The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 29, No. 3, September, 2019, pp. 211-222
https://doi.org/10.9720/kseg.2019.3.211

RESEARCH ARTICLE

CPR 공법의 압축재하시험을 통한 기초지반의 보강효과

강성승[1] · 김정한[2] · 노정두[3] · 고진석[1*]

[1]조선대학교 에너지자원공학과 교수, [2]효원이엔씨(주) 대표이사, [3]조선대학교 에너지자원공학과 박사과정

Effect of CPR Foundation Reinforcement Assessed by Compressive Loading Tests

Seong-Seung Kang[1] · Jung-Han Kim[2] · Jeongdu Noh[3] · Chin-Surk Ko[1*]

[1]Professor, Department of Energy and Resources Engineering, Chosun University
[2]CEO, Hyowon E&C Co., Ltd.
[3]Ph.D. Student, Department of Energy and Resources Engineering, Chosun University

Abstract

This study evaluates the yield load and allowable bearing capacity of ground in compressive loading tests to confirm the effect of CPR foundation reinforcement. The average compressive strength of the injection materials was higher than the planned compressive strength. Standard penetration tests for each stratum showed that foundation reinforcement improved the average N values, thereby increasing the bearing capacity of the ground. Compressive loading tests on two CPR piles revealed that the total and net settlement due to the maximum load exceed that permissible for the CPR pile diameter. The yield load and allowable bearing capacity calculated by the settlement criterion and the load-settlement curves varied greatly with the method applied. Therefore, it seems to be necessary to determine the optimum value through comprehensive analysis after applying various yield load calculation methods.

Keywords: CPR method, compressive loading, yield load, allowable bearing capacity, settlement

초 록

본 연구는 CPR 공법을 적용한 압축재하시험을 통하여 지반의 항복하중과 허용지지력을 평가하여 기초지반 보강효과를 확인하기 위한 것이다. 주입재의 평균압축강도는 계획된 강도보다 높게 나타났다. 또한 각 지층에서 표준관입시험 결과는 시험 전보다 시험 후의 평균 N값이 향상되었다. 즉, 이것은 지반의 지지력을 증대시키는 효과를 가져왔음을 의미한다. 두 종류의 CPR 말뚝 압축재하시험 결과에 의하면, 최대 재하하중에 의한 전침하량과 순침하량은 CPR 말뚝직경 허용범위를 초과하는 침하량을 나타냈다. 침하량 기준과 하중-침하량 곡선에 의해 산정한 항복하중 및 허용지지력은 적용되는 방법에 따라 값의 편차가 크게 나타났다. 따라서 허용지지력은 다양한 항복하중 산정법을 적용한 후 종합적인 분석을 통하여 최적의 값을 결정할 필요성이 있다고 사료된다.

주요어: CPR 공법, 압축재하시험, 항복하중, 허용지지력, 침하

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Chin-Surk Ko
E-mail: jsgo@chosun.ac.kr

Received: 31 July, 2019
Revised: 27 August, 2019
Accepted: 2 September, 2019

Ⓒ 2019 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

부적절한 설계 및 시공, 구조물 증축에 따른 하중 증가, 지하수위 하강에 의한 지반 침하 등은 지반의 불안정성을 야기하므로 이러한 지반을 안정화시키기 위해서는 적절한 기초지반 보강대책이 요구된다. 기초지반 보강대책으로서 시공성, 효율성, 경제성 측면에서 우수한 그라우팅 공법이 많이 사용되고 있다. 이 공법은 주입장비, 주입방식, 주입재 등에 따라 다양한 공법들로 분류된다. 이들 중 컴팩션 그라우팅 시스템(Compaction Grouting System, CGS) 공법은 슬럼프(slump)가 거의 없는 비유동성 소성확보를 위한 세립토와 내부마찰력 증대를 위한 조립토로 구성된 몰탈형 주입재를 지중에 방사형으로 압입하여 원기둥 형태의 고결체를 형성함으로써 주변지반을 압축강화시켜 지반의 밀도를 증대시키는 지반개량공법을 말한다. 이 공법은 비배출치환공법이라고도 하며 저공해, 저소음, 내구성 및 고강도 고결체 형성 등의 장점을 가지고 있다(Chun et al., 2000a). 이러한 장점 때문에 CGS 공법은 기초지반 보강, 연약지반 침하억제, 흙댐 코어 보수 및 보강 등과 같은 지반개량이나, 광산지역 폐광충전, 항만공사 등에 폭넓게 사용되고 있다(Chun and Kwon, 1999; Chun et al., 2000b, 2001; Chun and Choi, 2003; Shin et al., 2010; Park et al., 2013).

