

풍화대소켓 대구경 현장타설말뚝의 선단보강그라우팅 사례

A Case Study of Post-Grouted Drilled Shaft in Weathered Formation

권오성¹⁾, Oh Sung Kwon, 이종성²⁾, Jongsung Lee, 정성민³⁾, Sungmin Jung, 이경준⁴⁾, Kyungjun Lee, 최용규⁵⁾, Yongkyu Choi

- ¹⁾ 대림산업(주) 기술연구소 과장, Manager, Technology Research Institute, Daelim Industrial Co., Ltd.
²⁾ 대림산업(주) 기술연구소 부장, General Manager, Technology Research Institute, Daelim Industrial Co., Ltd.
³⁾ (주)지텍크 지반부 차장, Deputy General Manager, G-tec Ltd.
⁴⁾ (주)동아지질 상무, Managing Director, DongAh Geological Engineering Co., Ltd.
⁵⁾ 경성대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil&Environmental Engineering, Kyungsoong Univ.

SYNOPSIS : Post-grouting for the drilled shaft is known to increase the end bearing capacity of pile 2~3 times higher by consolidating and reinforcing the disturbed ground containing slime around the pile end. However, the general design guideline for post-grouting has not been established yet in Korea. Especially in the domestic application, the post-grouting is employed just for repairing the pile with the unacceptable resistance rather than for increasing the design resistance of pile. Therefore, little is reported about the effect of post-grouting on the pile resistance itself.

In this study, the effect of post-grouting on the resistance of drilled shafts installed in the weathered rock in Korea was estimated by performing the bi-directional load tests on the piles with and without the post-grouting. The test results presented that the initial slope of end bearing-base displacement curve in the pile with post-grouting was 4 times higher than that without post-grouting. At the acceptable settlement (1% of pile diameter), the end bearing capacities of piles with and without the post-grouting were estimated to be 12.0 MPa and 7.0 MPa, respectively, indicating that the post-grouting could increase the end bearing resistance of pile in weathered rock more than 70 %.

Keywords : drilled shaft, end bearing capacity, weathered formation, post grouting, tube-a-manchette

1. 서론

최근 초장대교량, 초고층구조물 등 대형구조물의 수요가 늘어남에 따라 상부의 큰 하중을 지지하기 위한 구조물기초 형식으로 대구경 현장타설말뚝의 시공이 증가하고 있다. 국내에서도 지난 20년간 지속적인 연구개발 및 현장적용을 통해 직경 3m 이상, 본당 설계지지력 수천 톤 이상의 대구경 현장타설말뚝의 시공이 가능하게 되었다.

불과 수 년 전 까지만 해도, 대구경 현장타설말뚝의 지지력 설계시 풍화대(풍화암 및 풍화토) 및 굳은 토사(굳은점토, 모래자갈층 등)의 큰 지지력을 무시하고 연암 이상의 기반암을 지지층으로 선정하는, 극히 보수적인 설계가 관습화되어 있었다. 이러한 설계관례로 인해, 특히 인천·부산 지역과 같이 대심도 연약지반과 깊은 풍화대가 동시에 기반암 상부에 존재하는 경우 말뚝의 설계길이가 극히 길어짐에 따른 시공성 결여, 건전도 불량 등 각종 하자, 공기 증가, 그리고 경제성 저하 등 각종 문제가 발생하기도 하였다. 다행스러운 것은 최근 풍화대를 포함하는 IGM (Intermediate geo-materials) 지반의 강도특성에

대한 연구, 풍화대 소켓말뚝의 지지력 특성에 대한 연구, 대용량 말뚝재하시험장비의 국산화(양방향재하시험) 등 여러 연구자의 지속적 노력에 의해 풍화대 지반상 기초에 대한 새로운 지지력 설계법이 시방에 반영되고(대한토목학회&교량설계핵심기술연구단, 2008), 국가발주 사업에 기반암소켓이 아닌 풍화대 소켓말뚝의 설계(한국도로공사, 2009)가 적용되는 등, 말뚝 설계가 보다 경제적이고 최적화된 방향으로 나아가고 있다는 점이다.

한편, 풍화대근입 말뚝은 암반근입 말뚝과는 달리 사용하중의 대부분을 주면마찰력이 지지하게 되며, 선단지지력은 일부분만 분담하게 되는데, 그 이유는 선단지지력의 경우 충분히 발휘되기 위해서 주면마찰력에 비해 상대적으로 매우 큰 변위가 요구되기 때문이다. 현장타설말뚝의 주면마찰력이 극한에 도달하기 위한 주면변위는 지반조건에 관계없이 1cm 내외이나, 선단지지력이 극한에 도달하기 위해서는 말뚝 직경의 10~15% 정도의 큰 선단변위가 필요하며, 굴착시 지반교란, 굴착슬라임 청소불량 등으로 인해 요구되는 선단변위는 더 커질 수 있다. 즉, 선단지지력이 충분히 발휘되기 전에 상부 구조물의 사용성 한계(예를 들어 허용침하량)를 초과하는 경우가 대부분이므로, 설계시 선단지지력의 일부만 사용이 가능하다.

상기의 문제점을 해결하기 위한 방법으로, 현장타설말뚝 시공 및 양생 후 말뚝 선단 하부 지반에 고압의 그라우트압을 적용시키는 포스트그라우팅(Post grouting) 기법이 있다. 이 방법은 굴착에 의해 연약화된 선단지반을 선행재하(preloading) 및 보강함으로써 허용침하량 내에서 보다 큰 선단지지력을 유발시키는 효과를 가져올 수 있다. 국외에서는 1960년대 초 이후 유럽을 중심으로 처음으로 사용되기 시작하였으며, 최근에는 미국과 동남아시아를 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있으나 현재까지 국내외적으로 통용되는 지침이나 시방은 없는 상태이다. 한 편, 국내에서는 설계지지력 증강 목적이 아닌, 지지력이 미달되는 결합말뚝에 대한 보강의 개념으로 포스트그라우팅을 이해하고 있어, 공법의 실용화에 따라 예상되는 경제적 파급효과에 비해 관련 연구나 적용 실적이 매우 미진한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 먼저 문헌조사를 통해 포스트그라우팅의 작용기구, 장치 및 공법, 설계 영향인자, 그리고 시공방법에 대해 고찰하였다. 문헌연구를 토대로 각종 포스트그라우팅 기법 중, 국내 풍화대 소켓 말뚝 보강에 적합한 그라우팅 기법을 선정하고 장치설계 및 상세시공 계획을 수립하였다. 다음으로 풍화암 근입 대구경 현장타설 콘크리트말뚝 시공 현장을 선정하여 포스트그라우트 시험시공을 실시하였다. 마지막으로 선단보강 말뚝, 그리고 인접한 미보강 말뚝에 대한 재하시험을 실시하고 그 결과를 비교분석함으로써, 말뚝 포스트그라우팅의 효과를 정량적으로 검증해 보고자 하였다.

