

시멘트밀크 고결체 위에 강관말뚝 선단 매입된 말뚝거동 End bearing Behavior of Open-ended Steel Pipe Piles Resting on Harden Cement Milk

박영호¹⁾, Young-Ho Park, 김성환²⁾, Sung-Hwan Kim, 김낙영³⁾, Nag-Young Kim, 김홍종⁴⁾, Hong-Jong Kim, 박용석⁵⁾, Yong-Seok Park

¹⁾ 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원, Director Researcher, Korea Expressway Co. Research Institution

²⁾ 한국도로공사 기술본부장, Executive Director, Korea Expressway Co.

³⁾ 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원, Senior Researcher, KECRI

⁴⁾ 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, Chief Researcher, KECRI

⁵⁾ 한국도로공사 도로교통연구원 연구원, Researcher, KECRI

SYNOPSIS : To find the soil plug of steel piles shaped by jet grouting, 4 blocks of cement milk with cube of 1.2m were made. 4 open-ended steel piles on the blocks were rested. The inner end part of 2 the piles was not reinforced. Cement milk 65%(SIG-1) and 100%(RJP-1) were filled into the block and height of 4.2 times of inner the pile diameter respectively. And the other the piles were welded 2 steel ring. The filling of the cement milk was an equal method as before(SIG-2 and RJP-2). Also the strain gauges were installed and the static pile load tests were done at the piles all. As a result, list in great order for effect of soil plug was ①SIG-1, ②SIG-2, ③RJP-1, ④RJP-2. This is because of strength and filling height of cement milk. And the higher the strength is, the greater the confining coefficient is.

Keywords : soil plug, cement milk, static pile load test, confining coefficient

1. 서 론

말뚝선단 아래 지반이 불량한 매입말뚝의 선단지지력을 발현하기 위하여 말뚝선단 확근 깊이와 폭은 모두 말뚝지름 이상을, 선단내부는 말뚝 안지름의 4배 이상을 시멘트밀크로 보강한다. 이 선단처리방법을 시멘트밀크 분출교반방식이라 한다(건설교통부, 1996). 이 방식의 설계 지지력은 말뚝선단 아래와 내부의 시멘트밀크 고결체 보다 고결체 아래의 원지반에서 파괴가 먼저 일어나도록 유도하고 있다.

석회암 공동부와 암편 섞인 풍화토지반에서 삼중관식 초고압분사공법으로 그라우팅을 하여 그라우팅 재료의 확산범위를 조사한 결과, 시멘트밀크 고결체의 지름은 1.2m 이었다(김낙영외 5, 2003; 박영호외 5, 2004). 그리고 내부굴착말뚝의 선단처리방법 중에서 시멘트밀크 분출교반방식의 선단확근 높이는 말뚝지름의 1배 이상이다(건설교통부, 1996). 그리고 시멘트밀크 고결체 위에 안치된 말뚝은 말뚝선단 보강형태에 따라 말뚝선단지지력이 달라질 수 있다.

따라서 말뚝선단보강형태와 시멘트밀크의 강도에 따라 개단강관말뚝의 폐색효과를 알아보기 위하여 폭×길이×높이가 1.2m×1.2m×1.0m인 총 4개의 시멘트밀크 고결체 블록 위에 지름과 두께가 각각 506mm, 두께 9mm인 4개의 강관말뚝을 안치하였다. 2개의 강관말뚝 선단에는 2단의 미끌림방지턱을, 2개의 말뚝은 무보강하였다(박영호외 3, 2009). 선단 보강과 무보강한 2개의 말뚝에 물/시멘트비 65%와 100%를 각각 충전하였다. 이때 선단 보강한 말뚝의 충전깊이는 말뚝 안지름의 1.4배 만큼을, 무보강은 4.2배 만큼을 충전하였다. 여기서 초고압분사공법 중의 하나인 SIG(super injection grouting)공법에서 사

용하는 시멘트밀크를 모사하여 65%를, RJP(rod jet pile)공법을 모사하여 100%의 시멘트밀크를 사용하였다. 이 시험체를 재령 35일에 정재하시험을 실시하여 고압에 의해 선단확근된 강관말뚝의 선단폐색효과를 알아보고자 한다.

