

그라우팅 기법을 활용한 PHC 파일 기초의 지지력 증강 효과 연구

A Study on Bearing Capacity Reinforcement for PHC Pile Foundation Using Post-grouting

유 민 택 ¹	Yoo, Min-Taek	이 수 형 ²	Lee, Su-Hyung
김 석 중 ³	Kim, Seok-Jung	최 영 태 ¹	Choi, Yeong-Tae
박 정 준 ⁴	Park, Jeongjun		

Abstract

In this research, post grouting methods were applied on PHC piles, and static load tests were conducted to confirm the effect of post grouting on bearing capacity enhancement of PHC piles. Grouting pressures of 1.9 MPa and 3.5 MPa were applied, and bearing capacities of grouted piles were compared with that of non-grouted pile. From the static load test results, the bearing capacities of grouted piles were about 3 times higher than that of non-grouted pile. In addition, the design efficiency (allowable bearing capacity/nominal bearing capacity) increased from 32% to 97% after post grouting, and the axial stiffness of piles also increased by about 1.3 times per grouting pressure.

요 지

본 연구에서는 매입식 PHC 기성말뚝에 대한 포스트 그라우팅 공법을 적용하고, 정재하 실험을 수행하여 포스트그라우팅 공법의 지지력 증강효과를 확인하였다. 그라우팅 압력은 1.9MPa 및 3.5MPa를 적용하였으며, 그라우팅을 수행하지 않은 미보강 말뚝과의 지지력을 비교하였다. 정재하 실험 결과를 바탕으로 PHC 말뚝의 지지력을 분석한 결과, 말뚝의 항복 하중은 약 3배 이상 증가하였으며 설계효율은 당초 32%에서 97%로 증가하였다. 또한, 그라우팅 공법을 적용한 말뚝의 축방향 강성은 그라우팅 주입압의 약 1.3배 비율로 증가하였다.

Keywords : Post-grouting, Bearing capacity, Static load test, PHC pile

1. 서 론

최근 도심지 건축 및 토목공사의 경우 소음 및 진동에 의한 민원, 소음관리기준의 강화 등으로 매입말뚝 혹

은 현장타설말뚝 공법의 적용이 증가하고 있다. 현장타설 말뚝의 경우 직경 및 길이 조절이 용이하나 품질 유지 및 높은 시공비용의 단점을 가지고 있다. 이에 비해 PHC 파일을 이용한 기성말뚝 매입공법은 말뚝의 품질

1 정회원, 한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀 선임연구원 (Member, Senior Researcher, High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

2 정회원, 한국철도기술연구원 도시교통실용화연구팀 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Urban Railroad Research Team, Korea Railroad Research Institute)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 신진연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Tel: +82-31-910-0277, Fax: +82-31-910-0561, seokjungkim@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

4 비회원, 한국철도기술연구원 첨단인프라연구팀 선임연구원 (Senior Researcher, High-speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 12월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

관리가 용이하고 상대적으로 시공비용이 저렴하여 일반 구조물의 기초에 널리 이용되고 있다. 그러나 기성말뚝 매입공법의 경우 굴착시 말뚝 주변부 및 선단부 지반이 교란되어 원지반의 강도가 감소하게 되며 이로 인한 지지력 감소 가능성을 내포하고 있다. 또한 굴착에 의해 발생하는 슬라임이 선단부에 잔존할 가능성이 있어 말뚝의 선단지지력을 감소시키고 침하를 증대시킬 수 있다.

최근 이러한 말뚝의 선단 지지력 감소에 대한 대책으로 그라우팅에 의한 보강 공법을 적용하고 있으며 이와 관련되어 국외에서 다양한 연구사례들이 보고되고 있다. Dapp and Brown(2010)은 대구경 현장타설말뚝에 대해 그라우팅을 적용한 말뚝과 적용하지 않은 말뚝에 대해 정재하 실험을 수행하고 지지력 차이를 분석하였으며, 그라우팅을 적용한 경우 지질 조건과 무관하게 2배 이상의 지지력이 발현되는 것을 확인하였다. Ho(2003)는 그라우팅 주입량과 주변 및 선단 지지력 증가량 사이의 근사적 관계를 확인하였다. 그러나 이러한 일련의 연구는 대부분 국외에서 적용된 현장타설말뚝에 대한 내용이며, 이마저도 각 연구마다 지지력 증강 효과에 대한 결과가 상이하여 현재까지 신뢰할 만한 설계기준이 정립되지 못한 실정이다. 더욱이 PHC 기성 매입말뚝에 그라우팅을 적용한 사례는 전 세계적으로도 드물며 특히 국내 지반조건에서의 적용 및 연구사례는 거의 전무한 실정이다.

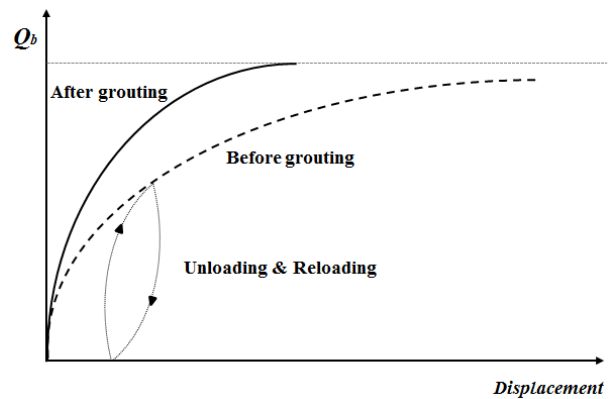
이에 본 연구에서는 포스트그라우팅 공법의 지지력 증강효과를 확인하기 위하여, 실제 현장에 바로 적용 가능한 매입식 PHC 기성말뚝에 대해 포스트 그라우팅 공법을 적용하였다. 또한, 그라우팅 공법이 적용된 말뚝 2본과 적용하지 않은 말뚝 1본에 대해 정재하 실험을 수행하였으며 그라우팅 압력에 따른 지지력 증강 효과를 정량적으로 분석하였다.

