

## 양방향재하시험을 활용한 암반근입 말뚝의 항복하중 판별방법

### Application of The Bi-Directional Pile Load Test for The Yield Capacity of Rock Socketed Pile

김종웅<sup>1)</sup>, Jong-Woong Kim, 장경준<sup>2)</sup>, Kyung-Jun Jang, 김학문<sup>3)</sup>, Hak-Moon Kim

<sup>1)</sup> 태조엔지니어링 사원, TESO Engineering

<sup>2)</sup> 단국대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

<sup>3)</sup> 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

**SYNOPSIS** : 말뚝의 정재하시험을 통하여 항복하중 및 극한하중을 판별하는 다양한 방법이 제안되어 왔다. 말뚝의 지지력은 주면마찰력과 선단지지력의 합으로 나타내어 왔으나 말뚝 재하시험을 통한 항복하중 및 극한하중의 판별법은 대체로 총 침하량에 대해 판별하거나 재하하중-침하 그래프로부터 산정되는 경우가 대표적이다. 본 연구에서는 현장 대구경 양방향 재하시험 결과를 활용하여 말뚝의 주면부와 선단부로 나누어 항복하중을 판별할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

**Keywords** : rock socketed pile, bi-directional pile load test, LogP-LogS metho, load distribution ratio

## 1. 서 론

두부압축재하시험은 사하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력시스템을 이용해야 하기 때문에 시험하중이 클 경우 재하용량의 한계와 현장의 적용이 불가한 경우 시험을 할 수 없는 경우가 발생한다. 양방향재하시험은 말뚝의 선단에 가압셀을 부착하여 주면마찰력과 선단지지력이 서로 반력으로 작용하도록 고안된 것으로 별도의 반력장치가 필요 없고 셀의 용량에 따라 큰 하중의 시험까지 가능하여 양방향재하시험의 사용이 증가하는 추세이다. 정재하시험을 통하여 항복하중을 산정하기 위한 여러 방법들이 제안되었다. 말뚝의 지지력은 주면마찰력과 선단지지력의 합으로 나타내어지며 정재하시험에 의한 총 하중(재하 하중)-침하(선단 침하)곡선을 분석하여 항복하중을 산정하거나 침하량으로 항복하중을 판별하고 있다. 상기 방법으로 항복하중을 결정하면 말뚝의 탄성변위가 없다고 가정하였을 경우 주면의 항복하중시 변위와 선단의 항복하중시의 변위가 동일할 때 말뚝의 항복이 발생하는가 하는 의문이 발생한다. 실제 주면의 항복하중 발생변위와 선단의 항복하중시의 변위가 동일해야 하는 결론이 나오지만 실제 주면의 지반조건과 주면면적, 선단의 지반조건과 선단면적이 상이하기 때문에 주면의 항복하중 발생 변위와 선단의 항복하중시의 변위가 동일한 경우보다 그렇지 못한 경우가 많다. 이에 주면과 선단의 하중분담율을 통하여 주면과 선단의 개별적 항복하중을 판별할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 재하시험의 분석방법

말뚝재하시험의 결과를 해석하기 위해서 극한하중을 구하거나, 항복하중을 구하는 방법 (Chin 법, Davisson 법, Mazurkiewicz 법, De Beer 법, Brinch Hansen의 90%법과 80%법, Fuller와 Hoy법, Vander Veen법, Butler와 Hoy법)이 사용되고 있다. 이 방법들은 하중-침하곡선 식을 포물선 또는 쌍곡선 등으로 가정함에 따라 구분되며 항복점이나 극한하중을 정의하기 위해 적용하는 침하율 또는 경사에

따라 구분된다. 따라서, 적용하는 방법에 따라 극한하중이나 항복하중이 다르게 나타난다. 현장타설말뚝의 경우 Fuller와 Hoy법이 비교적 잘 일치하며, Franki 말뚝의 경우 Davisson, Butler와 Hoy, Fuller와 Hoy법이 잘 일치하고, H말뚝의 경우 Brinch Hansen의 90%법과 Fuller와 Hoy법이 유사한 결과로 보고되고 있다. 각종 시험 분석방법의 특징은 표 2.1과 같다.