2. 기성말뚝의 선단폐색

2.1 내부굴착말뚝의 선단보강 형태

토사층에서 개단말뚝을 타입하면, 기성말뚝의 선단이 흙으로 가득차 말뚝내부마찰력이 말뚝선단 아래 지반의 지지력과 같게 될 때 더 이상 흙이 말뚝내부로 들어가지 않는다. 이 관내토의 내부마찰력은 상향으로 작용한다. 이 현상은 폐단말뚝의 선단부와 같은 효과를 나타낸다. 이 현상을 폐색효과(soil plug)라 부르며, 지지층에 관입된 말뚝길이, 층의 특성과 말뚝직경에 따라 변화한다(한국강관협회, 1994).

일반적으로 말뚝이 양질의 지지층에 관입할 때, 개단말뚝의 지지력은 폐색효과에 의해 폐단말뚝의 값과 거의 같다. 그리고 말뚝선단에 전달되는 수직력은 하중전이 정재하시험으로 측정할 수 있으며, 개단강관말뚝의 선단지지력은 표 1과 같이 계산한다(土質工學會, 1992). 그리고 내부굴착말뚝의 선단처리방법 중에서 시멘트밀크 분출교반방식은 완전선단폐색효과를 유도하기 위하여 표 1과 같이 처리한다(건설교통부, 1996, 土質工學會, 1992).

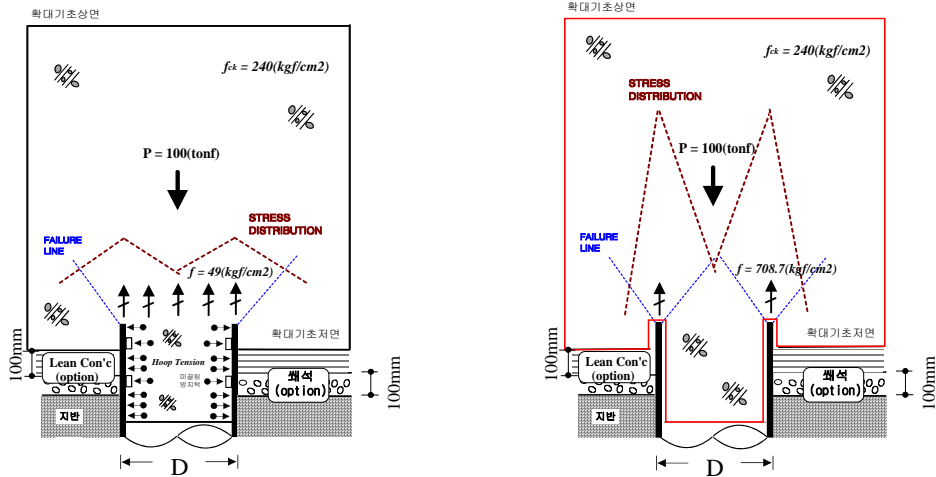
표 1. 내부굴착말뚝의 선단보강 형태와 단위 선단지지력, q_d

선단처리방법		말뚝 선단의 단위 선단 극한지지력 산정
시멘트밀크 분출교반방식		단위 선단 극한지지력(tonf/m ²) • 모래층 : $q_d = 15N$ • 모래자갈층 : $q_d = 20N (\leq 1,000)$ 여기서, N : 말뚝선단지반의 N값

2.2 강관말뚝머리부의 횡방향 구속효과

그림 1(a)와 같이 말뚝머리 내부에 미끌림방지턱이 부착된 말뚝머리부에 압축하중이 작용하는 경우, 인발하중의 거동과 같이 강관말뚝 내부에 횡방향 구속현상(hoop tension)이 발생한다. 이 구속에 의해 말뚝머리부는 말뚝내부에 속채움한 콘크리트와 강관말뚝이 하나의 합성단면이 되어 전단면적으로 압축하중을 저항한다.

