

대구경 소켓경사반력말뚝의 인발거동에 관한 연구

최용규¹⁾, Yong-kyu Choi, 김상옥²⁾, Sang-Ok Kim, 정창규³⁾, Chang-Kyu Jung,
정성기⁴⁾, Sung-Gi Jung, 김상일⁵⁾, Sang-Il Kim

- 1) 경성대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungsoong University
- 2) 현대건설 장림하수처리장 건설현장소장, General Manager, Hyundai Construction Co, Ltd.
- 3) 부산광역시 건설본부 교량건설 1과장, Department Head, Construction Headquarter, Pusan Metropolitan City
- 4) 부산광역시 감사관실, The Inspector, The Inspection Department, Pusan Metropolitan City
- 5) 경성대학교 토목공학과 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyungsoong University

개요(SYNOPSIS) : Using the large diameter ($D = 2,500\text{mm}$, $L = 40\text{m}$) batter steel pipe piles, designed as compression piles but used as reaction piles during the static compression load test of socketed test piles ($D = 1,000\text{mm}$, $L = 40\text{m}$), static pile load tests for large diameter instrumented rock-socketed piles were performed. The reaction steel pipe piles were driven 20m into the marine deposit and weathered rock layer and then 10m socketed with reinforced concrete through the weathered rock layer and into hard rock layer. Steel pipe and concrete in the steel pile part, and concrete and rebars in the socketed parts were instrumented to measure strains in each part. The pullout amounts of reaction pile heads were also measured with LVDT. During the static pile load test, total compressional load of about 20MN was loaded on the head of test piles, but load above 20MN was not loaded due to lack of loading capacity of loading system.

Over the course of the study, maximum pullout amount up to 7mm was measured in the heads of reaction piles when loaded up to 10MN and 1mm of pullout amount was measured. More than 85% of pullout load was transferred in the residual weathered rock layer and about 10% in the soft rock layer, which was somewhat different transfer mechanism in the static compressional load tests.

Key words : large diameter rock-socketed batter piles, reaction piles, static pile load tests, instrumented piles, static pullout load test, automatic measurement system.

1. 서론

말뚝의 정재하시험방법에는 사하중의 반력을 이용하는 방법, 지중앵커의 반력을 이용하는 방법, 반력 말뚝을 이용하는 방법 등을 들 수 있다. 각 시험방법은 현장여건, 시공상태 등에 따라 선택적으로 사용할 수 있다. 특히, 시공중인 경우, 대용량의 재하하중이 필요한 경우 그리고 해상과 같은 특수한 현장여건인 경우에는 반력말뚝 방법을 효과적으로 적용할 수 있다.

본 논문에서는 반력말뚝을 이용한 말뚝 정재하시험 사례를 고찰하였으며, 대구경 암반경사소켓말뚝을 반력말뚝으로 사용한 광안대교 건설현장의 대구경 말뚝정재하시험 사례에 관하여 소개하였다. 또한, 실

제말뚝으로 사용될 반력말뚝의 거동과 사용성을 고찰하였다.

2. 반력말뚝을 이용한 정재하시험 수행사례

2.1 소구경 강관말뚝인 경우

소구경 강관말뚝을 반력말뚝으로 사용할 경우, 시험말뚝을 중앙에 두고 대칭적으로 4개, 6개 또는 8개의 강관말뚝을 반력말뚝으로 시공하여 시험을 수행할 수 있다. 이때, 반력말뚝과 재하대의 연결상태가 재하시스템, 재하대와 부속장치 그리고 현장여건 등에 따라 달라질 수 있다. 즉, 강관말뚝에 직접 구멍을 내어 볼트를 끼워 고정한 후 연결강봉으로 재하대와 결합시키는 방법 (사진 1), 강관말뚝에 강관을 용접하여 연결 강봉으로 재하대와 결합시키는 방법 (사진 2), 그리고 강관말뚝에 창을 만든 후 레일용강재를 끼워 넣어 연결 강봉으로 재하대와 결합시키는 방법 (사진 3)을 사용할 수 있다. 또한, PSC말뚝과 PHC말뚝 등과 같은 기성말뚝을 반력말뚝으로 사용할 수도 있는데, 기성말뚝의 내부에 H형강 등의 연결재를 끼운 후 콘크리트를 타설하여 고정시킨 후 재하대와 결합시킬 수도 있다.