2. 포스트그라우팅 기법

2.1 포스트그라우팅 종류 및 특징

현장타설말뚝의 포스트그라우팅은 콘크리트 타설 및 양생에 의해 말뚝 몸체의 설계강도가 확보된 이후에 말뚝 선단부에 그라우팅을 실시하며, 일반적으로 철근케이지 삽입 공정시 길이방향으로 그라우트 이송관을, 그리고 철근망 최하단부에 그라우트 주입장치를 미리 부착하여 함께 설치한다. 그라우트 이송관은 관 내부 막힘 방지, 그리고 단계별 주입이 가능하도록 유입관과 유출관 한 쌍으로 구성되는 것이 좋다. 또한 철근망 하부에는 주입압이 말뚝 선단 전면적에 고르게 작용하도록 하기 위해서 별도의 장치를 두게 되며, 장치별로 주입방식이 약간씩 다르다. 말뚝 선단부의 그라우트 주입 장치(종류)별 개요도를 그림 1에 나타내었다.

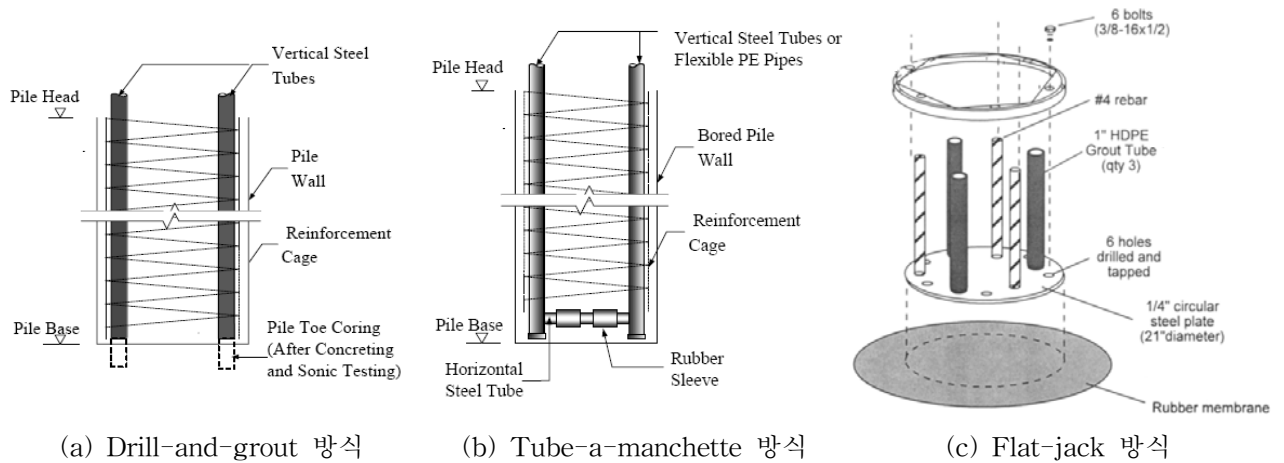


그림 1. 포스트그라우팅 방식별 개요도

(a) Drill-and-grout 방식

본 방법(그림 1(a))에서는 직경 100mm~125mm 정도의 강관 또는 PVC 관 한 쌍을 철근망에 부착하여 현장타설말뚝 시공순서와 동일하게 설치한다. 콘크리트 현장타설 및 양생 후, 미리 설치된 관 내부를 통해 추가보링을 실시하게 되며, 말뚝 선단부의 연약층 또는 슬라임층을 통과하여 지지층 하부 최소 300mm 이상 깊이를 추가 천공하게 된다. 이후 고압수(water jet)를 적용하여 말뚝 선단부의 굴착슬라임을 갈아낸 후 그라우트 유출관측으로 방출·제거하게 된다. 유출되는 물의 상태로부터 선단부 청소상태를 확인한 후, 1차로 저압 채움그라우팅을 실시하며, 유출밸브를 잠근 후 압력을 증가시켜 가면서 2차로 고압 그라우팅을 실시한다.

Cleaning & Grouting 방법은 말뚝 선단 하부 연약부위의 두께가 비교적 두꺼울 때 타 방법에 비해 효과가 좋은 것으로 알려져 있다. 그러나 공법 적용을 위한 공정이 비교적 복잡하고 추가 비용이 소요(추가천공, 시료확인, 고압수 적용 등)되며, 본 연구의 주 적용대상인 풍화대 지반의 경우 고압수에 의해 원지반이 오히려 교란될 가능성이 있다. 국내에서도 이 방법과 유사하게 그라우트 이송장치를 설치한 후 선단그라우팅을 실시한 사례가 몇 건 보고되고 있으나, 그라우팅 전 고압수를 적용하여 굴착슬라임을 제거하거나 압력 50bar(5MPa) 내외의 고압 그라우팅을 적용한 사례는 아직 없으며, 단지 5-10 bar 정도의 상대적으로 저압, 또는 중력식 그라우팅으로 천공홀을 메우는 정도로 시공되었다.

(b) Tube-a-manchette 방식

이 방법은 Tube-a-manchette 방법, sleeve-port 방법, 또는 선단부 유공관의 배열을 본따 U-tube 방법 등으로도 불린다. 그림 1(b)에서 보는 바와 같이, 말뚝 철근망 하단부에 유공관을 배치하여 철근망과 함께 매입하며, 이 유공관에 연결되는 그라우트 이송관도 유공관과 동일한 개수만큼 연직방향으로 설치한다. 콘크리트 타설 및 양생 후 그라우팅을 실시하며, 설계 주입압(또는 주입량)에 도달하면 그라우팅을 완료한다. 선단부 유공관의 노즐은 하향으로 설치되어 있다. 콘크리트 타설 중 주입구가 막히거나 그라우트 이송관 내부로 침입하는 것을 방지하기 위해 그라우트 주입 구멍마다 고무튜브로 팩킹하며, 이 고무튜브는 향후 그라우트 주입을 위한 가압시 주입구가 열리고, 감압시 단혀 역류를 방지하는 일방향 밸브의 역할을 하게 된다. 이 방법의 장점은 그라우트 전, 또는 그라우트 중 청수 주입을 통해 그라우트 이송관의 막힘 여부 판단이 가능하며, 또한 관 내부를 수시로 청소함으로써, 원하는 효과에 도달할 때까지 시간차를 둔 수회의 그라우트 주입을 반복할 수 있다는 점이다.