그러나 그림 1(b)와 같이, 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱이 부착되어 있지 않는 경우, 콘크리트의 건조수축과 진동 등에 의해 콘크리트의 화학적 부착력을 고려할 수 없다. 이로 인해 말뚝 관두계의 단면적이 말뚝머리 압축하중을 지탱하게 되어, 확대기초 콘크리트에 큰 지압응력이 발생한다. 만약 압축하중이 크게 작용하면, 강관내부의 콘크리트 부착도도가 파괴되어 확대기초 콘크리트 내부로 관입전단(punching shear)이 발생하여 큰 변위가 발생한다(福井次郎, 1992; 大志万 등, 1985; 박영호외3, 2009).



(a) 미끌림방지턱이 설치된 경우 (b) 미끌림방지턱이 설치되지 않은 경우

그림 1. 확대기초 콘크리트의 연직지압응력 분포

따라서 말뚝내부에 콘크리트를 동일한 깊이로 속채움한 강관말뚝 머리보강 설계법은 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱의 수가 충분히 설치되어 강관말뚝과 속채움 콘크리트와의 완전한 합성단면을 형성하여야 한다(대한토목학회, 2001). 강관말뚝 내부에 미끌림방지턱의 유무에 따라 확대기초 콘크리트에 발생하는 연직지압응력은 무려 15배 정도 차이가 나며, 구조물의 안전에 큰 영향을 준다(박영호, 2003).

2.3 이론적인 지지력 공식 제안

토사 지반내에 상대적으로 강한 매질인 시멘트밀크의 고결체 기둥이 구성되어 있다면, 이는 말뚝으로 거동할 것이다. 이 고결체는 시멘트밀크이기 때문에 강도에 큰 영향을 받게 된다. 따라서 시멘트밀크 고결체의 단위극한지지력, f_{cu} 는 무근 콘크리트 허용 연직지압응력 공식을 채용하였다. 그리고 이 식에서 콘크리트인 계수 0.25를 시멘트밀크에서는 이 값의 반인 0.125를 사용하고, 허용지압응력, f_{ba} 을 단위극한지지력, f_{cu} 으로 간주하고, 단면적비인 $\sqrt{A_c/A_p}$ 는 최대 2까지 고려하여 식(1)과 같이 제안하고자 한다.

그리고 말뚝머리 내부로 전달되는 힘은 미끌림방지턱이나 화학적 부착력(chemical bonding)에 의해 말뚝본체로 전이된다. 이 내부에 채운 콘크리트의 응력은 일축응력상태가 아닌 3축응력상태인 $0.5 f_{ck}$ 이다(박영호외 1, 2003; 大志万외 2, 1985). 또한 말뚝선단 아래 고결체 주변지반과 지표면에 설치된 고결체 기둥 주변지반의 구속효과를 분명히 다를 것이다. 이들의 개념을 적용하면, 말뚝선단 내부에 시멘트밀크 충전 높이와 말뚝선단 내부의 보강형태 그리고 고결체 주변지반의 구속효과를 고려하여 구속계수, α 를 도입하였다. 이 계수를 고려한 단위극한지지력, f_{cu} 는 식(1)에, 그리고 허용지지력과 극한지지력은 식(2)에 나타내었다.

$$f_{cu} = 0.125 \alpha f_{ck} \sqrt{\frac{A_c}{A_p}} \quad (1)$$

$$F_{ca} = \frac{F_{cu}}{FS} = \frac{f_{cu} \cdot A_p}{2} \quad (2)$$

여기서, f_{cu} : 시멘트밀크의 단위극한지지력(tonf/m²), α : 구속계수, F_{cu} : 시멘트밀크의 극한지지력(tonf), F_{ca} : 시멘트밀크의 허용지지력(tonf), FS : 안전율 = 2.0

그리고 구속계수는 다음 식과 같다.

$$\alpha = Q_d / 0.125 q_u \sqrt{\frac{A_c}{A_p}} \times A_p \quad (3)$$

여기서 Q_d 는 실측한 극한지지력이다.