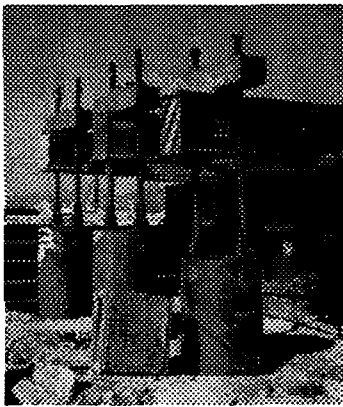


사진 1. 신호대교 사례



사진 2. 강동교 재가설공사 사례



사진 3. 부산 센텀시티 지하철도 사례

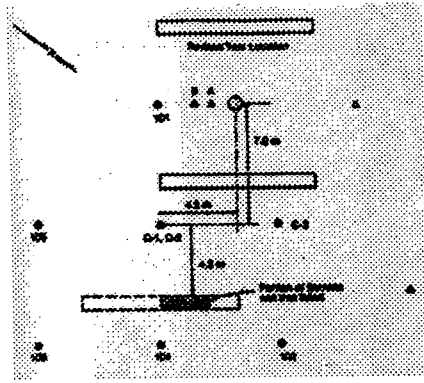
2.2 시험하중이 대용량인 경우

시험하중이 대용량인 2개의 사례에 관하여 고찰하였다. 영국의 Pentre지역에서 실시된 직경 762mm이고 관입길이 55m인 개단 강관말뚝에 대한 정재하시험에서 최대 설계시험하중 14MN을 작용시키기 위하여 슬러리월 (Barrette wall)의 반력을 이용하였다. 4개의 Barrette 패널을 사용하였는데, 각 패널은 폭 0.8m, 길이 4.5m 그리고 깊이 24m이었다. 시험부지의 개요도와 시험전경을 그림 1에 나타내었다. 다른 사례는 영국의 Tilbrook Grange지역에 항타 시공된 직경 762mm이고 관입길이가 30m인 개단강관 말뚝의 정재하시험에서 30MN의 최대설계시험하중을 작용시키기 위하여 8개의 현장타설말뚝의 반력을 이용하였다. 직경 750mm이고 관입길이가 30m인 현장타설말뚝을 사용하였으며 시험부지의 개요도와 시험전경을 그림 2에 나타내었다.