Chun et al.(2000b)은 연약부지 구조물 기초지반 보강공사에 CGS 공법을 적용한 후 그 효과를 검증하였다. 또한 Chun et al.(2001)은 침하가 발생한 연약지반에 CGS 공법을 적용하여 지반의 지지력 증대 및 침하억제 효과가 있음을 증명하였다. Chun and Choi(2003)은 손상된 흙댐 코어의 보수와 보강을 위해 CGS 공법을 적용하였으며, 그 결과 댐 코어재료의 특성변화를 최소화하면서 느슨한 공극을 채워 투수계수와 누수량을 감소시켜 댐 코어의 차수성을 향상시킬 수 있음을 보였다. Shin et al.(2010)은 해성점토 및 준설매립지반 기초보강에 CGS 공법을 적용한 결과, 침하 및 액상화에 대한 지반개량효과가 높고 시공에 따른 진동영향도 없음을 확인하였다. Park et al.(2013)은 CGS 공법에 의한 석회암 공동지역의 구조물 기초지반 보강을 실시하여 보강효과를 공학적으로 검토한 결과, 공동 내 재료 충전 상태가 양호하였으며 공동도 적절하게 보강된 것으로 나타났다. 본 연구는 현장 타설말뚝 공법으로 적용 가능한 CGS 공법의 구근 전단력과 연직력 향상을 위해 개발된 CGS 공법의 하나인 Compaction Grouting Compound Pile with Reinforcement(CPR) 공법을 적용한 압축재하시험을 통하여 지반의 항복하중과 허용지지력을 평가하여 기초지반 보강효과를 검토하고자 한다. 이를 위해 매립층과 퇴적층으로 구성된 지반에 직경 400 mm와 500 mm 두 종류의 CPR 말뚝을 형성시킨 후 시공 전후의 지반상태를 비교하였다. 또한 압축재하시험을 통하여 침하량 기준 및 하중-침하량 곡선에 의한 항복하중과 허용지지력을 비교 · 분석하였다.

현장 시험

시험 말뚝 배치

말뚝의 재하시험에는 일반적으로 설계하중의 2~3배에 달하는 재하하중이 요구된다. 재하방법은 사하중을 직접 재하하는 방법과 반력 말뚝의 인발 저항력을 이용하는 방법이 있다(Choi, 2009). 말뚝에 실재 하중을 재하하는 조건을 감안하면 사하중 재하방법이 바람직하나 소요되는 과도한 시간과 비용 등으로 반력 말뚝을 이용한 재하시험이 보편화되어 있다. 현장 타설 말뚝의 경우 반력 말뚝은 앵커를 반력체로 이용하는 것이 일반적이다. 하지만 CPR 말뚝 특성상 주입재의 강도가 균질하고 주변 마찰력이 우수하기 때문에 본 시험 시공에서는 CPR 말뚝을 반력 말뚝으로 이용하였다. 시험 말뚝은 Fig. 1과 같이 CPR 시험 말뚝 직경 ϕ400 mm (D400, Nos. 1, 2)크기 2공, ϕ500 mm (D500, Nos. 3, 4) 크기 2공 총 4동을 배치하고, 재하시험 시 반력 말뚝으로 이용하고자 외부(Nos. 5~14)에 10공을 배치하였다. 또한 주입재 주입 전후의 지반상태 변화를 측정하기 위한 표준관입시험(standard penetration test, SPT)용 4개의 시험공(BH-1, BH-2, AH-1, AH-2)을 배치하였다.

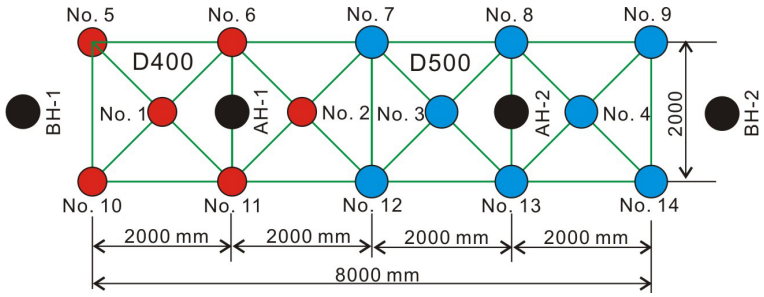

Fig. 1. Layout for CPR test, red circles: D400, blue circles: D500, test boreholes for SPT: BH-1, BH-2, AH-1, AH-2.

시험 말뚝 제원

시험 말뚝의 주입재 강도는 일반적으로 조골재량과 시멘트량을 조절하여 8.0~24.0 N/mm^2 범위를 적용하는데, 본 연구에서는 12.0 N/mm^{2}으로 설정하였다. 보강재는 직경 ϕ22 mm 크기의 SD300의 인장력(3,000 kgf/cm^2)을 가진 철근 1가닥을 시험체에 삽입한 말뚝으로 하였다. CPR 시험 말뚝 D400의 최대압축강도와 허용압축강도는 1,619.4 kN과 422.3 kN, 그리고 D500은 2,467.7 kN과 634.3 kN으로 산정되었다. 본 연구에서는 시험 말뚝의 항복하중 특성을 파악하기 위해 시험 말뚝 Nos. 1~4에 대해 압축재하시험을 하였으며, 이들 중 결과 분석과 해석에는 시험 말뚝 Nos. 1, 3을 사용하였다. 압축재하시험을 위한 재료의 허용강도와 최대계획하중은 D400의 경우 422.3 kN와 1,200.0 kN이며, D500의 경우 634.3 kN와 1,800.0 kN으로 하였다.

지반조사

시험 위치

본 연구를 위한 시험 장소는 행정구역상 광주광역시 광산구 신창동 526-2로, 동쪽으로 약 100 m 지점에 영산강 상류 수계, 북쪽으로 약 10 m 정도의 구릉선 산자락 끝 지점에 위치한다. 본 장소는 논으로 이용되다가 매립된 부지로 지형 특성상 하상 퇴적층이 발달되었다(Fig. 2).

Fig. 2. Study area for CPR test (retrieved from https://map.naver.com).