3. 시멘트밀크 블록의 시험체

3.1 시험체 제작

제트그라우팅공법 중 SIG, RJP공법에서 사용하는 물/시멘트 비는 각각 65%와 100% 이다. 강관말뚝의 선단부의 형상에 따른 폐색효과를 알아보기 위하여 미끌림방지턱을 용접하여 보강한 경우에는 말뚝 내경의 1.4배를, 보강하지 않은 경우는 4.2배를 각각 2종류의 시멘트밀크로 충전하여 정재하시험을 하였다. 그리고 미끌림방지턱은 2단을 용접하였으며 이들의 간격은 인력으로 용접 가능한 위치까지 멀리 이격될수록 폐색효과는 좋다(박영호, 2003). 따라서 강관 선단부에서 50mm(D/10)와 200mm(D/2.5)위치에 설치하였다. 여기서 D는 말뚝의 지름이다.

이들의 시험체 특징과 형상은 표 2와 같다. 그리고 정재하시험시 침하거동 측정을 위하여 자동변위계(LVDT)와 수동변위계(dial gauge)를 모두 사용하였다.

표 2. 시험체의 특징

시험체 종류	고결체 크기 (가로X세로X높이, m)	고결체 물/시멘트 비	강관 길이 (m)	말뚝선단부 보강 유, 무	강관내부 속채움 높이 (d:말뚝내경)
RJP 무	1.2×1.2×1.0	100%	2.5	무보강	4.2d
RJP 미	1.2×1.2×1.0	100%	0.85	미끌림방지턱 보강	1.4d
SIG 무	1.2×1.2×1.0	65%	2.5	무보강	4.2d
SIG 미	1.2×1.2×1.0	65%	0.85	미끌림방지턱 보강	1.4d

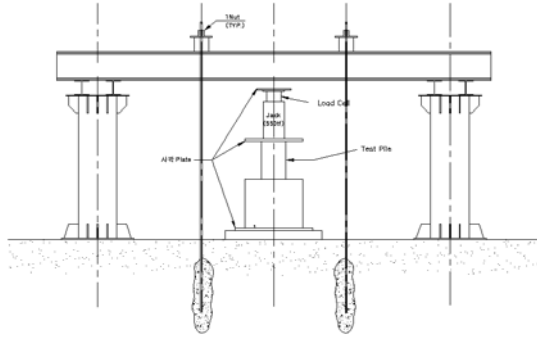
3.2 계측기 설치

말뚝선단부의 형상과 물/시멘트비에 따른 말뚝의 폐색효과를 측정하기 위하여, 폭 1.2m×1.2m, 높이 1.0m의 시멘트밀크 고결체의 거푸집을 제작하였다. 강관말뚝 외표면에 부착한 변형률계(strain gauges)는 지름 506mm 강관에 120도 간격으로 강관둘레 3부분에 설치하였고, 변형률계의 설치는 무보강의 경우 강관 하부에서 150mm, 450mm, 750mm, 1350mm, 1950mm의 위치에 설치하였으며, 미끌림방지턱의 보강 말뚝의 경우는 강관 하부에서 150mm, 450mm, 750mm의 위치에 설치하였다. 또한 긴 말뚝의 시험체에 설치한 변형률계(日産, FLA-5-11-1L)의 수는 15개이고, 짧은 말뚝의 시험체는 9개로서 총 4개의 시험체에 총 48개를 설치하였다.

