

## 현장 계측을 통한 말뚝지지 전면기초의 하중분담률 분석

### Analysis of Load Sharing Ratio of Piled Raft Foundation by Field Measurement

정 상 섭 <sup>1</sup>	Jeong, Sang-Seom	이 준 환 <sup>2</sup>	Lee, Jun-Hwan
박 종 전 <sup>3</sup>	Park, Jong-Jeon	노 양 훈 <sup>4</sup>	Roh, Yang-Hoon
홍 문 현 <sup>3</sup>	Hong, Moon-Hyun		

#### Abstract

In this study, field measurements were investigated to analyze the load sharing ratio and behavior of piled raft foundation. The field measurements were performed for about 300 days from the start of construction. The geometry of the raft is 3.1 m × 3.1 m, and the pre-cast and pre-bored pile is 23 m in length and 0.508 m in diameter. Based on the field measurements, the load-settlement relationship of the piled raft foundation was obtained, and the load sharing ratio of the pile was converged to 70% at ultimate loading condition. The load sharing ratio of the pile increased as the settlement increased, and this is because the surface friction of the weathered soil, which is at the lower ground, was significantly increased. Based on the results of the field measurements, load transfer curves were obtained and applied to a numerical analysis by using load transfer method.

#### 요 지

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 하중분담률 및 거동분석을 위해 시공단계 별 현장계측을 수행하였다. 현장계측은 시공시작일 부터 약 300일 동안 수행되었으며, 사용된 말뚝지지 전면기초는 3.1m×3.1m 크기의 전면기초와 길이 23m 직경 0.508m의 매입말뚝 5본이 시공되었다. 현장계측을 통해 시공단계에 따라 말뚝지지 전면기초의 하중-침하량 관계를 확인할 수 있었고, 극한하중조건에서 말뚝의 하중분담률은 약 70%에 수렴하였다. 기초의 침하량이 증가함에 따라 말뚝의 하중분담률이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 하부 지반인 풍화토의 주면마찰력이 크게 영향을 주었기 때문으로 판단된다. 현장계측 결과를 이용하여 하중전이분석을 수행하였으며, 이를 통해 말뚝-지반 사이의 비선형 하중전이곡선을 산정하고 하중전이기법을 이용한 수치해석 결과에 적용하였다.

**Keywords :** Piled raft foundations, Load sharing, Field measurement, Load-transfer curve, Load-settlement

1 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof, Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-2807, Fax: +82-2-2123-8378, [soj9081@yonsei.ac.kr](mailto:soj9081@yonsei.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

2 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ.)

3 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ.)

4 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

말뚝지지 전면기초는 일반적인 군말뚝 기초와 달리 전면기초와 말뚝이 하중을 분담하며, 상부구조물의 사용성을 저해할 수 있는 침하(부등침하)를 감소시키는 경제적 개념의 기초형식으로 최근 수십 년 동안 그에 대한 활용이 유럽지역을 중심으로 증대되고 있다(Burland et al., 1977; Randolph, 1994; Katzenbach et al., 2000; Poulos, 2001; Mandolini, 2005; Jeong and Cho, 2012).

Poulos(1991)는 말뚝지지 전면기초를 적용하기 적절한 지반과 그렇지 않은 지반에 대해 보고하였으며, 이상적인 지반으로는 매트하단이 단단한 점토와 조밀한 사질토층인 경우로 말뚝의 지지력을 발휘하는 것에 도움을 줄 수 있으며, 말뚝지지 전면기초를 적용하기 적절하지 않은 지반으로는 연약한 점토, 느슨한 모래로 전면기초가 충분한 지지력을 발휘하지 못하기 때문이다. 또한 상부의 압축성이 큰 토층은 장기 침하로 인하여 전면기초의 강성 발휘에 어려움이 발생 할 수 있으며, 압밀침하가 발생하는 지반이나 swelling이 발생할 수 있는 지반은 전면기초와 지반 사이의 접지압이 감소하여 말뚝에 전달되는 하중이 커지면서 침하량이 증가하게 되는 문제점이 있다고 보고되었다(Poulos, 2001).

Randolph(1994)는 말뚝지지 전면기초의 설계시 크립의 발생으로 극한하중의 70~80%를 말뚝이 지지하며, 이 경우 전면기초와 지반 사이의 접지압이 지반의 선형압밀하중 이하로 감소되기 때문에 나머지 20~30%의 하중은 전면기초가 분담한다고 보고하였다. 말뚝지지 전면기초의 설계에서는 말뚝의 하중분담률( $\alpha_{pr}$ )이 중요한 요소이며, 말뚝지지 전면기초의 거동은 전면기초-말뚝-지반 사이의 상호작용에 의해 결정되며, 지반의 종류, 말뚝의 지름, 말뚝 개수, 말뚝 배열, 압반근입 여부 등의 요인에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 말뚝의 하중분담률은 침하량, 상부 지반의 강도, 전면기초의 두께 및 말뚝 간격이 클수록 감소하는 경향을 보였으며, 말뚝이 암반에 근입된 경우에는 말뚝의 선단지지력이 증가하여 말뚝의 하중분담률이 증가하였다(Katzenbach et al., 2000; Poulos, 2001; Mandolini, 2005; Jeong and Cho, 2012).

이에 본 연구에서는 국내 실정에 맞는 말뚝지지 전면기초의 거동을 확인하고 하중분담률을 분석하기 위해 국내의 전형적인 지반으로 구성된 현장을 선정하여 말뚝지지 전면기초를 시공하고 현장계측을 수행하였다.

현장계측은 풍화토 지반에 시공된 OO기관 제 4공학관의 말뚝지지 전면기초를 시공단계에 따라 수행되었다. 현장계측을 통하여 하중-침하량 관계를 확인 하였고, 말뚝과 전면기초의 시공단계에 따른 하중분담률을 확인 하였다. 또한, 계측을 통한 축하중 분포도를 이용하여 현장 t-z 및 q-w의 하중전이곡선을 도출하였으며, 하중전이기법을 이용한 해석기법에 적용하여 현장계측값과 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 말뚝지지 전면기초의 하중분담률 특성

말뚝지지 전면기초의 하중분담률에 관한 연구는 모형실험, 현장실험, 수치해석, 현장계측 등의 방법으로 많은 연구자들에 의하여 수행되었다. 사질토 지반에 대하여 국외의 경우 모형토조를 이용한 다양한 연구가 수행되었으며 국내의 경우도 주로 모형토조를 이용한 사질토 지반에 대한 연구가 수행되었다(Kim et al., 2002; Lee et al., 2003; Kwon et al., 2005). Poulos(1994)는 수치해석을 통하여 무리말뚝의 거동에 관한 연구를 수행하였으며, 말뚝개수, 길이 및 직경이 증가하면 래프트의 하중분담이 감소한다고 보고하였다. Yamashita et al.(1993)은 수치해석과 대규모실험을 통하여 공사초기에는 전면기초가 하중을 많이 분담하지만, 공사가 진행됨에 따라 말뚝의 하중분담이 증가하여 최대 49% 정도로 증가한다고 보고하였다. Chow and Tech(1990)는 수치해석을 통하여 균일한 지반이 이층지반보다 래프트의 하중분담이 작은 것으로 언급하였다. Cooke et al.(1981)은 현장계측을 실시하여 래프트가 공사초기에 45%정도 하중을 분담하지만, 완료시에는 25%정도로 감소한다고 언급하였다. Horikoshi and Randolph(1996)는 점성토 지반에서 원심모형실험을 실시하여 말뚝의 개수와 시공기간 등에 따라 래프트의 하중분담이 변화한다고 보고 하였다.

말뚝지지 전면기초의 거동특성에 영향을 미치는 요소는 무리말뚝기초, 전면기초, 지반특성에 의해 결정되며, 기존 연구는 이들의 상호작용을 정량화하여 작용하중에 대한 전면기초, 말뚝기초 각각에 대한 하중분담 특성 및 극한지지력에 대한 연구결과가 주로 포함되어 있다(Poulos, 2001; Randolph, 1994; Katzenbach et al., 2000). 말뚝지지 전면기초는 무리말뚝-지반-무리말뚝, 무리말

뚝-지반-전면기초 사이의 상호작용이 각각 발생하며, 무리말뚝의 깊이, 전면기초의 폭, 무리말뚝간격 등에 따라 지지력특성이 변화하게 된다(Liu et al., 1985).