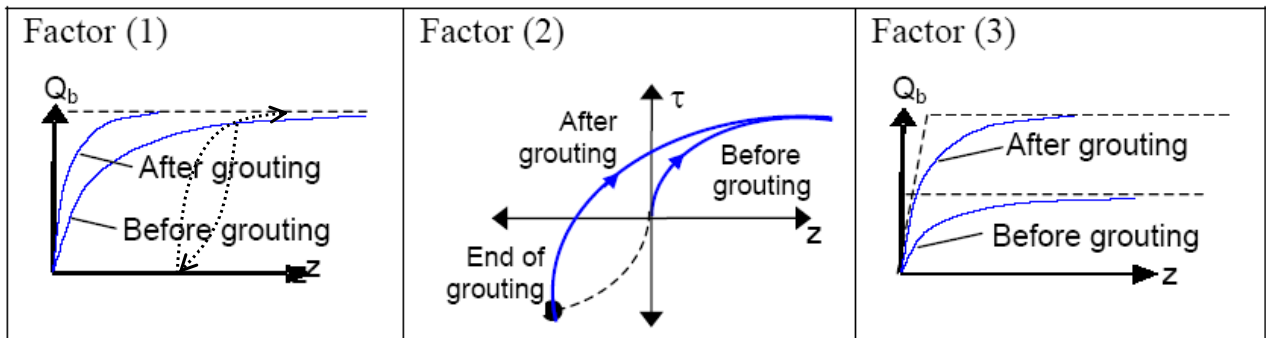
(c) Flat-jack 방식

팽창용 고무 멤브레인이 말뚝 선단부 철관 아래쪽에 위치하며, 그라우트 이송관을 통해 유공관으로 그라우트가 주입됨에 따라 멤브레인이 팽창하여 선단하부 지반을 압축시킨다. 이 방법은 그라우트 밸브

(bulb) 와 원지반간 분리막을 형성하게 되므로 고압 적용시의 지반교란 현상을 배제할 수 있으며, 선단부 전 면적에 대해 고른 압력이 작용한다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 그라우트제와 원지반이 멤브레인에 의해 분리되어 있으므로 침투식 그라우팅의 효과는 없다는 단점도 함께 가진다. 이러한 단점을 고려하여 그라우트 벌브(bulb)가 일정 부피에 도달하면 멤브레인이 파손되면서 말뚝기초의 전 단면적에 그라우팅이 작용되도록 보완된 방법도 보고되고 있다.

2.2 포스트그라우팅의 지지력 증강기구(Mechanism)

포스트그라우팅 중 그라우트 압력은 말뚝 선단부근에서 작용-반작용에 의해 상하 방향으로 작용하게 된다(양방향 재하시험과 동일한 형식으로 작용). 즉, 말뚝 선단 하부지반을 압축시키기 위한 하방향의 힘과 동일한 크기의 인발력이 말뚝에 작용하며, 말뚝에는 하향의 주면마찰력이 유발되어 이 인발력에 저항하게 된다. 포스트그라우팅의 지지력 증강기구는 상당히 복잡하며, 현재 여러 연구자에 의해 연구가 계속되고 있다. 현재까지의 연구결과에 의하면, 포스트그라우팅에 의한 지지력 증강 효과는 그라우트 압과 직접적인 연관이 있는 것으로 나타났으며, 압력식 포스트그라우팅에 의해 발생하는, 말뚝-지반간 상호작용에 영향을 미치는 인자는 세 가지 정도로 생각할 수 있다(그림 2 참조).



(a) 선단지반강성 증가 (b) 주면부 잔류응력 재분배 (c) 선단면적 증가

그림 2. 포스트그라우팅의 말뚝지지력 증강기구 개요

1) 선행재하(Preloading)에 의한 선단지반 강성 증대

그라우팅압에 의해 선단하부지반과 슬라임이 압축되며, 압축된 부피만큼 그라우트재가 채워지게 된다. 선단지반은 그라우트압력을 기 경험하였으므로 선행재하(Preloading) 효과를 가지게 되어 사용하중 재하시 하중-침하량 곡선의 기울기가 증가한다. 따라서, 동일 침하량 기준으로 포스트그라우팅 적용 말뚝이 미적용 말뚝에 비해 큰 지지력을 발휘하게 된다.

이러한 선행재하 효과는 말뚝 정재하시험 중 초기재하(initial loading) 곡선과 재하(unloading) 후 재재하(reloading) 곡선의 기울기를 비교하면 이해하기가 쉽다. 그림 2(a)의 점선에서 알 수 있는 바와 같이, 재하시험 도중 재하를 실시하면 잔류침하량이 남으며, 이후 재재하 곡선의 기울기는 초기재하 곡선의 기울기에 비해 급격히 증가하게 된다. 즉, 포스트그라우팅시 선단지반은 압축되며, 압축된 부피만큼 그라우트재가 충전되므로, 이후 사용하중 재하시 말뚝의 하중-침하량 곡선은 말뚝 재하시험중 재재하 곡선의 모양을 따라가게 되는 것으로 이해할 수 있다.

2) 말뚝체의 상향변위에 의한 주면부 잔류응력의 재분배

전술한 바와 같이, 말뚝 선단과 기초지반 사이에 그라우트압이 작용하면 말뚝은 상향의 인발력을 받게 된다. 말뚝 주면지반에는 이러한 상향력에 저항하기 위해 부(-)의 주면마찰력이 발현되는데, 포스트그라우팅 완료 후 그라우트압의 유지 또는 제거 여부(그라우트 유입, 유출 밸브의 잠금 여부)에 관계 없이 어느정도 잔류 응력이 남게 된다.

말뚝 몸체의 측면에서 포스트그라우팅 압력과, 상부구조물의 상재하중은 서로 반대방향으로 작용하는 힘이다. 따라서 포스트그라우트 말뚝 시공 완료 후 사용하중 재하시 주면지지거동은, 부(-)의 잔류 응력을 극복한 후 정(+)의 주면마찰력의 발현으로 전환되므로, 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 겉보기 주면마찰력이 미보강말뚝의 주면마찰력에 비해 증가되는 효과가 있다.

3) 가압식 그라우팅에 의한 선단면적 증대

고압의 그라우트 주입압 적용에 따라 말뚝의 직경보다 그라우트 벌브가 크게 형성되면, 선단면적이 증대되는 효과가 있다(중 모양 기초). 따라서 그라우트 재료의 침투에 의한 선단지반 보강효과를 고려하지 않더라도 그림 2(c)에서 보는 바와 같이 선단지지 면적 증가량에 비례하여 말뚝의 선단지지력은 커지게 된다.

2.3 포스트그라우팅 계획시 고려사항

포스트그라우팅의 보강효과는 주입압이 커질수록 증가하게 된다. 그러나 무조건적으로 그라우팅압을 높일 수 있는 것은 아니며, 그라우팅에 의해 말뚝에 가해지는 상향력이 말뚝의 총 주면마찰력보다 작아야 한다. 따라서 말뚝의 길이가 길거나, 주면마찰력이 큰 지반에 근입된 말뚝의 경우에는 보다 큰 그라우트압의 적용이 가능하게 된다. 현재까지의 시공사례를 보면 선단부 그라우팅압은 3~5MPa 정도를, 주입재로는 일반 포트랜드 시멘트를 사용하며, 물시멘트비는 60~80 정도를 주로 적용하는 것으로 보고되고 있다. 말뚝의 인발저항력을 고려한 최대 그라우트압(GP_{max})은 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

$$GP_{max} = \text{주면마찰력} / \text{선단면적} \\ = (f_s \cdot \pi \cdot D \cdot L) / (\pi \cdot D^2/4) = 4 \cdot f_s \cdot L/D \quad (1)$$

두 번째로, 그라우팅 장비의 한계를 고려해야 한다. 일반적인 장비의 가압한계는 6.9 MPa 정도로 알려져 있으며, 그 이상의 압력을 현장에서 적용하기 위해서는 특수장비가 필요하므로, 실용적으로 6 MPa 내외의 주입압을 장비의 주입압의 상한값으로 설정하는 것이 타당하다. 그라우트압의 상한값 이외에, 선단보강 그라우팅의 효과를 기대할 수 있는 주입압의 하한값도 설계주입압 선정시 감안해야 한다. 예를 들어, 그라우팅압이 현장타설말뚝 타설시 굳지않은 콘크리트의 타설압력 즉, 지지지반이 그라우팅 전 부담했던 최대 지중응력 보다 작다면, 포스트그라우팅에 의한 충분한 효과가 발휘될 수 없다.