3.3 하중전이 정재하시험

본 시험은 그림 2와 같이, 앵커반력방법으로 고결체에 하중을 가하였다. 재하 프레임(frame)은 하중 재하시 충분히 안정하도록 강성을 고려하여 BULIT UP MEMBER를 사용하였다. 가압장치는 고결체의 파단(rupture)상태까지 재하하기 위하여 550톤의 유압잭(hydraulic jack)을 사용하였다. 그리고 하중의 측정방법은 로드셀(load cell) 방식을 채용하였다. 계측장치는 하중측정장치, 말뚝머리부와 고결체의 저판 변위량 측정장치(dial gauge 3개, LVDT 6개), 그리고 시간측정용 시계(stop watch) 등을 사용하여 측정

하였으며, 데이터로거(data logger, TDS-303)로 자동화 계측하였다. 그리고 사용한 강관말뚝의 지름은 506mm, 두께 9mm이며 이 말뚝의 하중전이해석을 위해 변형률계(strain gauges), 온도측정용 전선(thermal couple) 등을 시공전 말뚝에 미리 설치하여 ASTM D 1143의 표준재하방법을 기준으로 정적압축재하시험을 실시하였다.



(a) 단면도



(b) 실 재하 장면

그림 2. 반력앵커를 이용한 말뚝 정재하시험 장면

4. 재하시험 결과

4.1 말뚝머리의 하중-침하 곡선

물/시멘트비가 65%(SIG), 100%(RJP)인 시멘트밀크 시험체의 상면에 강관말뚝이 안치되어 있다. 말뚝선단 폐색효과를 알아보기 위하여, 미끌림방지턱을 설치하지 않은 말뚝의 선단내부에는 말뚝내경의 4.2배(SIG무장, RJP무장)를, 2단의 미끌림방지턱을 설치한 말뚝의 선단 내부에는 말뚝내경의 1.4배(SIG보단, RJP보단)를 물-시멘트비가 65%, 100%인 시멘트밀크로 각각 충전하였다. 시멘트밀크 타설후, 35일 경과시 정재하시험을 실시한 결과는 그림 3과 같다.

4.2 말뚝축방향 하중전이 거동

물/시멘트비 100%인 시멘트밀크 고결체 위에 말뚝선단내부에 무보강된 강관말뚝의 선단부에 말뚝내경의 4.2배 높이 만큼을 시멘트밀크로 충전한 강관말뚝(RJP무장 시험체)에 대하여, 정재하시험 및 하중전이시험 결과는 그림 4와 같다. 그리고 이 축하중 곡선들을 관내토 내주면마찰력과 선단저항력으로 분리하면 그림 4(b)와 같다. 또한 RJP보단, SIG무장 그리고 SIG보단 시험체에 대한 결과는 표 3과 같다.

4.3 말뚝선단보강 형태 분석

내부주면마찰력과 선단저항력의 하중분담율은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\text{분담율}(\%) = \frac{\text{주면 또는 선단 저항력}}{\text{총지지력}} \times 100 \quad (4)$$