Kishida and Meyerhof(1965)에 의하면, 비접촉 무리말뚝 조건의 전체 지지력은 말뚝의 개별적인 항복, 또는 무리말뚝 전체가 하나의 말뚝형태로서 거동하는 형태의 항복하중으로 결정할 수 있고, 말뚝지지 전면기초의 지지력은 비접촉 무리말뚝의 지지력과 전면기초의 영향을 고려하여 결정할 수 있는데, 전면기초의 영향은 전체 지지력과 전면기초가 말뚝선단 지지력에 미치는 상재하중의 역할로서 고려할 수 있다고 하였다.

## 2.2 해석적 방법

말뚝지지 전면기초의 해석은 말뚝과 기초판 간의 복잡한 상호작용에 대한 이해부족과 해석시간이 오래 걸리는 등의 문제로 인해 기초판의 지지효과를 무시하여 단순하게 해석하는 간편법을 주로 사용하여 왔다. 그러나 최근에는 컴퓨터시스템의 발전과 많은 연구결과들을 토대로 기초판의 지지효과와 말뚝지지 전면기초의 보잡한 상호작용의 영향이 고려된 보다 정확한 해석방법들이 제시되고 있으며(근사해석법 및 엄밀해석법), 국내에서도 유전자알고리즘을 이용한 최적설계에 관한 연구가 시도된 바 있다(Kang et al., 2001; Kim et al., 2002). 최근 기존의 설계에서 고려하지 않았던 상부구조물-기

초-지반의 상호작용을 고려하면서 분리해석을 통하여 일체해석과 유사한 정밀성을 확보할 수 있는 상호작용 설계기법이 반영된 근사적 해석기법인 YSPR을 제안하였다(Jeong et al., 2012). 이를 포함한 해석기법은 다음 Table 1에 정리되어 있다.

## 2.3 현장계측 및 실험 사례

국외에서는 현장 계측 사례가 다수 진행되었으며, Van Impe and De Clerq(1994)는 점토지반에서 수행하였으며, 말뚝의 하중분담률은 73%로 확인되었고, Yamashita et al.(1993)는 수치해석과 대규모시험을 통하여 공사초기에는 전면기초가 하중을 많이 분담하지만, 공사가 진행됨에 따라 말뚝의 하중분담이 증가하여 최대 49% 정도로 증가한다고 보고하였다. Cooke et al.(1981)은 말뚝의 하중분담률이 77%로 확인되었고, Sommer et al.(1991)은 55%로 나타났다. Jendeby(1986)는 House 2와 Uppsala house에서의 계측 결과 말뚝의 하중분담률이 각각 34%와 36%로 확인하였으며, Katzenbach et al.(2000)는 말뚝의 하중분담률이 30~80%까지 다양하게 분포하는 것을 확인하였다. Hooper(1979)는 말뚝의 하중분담률이 61~71%로 계측되었으며, Mandolini et al.(2005)는 말뚝의 하중분담률이 50%로 전면기초와 비슷하게 분담하는 것으로 확인되었다(Table 2).

국내의 경우 Kim et al.(2002)이 축소모형시험 통해

Table 1. Representative numerical methods (Cho, 2013)

Types	References
Simplified methods	Poulos and Davis (1980), Randolph (1983, 1994), Burland (1995)
Approximate computer-based methods	Poulos (1991), Clancy and Randolph (1993), Poulos (1994), Russo (1998), Lee et al. (2007), Jeong et al. (2012)
More rigorous computer-based methods	<b>Boundary Element (BE) method</b> Butterfield and Banerjee (1971), Kuwabara (1989), Sinha (1997)
	<b>Combined BE and Finite Element (FE) method</b> Hain and Lee (1978), Franke et al. (1994), Russo and Viggiani (1998), El-Mossalamy and Franke (1998), Kim et al. (2000) - Finite layer theory Ta and Small (1996), Zhang and Small (2000), Chow et al. (2001)
	<b>2D FE method</b> - Plane strain model Desai (1974), Prakoso and Kulhawy (2001) - Axi-symmetric model Hooper (1974)
	<b>3D FE method</b> Wang (1995), Katzenbach et al. (1998), Reul and Randolph (2003, 2004), de Sanctis and Mandolini (2006), Kim et al. (2009), Lee et al. (2010), Cho et al. (2012)

침하량 비, 전면기초의 강성, 말뚝의 간격에 따른 말뚝과 전면기초의 하중분담비에 대해 수행하였다. 추가적으로 말뚝기초의 하중전달률은 말뚝의 간격과 전면기초의 강성 증가에 따라 감소하는 것으로 확인되었다. 최종적으로 말뚝기초의 하중분담률은 말뚝간의 간격보다 전면기초의 강성에 더 큰 영향을 받는다고 연구되었다.

Park et al.(2012)은 원심모형시험을 통해 무리말뚝과 말뚝지지 전면기초의 축하중 거동에 대해서 비교하였다. 사질토와 점토 지반조건에 대하여 실험을 수행하였으며, 변위제어를 통해 침하량이 증가함에 따라 말뚝지지 전면기초의 거동을 분석하였다. 또한 말뚝지지 전면기초의 지지력은 조밀한 사질토에서는 무리말뚝보다 13%, 느슨한 모래에서는 22%, 조밀한 점토에서는 30%, 연약

한 점토에서는 22%가 크게 나타났다고 보고하였다.

말뚝지지 전면기초의 경우 국외의 경우 현장계측 사례가 수행되었지만, 국내의 경우 말뚝지지 전면기초에 대한 연구는 주로 실내실험 및 해석적으로 수행되었다 (Table 3).

### 3. 현장계측

#### 3.1 현장 개요

말뚝지지 전면기초의 하중분담률을 확인하기 위해 수행된 00기관의 제 4 공학관 시공 현장에서 현장계측을 시공 단계별로 수행하였다(Roh 2017). 현장 지반조사는

Table 2. Case histories with observation of the load sharing (Mandolini et al., 2005)

Case	Reference	Structure	s/d	Ag/A	Raft load (%)	L/B
1	Van Impe and De Clerq (1994)	Multispan bridge	3.8	0.70	27	1.00
2	Yamashita et al. (1993)	Building Urawa	8.0	0.90	51	0.64
3	Cooke et al. (1981)	Stonebridge park	3.6	0.90	23	0.65
4	Sommer et al. (1991)	Messe Turm	6.4	0.83	45	0.52
5	Joustra et al. (1977)	Apartment block	5.2	0.90	22	0.70
6	Hight and Green (1976)	Dashwood house	3.0	0.90	19	0.50
7	Jendeby (1986)	House 1	6.5	0.90	8	2.10
8	Jendeby (1986)	House 2	10.5	0.90	66	2.20
9	Russo (1996)	Uppsala house	11.2	0.90	64	2.20
10	Katzenbach et al. (2000)	Garigliano Bridge	3.0	0.88	20	4.50
11	Katzenbach et al. (2000)	Messe Torhaus	3.5	0.80	20	1.14
12	Katzenbach et al. (2000)	Westend 1 -DG Bank	6.0	0.52	50	0.63
13	Katzenbach et al. (2000)	Japan Centre	5.5	0.45	60	0.60
14	Katzenbach et al. (2000)	Forum	6.0	0.55	62	0.70
15	Katzenbach et al. (2000)	Congress Centre	5.8	0.62	60	1.00
16	Katzenbach et al. (2000)	Main tower	3.3	0.70	45	0.50
17	Katzenbach et al. (2000)	Eurotheum	5.2	0.55	70	0.80
18	Katzenbach et al. (2000)	Treptowers	6.5	0.86	52	0.38
19	Hooper (1979)	National Westminster Bank	3.8	0.91	29	0.50
20	Hooper (1979)	Hide Park Cavalry Barracks	4.3	0.72	39	0.90
21	Mandolini et al. (2005)	Tank 12 Harbour Napoli	5.8	0.82	50	0.92
22	Mandolini et al. (2005)	Tank 14 Harbour Napoli	5.0	0.82	46	1.10