표준관입시험

시공 전 CPR 말뚝 시험구간 외부에 좌우 2개소(BH-1, BH-2)에서 지층과 지반상태를 확인하기 위하여 한국공업규격(Korean Industrial Standards, KS) 표준관입시험법(Standard Penetration Test, SPT) KS F 2307(1987)에 근거하여 1.0 m 간격으로 시험을 실시하였다. 지층은 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토, 풍화암 순으로 나타났다(Table 1). 매립층은 GL-0~-3.2 m 두께로 중립질 자갈 이상의 크기가 함유하고 점토와 모래질 실트가 혼합된 적황색의 산토로 매립되었으며, 입경이 매우 불균질한 상태로 조사되었다. N값은 5/30~16/30으로 폭넓게 분포하며, 지층은 느슨 또는 중간 상태로 조사되었다. 퇴적층의 두께는 GL-3.2~-8.5 m의 5.3 m 두께로 실트질 모래와 자갈이 소량 함유된 층으로 N값은 14/30~32/30, 지층은 중간 또는 조밀한 상태로 조사되었다. 풍화토층은 GL-8.5~-9.5 m의 1.0 m 두께로 얕고 황갈색으로 암편이 관찰되었으며, N값은 50/22~50/25 범위에 분포하였다. 풍화암층은 GL-9.5~-10.0 m의 0.5 m 두께로 조사되었으며, N값은 50/9~50/5 범위에 분포하였다.

Table 1. Stratum distribution and results of standard penetration test (SPT)

Stratum	Depth (GL -m)	Thickness (m)	Classification	N value (No/cm)
Buried layer	0~3.2	3.2	Clay gravel	5/30~16/30
Sediment	3.2~8.5	5.3	Silty sand	14/30~32/30
Weathered soil	8.5~9.5	1.0	Good weathering degree	50/22~50/25
Weathered rock	9.5~10.0	0.5	Sand with rock fragments	50/9~50/5

물성시험

시료에 대한 기본 물성값은 표준관입시험 시 채취된 매립층과 퇴적층의 시료를 한국공업규격의 시험법을 적용하여 구하였다. 이에 따르면 매립층과 퇴적층의 자연함수비(KS F 2306, 2015)는 17.5%과 12.5%, 비중(KS F 2308, 2016)은 2.58과 2.62이며, 통일 분류법(KS F 2324, 2016)에 의한 흙은 GC와 SM으로 분류되었다(Table 2).

Table 2. Physical properties and unified soil classification system (USCS)

Stratum	Water content (%)	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	Specific gravity	USCS
Buried layer	17.5	38.4	22.7	2.58	GC
Sediment	12.5	27.6	NP	2.62	SM

시험 시공

천공

시험 시공은 로터리 퍼커션형의 유압식 천공기를 이용하여 천공하였으며, 이때 지반 교란이 최소화되도록 천공수를 조절하였다. 천공수가 많을 경우 주변 지반을 교란시켜 그라우트 주입 시 수압파쇄 현상을 일으킬 가능성이 있으므로 천공수량을 철저히 조절해야 한다. 사용된 케이싱은 주입 작업의 효율성을 고려하여 BX 크기로 길이 100 cm, 외경 73 mm 내경 52 mm 규격을 사용하였다. 천공 근입 심도는 풍화암 상부층과 풍화토 하부층인 N ≤ 50/20 근입시켜 GL-9.0 m 까지 천공하였다.

주입재 배합

컴팩션 그라우팅의 주입재는 골재, 시멘트, 물 등으로 구성된다. 그중 가장 중요한 재료는 골재로서 골재의 배합 비는 시공성과 지반보강 효과를 좌우한다. 본 시험 시공에 사용된 골재는 10 mm 이하의 석분과 토사를 혼합하여 Fig. 3과 같이 이상선(Ideal Line)에 근접한 입도분포를 가지도록 배합하였다. 골재의 물성시험는 KS F 2503(2014), KS F 2504(2014), KS F 2511(2012) 규정에 근거하여 실시하였다. 밀도는 2.67 g/cm³, 함수량 7.5%, 통일 분류법상 SW~SM으로 분류되며, 세립토(0.08 mm 통과량) 비율이 9.7%로 이상적인 비율을 가진 골재로 판단되었다. 시멘트는 그라우트의 압축강도가 12.0 N/mm^2 정도 발현 되도록 280 kg/m^{3}를 배합하였다. 배합 수는 주입재 슬럼프가 5 cm 이하를 유지도록 200 L/m^{3}를 기준으로 매 공마다 슬럼프 시험을 실시하여 조절하였다(Table 3).

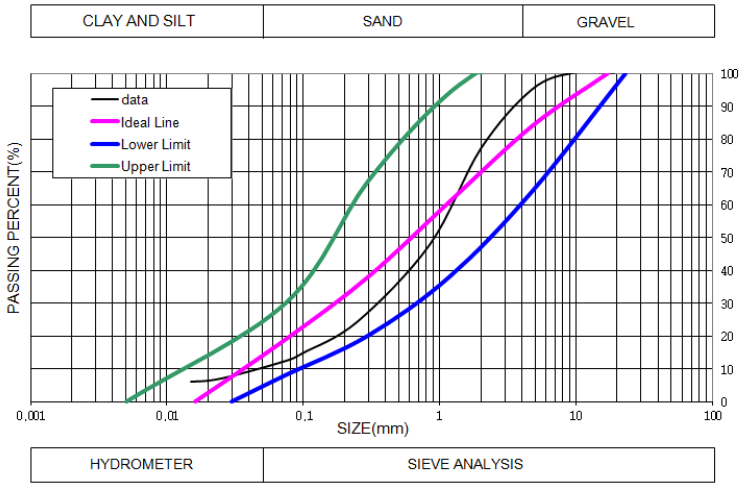

Fig. 3. Sieve analysis of aggregate.