2. 그라우팅을 활용한 보강공법 원리

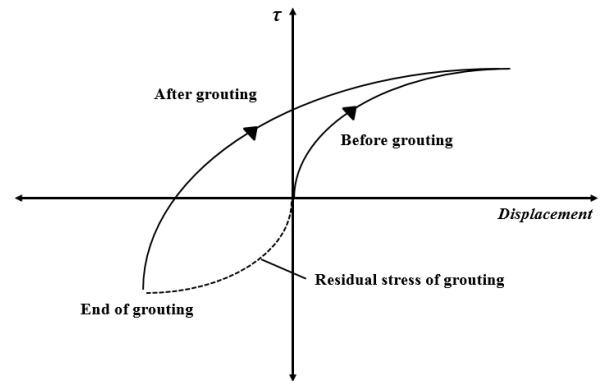
포스트그라우팅 공법은 매입말뚝 시공이 완료되어 주변 및 선단고정액이 어느 정도 굳은 이후, 말뚝 선단부에 저속·중지압의 압력으로 주입재를 주입하여 말뚝의 지지력을 증가시키는 공법이다. 그라우팅압은 말뚝을 상향으로 밀어올리려 하며, 이와 동시에 선단부 지반을 압축시키려는 작용을 하며, 말뚝재하시험 중 양방향 재하시험과 동일한, 작용-반작용 기작을 가진다. 포스트그라우팅의 지지력 증강효과는 Fig. 1에 정리한 것과 같이

크게 세 가지 정도로 생각할 수 있다(Fernandez et al., 2007; Kwon et al., 2011).

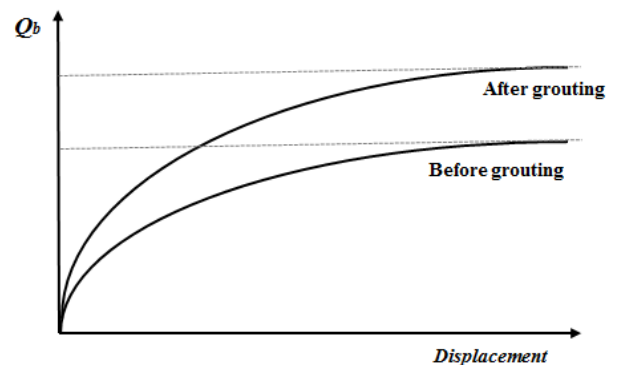
Fig. 1(a)은 선단지반강성 증가를 나타낸다. 그라우팅압에 의해 선단하부지반이 압축되며 선단지반은 그라우팅압만큼의 선행재하효과를 받게 되기 때문에 선단지반의 강성이 증가하게 된다. 이러한 선행재하효과는 제하(unloading) 후 재재하(reloading) 곡선의 기울기를 비교를 통해 이해할 수 있다. 점선으로 나타낸 것과 같이 재하시험 도중 제하를 실시하면 잔류침하량이 발생



(a) Factor 1: Stiffness enhancement by pre-loading at subground



(b) Factor 2: Increment of residual stress and skin friction by pile compression



(c) Factor 3: Increment of end-bearing capacity by the grouting

Fig. 1. Concept of post-grouting method

하며, 이후 재재하 곡선의 기울기는 초기재하 곡선의 기울기에 비하여 증가한다. 따라서 그라우팅을 실시하게 되면 하중-침하량 곡선의 기울기가 재재하곡선의 기울기를 따르게 되어 선단지반강성이 증가한 것으로 이해할 수 있다.

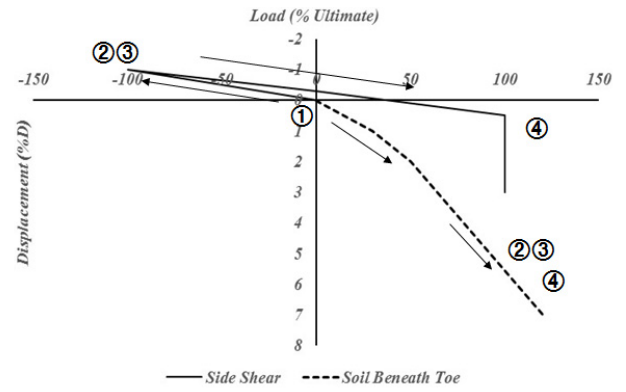
Fig. 1(b)는 주변부 잔류응력의 재분배 효과를 나타낸 그림이다. 말뚝 선단에 그라우팅압이 가해지면 말뚝은 상향의 인발력을 받게 되며, 이에 저항하는 부 주변 마찰력이 말뚝주변에 발현된다. 이 부 주변마찰력은 그라우팅이 완료된 후에도 어느 정도 잔류 응력이 남게 된다. 따라서 그라우팅 후 하중이 가해지게 되면 부 주변 마찰력을 극복한 후 정 주변마찰력의 발현으로 전환되어, 미보강말뚝에 비해 주변마찰력이 증가되는 효과가 있다.