Table 3. Summary of experimental study on piled raft (Cho, 2013)

Country	Laboratory model test	Centrifuge model test
Foreign	Akinmusuru (1980)	Thaher and Jessberger (1991)
	Cooke (1986)	Horikoshi and Randolph (1996)
	Phung (1993)	Conte et al. (2003)
Korea	Lee et al. (2000), Kim et al. (2002)	Park et al. (2009)
	Lee et al. (2003)	Park et al. (2012)
	Kwon et al. (2005)	Nguyen et al. (2013)

현장에서 인접한 총 2공(NBH-1, NBH-2)에서 수행되었으며, 시추공을 통하여 지반 층서를 확인하고, Table 4와 같이 탄성파탐사, 실내물성시험 및 SPT 결과를 이용하여 지반물성을 산정하였다. Fig. 1은 00기관에 시공된 높이 41m의 제 4공학관의 정면도와 지반조사 결과인  $N_{SPT}$  값을 보여주고 있다. Fig. 2는 전면기초의 평면도로 3.1m × 3.1m의 전면기초와 5 본의 강관말뚝( $D=508\text{mm}$ ,  $t=14\text{mm}$ )이 상부하중을 분담하도록 설계되었다. Fig. 3은 계측현장의 평면도로 말뚝 간격은 900mm로 일정하며, 지층은

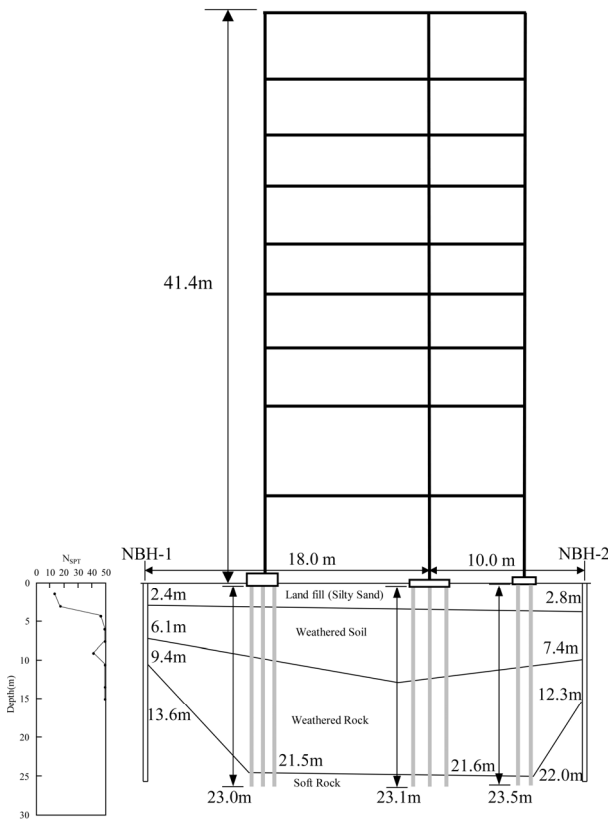


Fig. 1. Profile view and  $N_{SPT}$

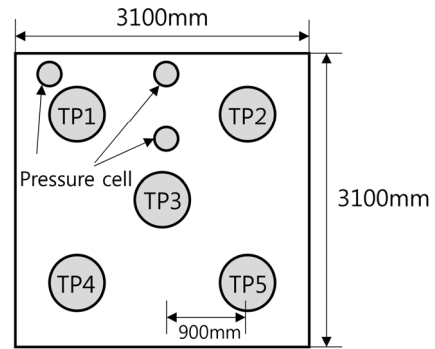


Fig. 2. Configuration of pile

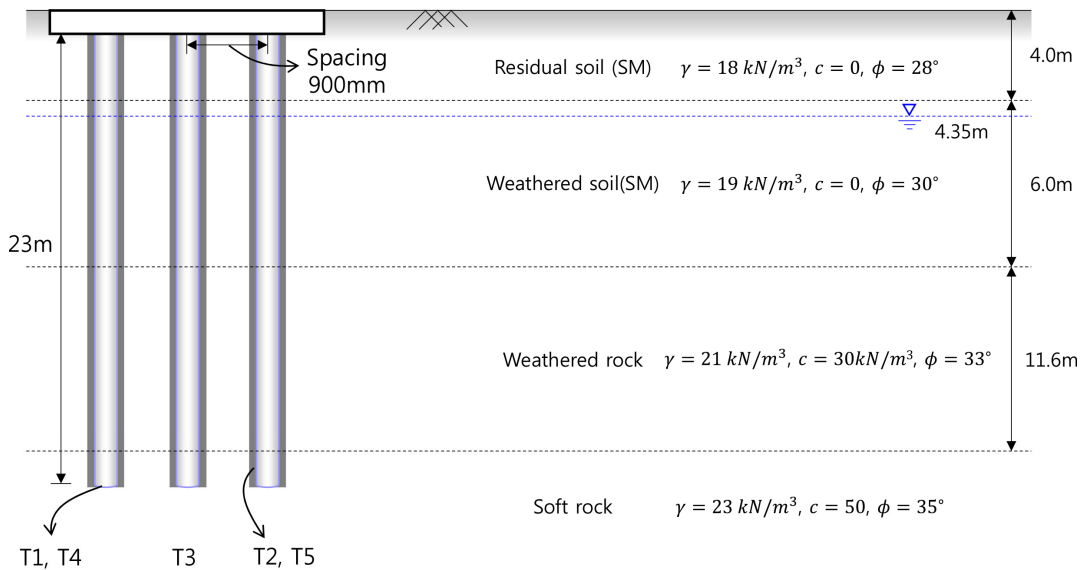


Fig. 3. Analytical modeling conditions

Table 4. Physical properties of in-situ soil

Type	USCS	Unit weight, $\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion $c$ (kPa)	Friction angle $\phi$ (deg)	*Young's Modulus $E$ (MPa)	Poisson's ratio, $\nu$
Residual soil	SM	18.0	0	28	26	0.45
Weathered soil	SM	19.0	0	30	33	0.4
Weathered rock	W.R	21.0	30	33	150	0.35
Soft rock	S.R	23.0	50	35	500	0.3

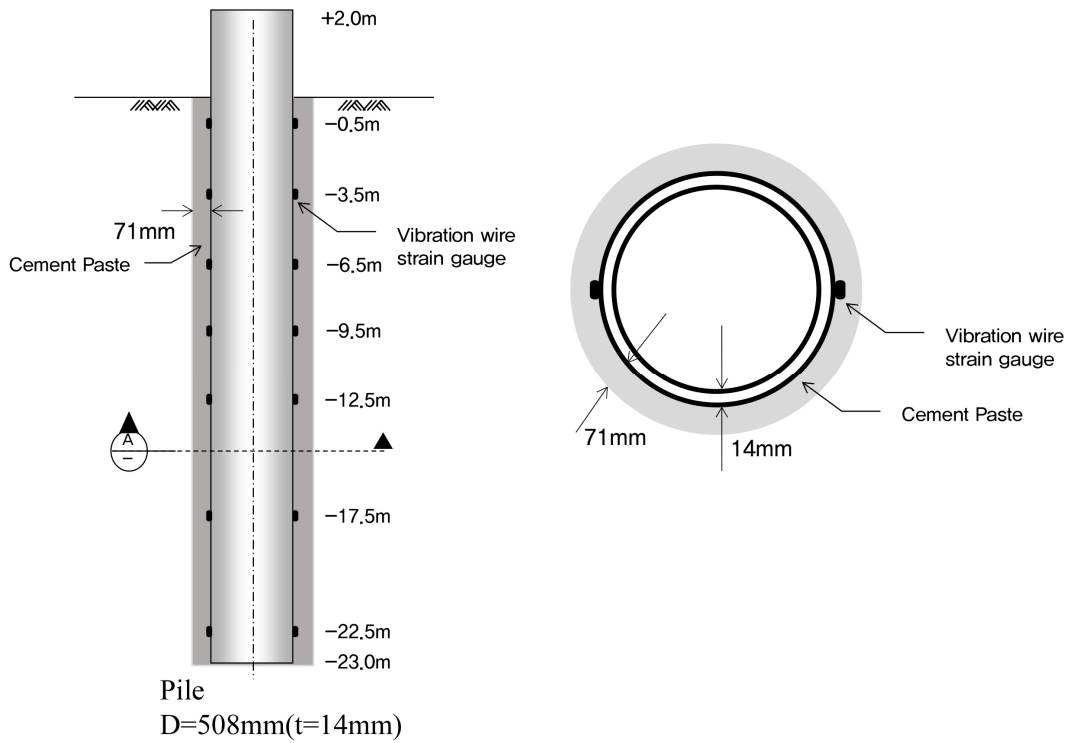


Fig. 4. A schematic representation of instrumented piles

풍화암층이 11.6m로 가장 두텁게 이루어져 있으며, 나머지 층은 매립층, 풍화토, 연암이 분포하고 있다.