Table 3. Mixing ratio of grout material

Compressive strength (N/mm^2)	Cement (kg)	Coarse aggregate (m^3)	Fine aggregate (m^3)	Water (L)	Slump
12.0	280	0.5	0.5	200 ± 50	≤5 cm

주 입

주입 순서는 지반 보강 효과를 극대화시키기 위하여 Fig. 1의 외곽에 위치한 보조공 No. 5~9, No. 10~14에 대하여 격 공으로 주입하여 지반을 강화시킨 후 중앙부에 위치한 No. 1~4 시험공에 주입하였다. 반죽된 주입재를 압송하는 펌프의 토출량은 반죽 상태, 슬럼프, 외부 온도 및 펌프의 정비 상태 등에 따라 1회 토출량의 차이가 발생한다. 펌프 토출량의 차이는 전체 주입량에 오차를 가져오며 계획된 주입량 보다 적게 주입되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 펌프에서 압송 배관으로 토출된 양을 초음파 유량계를 통해 실시간으로 측정하고, 주입 중 주입심도, 주입시간, 주입 라인 손실(line loss), 주입관 상부 압력(header pressure) 및 주입관 선단 압력(tip pressure) 등 관련 자료들을 획득하였다. 실시간 주입압력과 주입량은 CAMS(Compaction grouting Real time Automatic Monitoring System)를 이용하여 모니터링하였다. D400 시험공의 주입량은 0.125 m^3/m, D500 시험공의 주입량은 0.2 m^3/m으로 계획하였다. 하지만, 주입재가

지중에서 압축되는 과정에서 발생되는 손실이나 GL-1.0~-2.0 m 지점에서 주입재가 지표면 방향으로 넘치는 현상을 고려하여 약 10% 정도 가중시켜 주입하였다. 각 시험공별로 주입된 양은 Table 4와 같다.

Table 4. Injection amount and pressure at each borehole by CPR injection

Hole No.	Depth (m)	Injection diameter (mm)	Injection amount (m^3)	Pressure (MPa)
No. 1	9.0	ϕ400 mm	1.25	1.08~3.24
No. 2	9.0	ϕ400 mm	1.28	0.78~2.94
No. 3	9.0	ϕ500 mm	2.05	0.88~2.75
No. 4	9.0	ϕ500 mm	1.64	0.78~2.94
No. 5	9.0	ϕ400 mm	1.25	1.08~3.53
No. 6	9.0	ϕ400 mm	1.19	1.27~3.43
No. 7	9.0	ϕ500 mm	2.10	0.88~3.14
No. 8	9.0	ϕ500 mm	1.95	0.78~3.14
No. 9	9.0	ϕ500 mm	1.98	0.69~2.55
No. 10	9.0	ϕ400 mm	1.35	0.59~2.26
No. 11	9.0	ϕ400 mm	1.28	0.98~3.33
No. 12	9.0	ϕ500 mm	2.00	0.78~3.14
No. 13	9.0	ϕ500 mm	2.10	0.98~2.06
No. 14	9.0	ϕ500 mm	2.32	1.08~3.82

Table 4에서 보이는 바와 같이 각 시험공 별 주입압력 범위는 전체적으로 0.59~3.82 MPa로서, 상부 매립 층에서는 1.37 MPa 이하인 반면, 하부 퇴적층에서는 1.37~3.82 MPa로 나타났다. 또한 시험공의 심도별 압력 범위가 다르게 나타났는데, 이것은 주입에 의해 심도별 지반의 압축 정도에 따른 상대밀도가 다르기 때문으로 판단된다. 이와 더불어 상부의 매립층은 불균질한 크기의 입도분포를 가진 자갈 섞인 토사로 각 공별 위치의 자갈 크기 및 혼재 유무에 따른 주입 압력이 상이하게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 시험공 4번의 주입압력의 경우 매립층 심도에서 상대적으로 주입압력이 낮게 발생하였는데, 이는 주입재가 방사 방향으로 주변 지반을 압축 시키지 못하고 자유면 방향인 지표면으로 유동됨으로써 선행된 주입으로 인한 주변 지반이 충분히 단단해 졌거나 자갈 함유량이 많은 것에 기인되는 것으로 판단된다.

압축강도 및 시험 후 표준관입시험

주입재의 압축강도를 확인하기 위해 직경 10 cm, 높이 20 cm 몰드 공시체를 9개 제작 하여 수중 양생 후 KS F 2404에 근거하여 압축시험을 실시하였다. 그 결과 압축강도는 12.1~13.4 N/mm^2, 평균 압축강도 12.8 N/mm^2으로 계획된 12.0 N/mm^2보다 더 높게 나타났다. 시험 시공 중 증가된 간극수압을 소산시키기 위하여 충분한 시간을 고려하여 한 달 후 Fig. 1에 도시된 위치인 시험공 중앙 부위 2개소(AH-1, AH-2)에서 1.0 m 간격으로 표준관입시험을 실시하였다. 주입재 주입 전후의 표준관입시험 결과를 Table 5에 정리하였다. 매립 층에서는 N값이 평균 2~5 정도 증가되어 시험 전 보다 16~63% 향상 효과를 보여 지반의 상대밀도를 높이는 결과를 나타냈다. 퇴적층에서는 N값이 평균 2~7정도 증가되어 시험 전보다 8~36% 정도 향상되는 효과를 보여 시험 전 보다 지반이 더 조밀하게 형성되었음을 나타냈다(Fig. 4). 풍화토 층도 N값이 소폭 증가되었다.