표 2.1 시험 분석방법의 특징

방법	적용대상	특징
Chin법	마찰말뚝 QM, SM	쌍곡선 가정, 동일시간간격으로 재하할 것
Davisson법	항타말뚝 QM	말뚝의 탄성압축 고려
Mazurkiewicz법	-	포물선 가정, 80%법과 유사
De Beer법	SM	LogP-LogS 직선이 아래로 꺾이는 점
Brinch Hansen(90%법)	CRP	모든 종류의 지반
Brinch Hansen(80%법)	QM, SM	포물선 가정, 반복재하시험에 사용 곤란
Fuller와 Hoy법	QM	긴 말뚝에 불리, 0.14mm/KN 때의 하중
Vander Veen법	-	분석에 시간이 많이 걸림
Bulter와 Hoy법	QM	초기 접선과 0.14mm/KN의 접선과의 교점에서 하중

본 연구에서는 말뚝의 탄성침하량을 고려하지 않았으며, 대구경 현장타설말뚝에 대하여 분석 하였다. 하중을 단계적으로 증가하여 시험한 데이터를 사용하였으며 SM 적용대상으로 판정되어 제안방법의 항복하중과 비교하기 위하여 항복하중 판별법인 De Beer법과 비교하여 보았다.

De Beer법 (log P-log S 분석법)은 일정하중을 일정시간 간격으로 단계적으로 증가하여 얻어지는 하중 (P)와 말뚝머리 침하량(S)를 양대수 눈금으로 표시하고, 각 점을 연결하여 얻어지는 선이 꺾어지는 점의 하중을 항복하중으로 결정하는 방법이다 이러한 변곡점은 실험결과에 의하면 1개 또는 경우에 따라 2~3개가 나타날 수 있다. 이것은 말뚝 항복을 의미하는 것으로 다층지반에서 각 층마다 항복현상이 현저하게 나타나기 때문에 명확한 절곡점이 여러 개 생긴다고 판단할 수 있다. 이에 대한 문제를 해결하기 위해 주면의 항복하중과 선단의 항복하중을 각각 판별할 수 있는 방법을 제안하여 비교해 보고자 한다.

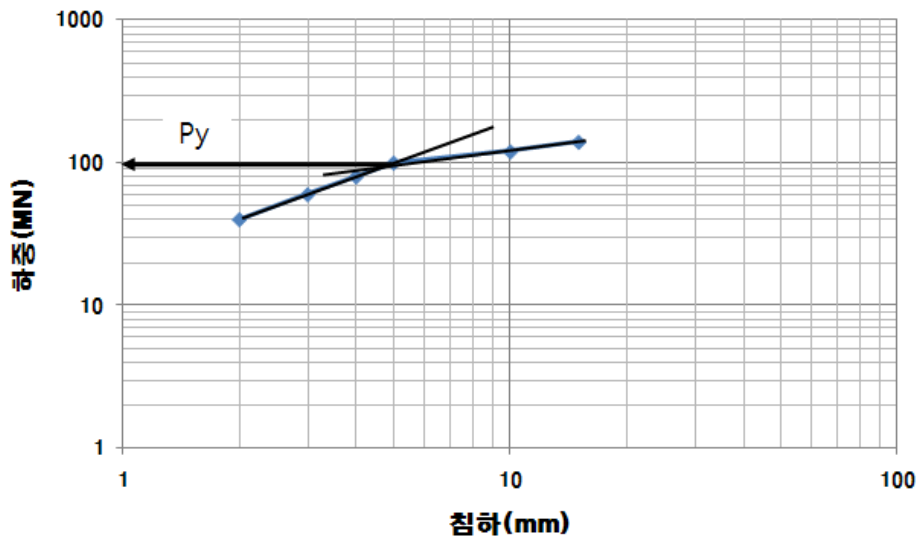


그림 2.1 log P-log S 분석법

### 3. 양방향 재하시험 결과와 분석

#### 3.1 현장개요

본 연구에서는 풍화암, 연암 및 경암층에 근입된 인천의 현장타설말뚝 2본에 대하여 O-cell 재하시험 데이터를 분석하였다. 현장에 대한 지반조건 및 말뚝제원은 다음과 같다.