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 하중분담률을 분석 또는 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 각 23m 길이의 말뚝에 좌우로 7개씩 5본의 말뚝에 총 70개의 변형률계를 부착하여 계측결과를 분석하였으며, 전체 하중은 상

부 기둥하중에 부착된 변형률계 계측값을 바탕으로 산정하였다(Fig. 5). 또한 전면기초 하단에 토압계를 설치하여 계측하였으나 정상적으로 계측이 이루어지지 않아 본 연구에서는 말뚝의 변형률계 데이터를 이용하여 분석하였다(Roh, 2017).

### 3.2 계측결과

Fig. 6은 시공 단계별 하중-침하곡선과 상부 기둥하중 현장계측값의 결과를 나타내고 있으며, 시공 단계는 구

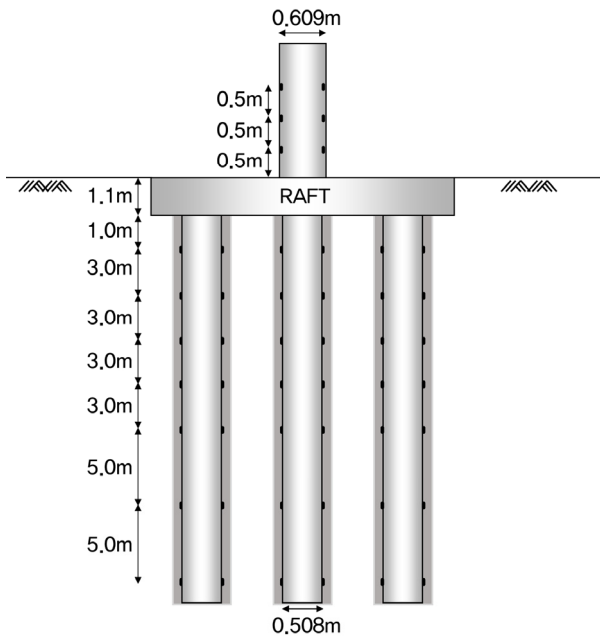


Fig. 5. A schematic representation of piled raft and column

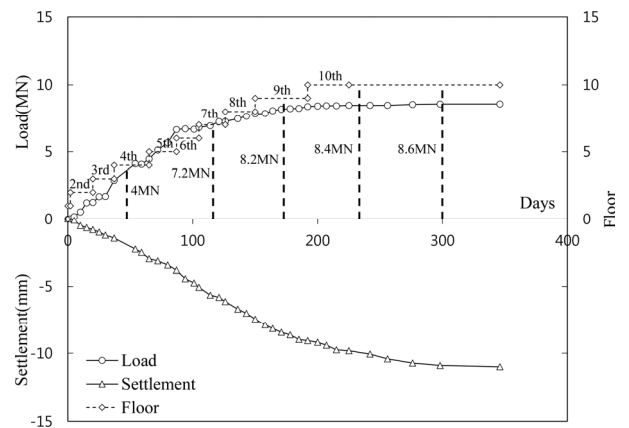


Fig. 6. Observed time-dependent Load-settlement curve and load (Roh, 2017)

조물의 층수로 1층에서 10층까지 변화함에 따라 진행되었다. 이 때, 하중-침하 계측은 시공시작부터 시공완료까지 대략 1년여 동안 계측된 데이터이며, 초기 7mm까지는 선형적으로 증가하다가 최종 11mm까지 침하된 것을 확인하였다. Fig. 7과 같이 전체 하중과 말뚝이 부담하는 하중을 함께 도시하면, 비교적 작은 침하량(0~5mm)에서는 말뚝의 하중분담이 적게 받는 반면 최대 침하량(10mm)에서는 초기에서 보다 증가 하여 대략 6 MN의 하중을 받는 것을 확인하였다. Fig. 8은 말뚝의 하중분담률( $\alpha_{pr}$ )을 나타낸 결과로 초기 하중분담률( $\alpha_{pr}$ )은 30%에서 시작하여 최종 침하에서는 하중분담률( $\alpha_{pr}$ )이 약 70%까지 증가하는 것을 확인하였다. 기존연구 결과 국외의 경우 일반적으로 50~70% 정도로 나타났으

나, 국내의 경우 70% 전후로 나타났는데 이는 국내 현장지반이 풍화토 및 풍화암을 주로 이루며 말뚝의 선단은 대부분 암반에 근입시키므로 국외의 점토지반인 경우에 비하여 말뚝의 하중분담률이 크게 발생한 것으로 판단된다. 현장계측 결과, 초기하중조건에서 말뚝의 하중분담률이 총 하중에 비해 다소 작게 나타났으며, 이는 원지반의 SPT 결과로부터 깊이 5m 이상에서 나타나는 견고한 풍화토 지반에 비해 상부지반의 강도가 작기 때문에 하중이 증가함에 따라 상부의 주면마찰력이 항복 상태가 되면서 하부지반에서 주면마찰력과 선단지지력이 크게 발현되었기 때문으로 판단된다.

### 3.3 하중전이분석

#### 3.3.1 하중전이곡선 도출

Fig. 9는 재하하중 별 축력분포를 나타내고 있으며, 총 5개의 말뚝 중 대표적으로 기초의 중심부 (TP-3)와 모서리부 (TP-1)의 축력분포를 도시하였다. 모서리부의 경우 동일 높이에서 축력분포가 각 말뚝에 따라 서로 다르게 나타났으나 본 연구에서는 대표적으로 TP-1의 계측 결과를 활용하여 하중전이곡선을 도출하였다. TP-1의 경우 초기하중부터 일정한 크기로 증가하여 최종 계측인 300일째에는 총 1.2MN 정도의 축하중을 받아 선단까지 전이를 하였고, TP-3의 경우 TP-1에 비해 20% 정도 적은 약 0.9MN의 최종축하중을 받는 것으로 확인되었다. 축하중 분포도에서 두 말뚝 모두 공통적으로 선단에서는 하중을 거의 받지 않는 것으로 확인되었다. 이는 매입말뚝의 특성으로 초기에 주면마찰력이 모두 발현이 되고 나서 선단이 발휘되는 것으로 사료된다. 또한, 하부지반인 풍화토의 주면마찰력이 시공 완료단계까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 영향으로 침하량이 증가함에 따라 말뚝의 하중분담률( $\alpha_{pr}$ )이 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 10과 11은 현장 변형률계 계측값을 분석하여 산정된 하중전이분석 결과를 도시한 것으로, 말뚝지지 전면기초의 중심부 (TP-3)와 모서리부 (TP-1)의 하중전이곡선이다. 주면하중전이곡선(t-z curve)은 TP-1의 경우 TP-3보다 비교적 크게 나타났으며, 선단지지력의 경우 TP-1과 TP-3의 단위선단지지력의 값은 비슷한 경향을 갖는 것으로 나타났다. 하중전이곡선을 이용한 말뚝지지 전면기초의 해석에는 회귀분석한 결과를 적용하였으며, 이는 해석 결과의 일관성을 확보하기 위함이다.