Table 5. Results of standard penetration test (SPT) before (BH-1, BH-2) and after (AH-1, AH-2) injection on four boreholes

Depth (m)	SPT before injection		SPT after injection		Changes of N value
	BH-1	BH-2	AH-1	AH-2	
1.5	16/30	14/30	18/30	17/30	Average +2
2.5	6/30	5/30	8/30	10/30	Average +2
3.5	14/30	15/30	19/30	21/30	Average +5
4.5	23/30	20/30	25/30	27/30	Average +5
5.5	20/30	19/30	26/30	25/30	Average +7
6.5	22/30	24/30	23/30	30/30	Average +2
7.5	32/30	30/30	35/30	32/30	Average +2
8.5	50/22	50/25	50/20	50/18	Average +4
9.5	50/9	50/5	50/7	50/6	Average +1

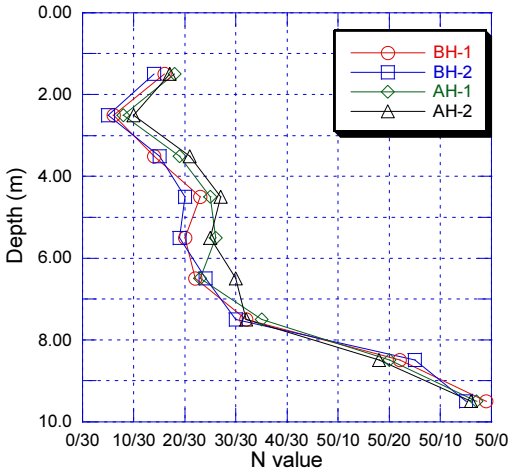

Fig. 4. Results of standard penetration test (SPT) before (BH-1, BH-2) and after (AH-1, AH-2) injection.

CPR 말뚝 압축재하시험

말뚝 압축재하시험 계획 및 방법

말뚝 압축재하시험에는 설계하중의 2~3배에 달하는 재하하중이 필요하다. 압축재하시험 방법으로는 일반적으로 완속재하시험(slow maintained-load test), 급속재하시험(quick maintained-load test), 하중증가평형시험(incremental equilibrium test), 일정침하율시험(constant rate of penetration test), 일정침하량시험(constant settlement increment test), 반복하중재하시험(cyclic loading test), 스웨덴 반복하중재하시험(Swedish cyclic test) 등 7가지로 분류할 수 있다(ASTM D1143-81, 1994). 본 연구에서는 재하단계별 하중증가 비율 및 각 하중단계의 경과시간 등을 고려하여 급속재하시험 방법을 적용하였다. 말뚝 압축재하시험을 수행함으로써 하중-시간-침하량 거동특성을 알 수 있으며, 침하량 기준과 하중-침하량 곡선으로부터 항복하중과 허용지지력을 구할 수 있다. 재하하중 단계는 최대 계획하중의 5% 또는 허용하중의 15%로 정하였다. 각 하중단계의 재하간격은 5분으로 하였으며, 침하량은 각 하중단계마다 기록하였다. 본 연구의 말뚝 압축재하시험은 CPR 말뚝 D400과 D500에 대해 실시하였다. 전자의 경우 최대 계획하중은 1,200 kN, 허용하중은 400 kN으로 하였으며,

후자는 1,800 kN과 600 kN으로 각각 설정하였다. 재하대는 최대 계획하중의 1.5배 이상의 재하용량으로 시험 도중 말뚝의 편심을 방지할 수 있도록 수직과 수평을 정확히 맞추도록 하였다(Fig. 5). 재하하중은 5,000 kN 용량의 유압잭을 이용하여 가했으며, 측정은 로드셀을 이용하였다. 침하량은 말뚝에 180° 간격으로 부착된 변형률게이지를 이용하여 측정되었다. 재하하중 및 변위 자료는 60채널 TDS-530 모델의 데이터로거를 이용하여 획득하였다.

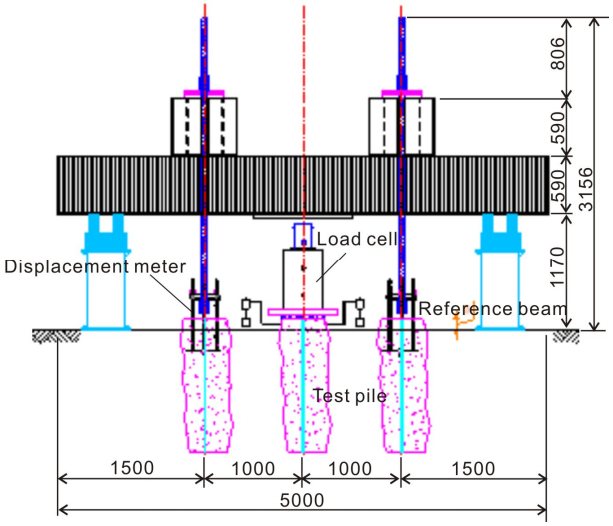

Fig. 5. Schematic diagram for compressive load test.

