, 선단보강 그라우팅 및 콘크리트 속채움, 선단보강 그라우팅, slime 제거 및 콘크리트 속채움 후 항타을 적용하여 시험시공을 시행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 시험말뚝에 대한 정재하시험 결과 MSG공법이 가장 우수한 소요지지력이 확보함을 확인하였다. 항복하중 분석법(P-S Curve), 극한하중 분석법(P-S Curve), Davisson 분석법 등의 방법을 사용하여 지지력을 분석하였다.

2) 강관과일은 시공 후 장기간 시간이 흐르면 지하수에 의해 선단부가 연화될 우려가 있어 지하수 차단 및 지반 보강과 강관 주변부 지반과의 이격부에 대한 주입재의 주입, 충전 그라우팅 공법을 채택하여 강관말뚝의 선단지지력과 주변마찰력을 보강하는 점이 가장 중요하였다. 본 현장의 경우 주입 대상지층이 침투효율이 낮은 이암층이기 때문에 MSG를 제외한 공법들의 보강 효과가 기대에 미치지 못한 반면, MSG공법의 경우 주입재로 사용된 Micro silica cement의 침투성이 우수하고 강도 및 내구성이 양호하기 때문에 주변마찰력 및 선단지지력이 크게 증가한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김영수(2006), “○○○○교 강관말뚝 기초의 지지력 보강대책 연구보고서” 경북대학교산 업기술연구소.
2. 이영휘(1996), “포항 이암층의 Slaking, 팽창 및 전단강도 특성”, 한국지반공학회 학회 지. 12권, 2호, pp. 33-42.
3. 이영휘, 우문정, 정운태(1993), “포항이암의 Slaking 및 팽창특성”, 1993년 학술발표회 논문집(II), 한국지반공학회, pp. 153-165.
4. 한중환, 광영훈, 손진담, 손병국(1986), “한국 동남부지역 제3기 퇴적분지의 지체 구조발 달 및 퇴적환경연구”, 과학기술처, 연구보고서, KR-86-2-(B)-4, pp.20-49.
5. 김낙진(2005), “SIP매입 말뚝의 지지력 산정에 관한 연구”, 석사학위논문, 한양대학교, pp. 17-21.
6. 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