표 3.1 암반 근입부 물성치

현장	말뚝	암종	qu (MPa)		Em (MPa)		RQD(%)	
			선단	주면	선단	주면	선단	주면
인천	1	풍화암	-	5	-	-	-	0
		연암	-	30.4	-	973	-	25
		경암	69.6	69.6	2611.9	973.9	82	82
	2	풍화암	-	5	-	-	-	0
		연암	12	12	1483.4	1483.4	25	25

인천 1 말뚝의 경우 경암선단지지 말뚝으로 경암의 일축압축강도는 69.6MPa로 나타나고 있으며 인천 2 말뚝의 경우 연암선단지지 말뚝으로 연암의 일축압축강도는 12MPa로 나타나고 있다.

표 3.2 암반 근입부 말뚝길이 및 말뚝직경

현장	말뚝	암종	근입 깊이(m)	직경(m)
인천	1	풍화암	7	3.05
		연암	6	
		경암	1.23	
	2	풍화암	9.5	2.4
		연암	4	

인천 1 말뚝의 경우 말뚝의 직경은 3.05m 암반 근입 깊이는 14.23m이며 풍화암 연암, 경암에 걸쳐 근입이 되어 있다. 인천 2 말뚝의 직경은 2.4m 암반 근입 깊이는 13.5m이며 풍화암과 연암에 걸쳐 근입되어 있다.