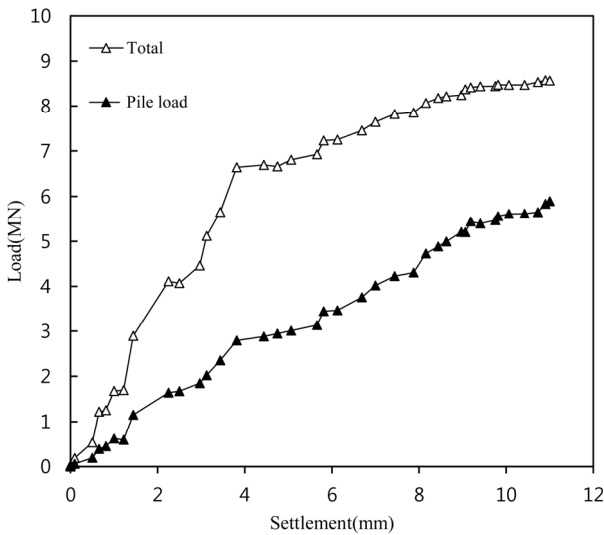


Fig. 7. Load sharing of piles (Roh, 2017)

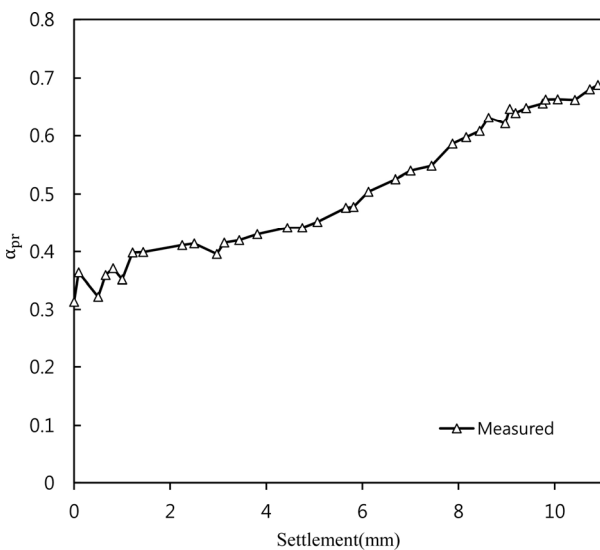
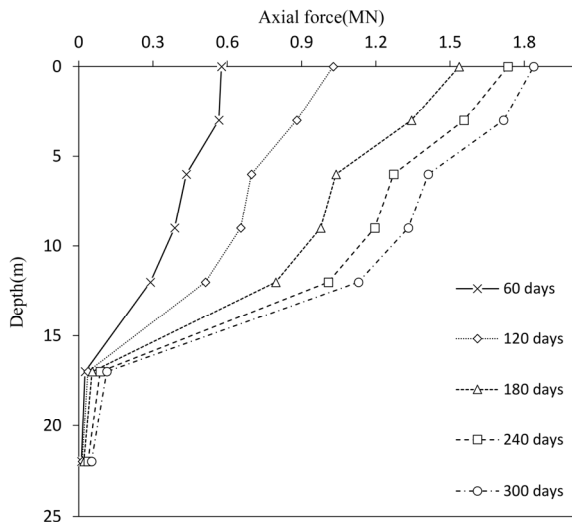
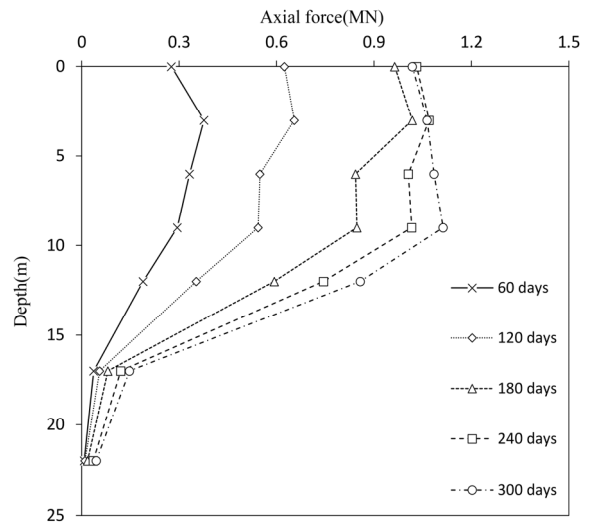


Fig. 8. Load sharing ratio of piles (Roh, 2017)

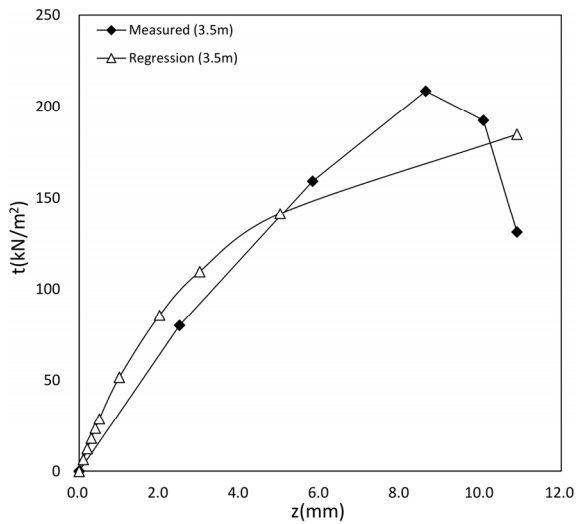


(a) TP-1

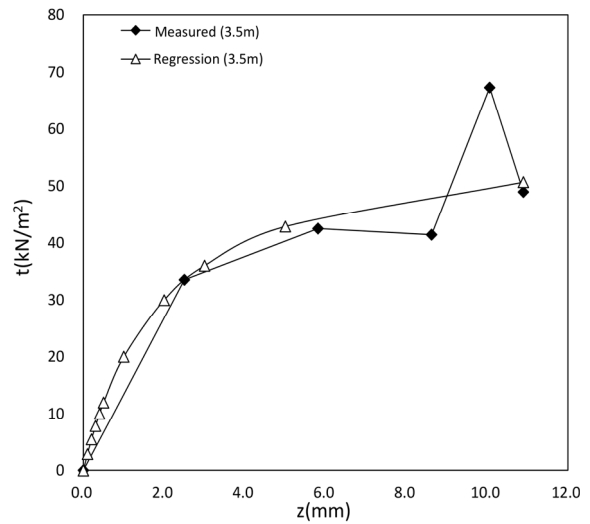


(b) TP-3

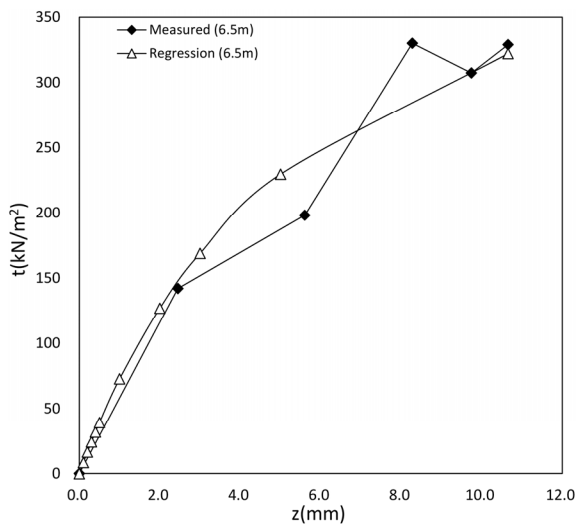
Fig. 9. Axial force distribution diagram (TP-1, TP-3) (Roh, 2017)



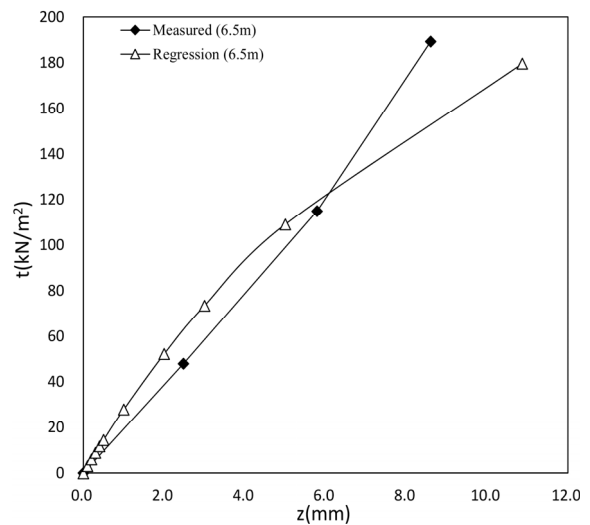
(a) 3.5 m (TP-1)