3. 포스트그라우팅 시험시공

기존의 포스트그라우팅 관련 연구는 말뚝의 지지지반이 토사일 경우로 집중되어 있다. 본 연구에서는 국내의 풍화대(풍화토 및 풍화암)에 선단이 위치하는 말뚝에 포스트그라우팅 기법 적용시의 효과를 알아보기 위해, 풍화대소켓 대구경 현장타설 콘크리트말뚝 시공 현장을 선정하여 포스트그라우팅 시험시공을 실시하고, 지지력 증강 효과를 검증해 보고자 하였다.

3.1 시험시공 현장 개요

본 연구의 대상은 풍화대소켓 현장타설말뚝이므로, 대상 현장 선정시 풍화대소켓 대구경 현장타설말뚝의 시공이 예정되어 있으며 실규모 말뚝재하시험이 반영되어 있는 자사(대림산업) 주간 현장을 우선적으로 고려하였다. 그림 3(a)는 포스트그라우팅 시험시공 현장으로 최종 선정된, 행복중심복합도시 금강2교 현장의 중단면도 및 대략적인 지층조건을, 그림 3(b)는 시험시공 말뚝 위치의 기초설계 개요를 나타낸 것이다.

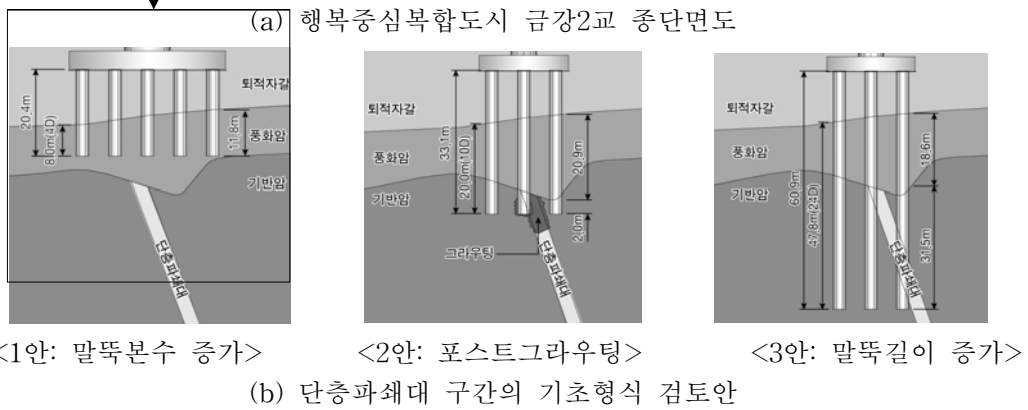
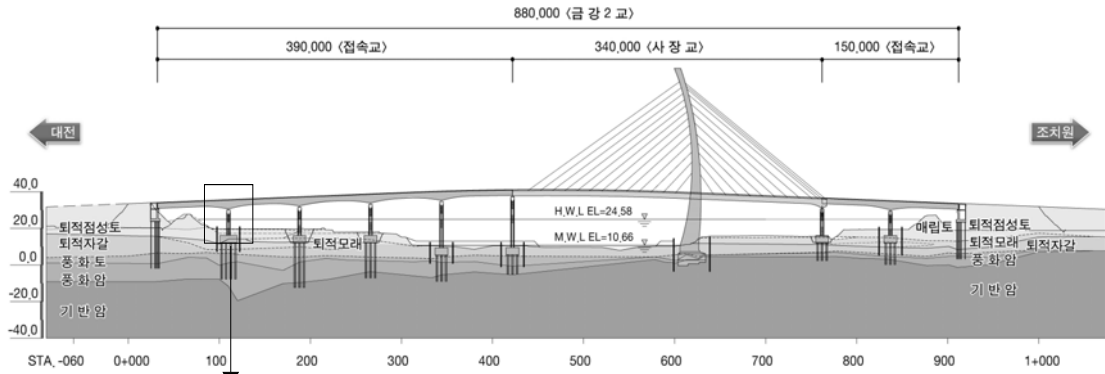


그림 3. 시험시공 현장현황 및 풍화대소켓말뚝 설계 개요

그림 3에서 보는 바와 같이 비대칭 사장교의 주탑기초로는 암반지지된 직접기초 형식을 선정하였으며, 접속교 기초로는 기반암(연암 또는 보통암)이 20m 내외의 심도에서 출현하므로 연암소켓 대구경 현장타설말뚝기초 형식(직경 2m, 3×3 배열)을 채택하였다.

한 편, 대안설계 상세 지반조사 중 접속교 P1 교각 위치(그림 4에서 직사각형으로 표시)에 단층파쇄대가 존재하는 것으로 확인되었다. 단층파쇄대 상의 기초 지지력 확보를 위한 대책으로 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 ① 풍화암근입 말뚝으로 설계하되 말뚝분수 증가, ② 말뚝 선단보강그라우팅으로 본당 설계지지력 증대, ③ 말뚝길이를 증가시켜 단층파쇄대를 관통 하는 세가지 안에 대해 검토하였다. 최종적으로 안정성 및 시공성을 고려하여 연암소켓 말뚝 9본으로 설계된 3안에서 풍화암소켓 말뚝 20본(4×5 배열)으로 설계된 1안으로 변경하였다.

그림 4는 P1 교각기초를 풍화암지지 말뚝으로 변경설계한 후의 말뚝배치 평면도이며, 본 연구에서 시험말뚝으로 선정한 말뚝 2본(No.17, No.18)의 위치를 함께 표시하였다. 여기서 본말뚝을 시험말뚝으로 선정하였다.