마지막으로 Fig. 1(c)는 선단면적의 증가효과이다. 그라우팅에 의한 그라우트 구근이 말뚝선단에 형성되며, 이에 따라 말뚝의 선단면적이 종 모양 기초처럼 증가하게 된다. 따라서 선단지반보강효과를 제외하더라도 말뚝의 선단지지면적 증가에 따른 선단지지력 증가효과를 기대할 수 있다.

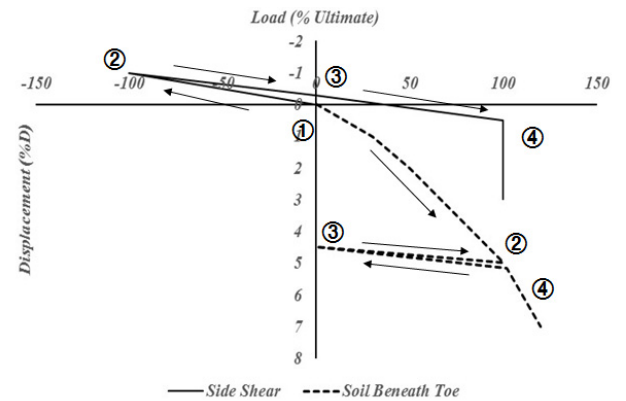
포스트그라우팅 공법에 따른 말뚝의 축방향 하중지지기구를 주변마찰력 측면과 선단지지력 측면으로 나누어 도시하면 Fig. 2와 같다(Mullins et al., 2006).

Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)는 각각 주입재 양생 시까지 가압을 유지할 경우와, 그렇지 않은 경우의 주변하중-주변변위 경로와 선단하중-선단침하 경로를 나타낸다. 또한 그림의 원문자로 표시되어 있는 위치는 각각, ① 말뚝이 하중을 받지 않는 초기상태, ② 최대 그라우팅압 적용시, ③ 양생 완료 및 하중재하 전, ④ 하중 재하 후 상태를 표시한 것이다.

Fig. 2(a)의 경우 압력식 주입에 따라 말뚝체는 상향으로(-변위) 인발되며, 반대로 선단부는 압축(+변위)된다. 이후 사용하중 재하에 따라 주변마찰력이 그라우팅압에 해당하는 만큼 증가하게 된다. Fig. 2(b)의 경우 압력식 주입 후 양생 전 압력을 해제하게 되므로, 하중은 0으로 감소하지만, 선단부에서 상당한 크기의 잔류변위가 발생하게 된다. 이후 하중 재하에 따라 말뚝 선단부의 하중-침하 곡선은 초기 하중-침하곡선이 아닌 재하-재재하 곡선을 따르게 되므로 선단부 강성이 증가하는 효과를 볼 수 있다. 현장시험을 통한 기존의 연구 결과에 의하면 양생 시까지의 가압 유지에 관계없이 두 방법에 의한 말뚝 지지력 증강 효과는 유사한 것으로 알려져 있다(Dapp and Mullins, 2002; Mullins et al., 2006).



(a) Maintaining pressure up to curing



(b) Eliminating pressure before curing

Fig. 2. Load-displacement behavior with post-grouting

3. 실험 개요

3.1 시험 말뚝 시공 (○○고속철도 ○-○공구)

시험말뚝의 시공은 ○○고속철도 ○-○ 공구에서 수행되었으며, 시공에 앞서 지반 조건 파악을 위해 현장 2개소에 대해 표준 관입시험 및 시추공 조사를 수행하였다. 풍화암을 포함한 토사층은 SPT Sampler에 의하여 시료를 채취하였으며 기반암에서는 코어회수율을 높여 정확한 암질상태를 파악하기 위하여 D-3 Core Barrel 및 Diamond Bit를 사용하여 코어를 채취하였다. Fig. 3은 본 연구가 수행된 현장의 지층 개요와 시추 주상도를 나타낸 그림이다. Fig. 3에 나타난 바와 같이, 지층 분포는 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화암층 순서로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 매립층은 1.8~1.9m의 층후로 자갈섞인 점토질 모래로 구성되어 있었으며, N값은 3/30으로 연약한 지반임을 확인할 수 있었다. 퇴적층의 경우 모래질 실트 및 점토질 실트로 구성된 실트층 하부에 모래섞인 자갈층이 위치하고 있었으며, 실트층의 N값은 0/30~11/30으로 대부분이 연약한 지반으로 확인

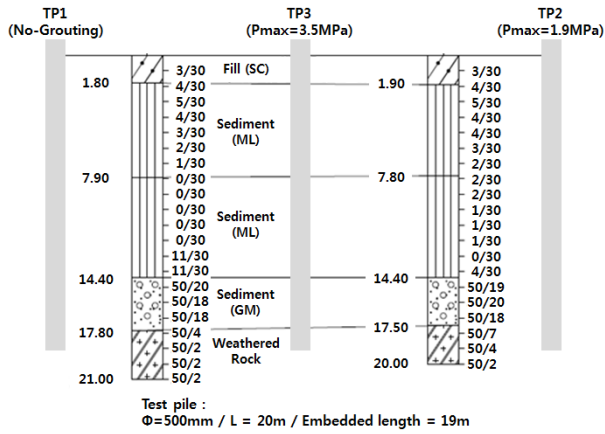


Fig. 3. Boring log of test site

되었다. 반면, 자갈층의 N값은 50/20~50/18로 측정되었다. 퇴적층 하부에는 풍화암층이 위치하는 것을 확인하였다. 지반조사가 이루어진 시추공 인근에 시험말뚝을 시공하였으며, 그 위치는 Fig. 3과 같다.