(b) 3.5 m (TP-3)



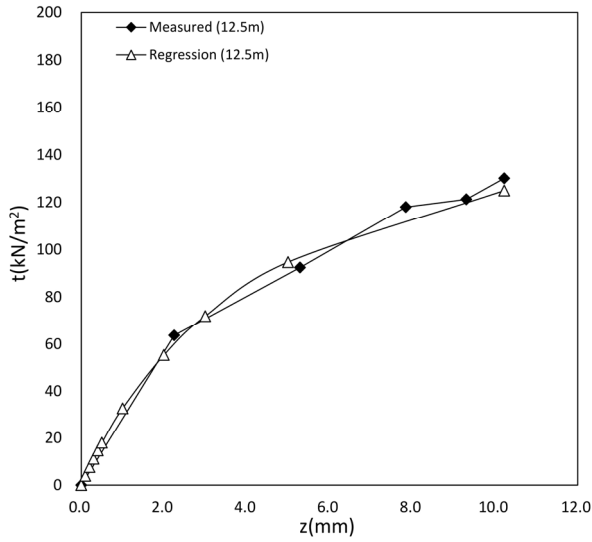
(c) 6.5 m (TP-1)



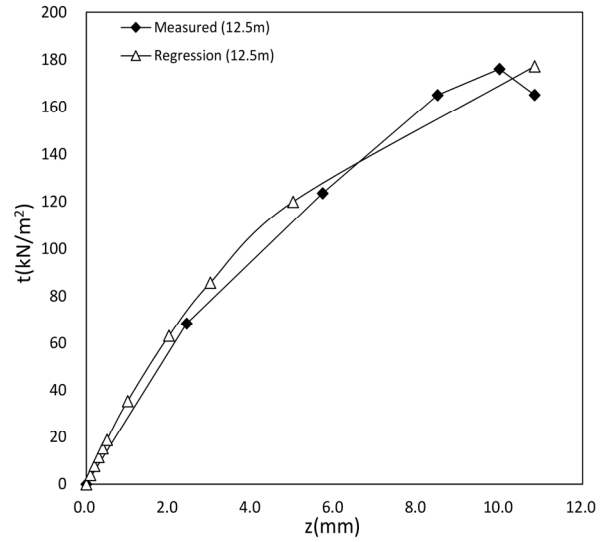
(d) 6.5 m (TP-3)

Fig. 10. t-z load-transfer curves of test pile (TP-1, TP-3)

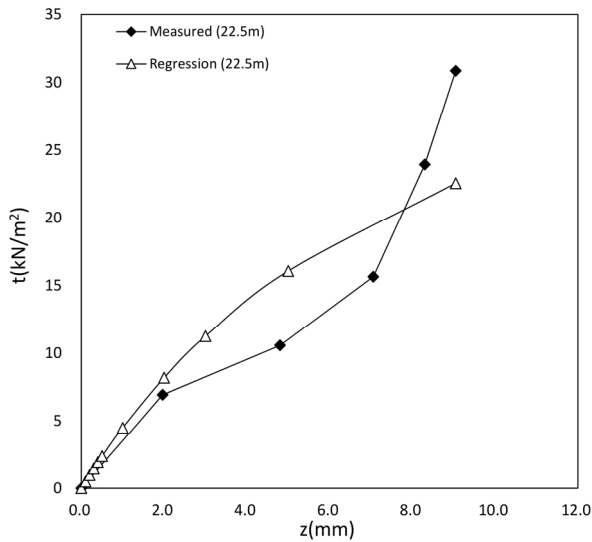




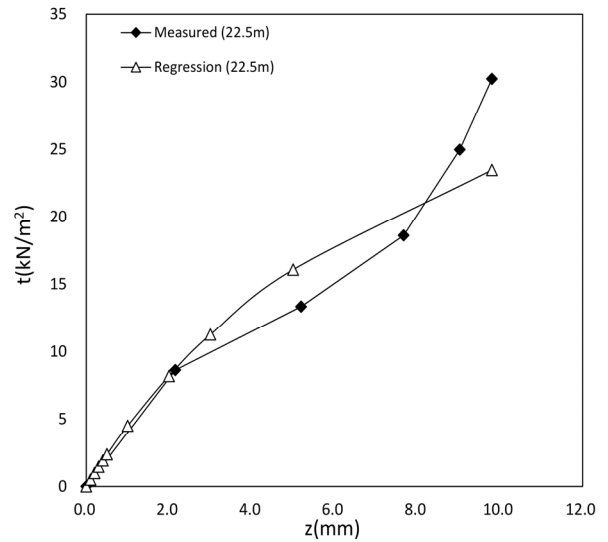
(e) 12.5 m (TP-1)



(f) 12.5 m (TP-3)



(g) 22.5 m (TP-1)



(h) 22.5 m (TP-3)

Fig. 10. t-z load-transfer curves of test pile (TP-1, TP-3) (Continued)

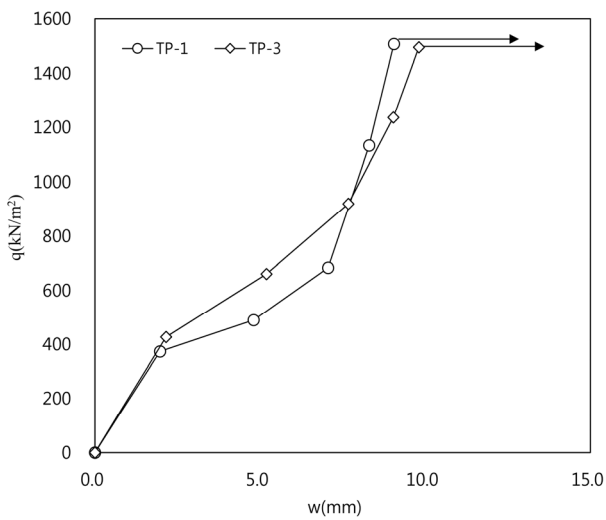


Fig. 11. q-w Load-transfer curves of test piles (TP-1, TP-3)

즉, 지반의 변형이 증가함에 따라 응력이 비선형으로 증가하도록 쌍곡선 함수 형태의 하중전이 곡선을 적용하였다. 선단하중전이곡선( $q-w$  curve)은 각 말뚝에서 유일하게 계측된 값이므로 회귀분석을 수행하지 않고 Fig. 11과 같이 계측 결과로부터 산정된 실제 값을 그대로 적용하였다.