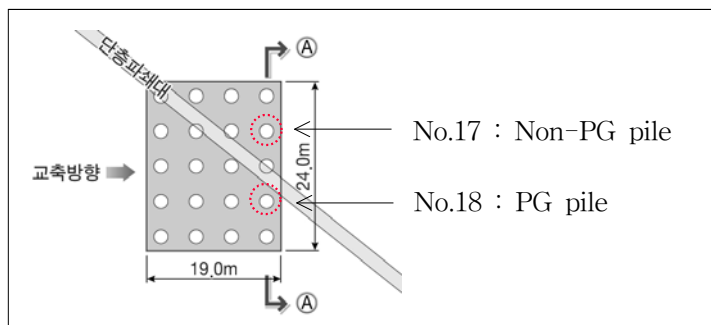
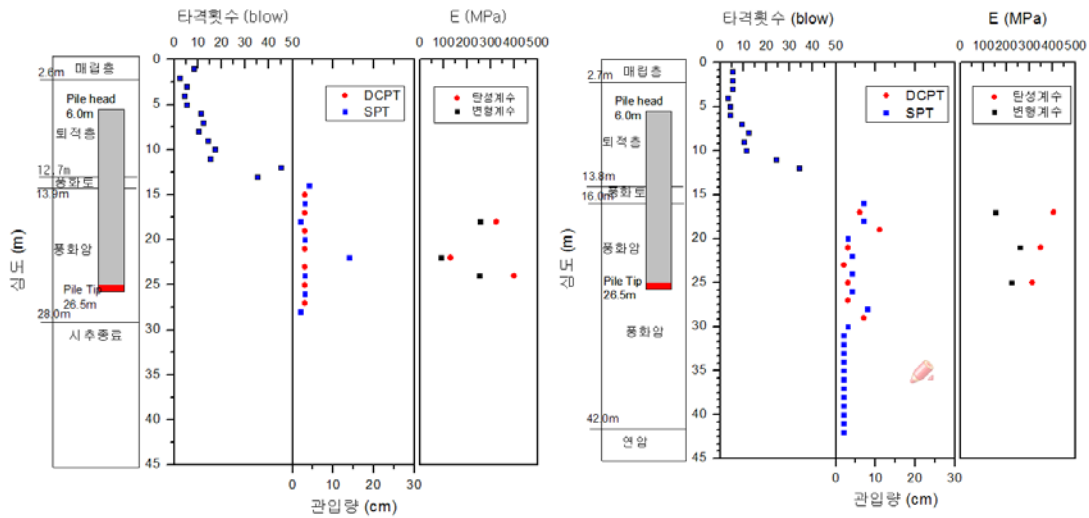


그림 4. 금강2교 P1 시험말뚝 위치

그림 4 의 18번 말뚝은 철근망에 포스트그라우팅 장치를 부착하여 함께 시공하는 것으로 계획하였으며, 17번 말뚝은 포스트그라우팅을 실시하지 않은 비교대상말뚝으로 선정하였다. 두 시험말뚝은 말뚝이 근입되는 지반조건이 유사하도록 인접시키되, 포스트그라우팅 말뚝의 고압그라우팅 주입이 인접한 미보강말뚝의 지지력에 영향을 미치지 않도록 한 칸 건너서 선정하였다.

3.2 지반조사 및 말뚝 시공

말뚝 설치 예정 위치의 중앙부에 1개소씩의 시추조사 및 원위치시험을 실시하였다. 시추조사는 말뚝의 설계 근입깊이 하부 최소 5 m 이상 실시하는 것으로 계획하였으며, 한 공에 대해서는 추가시추를 실시하여 연암선을 확인하도록 하였다. 풍화대 구간에 대해서는 표준관입시험(SPT)과 함께 한국형 타격관입시험(DCPT)을 실시하였다. SPT 및 DCPT 공히 30cm 관입당 타격회수가 50회를 넘을 경우, 50타 추가 타격(최대 타격회수 : 100회)를 수행하였다. 또한 말뚝의 지지층인 풍화암의 변형특성 파악을 위해 말뚝 주변 깊이에 2회, 말뚝 선단 위치에 1회의 공내재하시험(Elastometer from OYO, Japan)을 실시하였다. 직경 2m의 현장타설말뚝은 올케이싱 및 어쓰드릴(Earth Drill)공법을 이용하여 시공하였다. 먼저 케이싱 오실레이터를 이용하여 임시케이싱을 삽입한 후 어쓰드릴 장비(BG-40 from Bauer, Germany)를 이용하여 굴착을 실시하였다. 말뚝의 풍화암 근입깊이는 4D(8m)로 계획하였으나 실제 시공된 말뚝의 길이 및 지층분포는 그림 5와 같이 시공되었다. 천공 완료 후 철근망 및 콘크리트 타설은 향후 터파기 및 푸팅 저면 위치를 고려하여 지표면 하부 6m 까지만 실시하였다. 상부 잔여 구간은 공벽 붕괴로 인해 기 설치된 계측기의 망실 방지할 수 있도록 잡석 채움을 실시하였다. 또한 시험말뚝 2본(No.17, No.18) 모두 선단부에 양방향 재하장치(각각 일방향 30,000 kN, 40,000 kN)를 설치하여 말뚝 시공 완료 후 지지력 검증시험이 가능하도록 조치하였다. 시추조사 및 원위시험 결과, 그리고 말뚝 설치심도를 그림 5에 함께 나타내었다.



(a) BH-1 (Pile No. 17)

(b) BH-2 (Pile No. 18)

그림 5. 시험말뚝 설치위치의 지반조사 결과

3.3 포스트그라우팅 계획 수립 및 장치 셋팅

포스트그라우팅의 주입방식은 시공성 및 경제성을 고려하여 Tube-a-manchette 방식을 선정하였다. Tube-a-manchette 방식에서 대구경 말뚝일 경우 일반적으로 사용하는, 다수의 U 자형 유공관 형태로 장치를 삽입하게 되면 유공관의 개수만큼 그라우트 이송관이 필요하므로, 말뚝 길이가 길어질 경우 자재비가 증가할 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 6에서 보는 바와 같이 그라우트 이송관(유입,

유출)을 2조만 설치하되, 선단부 유공관의 배열을 2중 원형으로 배열함으로써 말뚝의 전 면적을 커버하도록 조치하였다. 분사 노즐은 내측 유공관과 외측 유공관 공히 8개소를 설치하였고 노즐마다 고무팩킹을 설치하여 1방향 밸브의 역할을 하도록 조치하였다. 또한 그라우트 이송관의 유입부와 유출부에는 체크밸브와 압력계를 설치하였다.