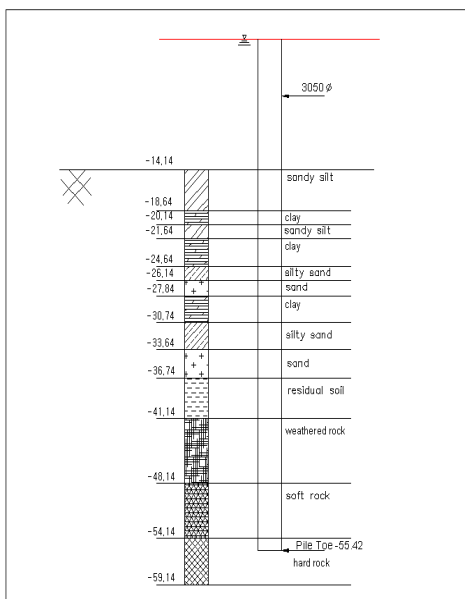


그림 3.1 인천-1 말뚝 및 지반조건

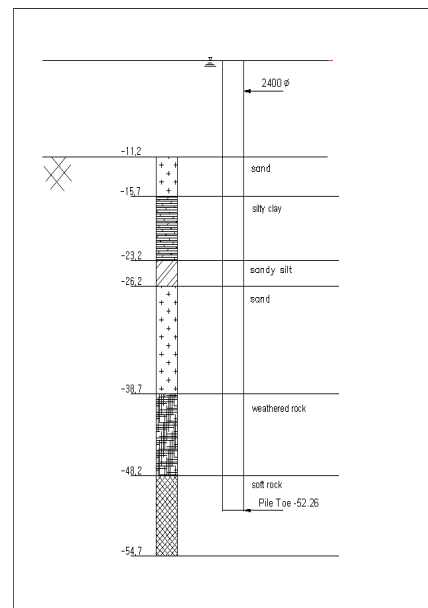


그림 3.2 인천-2 말뚝 및 지반조건

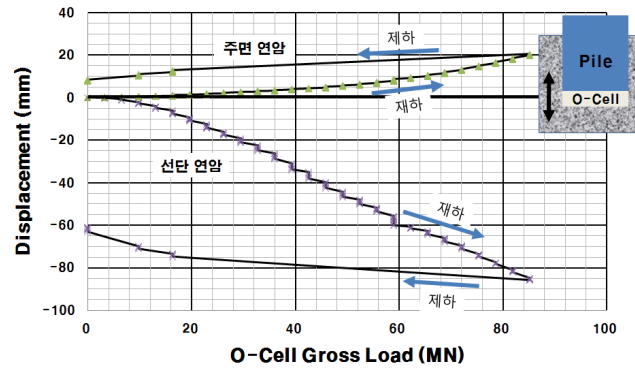
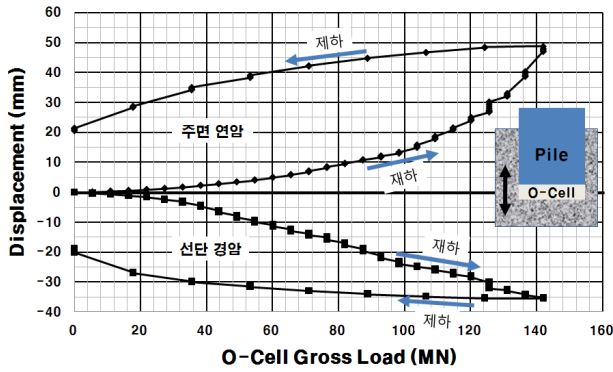


그림 3.3 시험하중단계별 최대 변위 (인천-1 현장)    그림 3.4 시험하중단계별 최대 변위 (인천-2 현장)  
 그림 3.3, 그림 3.4는 양방향재하시험의 결과 그래프로 하나의 그래프에 하향변위와 상향변위의 하중-변위 그래프가 같이 나타나며 상향 하중-변위 그래프는 주면마찰력에 대한 값이며 하향 하중-변위 그래프는 선단지지력에 대한 값을 나타낸다.

### 3.2 선단지지력과 주면마찰력의 하중분담을 항복하중 판별법 제안

선단지지력이 항복하중에 도달하면 하중은 주면마찰력으로 전이 되고 주면마찰력이 항복하중에 도달하면 하중은 선단지지력으로 전이 된다는 가정하에 하중분담율 그래프를 도시하고 그래프로부터 변곡점을 찾아 하중전이 발생하중  $q_t$ 를 찾고 주면 또는 선단의 항복하중을 찾아낸다. 하중분담율 그래프는 선단과 주면의 하중-침하곡선으로부터 증가하중침하곡선을 결정하고 선단지지력과 주면마찰력의 하중분담율을 하중( $q_t$ )에 대하여 나타낸다.

하중분담율의 계산은 같은 변위에서 선단과 주면지지력의 총 하중에 대한 비로 계산하였다.

$$\text{주면 하중분담율(\%)} = \frac{q_s}{q_t} \times 100$$

$$\text{선단 하중분담율(\%)} = \frac{q_b}{q_t} \times 100$$

$$q_t(\text{MN}) : q_s + q_b$$

$$q_s(\text{MN}) : \text{주면마찰력}$$

$$q_b(\text{MN}) : \text{선단지지력}$$

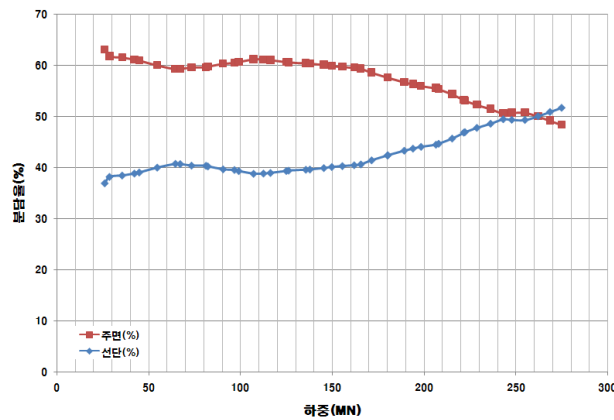


그림 3.5 하중분담율 그래프

① 양방향 재하시험으로부터 하중-변위 그래프를 그린다. ② 양방향 재하시험 그래프로부터 증가하중침하 곡선을 결정한다. ③ 제한된 하중분담을 그래프로부터 변곡점을 찾는다. ④ 하중분담율이 변화를 보이면 항복이 발생한 것으로 판단 그림과 같이  $q_t$ 로부터 주변 또는 선단의 항복하중 결정 한다.