각 시추공에서의 변형계수 및 탄성계수를 산정하기 위하여 공내재하시험을 수행하였다. 시추공내에 고무튜브의 Probe를 삽입하고, 그것에 가압액(물)이나 공기의 주입에 의해 공벽에 등분포하중을 주는 방식으로, 가압장치에서 Sonde 외부에 부착된 고무튜브가 팽창되어 공벽에 도달한후 공벽의 변위를 측정하고, 측정된 변위로부터 변위-응력곡선을 구한 후 변형계수 및 기타 공학적 특성 산정하였다. 2개소의 시추공의 풍화암 구간에서 2회씩, 총 4회의 공내재하시험을 수행하여 풍화암층의 변형계수와 탄성계수를 산정하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다.

본 연구에서는 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 총 3본의 시험말뚝을 시공하였다. 시험말뚝은 직경 500mm, 길이 20m의 PHC 말뚝으로, 지표면 위로 노출된 두부 1m를 제외한 19m가 지반에 근입되었으며, 풍화암에 1m 이상 근입되도록 시공하였다.

시험말뚝 중 1본은 대조군으로 그라우팅 공법을 적용하지 않고 시공하였으며, 나머지 2본은 그라우팅 기법

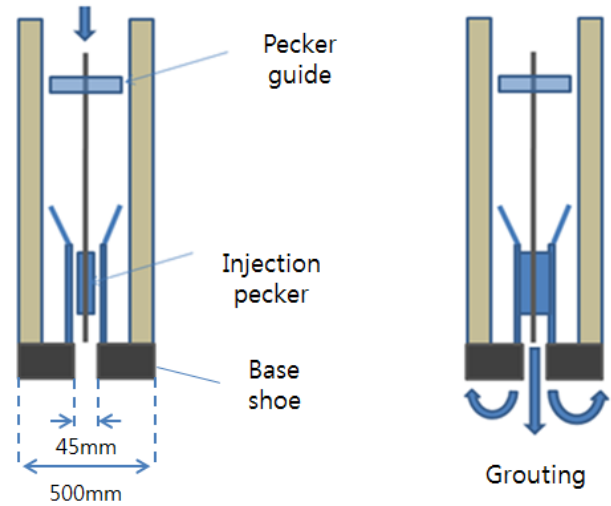


Fig. 4. Apparatus and procedure of post-grouting method

을 적용하였다. Fig. 4는 본 연구에서 사용한 그라우팅 주입 장치의 모식도를 나타낸 그림이다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, 시험말뚝 시공에 앞서 그라우팅 기법을 적용할 말뚝의 선단부에 76mm의 홀을 천공하여 팩커 삽입관을 결합시켰다. 팩커 삽입관은 선단 슈 천공 이후에 용접을 이용해 결합하였으며, 그라우팅장치의 설치가 용이하도록 주입파이프 상단에 깔대기를 설치하였다. 깔대기를 통해 주입파이프에 그라우팅 주입팩커를 설치하고, 압력그라우팅을 실시하여 그라우팅압력을 순차적으로 증가시켰으며, 단계별 주입압과 순시유량, 적산유량 등을 기록하였다.

3.2 말뚝 지지력 증강 그라우팅

그라우팅 주입 장치가 설치된 말뚝 2본에 대하여 포스트 그라우팅을 수행하였다. 그라우팅 압을 가하기 전 주면고정액을 주입하여 양생시킨 후, 각각의 말뚝에서 서로 다른 압력의 그라우팅을 실시하였다. 이때 각종 계측을 동시에 수행하였으며, 지지력 보강 시 시공 상의 문제점을 발견한 경우 개선방향을 도출하여 시공을 진행

Table 1. Borehole loading test results

No.	Depth (m)	Deformation modulus (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Strata	N value
T-1	18.5	295	414	Weathered rock	50/2
	20.5	314	430	Weathered rock	50/2
T-2	18.5	241	374	Weathered rock	50/4
	19.5	254	394	Weathered rock	50/2

하였다. 그라우팅 주입 시 그라우팅 주입압이 일정한 경우에는 선단지지력이 증가하고 있는 것으로 판단하였으며, 말뚝 두부의 변위가 발생할 경우, 최대 주면마찰력이 발현된 것으로 예측하였다. 또한, 그라우팅 주입량 계속시, 그라우팅 주입압의 상승없이 과도하게 주입될 경우에는 그라우팅이 새는 것으로 판단하여 그라우팅을 멈추고, 그라우팅 라인을 청소한 후 단계별 그라우팅을 재 실시하였으며, 주입 그라우트압이 송출펌프의 최대치에 도달하였는지를 확인하였다.

본 연구에서는 그라우팅 주입압에 따른 매입식 기성 말뚝의 지지력 증강효과를 분석하기 위하여 대조군으로 이용할 미보강 말뚝 1본을 제외한 2본의 선단보강 말뚝에 대하여 그라우팅 압을 다르게 적용하도록 계획하였다. 그라우팅압력은 말뚝의 인발저항력을 고려하여 결정하여야 하며, 최대 그라우팅압(GP_{max})는 다음 식 (1)에 의하여 구할 수 있다.

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

이때, f_s 는 단위주면마찰력, D 는 말뚝 직경, L 은 말뚝 근입 깊이를 의미한다. 그라우팅 주입압에 의해 말뚝 두부의 변위가 발생할 경우 최대 주면마찰력이 발현된 것으로 예측할 수 있기 때문에, 최대 그라우팅압은 최대주면마찰력과 말뚝선단의 면적으로부터 산정할 수 있다.