말뚝 압축재하시험 결과

침하량 기준에 의한 항복하중 및 허용지지력

침하량 기준 판정법에는 전침하량(total settlement) 기준과 전침하량에서 탄성침하량(elastic settlement)을 제거한 순침하량(net settlement) 기준이 있다. CPR 말뚝 D400에 대한 말뚝 압축재하시험을 실시하여 침하량으로부터 항복하중과 허용지지력을 산정하여 정리하면 Table 6과 같다. 최대재하하중이 1,260 kN일 때 전침하량은 77.670 mm로 나타났으며, 이는 CPR 말뚝 직경의 10% (40.0 mm)를 초과하는 침하량이다. 하중을 완전 제거한 후의 순침하량은 69.23 mm로 확인되었으며, 이 값은 순침하량 분석 기준인 CPR 말뚝 직경의 2.5% (10.0 mm)를 초과하는 것으로 나타났다. Terzaghi and Peck(1967)이 제안한 침하량 25.4 mm 및 안전율 2.0의 기준에 근거하여 CPR 말뚝의 항복하중과 허용지지력을 계산한 결과 978.4 kN/본과 489.2 kN/본으로 각각 산정되었다(Fig. 6a). 또한 영국기초공업기준에서 제안한 전체 침하량 40 mm (말뚝 직경의 10%) 및 안전율 3.0 기준(British Standards Institution, 1986)에 근거하여 CPR 말뚝의 항복하중과 허용지지력을 계산한 결과 1,098.3 kN/본과 366.1 kN/본으로 각각 산정되었다(Fig. 6a).

CPR 말뚝 D500에 대한 말뚝 압축재하시험 결과를 정리하면 Table 6과 같다. 최대재하하중이 1,498.8 kN일 때 전침하량은 75.475 mm로 나타났으며, 이는 CPR 말뚝직경의 10% (50.0 mm)를 초과하는 침하량이다. 순침하량은 64.76 mm로 확인되었으며, 이 값은 순침하량 분석 기준인 CPR 말뚝 직경의 2.5% (12.5 mm)를 초과하는 것으로 나타났다. Terzaghi and Peck(1967)이 제안한 침하량 25.4 mm 및 안전율 2.0의 기준에 근거하여 CPR 말뚝의 항복하중과 허용지지력을 계산한 결과 1,131.8 kN/본과 565.9 kN/본으로 각각 산정되었다(Fig. 6b). 또한 영국기초공업기준에서 제안한 전체 침하량 50 mm (말뚝 직경의 10%) 및 안전율 3.0 기준(British Standards Institution, 1986)에 근거하여 CPR 말뚝의 항복하중과 허용지지력을 계산한 결과 1,448.8 kN/본과 482.9 kN/본으로 각각 산정되었다(Fig. 6b).

Table 6. Analyzed results of compressive load test on CPR piles of No. 1 (D400) and No. 3 (D500)

CPR pile	Judgements		Yield load (kN)	Safety factor	Allowable bearing capacity (kN)
No. 1 (D400)	Total settlement (mm)	25.4	978.4	2	489.2
		40 (10% of D)	1,098.4	3	366.1
	Net settlement (mm)	10 (2.5% of D)		2	
	Ultimate load (kN)		1,260.0	3	420.0
	Yield load (kN)	P-S	1,060.0	2	530.0
		logP-logS	973.4	2	486.7
		Davisson	692.0	2	346.0
	Maximum settlement at maximum load (mm)				77.670
	Allowable bearing capacity (kN)				420.0
No. 3 (D500)	Total settlement (mm)	25.4	1,131.8	2	565.9
		50 (10% of D)	1,448.8	3	482.9
	Net settlement (mm)	12.5 (2.5% of D)		2	
	Ultimate load (kN)		1,498.8	3	499.6
	Yield load (kN)	P-S	1,350.2	2	675.1
		logP-logS	1,334.2	2	667.1
		Davisson	708.4	2	354.2
	Maximum settlement at maximum load (mm)				74.475
	Allowable bearing capacity (kN)				499.6

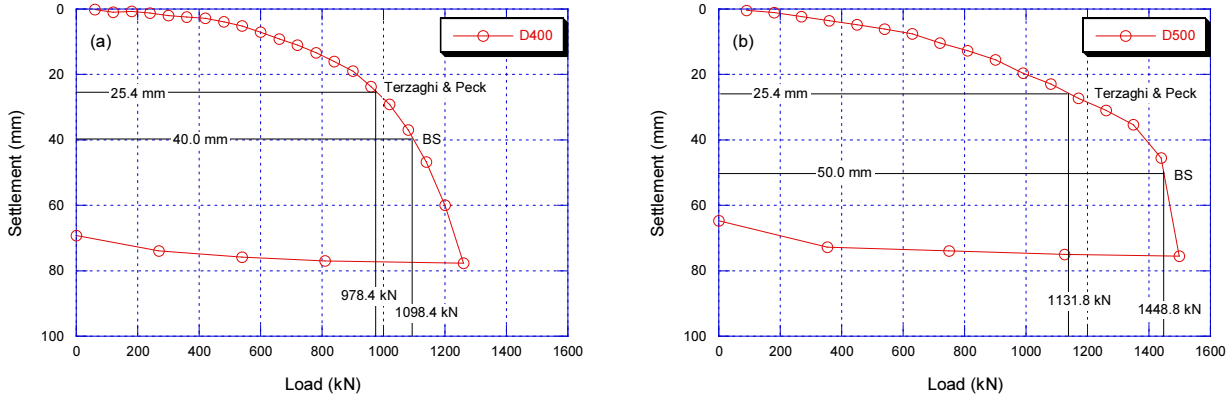

Fig. 6. Results of compressive load test on CPR piles of (a) No. 1 (D400) and (b) No. 3 (D500) based on the methods proposed by Terzaghi and Peck (1967) and British Standards Institution (1986).