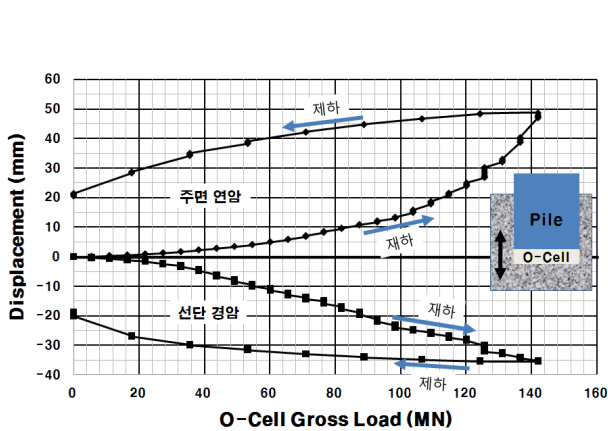


그림 3.6 시험하중단계별 최대 변위 (인천-1 현장)  
① 양방향 재하시험 데이터

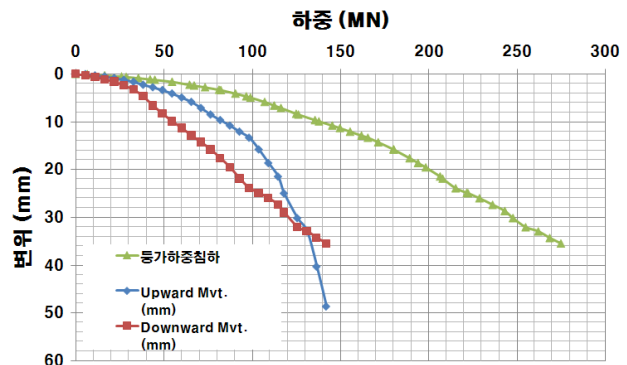


그림 3.7 인천-1 말뚝의 증가하중침하곡선  
② 증가하중침하 곡선 결정

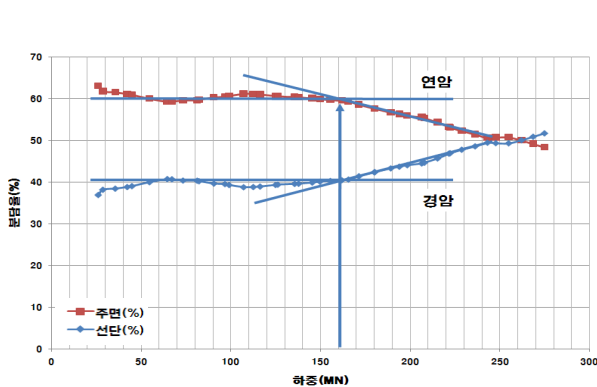


그림 3.8 인천-1 말뚝의 하중분담율  
③ 하중분담율 그래프로부터 하중전이 확인( $q_t$ )