문헌연구와 시공사례(Kwon et al., 2011)에 따르면 선단부 그라우팅압은 최대 5MPa로 보고되고 있으며, 당 현장에서의 말뚝 인발저항력을 고려하여 최대 그라우팅압을 각각 1.9MPa과 3.5MPa로 결정하였다.

3.3 말뚝 정재하시험

선단보강 말뚝 2개소에 대한 지지력 보강이 완료된 후, 미보강 말뚝 1개소를 포함한 총 3개소의 말뚝에 정재하시험을 수행하였다. 이때 약 15일 내외의 선단부 그라우팅의 양생기간을 가진 후 정재하 시험을 수행하였다. 하중재하방법은 Fig. 5와 같이 주변 말뚝 중 6본을 반력 말뚝으로 이용하는 반력말뚝 재하방식으로 실시하였으며, 말뚝 두부에서 LVDT를 설치하여 하중재하에 따른 말뚝 두부에서의 침하량을 측정하였다. 지지력 증강 확인을 위해서는 최소한 말뚝의 통상 설계하중의 200%이상의 재하하중이 필요하다. Lee(2004)에 따르면 국내에서 사용하고 있는 직경 500mm의 PHC 말뚝의 경우 말뚝재료의 공칭 허용하중은 약 1,617kN, 통상설계하중은 882kN으로 알려져 있으며, 공칭 허용하중에 대한 통상설계하중을 의미하는 설계효율이 약 55%로 보고되고 있다. 본 연구에서는 재래식으로 시공한 미보강 말뚝(TP1)에 2,352kN 그리고 선단보강 말뚝(TP2, TP3)에 3,136kN을 최대재하하중으로 결정하였으며, 하중재하단계는 기본적으로 196kN씩 단계적으로 재하하여 최대재하하중에 도달한 이후 하중을 제거하였다. TP3의 경우 초기 재하시 말뚝부두 보강재의 압축으로 인한 침하가 발생되어, 1,176kN에서 제하한 후 재재하를 실시하였다.

4. 실험결과

4.1 그라우팅 실험 결과 및 분석

그라우팅 주입은 말뚝 선단부에 삽입한 펌커를 통해

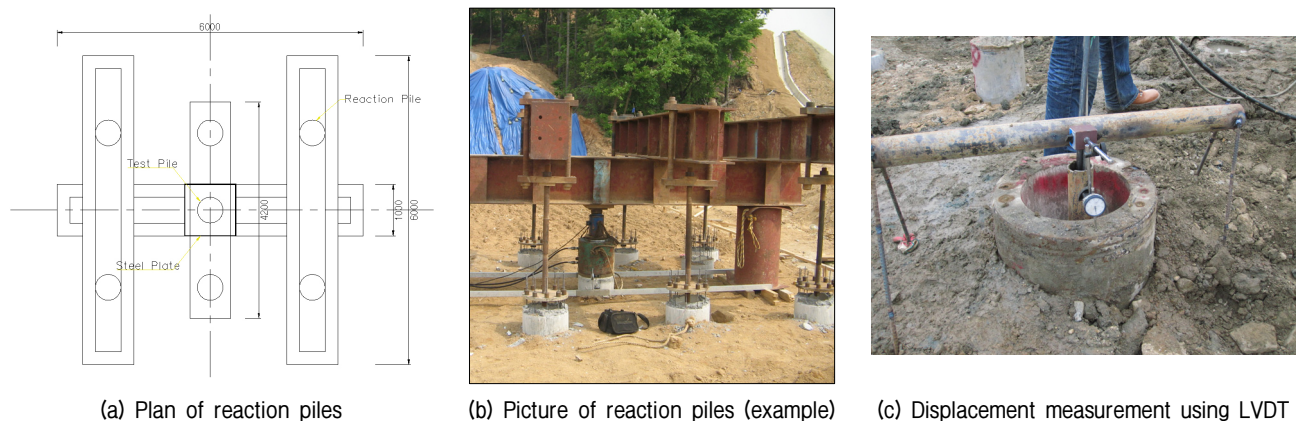


Fig. 5. Plan and picture of load test using reaction piles

말뚝 선단에 그라우팅 주입재를 주입하는 방식으로 수행된다. 그라우팅 주입재의 경우 대한주택공사 시방서의 기준을 따라 일반 포트랜드 시멘트를 물-시멘트비 83%로 배합하였다(KLHC, 2010). 참고로, 배합비 83%의 주입재의 경우 원지반과 교반시 약 10MPa 정도의 강도를 발현하는 것으로 보고되고 있다.

인발변위 측정결과 최대 그라우팅압 1.9MPa를 적용한 TP2 말뚝의 경우 상향변위가 발생하지 않았으며, 3.5MPa를 적용한 TP3 말뚝의 경우 상향변위가 약 0.3mm로 매우 작게 발생하였다. 이는 그라우팅 주입압이 말뚝의 주면지지력을 초과하지 않음을 의미한다. Fig. 6은 TP2와 TP3에서의 그라우팅 주입시 시간에 따른 주입압과, 순시유량, 적산유량을 나타낸 그림이다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이, 순 시유량의 변화양상이 그라우팅 주입압의 변화양상과 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 그라우팅 주입재 이송관의 파손에 따른 주입재의 손실이 없이 말뚝 선단에 일정하게 주입재가 주입되는 것을 의미한다. 한편, 그라우팅 압력이 3.5MPa인 TP3번 말뚝의 경우에는 압력을 일정하게 장시간 유지하기가 어려웠다. 그 이유는 본 연구에서 주입압에 비하여 과다하게 큰 용량의 펌프를 이용하였기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 적산유량을 통하여 말뚝 선단에 주입된 그라우팅 주입재의 총 누적량을 확인하였다. TP2의 총 주입량은 약 290L, TP3의 총 주입량은 약 398L였으며, 그라우팅 주입량은 그라우팅 주입의 시작시점부터 종료시점까지 일정하게 증가하였다. 이는 그라우팅 주입시간동안 그라우팅 주입재가 말뚝 선단에 계속 침투하는 것을 의미한다. 따라서 주입량이 증가함에 따라 말뚝 선단주변에서 그라우팅 주입재가 도달하는 영역이 증가하여 선단부 지반 개량효과가 증가될 것을 기대할 수 있었다. 그라우팅 주입 결과를 바탕으로, 본 현