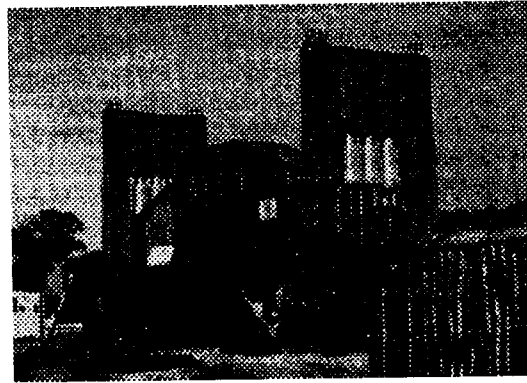
3. 대구경 경사반력말뚝의 압축 및 인발정재하시험

3.1 대구경 경사반력말뚝

RCD굴삭기와 대형 진동항타관입기를 이용하여 강관을 풍화대 상부까지 항타한 후 강관 내부의 흙을

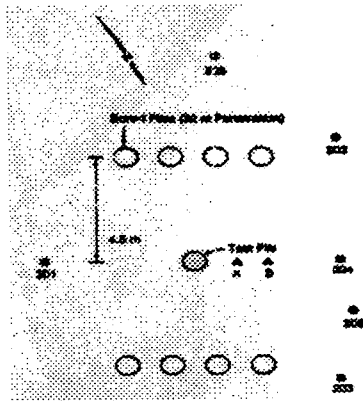


(a) 시험부지 개요도

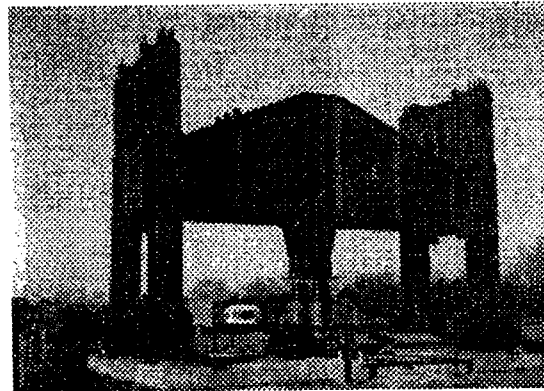


(b) 시험전경

그림 1. 영국의 Pentre지역에서 실시된 말뚝정재하시험 사례



(a) 시험부지 개요도



(b) 시험전경

그림 2. 영국의 Tilbrook Grange지역에 실시된 말뚝정재하시험 사례

제거하였다. RCD장비로 풍화대와 연암을 관통하여 말뚝선단위치까지 굴삭한 후 강관을 관입 가능한 깊이까지 향타하였다. 말뚝의 선단부에는 철근콘크리트를 현장타설하였으며, 그 상부는 강관 내부에 콘크리트를 속채움하였다. 이와 같은 시공과정을 거쳐 완성된 대구경 경사 반력말뚝들 ($\phi = 2,500\text{mm}$)은 풍화대와 암반에 소켓된 경사강관말뚝이었다.

반력말뚝들의 개요를 표 1에 나타내었으며, 말뚝정재하시험이 수행된 시험말뚝들 ($\phi = 1,000\text{mm}$)의 시공개요도와 반력말뚝으로 사용한 대구경 경사말뚝들의 배치도를 그림 3에 나타내었다. 그림 4에는 암반에 시공된 시험말뚝 (TP3)과 반력말뚝들 (P2, P9)의 시공상세도를 나타내었다. 풍화대에 시공된 시험말뚝 (TP2)과 반력말뚝들 (P6, P13)의 시공상세도는 지층의 깊이만 달라질 뿐 말뚝의 시공 상태는 비슷하므로 도시하지 않았다.

3.2 축하중계측용센서의 제작 및 설치

말뚝을 구성하고 있는 각 구성부재에서 발생하는 응력을 측정하기 위하여 콘크리트응력, 철근응력, 강관응력 측정용 센서들을 각 부재에 설치하였다. 그리고, 부가적으로 말뚝선단부의 변위량을 직접 측정하기 위하여 말뚝선단 침하봉을 설치하였다. P2와 P9에는 축하중계측용 센서들을 설치하였으나 P6과 P13

에는 시공일정이 맞지 않아 센서들을 설치하지 못하였다. 그림 5에는 반력말뚝 P2에 대한 센서설치도 및 설치 수량을 나타내었으며 반력말뚝 P9에도 비슷한 양상으로 설치하였다. 센서는 선정된 깊이에서 90° 방향으로 4개소씩 설치하는 것이 가장 효과적이지만, 제한된 센서비용으로 인하여 180° 방향으로 2개소씩만 설치하였다.

표 1. 경사 반력말뚝 개요

시 험 위 치		광안대로 건설공사 1공구의 MP11			
말뚝 번호		P2	P9	P6	P13
반력 말뚝 형식		암반에 소켓된 강관말뚝		풍화대에 소켓된 강관말뚝	
말뚝 제원	구분	실제말뚝	실제말뚝	실제말뚝	실제말뚝
	직경 (mm)	2,500	2,500	2,500	2,500
	관입길이 (m)	29.6	30.0	35.8	32.9
	강관길이 (m)	20.3	20.3	25.0	21.1
	소켓길이 (m)	9.3	9.7	10.8	11.8
최대 인발 하중 (MN)		10.0			
압축 설계 하중 (MN)		17.0			
반력발생수단		실제 말뚝(본말뚝, $\phi = 2,500\text{mm}$) 2개의 인발저항력			
비고		계측센서 설치		계측센서 미설치	

3.3 연직압축 및 인발 정재하시험 수행

본 시험에서는 직경 1,000mm에 대한 말뚝 압축 정재하시험을 수행하면서 동시에 직경 2,500mm의 경사말뚝에 대한 인발정재하시험을 수행하였다. 말뚝에 대한 인발정재하시험은 ASTM D3689 - 90 (Reapproved 1995)에 따라 수행하여야 하지만 본 시험에서는 반력말뚝에 대한 시험이 주된 것이 아니었으므로, 압축정재하시험에 대한 시험 수행계획에 따라 재하하중의 결정, 재하방법의 선정, 하중재하시스템 구성, 자동화 계측시스템 구성 등이 이루어 졌으나, 반력말뚝의 인발재하시험결과의 획득에는 문제가 없었다.