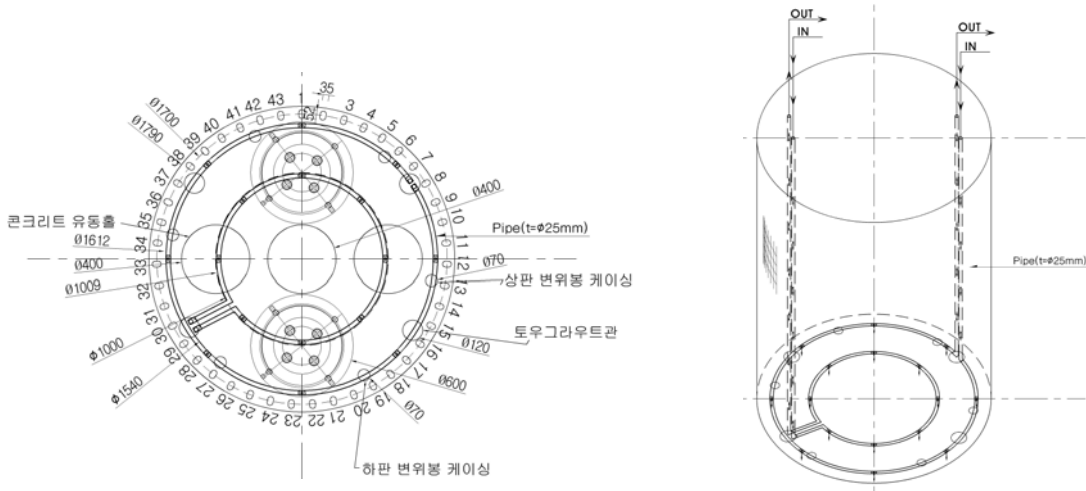


그림 6. 포스트그라우팅 장치 모식도

상기의 포스트그라우팅 장치가 설치되는 No.18 시험말뚝은, 포스트그라우팅 후 지지력 증강효과 확인 시험을 위해 말뚝 선단부에 양방향재하장치도 함께 설치되어야 하는 상황이었다. 이를 위해 철근케이지 하단부에 양방향재하시험용 유압잭을 먼저 부착한 후, 양방향 재하시험 장치의 상판과 하판에 구멍을 내어 그라우트용 이송관이 통과하도록 조치하였으며, 하판의 밑면에 철근망과 선단지반의 접지를 용이하게 하기위하여 설치한 까치발과 원형 유공관을 용접에 의해 부착함으로써 장치 설치를 완료하였다. 사진 1 ~ 4에는 포스트그라우팅용 시험말뚝(Pile No.18) 에 대한 셋팅 과정을 나타내었다.



(a) 양방향(40MN) 재하장치



(b) 유압잭 하판 -그라우팅 튜브간 용접



(c) 그라우팅 주입부-이송관 연결부



(d) 그라우트관 막힘여부 확인(청수주입)

사진 1. 포스트그라우팅 장치 셋팅 사진

3.4 포스트그라우팅 실시 및 계측

당 현장 시험말뚝에 적용 가능한 최대 그라우트압(GPmax)을 식 (1)을 이용하여 추정된 결과, 약 5 MPa 까지의 압력주입이 가능한 것으로 예측되었다. 따라서, 포스트그라우팅 압력은 1 MPa 단위로 단계별로 주입하며, 최대주입압은 5 MPa로 제한하는 것으로 그라우트 주입 계획을 수립하였다. 그라우팅 주입장비는 고압분사그라우팅(JSP)장비를 이용하였다. 계획 주입압이 5MPa임에도 불구하고 대용량(40MPa)의 주입장비를 사용한 이유는 국내에서 일반적으로 사용하는 단관 그라우팅용 펌프의 경우 장비의 최대용량이 대부분 5 MPa 미만이기 때문에, 최대 계획주입압(5 MPa)하에서 일정시간동안 압력을 유지하는 것이 불가능했기 때문이다. 그라우트 주입재는 일반 포트랜드 시멘트를 물-시멘트비 70%로 배합하는 것으로 계획하였다. 참고로, 물-시멘트비 70%는 기성매입말뚝 시공시 선단고정액 기준으로 많이 적용되며(단, 주택공사의 경우 W/C 비 83%로 규정), 원지반과 교반시 약 20 MPa 정도의 강도 발현이 되는 것으로 보고되고 있다. 단계별 그라우팅 압력 유지시간은 최대 20분으로 계획하였다.

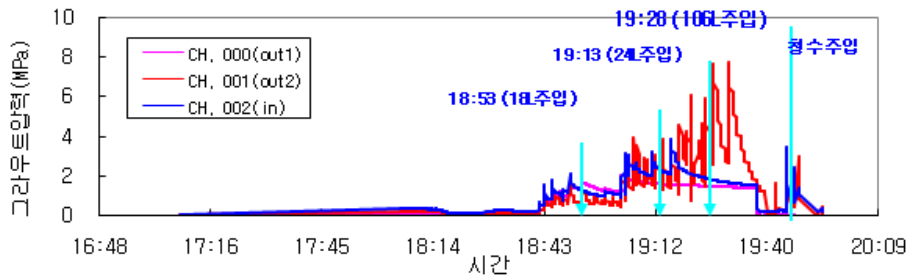
그라우팅 압력에 따른 말뚝의 인발변위 및 탄성압축량 계측을 위해 말뚝 선단부에 침하봉을 말뚝 두부에 LVDT 를 설치하여 기준대에 고정하였으며, 말뚝의 깊이별로 설치된 변형률계 계측을 추가로 실시하였다. 그라우트 주입관(유입관 및 유출관 1조로 구성)은 총 2조를 배치하였으므로, 그라우트 이송관이 포스트그라우트 유입부 부근에서 두 갈래로 나누어지도록 배관을 설계하였다. 또한 그라우트 이송관의 주입부 및 유출부에는 압력계를 설치하여 그라우트 주입시의 압력을 측정하도록 계획하였고, 유출부에는 체크밸브를 두어 압력주입이 가능하도록 조치하였다. 그라우팅 장비는 고압펌프, 교반기, 고압호스, 발전기, 수조 및 물차, 디지털 유량계 등으로 구성하였다. 포스트그라우트 장비 및 그라우팅 중 계측장비 셋팅 완료 후, 유출관의 밸브를 연 상태로 유입관으로 먼저 청수를 주입하여 주입관을 세척하였으며, 그 상태에서 지속적으로 그라우트재를 주입하여 유출부로 그라우트재가 유출되는 것을 확인하였다. 이후 유출부의 밸브를 닫은 후, 단계별 압력주입을 실시하였다.

포스트그라우팅의 압력 단계는 다음과 같이 계획하였다.

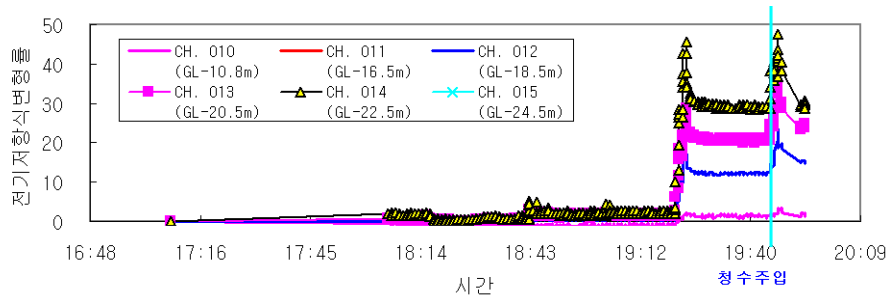
- 1 단계 : 0MPa → 1MPa → 2MPa → 3MPa → 0MPa(감압) → 2단계 주입 위해 청수세척
- 2 단계 : 0MPa → 3MPa → 4MPa → 5MPa → 6MPa → 3MPa → 0 MPa