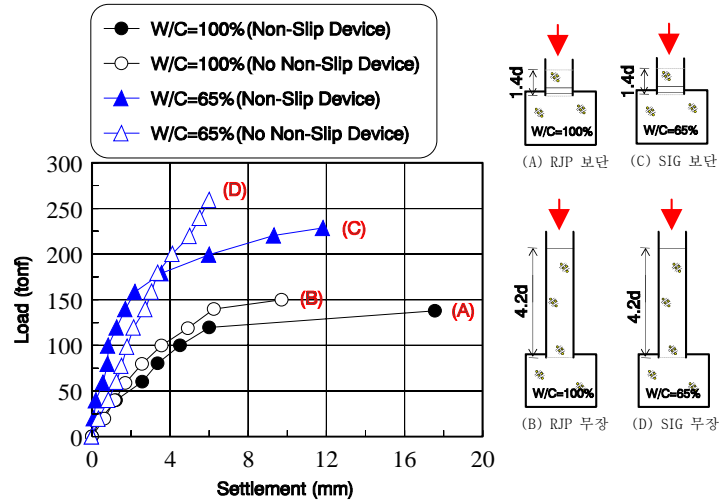
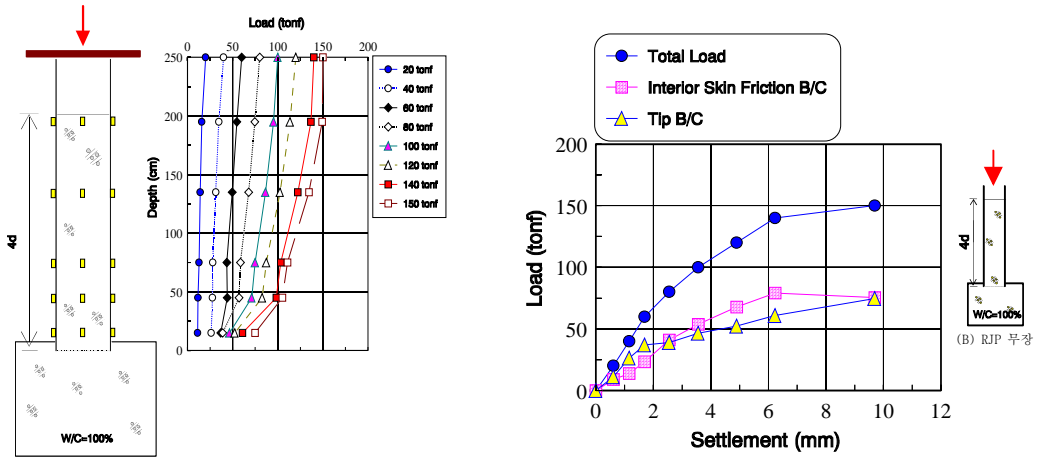


그림 3. 말뚝머리의 하중-침하 곡선



(a) 축방향 하중전이

(b) 지지력 분리 거동

그림 4. RJP 무선단보강 말뚝의 축방향 하중

표 3. 지지력 분리 곡선의 특이점의 값들

구분 (tonf)	RJP무장		RJP보단		SIG무장		SIG보단		
	극한점	항복점	극한점	항복점	최대점	항복점	극한점	항복점	
총지지력	150	140	140	120	260	-	230	160	
내주면마찰력	74.7	79	49.8	52.6	163.9	-	59.8	120	
선단저항력	75.3	61	90.2	67.4	96.1	-	170.2	40	
분담율	주면	49.8%	56.4%	35.6%	43.8%	63%	-	26%	75%
	선단	50.2%	43.6%	64.4%	56.2%	37%	-	74%	25%

그림 4의 하중-침하 곡선에서 항복하중을 기준으로 고압에 의해 선단확고된 강관말뚝의 선단보강형태는 내부주면마찰력이 크고, 선단저항이 적은 것이 가장 좋다. 4종류의 시험말뚝에 대해 내부주면마찰분담

을 기준으로 순서대로 나열하면, ①SIG무장(항복점 미발생), ②SIG 보단(75%), ③RJP무장(56.4%), ④ RJP보단(43.8%) 이었다. 이 순서의 의미는 말뚝내부에 충전하는 시멘트밀크의 강도와 충전 높이에 영향을 받음을 알 수 있다.

4.4 지지력 분석 및 구속계수 결정

본 연구에서 제안한 시멘트밀크의 이론적인 극한 선단지지력 공식인 식(1)~식(3)에서 구속효과는 블록 시험체의 정재하시험 결과와 비교한 결과는 표 4와 같다.

표 4. 시멘트밀크 블록시험체의 추정 지지력과 재하시험값 비교

구분	시멘트 밀크 고결체 가 형성된 지반	일축강도 q_u (kgf/cm ²)		산정												비고
		범위	적용	D_p	D_c	A_p	A_c	$\sqrt{\frac{A_c}{A_p}}$	0.125	α	f_{cu}	F_{cu}	α	실측		
				코아 깊이	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨=⑦*⑧ *①*⑥	⑩=⑨*④	⑪= ⑩/⑫	
선단 확근 고결체	SIG 무장	298.83	1.5D	298.83	0.506	1.2	0.2	1.13	2.37	-	-	885.3	177.1	-	96.1*	재령45일
	SIG 단보	298.83	1.5D	298.83	0.506	1.2	0.2	1.13	2.37	-	-	885.3	177.1	1	170.2	재령45일
	RJP 무장	212.63	3D	212.63	0.506	1.2	0.2	1.13	2.37	-	-	62939	126	0.6	73.5	재령45일
	RJP 단보	212.63	3D	212.63	0.506	1.2	0.2	1.13	2.37	-	-	699.3	126	0.7	90.2	재령45일