### 3.3.2 현장 하중전이곡선을 적용한 수치해석

본 연구에서는 Jeong et al.(2012)이 제안한 3차원 근사적 해석기법인 YSPR을 이용하여, 앞 절에서 도출된 현장 하중전이곡선을 적용한 수치해석을 수행하였다. Jeong et al.(2012)는 전면기초의 거동을 고려하기 위해 평면 셀요소를 이용하고, 말뚝-지반 및 전면기초-지반의 비

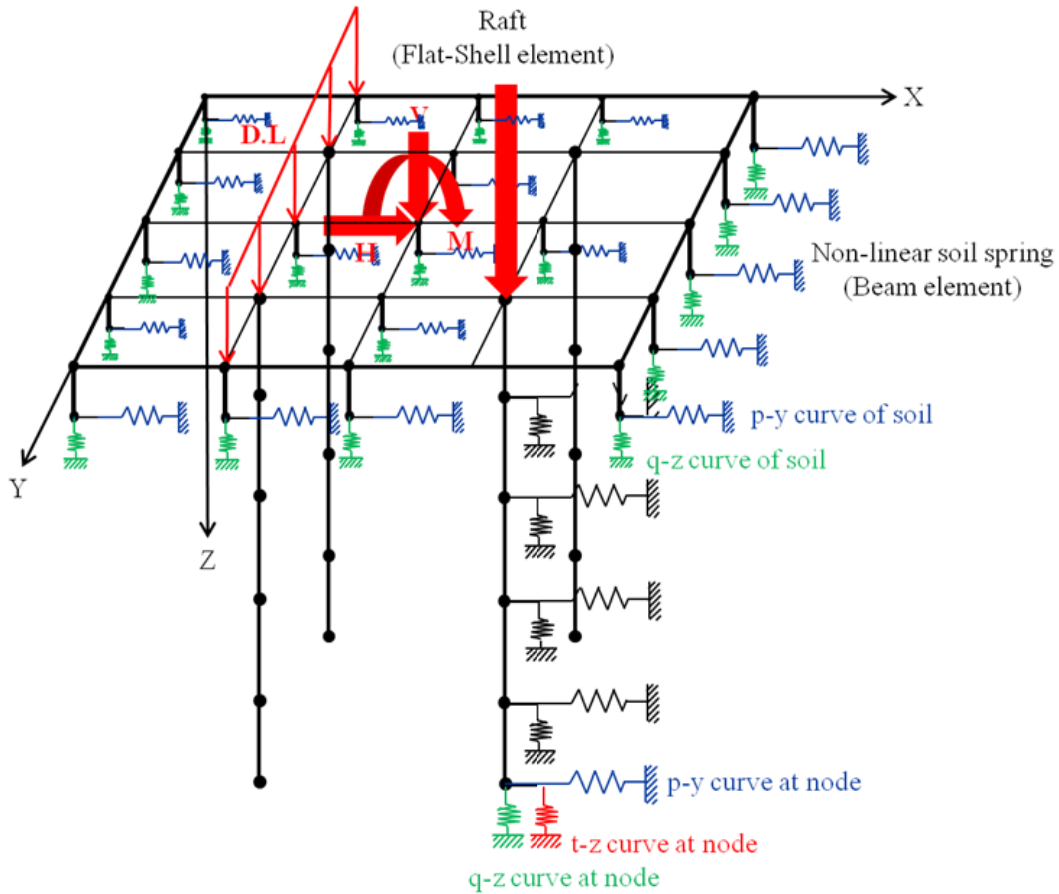


Fig. 12. Piled raft analysis method (Jeong et al., 2012)

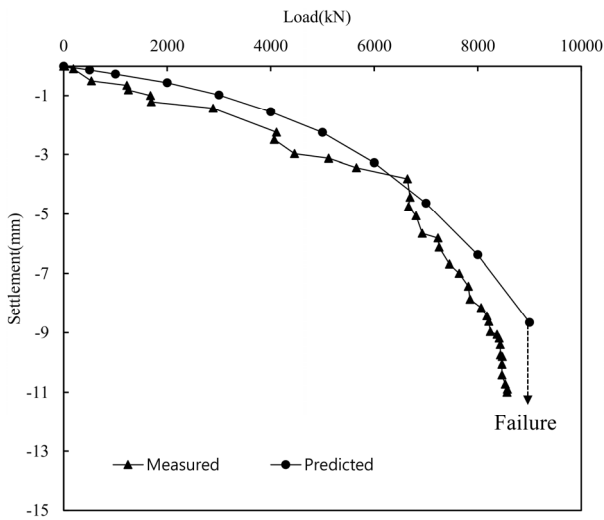


Fig. 13. Load-settlement curves

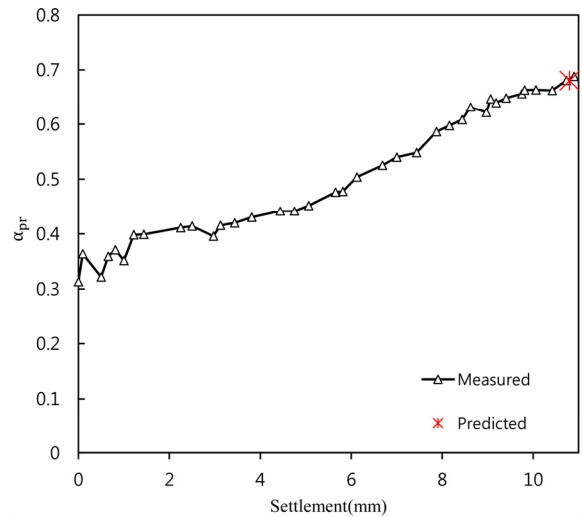


Fig. 14. Load-sharing ratio curves

선형 상호작용을 고려하기 위해 비선형 하중전이함수를 적용하였다(Fig. 12). 말뚝-지반 사이의 비선형 상호작용을 정의하는 하중전이함수에 앞서 산정된 현장 하중전이곡선을 적용하였으며, 해석결과 현장계측의 하중-침하 결과와 비슷한 경향을 보였다(Fig. 13). 극한하중

조건에서 현장계측값과 하중전이를 반영한 해석기법을 이용한 결과 말뚝 하중분담률은 약 70%로 수렴하는 유사한 경향을 보였으며(Fig. 14), 말뚝이 받는 하중 역시 최종하중에서 비슷한 값을 나타내었다(Fig. 15).

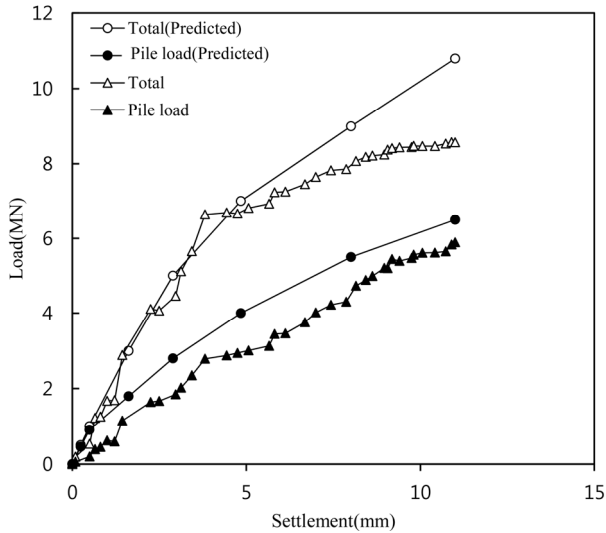


Fig. 15. Load-sharing of piles

#### 4. 결론

본 연구에서는 말뚝지지 전면기초의 하중분담률 및 거동분석을 위해 시공단계 별 현장계측을 수행하였다. 현장계측은 시공시작일 부터 약 300일 동안 수행되었으며, 사용된 말뚝지지 전면기초는 3.1m×3.1m 크기의 전면기초와 길이 23m 직경 0.508m의 매입말뚝 5본이 시공되었다. 현장계측 결과로부터 말뚝지지 전면기초의 하중-침하량 관계, 시공단계별 말뚝의 축력분포 및 하중분담률을 확인하였으며, 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 말뚝지지 전면기초의 하중분담률을 분석하기 위하여 현장계측을 수행하였으며, 하중-침하량 관계를 시공단계별로 말뚝의 축하중 분포도 및 말뚝의 하중분담률을 확인할 수 있었다. 이는 풍화토-풍화암-연암으로 이루어진 전형적인 국내의 지반의 특성을 반영한 말뚝지지 전면기초의 하중분담률로 판단된다.
- (2) 현장계측결과 침하량이 증가함에 따라 말뚝의 하중분담률이 증가하는 것으로 보였으며, 기존 연구의 결과와 반대되는 경향을 확인하였다. 또한, 말뚝의 축하중분포를 분석한 결과 하부지반인 풍화토의 주변마찰력이 시공 완료단계까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이러한 영향으로 침하량이 증가함에 따라 말뚝의 하중분담률( $\alpha_{pr}$ )이 증가하는 것으로 판단된다.
- (3) 말뚝의 하중분담률은 극한하중단계에서 약 70%로