하중-침하량 곡선에 의한 항복하중 및 허용지지력

말뚝에 하중이 재하되었을 때 하중(P)-시간(t)-침하량(S) 거동특성에 의하여 항복하중을 분석하여 판정하는 다양한 방법들, 즉 P-S 분석, logP-logS 분석, S-logt 분석, ds/d(logt)-P 분석, Davisson 분석 등이 있다(Choi, 2009). 이들 방법 중 본 연구에서는 P-S 분석, logP-logS 분석, Davisson 분석 등 세 가지 방법들로부터 항복하중을 판정하였다. CPR 말뚝 D400에 대한 항복하중을 산정하면 Fig. 7과 같다. 즉, P-S 분석에 의해 평가한 항복하중은 1,060.0 kN이며, 안전율을 고려한 허용

지지력은 530.0 kN으로 산정되었다(Fig. 7a). logP-logS 분석에 의해 평가한 항복하중은 973.4 kN이며, 안전율을 고려한 허용지지력은 486.7 kN으로 산정되었다(Fig. 7b). Davisson 분석에 의해 평가한 항복하중은 692.0 kN이며, 안전율을 고려한 허용지지력은 346.0 kN으로 산정되었다(Fig. 7c). CPR 말뚝 D500에 대한 항복하중은 Fig. 7의 과정을 통해서 산정되었다. P-S 분석에 의해 평가한 항복하중은 1,350.2 kN이며, 안전율을 고려한 허용지지력은 675.1 kN으로 산정되었다(Fig. 7d). logP-logS 분석에 의해 평가한 항복하중은 1,334.2 kN이며, 안전율을 고려한 허용지지력은 667.1 kN으로 추정된다(Fig. 7e). Davisson 분석에 의해 평가한 항복하중은 708.4 kN이며, 안전율을 고려한 허용지지력은 354.2 kN으로 산정되었다(Fig. 7f).