(주) * : 극한하중이 아닌 최대하중임.

상기 표에 의하면, 추정 극한지지력 공식과 실측 극한지지력과 비교한 결과, 선단보강형태와 고결체 강도에 따라 구속계수, α 가 달라지는 것을 알 수 있었다. 물/시멘트비가 100%를 말뚝내경의 1.4배와 4.2 배 만큼 충전한 경우의 구속계수는 0.6~0.7이었다. 그리고 물/시멘트비가 65%를 말뚝지름의 1.4배 만큼 충전한 경우의 구속계수는 1.0이었다. 여기서 동일한 충전높이에 대하여 구속계수가 다른 것은 시멘트밀크의 강도의 영향으로 판단된다.

6. 결 론

초고압분사공법에 사용하는 시멘트밀크의 비를 사용하여 개단강관말뚝의 선단폐색효과를 알아보기 위하여 시멘트밀크 블록을 만들어 정재하시험을 실시한 결과는 다음과 같다.

1. 4종류의 시험말뚝에 대해 내주면마찰분담율 기준으로 순서대로 나열하면, ①SIG무장(항복점 미발생), ② SIG보단(75%), ③RJP무장(56.4%), ④RJP보단(43.8%) 이었다. 이 순서의 의미는 말뚝말뚝내부에 충전하는 시멘트밀크의 강도와 충전 높이에 영향을 받음을 알 수 있다.
2. 추정 극한지지력 공식과 실측 극한지지력과 비교한 결과, 물/시멘트비가 100%를 말뚝내경의 1.4배와 4.2배 만큼 충전한 경우의 구속계수는 0.6~0.7이었다. 그리고 물-시멘트비가 65%를 말뚝지름의 1.4배 만큼 충전한 경우는 1.0이었다. 이는 동일한 충전높이에 대하여 구속계수가 다른 것은 시멘트밀크의 강도의 영향으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(1996), 도로교표준시방서-설계/시공 및 유지관리편, **대한토목학회**, 서울, p.687.
2. 대한토목학회(2001), **도로교설계기준해설 하부구조편**, 서울, pp.268~278, pp.287~300.
3. 한국강관협회(1994), **강관말뚝**, 서울, pp.38~39.
4. 박영호, 김낙영(2003), “미끌림방지턱을 이용한 강관말뚝 머리 결합부의 구조특성에 관한 실험적 연구”, **한국지반공학회지**, 제19권 제6호, pp.227~243.
5. 박영호, 김성환, 김낙영, 육정훈(2009), **기초공학실무와 무조인트 교량**, 서울, pp.281~319.
6. Vesic' A.S(1977), **Design of Pile Foundations**, NCHRP Shnthesis 42, TRB, Washington, D.C., pp.26~29.
7. 大志万, 和也, 福井次郎(1985), 新くい鋼管杭の杭頭結合方法, 土木技術資料, Vol.27-1, pp.33~39.
8. 福井次郎(1992), 鋼管杭の杭頭結合と現場接合, 基礎工, pp.29~34.
9. 土質工學會(1982), 構造物基礎の 設計計算演習, 東進印刷, 東京, pp.122~123.
10. 土質工學會(1983), 抗基礎の 調査・設計から 施工まぞ, 三美印刷株式會社, 東京, pp.409~413.
11. 土質工學會(1992), 基礎の 設計資料集, 三美印刷株式會社, 東京, pp.113~114.