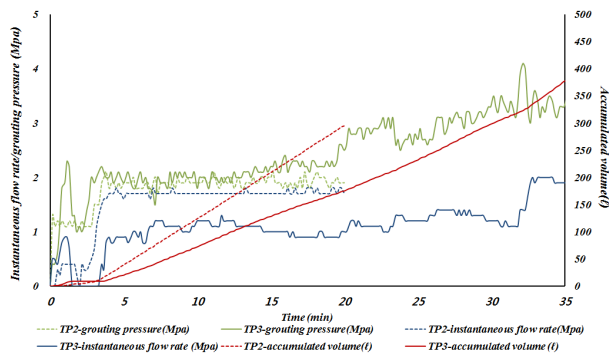


Fig. 6. Grouting test results

장에서의 그라우팅 주입이 성공적으로 수행되었음을 판단할 수 있었으며, 그라우팅 압력 3.5Mpa까지 주입압이 커질수록 말뚝의 지지력 증강효과가 증대될 것을 기대할 수 있었다.

4.2 정재하 실험 결과

정재하 시험 결과를 바탕으로 각 시험 말뚝의 항복하중 및 축방향 강성을 분석하였다. 항복하중은 구조물 기초 설계기준 해설(KGS, 2015)에 명시된 하중-침하곡선 분석법과 잔류침하량 기준 분석법을 이용하여 결정하였다. 하중-침하곡선 분석의 경우 하중 단계별 침하량 값을 그래프로 도시한 후, 초기 직선부분의 연장선과 급경사 부분의 접선과의 교점에 해당하는 하중을 항복하중으로 결정하였다. 잔류침하량 분석의 경우 하중재하시험 종료 후 제하시점에 발생한 최종 침하량을 말뚝의 잔류침하량으로 결정하였으며, 잔류침하량 값이 말뚝 직경의 2.5%인 12.5mm 일 때의 하중을 항복하중으로 결정하였다.

TP1 말뚝의 경우 하중재하시 1,960kN 까지 재하 후 하중을 제하고, 이후 최대재하하중 2,352kN까지 재하하였다. 최대재하하중 2,352kN에 이르기까지 총 침하량은 34.31mm, 하중시험 종료 후 제하 완료시 잔류침하량은 30.18mm가 발생하였다. 앞서 언급한 두가지 방법을 통해 측정된 항복 하중은 1,160kN, 970kN이었으며, 안전율 2를 적용하여 각각 580kN과 485kN으로 허용하중을 결정하였다(Fu and Zhou, 2003).

TP2 말뚝의 경우 하중재하시 별도의 제하-재제하 과정 없이 최대재하하중 3,136kN까지 재하하였다. 최대재하하중 3,136kN에 이르기까지 총 침하량은 16.24mm, 잔류침하량은 4.21mm 발생하였다. 시험말뚝 TP2의 경우 TP1과 달리 하중-침하곡선이 선형적으로 증가하였으며 (Fig. 7), 잔류 침하량 역시 항복하중을 결정하기 위한 기준 침하량인 12.5mm 보다 매우 작게 발생하였다(Fig. 8). 이는 최대 재하하중 범위 내에서 말뚝의 항복이 발생하지 않았으며, 말뚝의 지지력이 최대 재하하중 이상임을 의미한다. 따라서 시험말뚝 TP2에서는 최대재하하중에 안전율 2.0을 적용한 1,568kN 이상을 말뚝의 허용지지력으로 산정하였다.

TP3 말뚝의 경우 하중재하시 수직 하중에 편심이 발생하여 말뚝두부 수평재에 과다변위가 발생하는 현상이 나타났다. 이에 1,176kN에서 하중 재하를 중지하고