수렴하였으며, 계측 결과로부터 도출된 현장 하중전이곡선을 적용한 수치해석 결과와 유사한 경향을 보였다. 이로부터 본 연구에서 수행된 현장계측 결과가 말뚝-지반 사이의 하중전이효과를 잘 반영하였다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030040, 2014R1A2A1A11054606)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참고문헌 (References)

1. Brown, P. T. and Weisner, T. J. (1975), "The Behaviour of Uniformly Loaded Piled Strip Footings", *Soils and Foundations*, Vol.15, No.4, pp.13-21.
2. Burland, J. B., Broms, B. B., and De Mello, V.F.B. (1977), "Behaviour of Foundations and Structures", *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, Vol.2, pp.495-549.
3. Cho, J. Y. and Jeong, S. S. (2012), "Development of Three-dimensional Approximate Analysis Method for Piled Raft Foundations", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.4, pp.67-78.
4. Chow, Y. K. and The, C. I. (1991), "Pile-Cap-Pile-Group Interaction in Nonhomogeneous Soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.11, pp.1655-1668.
5. Clancy, P. and Randolph, M. F. (1993), "An Approximate Analysis Procedure for Piled Raft Foundations", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, London, Vol.17, No.12, pp.849-869.
6. Cooke, R. W., Bryden Smith, D. W., Gooch, M. N., and Sillet, D. F. (1981), "Some Observations of the Foundation Loading and Settlement of a Multi-storey Building on a Piled Raft Foundation in London Clay", *Proceedings. I.C.E.*, part 1, 70, pp.433-460.
7. de Sanctis, L. and Mandolini, A. (2003), "On the Ultimate Vertical Load of Piled Rafts on the Soft Clay Soils", *Proceedings of 4th International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles*, Ghent, Millpress, Rotterdam, pp.379-386.
8. Hain, S. J. and Lee, I. K. (1978), "The Analysis of Flexible Raft-pile Systems", *Geotechnique*, Vol.28, No.1, pp.65-83.
9. Hooper, J. A. (1979), "Review of Behaviour of Piled Raft Foundations", *CIRIA report n° 83*.
10. Horikoshi, K. and Randolph, M. F. (1996), "Centrifuge Modelling of Piled Raft Foundations on Clay", *Geotechnique*, Vol.47, No.5, pp.741-752.
11. Jendeby, L. (1986), "Friction Piled Foundations in Soft Clay. A Study of Load Transfer and Settlements", *Ph.D. Thesis*, Dept. Geotech. Eng. Chalmers University of Tech, Goteborg
12. Jeong, S. S., Lee, J. H., and Lee, C. J. (2004), "Slip Effect at the Pile-soil Interface on Dragload", *Computers & Geotechnics*,

- Vol.31, pp.115-126.
13. Katzenbach, R., Arslan, U., and Moormann, C. (2000), "Piled Raft Foundations Projects in Germany", *Design applications of raft foundations*, Hemsley, J. A. Editor, Thomas Telford, pp.323-392.
  14. Katzenbach, R., Schmitt, A., and Turek, J. (2005), "Assessing Settlement of High-rise Structures by 3D Simulations", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*.
  15. Kitiyodom, P. and Matsumoto, T. (2003), "A Simplified Analysis Method for Piled Raft Foundations in Non-homogeneous Soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27, pp.85-109.
  16. Kuwabara, F. (1989), "An Elastic Analysis for Piled Raft Foundations in a Homogeneous Soil", *Soils and Foundations*. Vol.28, No.1, pp.82-92.
  17. Kim, H. T., Kang, I. K., Park, J. J., and Park, S. K. (2002), "Laboratory Model Tests on Load Sharing Characteristics of Piled Raft Foundations Applied Vertical Loads on Sandy Soils", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.22, No.2, pp.111-120.
  18. Kwon, O. K., Oh, S. B., and Kim, J. B. (2005), "Experimental Study on the Load Sharing Ratio of Group Pile", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.5, pp.51-58.
  19. Lee, I. K. (1993), "Analysis and Performance of Raft and Raft-pile Foundations in a Homogeneous Soil", *Proceedings of 3rd International Conference on Case History in Geotechnical Engineering*, St Louis (also Research Report R133, ADFA, University of New South Wales, Australia).
  20. Lee, J. H. and Jeong, S. S. (2007), "Three Dimensional Numerical Analysis of Piled Raft on Soft Clay", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.5, pp.63-75.
  21. Lee, J. H., Kim, Y. H., and Jeong, S. S. (2010), "Three-dimensional Analysis of Bearing Behavior of Piled Raft on Soft Clay", *Computers & Geotechnics*, Vol.37, pp.103-114.
  22. Lee, S. H., Park, Y. H., and Song, M. J. (2007), "A Practical Analysis Method for the Design of Piled Raft Foundations", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.12, pp. 83-94.
  23. Mandolini, A., Russo, G., and Viggiani, C. (2005), "Piled Foundations: Experimental Investigations, Analysis and Design", *State-of-the-Art Rep. Proc., 16th ICSMGE*, Osaka, Japan, Vol.1, pp.177-213.
  24. Ottaviani, M. (1975), "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Vertically Loaded Pile Groups", *Geotechnique*, 25, pp.159-174.
  25. Park, D. G., Choi, K. J., Kim, D. W., Chung, M. K., and Lee, J. H. (2012), "Analysis of Piled Raft Capacity Increase with Centrifuge Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.8, pp.43-53.
  26. Poulos, H. G. (1991), "Analysis of Piled Strip Foundations", *Proceedings of Conference on computer methods and advances in geomechanics*, Rotterdam: Balkema, pp.183-191.
  27. Poulos, H. G. (1994), "An Approximate Numerical Analysis of Pile-raft Interaction", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, London, Vol.18, No.2, pp. 73-92.
  28. Poulos, H. G. (2001), "Piled Raft Foundations: Design and Applications", *Geotechnique*, 51, pp.95-113.
  29. Randolph, M. F. (1983), "Design of Piled Foundations", *Research Report Soils TR143*. Cambridge: Cambridge University Engineering Department.
  30. Randolph, M. F. (1994), "Design Methods for Pile Groups and Piled Rafts", *Proceedings of 13th ICSMFE*, New Delhi, India, Vol.5, pp.61-82.
  31. Reul, O. and Randolph, M. F. (2003), "Piled Rafts in Overconsolidated Clay-Comparison of In-situ Measurements and Numerical Analyses", *Geotechnique*, Vol.53, No.3, pp.301-315.
  32. Roh, Y. H. (2017), "Load Carrying Behavior of Piled Rafts with Varying Ground Water Level and Bed Rock Inclination", *Master's Thesis*, Yonsei university, Seoul.
  33. Sommer, H., Tamaro, G., and De Benedittis, C. (1991), "Messe Turm, Foundations for the Tallest Building in Europe", *Proceedings. 4th International Conf. on Piling and Deep Foundations*, Stresa, Balkema, Rotterdam, pp.139-145.
  34. Wang, A. (1996), "Three Dimensional Finite Element Analysis of Pile Groups and Piled -raft", Ph.D. dissertation, University of Manchester, U.K.
  35. Won, J. O. and Jeong, S. S. (2005), "Nonlinear Three-dimensional Analysis of Piled Piers Considering Coupled Cap Rigidities", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.6, pp. 19-30.
  36. Won, J. O., Jeong, S. S., Lee, J. H., and Jang, S. Y. (2006), "Nonlinear Three-dimensional Analysis of Pile Group Supported Columns Considering Pile Cap Flexibility", *Computers & Geotechnics*, Vol.33, pp.355-370.
  37. Yamashita, K., Kakurai, M., Yamada, T., and Kuwabara, F. (1993), "Settlement Behaviour of a Five Storey Building on a Piled Raft Foundation", *Proceedings. II Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles*, Van Impe W. Editor, pp.351-356.
  38. Zhang, G. M., Lee, I. K., and Zhao, X. H. (1991), "Interactive Analysis of Behaviour of Raft-pile Foundations", *Proceedings of Geo-Coast' 91*, Yokohama2, pp.759-764.

Received : August 2<sup>nd</sup>, 2017

Revised : August 19<sup>th</sup>, 2017

Accepted : August 23<sup>rd</sup>, 2017