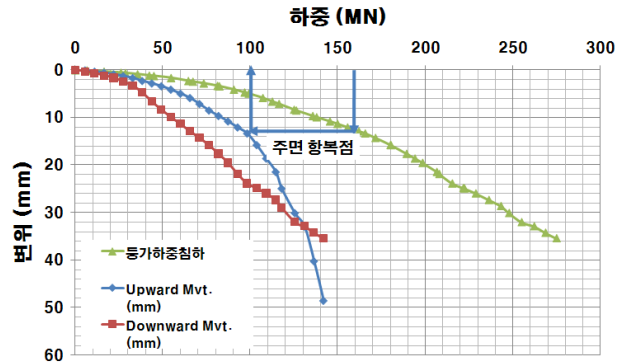


그림 3.9 인천-1 말뚝의 주변 항복점  
④  $q_t$ 로부터 주변 또는 선단의 항복하중 결정

양방향 시험에 의해 나온 선단과 주변에 대한 하중침하 곡선으로부터 증가하중침하 곡선을 작도 하여 주변마찰력과 선단지지력의 하중분담을 변화율과 침하량과 하중단계별로 나타내었다. 주변이나 선단에서 파괴가 시작되는 점이 나타나지 않은 말뚝에서의 주변마찰력과 선단지지력의 비는 하중의 증가에 의한 변동이 크지 않고 거의 일정한 수준으로 유지 되었으며, 주변의 파괴가 발생하기 시작하면 선단의 하중분담율이 증가함을 나타냈다.

(그림 3.8)은 인천-1 지역의 하중의 증가에 따른 주변과 선단의 하중분담율 그래프이다. 주변의 항복 시작 전인 약 160MN 이하의 하중에서 주변(60%):선단(40%)의 하중분담을 나타내고 있으며, 약 160MN 에서 주변마찰력의 하중분담율이 감소하기 시작하며 선단의 하중분담율이 증가하기 시작한다. 즉 주변의 항복이 시작되면서 선단으로 하중의 전이가 일어나는 것으로 해석될 수 있다.

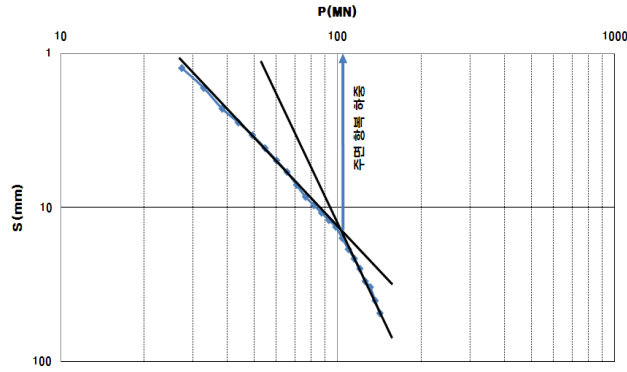


그림 3.10 인천-1 말뚝의 LogP-LogS법에 의한 항복점

(그림 3.9)로부터 주면마찰력의 항복하중을 구하면 약 100MN이 되며, 이는 (그림 3.10)의 LogP-LogS 법에 의한 항복하중과 부합하는 것으로 보이고 있다.