가압단계를 2단계로 나눈 이유는, 첫째로 노즐부의 고무팩커가 일방향 밸브의 역할을 할 수 있는지 여부를 확인하기 위해서이며, 둘째로, W/C 70%에서 별도의 첨가제 없이 시간차를 둔 수회의 그라우팅이 가능한지 여부를 확인하기 위함이었다. 그러나, 1단계 주입 완료 후 청수 세척시, 내측 주입관(그림 6의 작은 원형 유공관 부분)이 막혀 유출관측으로 유출되지 못하는 것을 확인하였다. 또한 외측 주입관에 대해 2단계 주입을 실시하였으나, 그라우트 유량계의 유입유량이 더 이상 증가하지 않았으며, 이것으로부터 내·외측 유공관의 노즐이 모두 막힌 것으로 판단하고 2단계 주입을 종료하였다. 2차 주입이 실패한 이유는 감압시 노즐을 통해 외부의 액상화된 토사가 관 내측으로 역류했거나, 1단계와 2단계 주입의 시간차로 인해 그라우트재의 초결이 시작되었을 가능성이 있는 것으로 추정하였으나, 보다 명확한 원인 분석을 위해서는 추가분석이 필요할 것으로 생각되었다. 그림 7에는 1차 그라우트 주입중 시간에 따른 주입압력, 누적 주입량, 말뚝의 깊이에 따른 변형률을 도시하였다.

1차 주입시험 중, 1, 2, 3MPa의 3단계 주입에 따른 누적 주입량은 총 106 L 정도였다. 한 편, 그림 8의 주입압력-시간 그래프에서 알 수 있듯이 주입압을 일정값으로 조절하거나 일정압으로 장시간 유지하는 것이 매우 어려웠는데, 가장 큰 원인은 주입압에 비해 과다하게 용량이 큰 펌프를 사용했기 때문인 것으로 판단되었다. 따라서, 정밀한 주입압 조절 및 일정 주입압의 유지를 위해서 향후 바이패스 모듈(Bi-pass module) 등의 주입압 조절장치를 추가로 설치하고, 적정 용량(적정 압력과, 시간당 적정 토출량)을 가지는 주입장치로 변경하여야 할 것으로 판단되었다. 그림 7(b)에는 주입단계별, 깊이에 따른 변형률의 변화 양상을 나타내었는데, 주입압이 클 수록, 또한 게이지 설치 위치가 말뚝 선단부에 가까울 수록 말뚝에 큰 변형률이 발생하는 것을 알 수 있었다.



(a) 시간에 따른 주입압 및 주입량



(b) 주입압 적용에 따른 말뚝의 깊이별 변형률

그림 7. 포스트 그라우팅 중 계측결과 (1단계 주입)

4. 주입효과 검증시험

포스트 그라우팅 종료 후, 그라우트재의 강도 발현을 위해 약 2주가 경과된 시점에서 포스트 그라우팅 적용 말뚝(PG-pile, No.18) 과 포스트그라우팅 미적용 말뚝(Non-PG pile, No.17)에 대한 양방향 고유압 재하시험을 실시하여 포스트 그라우트효과를 확인하였다. 그림 8 ~ 9에는 각각 17번 말뚝과 18번 말뚝에 대한 양방향 고유압 재하시험 의 하중-변위 곡선을 나타내었다.

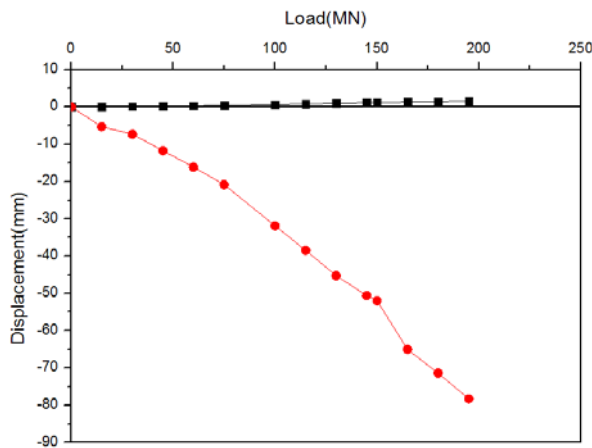


그림 8. Non-PG 말뚝 재하시험결과(Pile No.17)

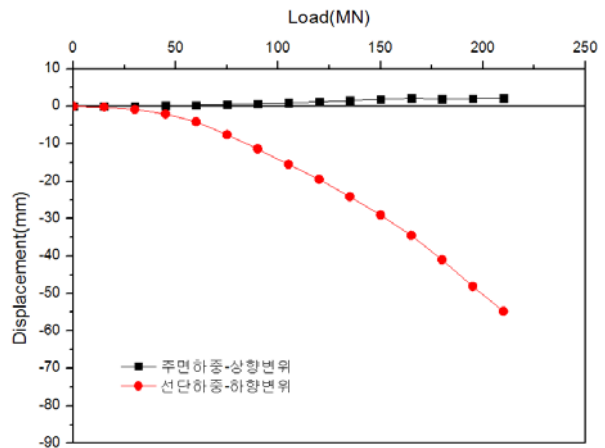


그림 9. PG 말뚝 재하시험결과(Pile No.18)

포스트그라우팅 미적용 말뚝(No.17)의 경우 최대 시험하중 19.5 MN에서 주면변위 1.6 mm, 선단침하량 78.3 mm 가 발생하였으며, 포스트그라우팅 말뚝(No.18)은 최대 시험하중 21.0 MN에서 주면변위 2.1 mm, 선단침하량 54.7 mm 가 발생하였다. 즉, 동일 하중에서 포스트그라우팅 적용말뚝의 선단침하량이 포스트그라우팅 미적용 말뚝의 선단침하량에 비해 상당히 감소된 것을 알 수 있었다. 한편, 주면지지력-주면변위 곡선은 포스트그라우팅 여부에 관계 없이 유사한 경향을 보였다.

그림 10은 PG 말뚝과 Non-PG 말뚝의 선단하중-침하량 곡선을 함께 도시한 것이며, 표 1에 침하량

기준 허용선단지지력을 정리하였다.

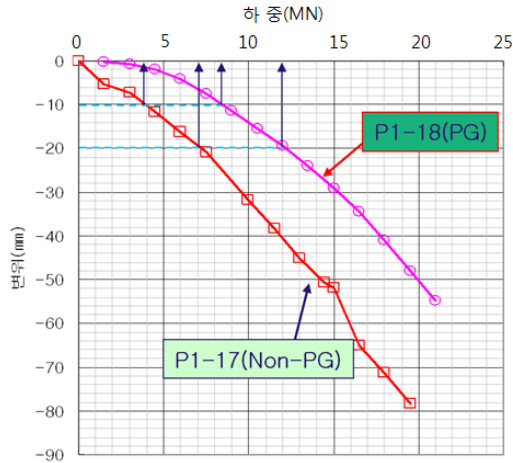


그림 10. 허용침하량 기준 선단지지력 비교

표 1. 변위기준 허용선단지지력 (MN)

	1cm 침하기준	1%D(2cm) 침하기준	비고
Non-PG	3.9	7.0	설계당시 허용선단 지지력 증강비 = 3.0 MN
PG	8.4	12.0	
지지력 증강비	118 %	71 %	

그림 10 및 표 1에서 보는 바와 같이, 말뚝 변위 1cm 침하 기준 허용선단지지력은 Non-PG 말뚝의 경우 3.9 MN, PG 말뚝의 경우 8.4 MN 으로 포스트그라우팅에 의해 선단지지력이 약 118 % 정도 증가하였으며, 말뚝직경의 1% 침하(2 cm) 기준 허용선단지지력은 Non-PG 말뚝의 경우 7.0 MN, PG 말뚝의 경우 12.0 MN으로 포스트그라우팅에 의해 선단지지력이 약 71 % 정도 증가하는 것으로 나타났다.