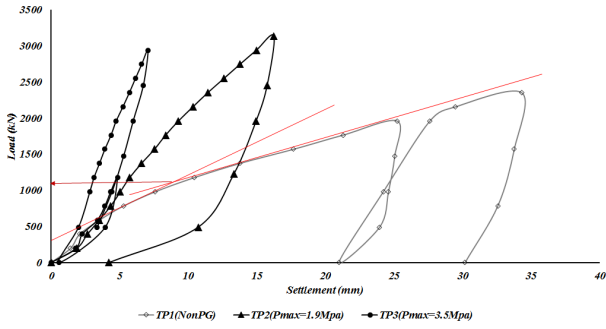


Fig. 7. Load-settlement curve

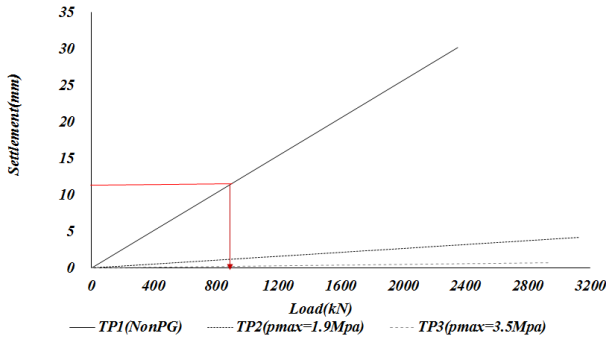


Fig. 8. R-E curve

하중을 제하한 후, 다시 최대재하하중 2,940kN까지 재재하하였다. 그 결과 최대재하하중 2,940kN에 이르기까지 총 침하량은 7.06mm, 잔류침하량은 0.77mm 발생하였다. 시험말뚝 TP3의 경우 TP2와 같이 하중-침하곡선의 기울기가 선형적으로 증가하였으며(Fig. 7), 잔류 침하량 역시 항복하중 결정 기준침하량인 12.5mm 보다 매우 작게 발생하였다(Fig. 8). 또한, Fig. 8에 나타나듯 동일 하중에서의 침하량이 TP2 말뚝에서의 침하량보다도 매우 작게 발생하였는데, 이는 최대 재하하중 범위 내에서 말뚝 항복이 발생하지 않았으며 TP2 말뚝보다 항복하중이 크다는 것을 의미한다. 따라서 시험말뚝 TP2에서의 허용지지력은 TP2 말뚝에 적용한 1,568kN 이상으로 산정하였다.

4.3 정재하 실험 결과 고찰

각 시험말뚝에서 산정한 허용지지력의 결과를 Table 2에 정리하였다. 단, 그라우팅 보강을 수행한 TP2와 TP3의 경우 시험시 최대 하중 범위 내에서 말뚝의 항복이 발생하지 않아 말뚝의 지지력을 최대 재하하중 이상으로만 표기하였다. 실험 결과 그라우팅 말뚝(TP2와 TP3)의 허용지지력은 미보강 말뚝(TP1)에 비하여 최소 3배 이상 증가하였으며, 말뚝 재료의 강도 대비 설계효율은 90% 이상으로 증가되는 것으로 나타났다. 이는 적용된 그라우팅 공법으로 인하여 말뚝의 주변지반의 소성변형률이 감소하고, 선단부의 직경이 증가하기 때문인 것으로 판단된다(Pooranampillai et al., 2009)

보강말뚝인 TP2와 TP3 말뚝 재하실험에서 말뚝 항복이 발생하지 않아 지지력 증강효과에 대한 정량적인 분석에 한계가 있어, 각 시험말뚝의 하중-침하곡선의 기울기를 활용하여 말뚝의 축하중 강성을 비교하였다. Fig. 7에서 나타나는 바와 같이 그라우팅 주입압과 주입량이 늘어날수록 하중 침하 곡선의 기울기가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 기존 연구자들의 결과와도 일치하였다(Mullins et al., 2000; Bustamante et al., 2009). 이는 말뚝의 축하중 강성이 커짐을 의미하며, 상향변위가 발생하지 않는 한 높은 그라우팅 압력으로 시공하는 것이 지지력 증강에 효과적임을 나타낸다.

Table 3은 그라우팅 주입압에 따른 지지력 증강효과를 정량적으로 확인하기 위해 각 실험에서 산정된 하중-침하 곡선의 기울기를 비교한 결과이며, 하중-침하곡선의 기울기인 축방향 강성(Axial stiffness) 값은 최대 재하 하중에서의 침하량 값의 기울기를 이용하여 산정하였다. 강성비(Stiffness ratio)는 그라우팅 공법을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에서의 축방향 강성(Axial stiffness) 값의 비율로 산정하였으며 산정방법은 식 (2)와 같다.

Table 2. Axial load capacity for with and w/o grouting cases

No. of pile	Grout injection pressure (MPa)	Grout injection flux (L)	Allowable load capacity (kN)		Design efficiency (Allowable load capacity/Nominal axial load capacity) (%)
			P-S curve	R-E curve	
TP 1	-	-	P-S curve	580	32%
			R-E curve	485	
			Average	530	
TP 2	1.9	290	> 1,568		> 97%
TP 3	3.5	398	> 1,568		> 97%

Table 3. Axial load stiffness results for with and w/o grouting cases

Injection pressure (MPa)	Axial stiffness (kN/mm)	Stiffness ratio
3.5	416.43	6.07
1.9	193.10	2.82
0	68.55	1.00

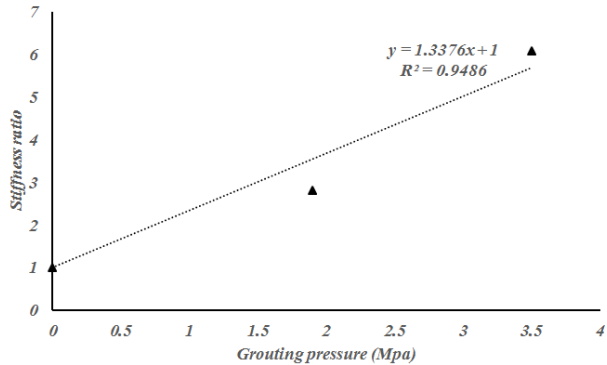


Fig. 9. Grouting pressure-stiffness ratio results

$$\text{Stiffness ratio} = \frac{\text{Axial Stiffness (Grouting case)}}{\text{Axial Stiffness (Non - Grouting case)}} \quad (2)$$

Fig. 9는 주입압의 조건에 따라 변화하는 강성비의 변화를 나타낸다. Fig. 9에 나타난 바와 같이, 그라우팅 공법을 적용한 말뚝의 축방향 강성은 그라우팅 주입압의 약 1.3배 비율로 증가하는 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 기성말뚝에서 그라우팅에 의해 상향 변위가 발생하지 않는 조건에서 지지력 증강효과는 그라우팅 주입압에 비례하며, PHC 500 기성말뚝의 경우 그라우팅 주입압의 약 1.3배로 축방향 강성이 증가한다고 판단할 수 있다. 단, 본 연구에서 수행한 결과는 제한적인 실험결과만을 적용한 것이므로, 추후 다양한 직경의 기성말뚝에 대한 실험을 수행하여 그라우팅에 의한 지지력 효과를 정립할 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 매입식 기성말뚝의 선단 보강을 통한 지지력 증강기법을 실제 현장에 적용하였으며 그에 따른 지지력 증강효과를 정재하 실험을 통해 검증하였다.