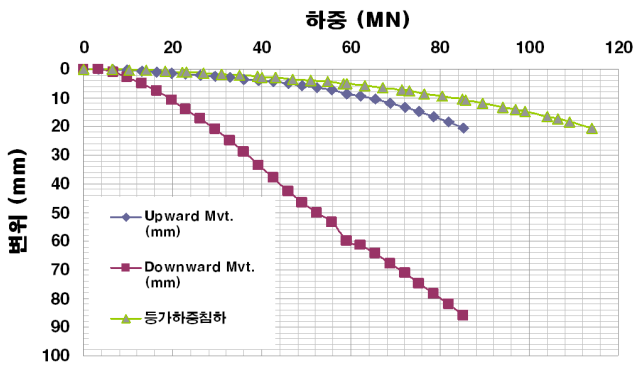


그림 3.11 인천-2 말뚝의 등가하중침하곡선

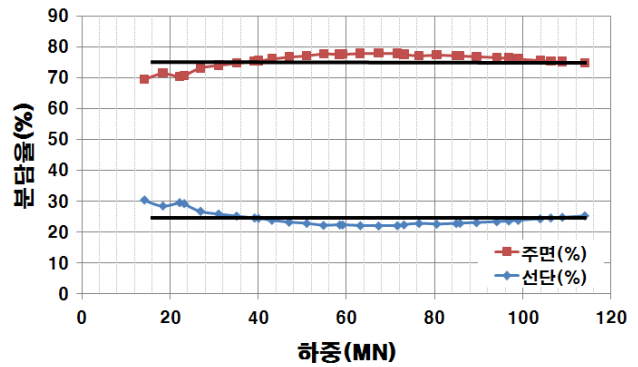


그림 3.12 인천-2 말뚝의 하중분담율

그림 3.11은 인천-2 지역의 하중의 증가에 따른 주면마찰력과 선단지지력의 하중분담율 그래프이다. 주면마찰력 또는 선단지지력의 항복은 보이지 않고 있으며 주면마찰력(75%):선단지지력(25%)의 하중분담을 나타내고 있다. 그림 3.12는 인천-2 지역의 하중의 증가에 따른 주면마찰력과 선단지지력의 하중분담율 그래프이다. 주면마찰력 또는 선단지지력의 항복은 보이지 않고 있으며 주면마찰력(75%):선단지지력(25%)의 하중분담을 나타내고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 선단지지력과 주면마찰력에 대하여 하중분담율을 통하여 항복하중을 결정하는 방법을 제안하였다. 기존 방법들은 항복하중을 결정함에 있어 선단지지력과 주면마찰력의 항복하중을 개별적으로 고려하지 않고 재하하중과 선단침하량에 의한 하중-침하 그래프로부터 항복하중을 결정하여 LogP-LogS방법 등에 변곡점이 2개이상 나타나는 경우가 발생하였다. 이는 주면의 항복지지력과 선단의 항복지지력이 상이하여 발생한 것으로 사료되며, 주면과 선단의 항복하중을 개별적으로 산정할 수 있는 본 방법을 제안 하였다.

1. 본연구의 말뚝 4본에 대하여 말뚝 선단부와 주면부의 하중분담비는 주면 또는 선단의 항복발생 전까지 일정하게 유지되며 선단지지력 : 주면마찰력의 비가 경암 선단지지인 경우 40%:60% 연암 선단지지인 경우 25%:75%의 비율로 나타났으며 보다 많은 케이스의 분석을 통하여 근입비의 영향에 의한 하중분담비의 변화에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

2. 말뚝의 주면, 또는 선단에 관한 항복하중을 판단할 수 있는 방법으로 하중분담비에 의한 방법을 제안하였다. 인천-1 제안 방법으로 말뚝의 주면 항복하중은 약100MN으로 나타났으며 LogP-LogS 방법으로 구한 항복하중과 유사하게 나타났다.

## 참고문헌

1. 권오성 (1999), “암반에 근입된 현장타설말뚝의 지지거동에 대한 수치해석” 석사학위 논문, 서울대학교.
2. 권오성 (2004), “암반의 풍화도가 암반근입말뚝의 지지거동에 미치는 영향” 박사학위 논문, 서울대학교.
3. 문일석 (2006), “Osterberg-Cell 재하시험을 통한 대구경 현장타설말뚝의 지지력 분석” 석사학위 논문, 연세대학교.
4. 배종오 (2001), “대구경 현장타설말뚝의 지지력 분석”, 석사학위 논문, 연세대학교.
5. 소진만, 정성준, 김성렬, 김명모 (2007) : “국내 설계기준에 제시된 현장타설말뚝 지지력공식의 신뢰성 분석”, 한국지반공학회 2007 추계 학술발표회 논문집, pp.707~713.
6. 천병식, 조천환 (1997) : “항타 및 매입말뚝의 하중-침하량 곡선의 분석” , 한국지반공학회.
7. 건설교통부 (2003) : “구조물 기초설계기준 해설”
8. GEO PUBLICATION (2006) : “FOUNDATION DESIGN AND CONSTRUCTION”, pp.103~117.
9. Duncan C. Wyllie (1999) : “Foundations on Rock”, pp.249~284.
10. Joseph E. Bowles (1997) : “FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN”, FIFTH EDITION.
11. Lianyang Zhang (2004) : “Drillde Shafts in Rock Analysis and Design”, pp.189~200.
12. Kulhawy, F. H. and Goodman, R. E.(1980) : “Design of Foundation on discontinuous rock”, Proc. International Conf. on Structural Foundations on Rock, Sydney, Australia, pp.209~220.