포스트그라우트가 말뚝의 선단지지거동에 미치는 영향을 보다 정량적으로 분석하기 위해, PG 말뚝과 Non-PG 말뚝의 선단하중-침하곡선의 가로축을 말뚝의 직경으로 정규화하였다(그림 11).

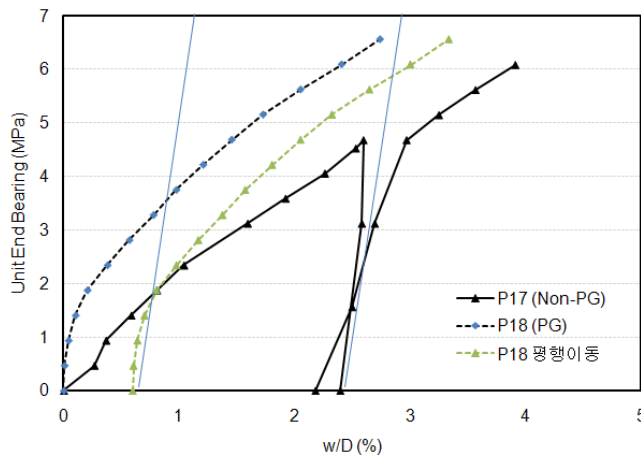


그림 11. PG 말뚝과 Non-PG 말뚝의 정규화 선단하중-침하 곡선

말뚝 선단부 침하량을 말뚝의 직경으로 정규화한 이유는, 말뚝의 직경이 선단하중침하 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문이다. P17 말뚝(Non-PG) 의 경우 말뚝재하시험중 제하-재재하 곡선도 함께 나타내었다. 또한 말뚝 포스트그라우팅을 실시하게 되면, 그라우트 압력에 의해 선단지반이 압축되고, 압축된 공간이 그라우트재로 채워지는 것을 감안하여 P18 말뚝(PG)의 선단하중-침하곡선을 수평이동한 그래프도 함께 도시하였다.

전술한 바와 같이, 스트레인게이지 분석 결과 포스트그라우팅에 의해 말뚝체에 약 1.8MPa 의 응력이 전달되었으며, 또한 PG 말뚝의 선단하중-침하곡선 역시 선단하중 약 1.8MPa 부근에서 기울기가 급격히 변화하는 것으로부터, PG 말뚝과 Non-PG 말뚝 곡선의 선단하중이 약 1.8 MPa 부근에서 교차하도록

그래프의 수평이동을 실시하였다.

PG 말뚝과 Non-PG 말뚝의 선단하중-침하곡선 비교분석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- ① 선행하중(PG 압력) 까지는 PG 말뚝의 선단하중-침하곡선의 기울기가 Non-PG 말뚝의 선단하중-침하곡선의 기울기에 비해 수 배 증가하였다.
- ② PG 말뚝 하중침하-곡선의 초기 기울기는 Non-PG 말뚝의 제하-재제하 곡선의 기울기와 매우 유사하였다. 주기재하의 경우, 1차재하 하중이 선단지반을 압축하게 되므로 2차재하시 기울기는 증가하게 되었다.
- ③ 선행하중(PG 압력) 이후 PG 말뚝 곡선의 기울기 역시 Non-PG 말뚝 곡선 기울기에 비해 다소 증가하는 것을 알 수 있었다.

따라서, 만약 일반 말뚝의 선단지지거동을 알 수 있다면, PG 말뚝의 지지거동 예측이 어느 정도 가능할 것으로 판단되었다. 풍화대에 근입된 대구경 현장타말뚝의 포스트그라우팅 공법은 말뚝 지지력 증강으로 인한 기초 물량 감소 측면에서 그 실용화 가능성이 충분할 것으로 보이므로 경제적인 파급효과도 매우 클 것으로 판단되었다.

5. 결론

포스트그라우팅 기법을 풍화대 지반에 적용할 경우 그 효과를 알아보기 위해 풍화암소켓 대구경 현장타설콘크리트말뚝 시공 현장을 선정하여 포스트그라우팅 시험시공을 실시하였다. 또한 포스트그라우팅 말뚝, 그리고 인접한 미보강 말뚝에 대한 양방향 고유압 말뚝재하시험을 수행하고 그 결과를 비교함으로써, 포스트그라우팅이 현장타설말뚝의 축방향 지지력 증강에 미치는 효과를 정량적으로 확인하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재하시험 결과, 말뚝 변위 1cm 침하 기준 허용선단지지력은 Non-PG 말뚝의 경우 3.9 MN, PG 말뚝의 경우 8.4 MN으로 포스트그라우팅에 의해 선단지지력이 약 118 % 정도 증가하였으며, 말뚝직경의 1% 침하(2 cm) 기준 허용선단지지력은 Non-PG 말뚝의 경우 7.0 MN, PG 말뚝의 경우 12.0 MN으로 포스트그라우팅에 의해 선단지지력이 약 71 % 정도 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 선행하중(PG 압력) 까지는 PG 말뚝의 선단하중-침하곡선의 기울기가 Non-PG 말뚝의 선단하중-침하곡선의 기울기에 비해 수 배 이상 증가하므로, 동일침하량 하에서 PG 말뚝이 수 배 이상 큰 지지력을 발휘할 수 있을 것으로 기대되었다.
- 3) PG 말뚝 하중침하-곡선의 초기 기울기는 Non-PG 말뚝의 제하-재제하 곡선의 기울기와 매우 유사한 것을 확인하였다. 따라서, 만약 일반 말뚝의 선단지지거동을 알 수 있다면, PG 말뚝의 지지거동 예측이 어느 정도 가능할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 4) 선행하중(PG 압력) 이후 PG 말뚝 곡선의 기울기는 Non-PG 말뚝 곡선 기울기에 비해 다소 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 포스트그라우팅은 말뚝 선단지반의 선행재하 효과 이외에 말뚝의 선단 지지면적을 확장시키는 효과도 있을 것으로 추정되었다.

Acknowledgement

본 고의 내용은 대림산업(주), (주)동아지질, (주)지텍크, 경성대학교 간 공동으로 연구 수행중인 “현장타설말뚝 Post Grouting System 개발” 연구과제의 1차년도(2009) 연구성과임을 밝힙니다.