- (1) 재하시험 결과 미보강 말뚝에서는 최대재하하중인 2,352kN 이내에서 항복하중이 확인되었으나, 선단

보강이 수행된 시험말뚝 TP2와 TP3에서는 최대재하하중 3,136kN 이내에서 항복점이 확인되지 않고 상대적으로 선형적인 거동을 나타냈다. 하중-침하 곡선과 잔류침하량 기준으로 추정된 말뚝의 허용지지력은 미보강 말뚝인 TP1의 경우 약 530kN, 보강 말뚝인 TP2(최대 그라우트압 Pmax=1.8MPa), TP3 (Pmax=3.5MPa)에서는 1,568kN 이상으로 나타나 본 그라우팅 적용에 따라 말뚝의 허용지지력이 최소 3 배 이상 증가하는 것을 확인하였다.

- (2) 말뚝 부재의 설계효율(허용지지력/재료허용하중) 측면에서는 설계효율이 당초 32%에서 보강 후 97% 이상으로 크게 증가하였다. 따라서 본 연구의 지지력 증강기법을 이용한다면 기초 물량 감소에 따른 원가절감 측면에서 실용화 가능성이 충분할 것으로 판단된다.
- (3) 그라우팅 주입을 다르게 적용한 TP2, TP3 말뚝의 하중-침하 곡선 비교 결과, 그라우팅 주입압이 증가함에 따라 말뚝의 축방향 강성이 주입압의 1.3배 비율로 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 기성말뚝에서 그라우팅에 의해 상향 변위가 발생하지 않는 조건에서 지지력 증강효과는 그라우팅 주입압에 비례한다.
- (4) 단, 본 연구에서 수행한 결과는 제한적인 실험결과만을 적용한 것이므로, 추후 다양한 직경의 기성말뚝에 대한 실험을 수행하여 그라우팅에 의한 지지력 효과를 정립할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업 “선로안정화를 위한 콘크리트궤도 도상/노반 상태평가 및 보강/복원 기술 개발(17RTRP-B114179-02)”과제의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Bustamante, M., Gambin, M., and Ganeselli, L. (2009), “Pile Design at Failure Using the Menard Pressuremeter: an Update”, *In Contemporary Topics in In Situ Testing, Analysis, and Reliability of Foundations*, pp.127-134.
2. Dapp, S. D. and Mullins, G. (2002), “Pressure Grouting Drilled Shaft Tips: Full-scale Research Investigation for Silty and Shelly Sands”, *In Deep Foundations 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance*, pp.335-350.
3. Dapp, S. and Brown, D. (2010), “Evaluation of base Grouted Drilled

- Shafts at the Audubon Bridge”, *In GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling & Design*, pp.1553-1562.
4. Fernandez, A. L., Pando, M. A., and King, P. G. (2007), “Load Test Program to Validate Model for Post Grouted Drilled Shafts”, *In Contemporary Issues In Deep Foundations*, pp.1-11.
 5. Fu, X. and Zhou, Z. (2003), “Study on Bearing Capacity of Bored Cast-in-situ Piles by Post Pressure Grouting”, *In Grouting and Ground Treatment*, pp.707-715.
 6. Ho, C. E. (2003), “Base Grouted Bored Pile on Weak Granite”, *In Grouting and Ground Treatment*, pp.716-727.
 7. KGS (2015), *Explanation of foundation structure design criteria*, Korean Geotechnical Society (in Korean).
 8. KLHC (2010), *Specification of housing construction, 30535 preboring method*, Korea Land & Housing Corporation (in Korean).
 9. Kwon, O. S., Jung, S. M., and Choi, Y. K. (2011), “A Case Study of Post-Grouted Drilled Shaft in Weathered Rock”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.6, pp.5-16.
 10. Lee, M.H. (2004), “Present Status and Prospection of Domestic Pile Foundation”, *Workshop for field engineer, Korean geotechnical society*, Vol.12, No.6, pp.79-86 (in Korean).
 11. Mullins, G., Dapp, S. D., and Lai, P. (2000), “Pressure-grouting Drilled Shaft Tips in Sand”, *In New technological and design developments in deep foundations*, pp.1-17.
 12. Mullins, G., Winters, D., and Dapp, S. (2006), “Predicting End Bearing Capacity of Post-grouted Drilled Shaft in Cohesionless Soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.4, pp.478-487.
 13. Pooranampillai, J., Elfass, S., Vanderpool, W., and Norris, G. (2009), “Large-Scale Laboratory Study on the Innovative Use of Compaction Grout for Drilled Shaft Tip Post Grouting”, *In Contemporary Topics in Deep Foundations*, pp.39-46.

Received : December 21st, 2016

Revised : April 5th, 2017

Accepted : June 14th, 2017