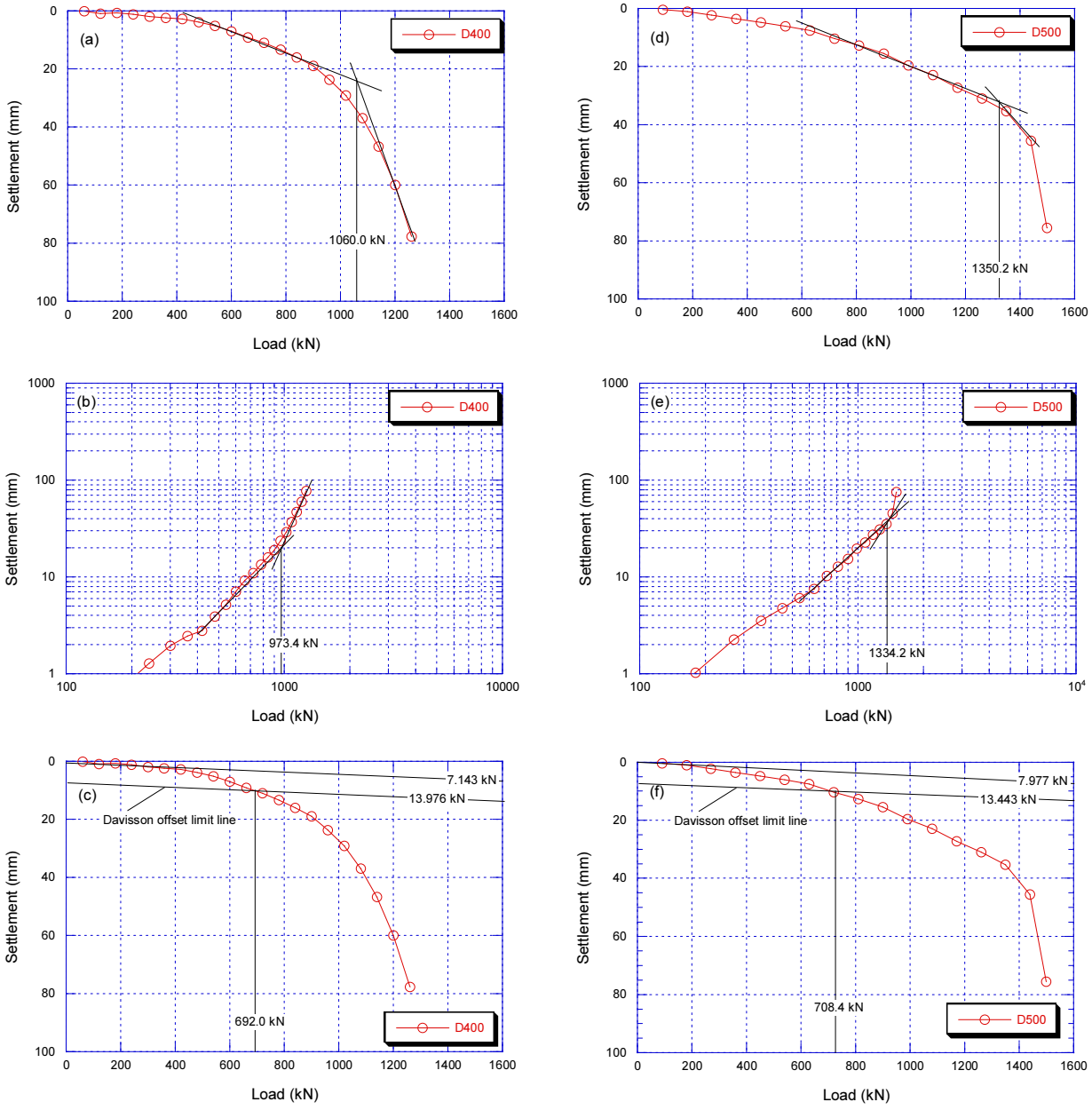

Fig. 7. Estimation of yield load and allowable bearing capacity on No. 1 (D400) and No. 3 (D500) obtained from (a), (d) S-P, (b), (e) logP-logS, and (c), (f) Davisson methods.

결 론

현장 타설말뚝 공법으로 적용 가능한 CGS 공법의 하나인 CPR 공법을 적용하고, 압축재하시험을 통하여 지반의 항복하중과 허용지지력을 평가하여 기초지반 보강효과를 확인하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

주입재의 평균 압축강도는 계획된 것보다 더 높게 나타났다. 압축재하시험 후 실시한 표준관입시험의 결과에 의하면 매립층과 퇴적층 모두에서 평균 N값이 시험 전 보다 향상된 것으로 나타나, 압축재하시험에 의해 지반이 더 조밀하게 형성되었음을 나타냈다. 급속재하시험에 의한 CPR 말뚝의 최대재하하중은 D500이 D400보다 약 16% 더 높은 것으로 나타났다. Terzaghi and Peck(1967)이 제안한 침하량 및 안전율에 근거한 CPR 말뚝의 항복하중과 허용지지력은 D500이 D400보다 약 14% 더 높게 나타났다. 그리고 영국기초공업기준의 침하량과 안전율에 근거한 CPR 말뚝의 항복하중과 허용지지력은 D500이 D400보다 약 24% 더 높게 나타났다. 하중-침하량 곡선으로부터 산정한 CPR 말뚝의 항복하중 및 허용지지력 크기는 P-S 분석 > logP-logS 분석 > Davisson 분석 순으로 나타났다. 하지만 P-S 분석과 logP-logS 분석에 의한 항복하중과 허용지지력은 큰 차이를 보이지 않은 반면 Davisson 분석에 의한 값은 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 결론적으로 침하량 기준과 하중-침하량 곡선에 의해 산정된 항복하중 및 허용지지력은 적용되는 방법에 따라 값의 편차가 크게 나타나므로, 허용지지력은 다양한 항복하중 산정법을 적용한 후 종합적인 분석을 통하여 최적의 값을 결정할 필요성이 있다고 사료된다.

사 사

이 논문은 2018학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드린다.

References

ASTM D1143-81, 1994, Standard test method for piles under static axial compressive load, American Society for Testing and Materials.

British Standards Institution, 1986, British standard code practice for foundation (BS 8004).

Choi, J.H., 2009, A study on the decision of bearing capacity for bored pile foundation, MSc Thesis, Chosun University, 1-69 (in Korean with English abstract).

Chun, B.S., Choi, J.K., 2003, Applicability of CGS for remediation and reinforcement of damaged earth dam core, Journal of the Korean Geotechnical Society, 19(6), 325-334 (in Korean with English abstract).

Chun, B.S., Koh, Y.I., Kwon, H.S., 2000a, Reinforcement of building foundation by the low slump mortar grout, KGG Fall National Conference, November 3-4, 2000, Seoul, Korea, 71-78.

Chun, B.S., Kwon, H.S., 1999, A study on the ground improvement by compaction grouting system, Journal of the Korean Society for Railway, 2(3), 9-19 (in Korean with English abstract).

Chun, B.S., Kwon, H.S., Joung, U.W., 2000b, Reinforcement of the foundation using C.G.S, KGG Spring National Conference, March 25, 2000, Seoul, Korea, 441-448.

Chun, B.S., Yeoh, Y.H., Joung, Y.K., 2001, Settlement restraint of soft ground by low slump mortar injection, Journal of the Korean Geotechnical Society, 17(6), 53-67 (in Korean with English abstract).

https://map.naver.com.

KS F 2306, 2015, Korean Industrial Standards.

KS F 2307, 1987, Korean Industrial Standards.

KS F 2308, 2016, Korean Industrial Standards.

KS F 2324, 2016, Korean Industrial Standards.

KS F 2503, 2014, Korean Industrial Standards.

KS F 2504, 2014, Korean Industrial Standards.

KS F 2511, 2012, Korean Industrial Standards.

Park, S.S., Hong, J.U., Chun, B.S., 2013, A study on the reinforcement case of bridge foundation in the limestone cavity with CGS method, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 14(12), 43-52 (in Korean with English abstract).

Shin, E.C., Chung, D.K., Seo, K.C., Lee, M.S., 2010, Case study for improvement of marine clay and dredgedfill ground by CSG method, KGG Spring National Conference, March 25-26, 2010, Kyeonggi, Korea, 480-488.

Terzaghi, K., Peck, R.B., 1967, Soil mechanics in engineering practice, John Wiley and Sons, 729p.