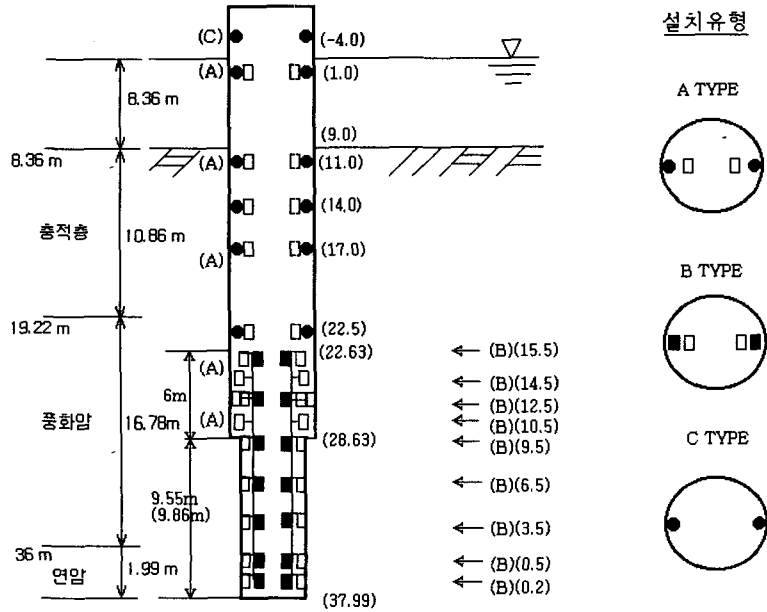
계획최대 재하하중은 말뚝재료의 항복 또는 파괴강도를 초과하지 않는 범위내에서 결정하여야 하며, ASTM D 3689 - 90에서는 파괴가 유발되었다고 전문가가 판단할 수 있는 정도까지 또는 파괴가 유발되지 않는다면 예상되는 설계하중의 200%까지 하중을 재하하도록 규정하였다.

반력말뚝에 대한 인발지지력과 인발변위를 수치계산방법과 경험적인 지지력 공식에 의하여 검토하였으며, 그 결과를 표 2에 요약하였다. 반력말뚝은 실제로 사용될 말뚝이었으므로 인발에 의하여 손상되지 않아야 하였다. 따라서, 안전율을 6.0으로 반영하더라도 허용인발저항력의 평균값은 10MN을 초과하였으며, 따라서 10MN의 인발하중은 충분히 지지할 수 있을 것으로 판단하였다. 또한 인발하중 10MN 작용시의 인발변위는 3.82mm ~ 4.28mm로 예측되었으므로 반력말뚝은 10MN 정도의 인발하중에도 충분히 안전할 것으로 판단하였다.

따라서 본 시험에서는 각 반력말뚝에 대한 최대인발하중은 10MN으로 결정하였으며, 압축시험말뚝에 작용될 최대압축하중은 20MN으로 결정하였다.

인발재하시험의 재하방법도 압축정재하시험의 그것과 동일하다. 즉, 표준적인 재하 (standard loading) 방식인 완속재하방식 (slow maintained - load test, SM test)은 하중단계에서는 침하율이 0.01 inch/hr (0.25 mm/hr) 이하가 될 때까지 재하하중을 유지하였으며, 또한, 말뚝의 순침하량을 구하기 위하여 반복재하 (cyclic loading)방식을 함께 사용하였다.

하중재하단계도 압축재하시험에서와 동일한 단계로 설정되어야 하는데, 본 시험의 경우 최대 인발하중을 10MN으로 결정하여 5, 10, 15 그리고 20MN으로 재하단계에서 하중을 재하하여야 하였으나, 압축정재하시험 단계에서 설정한 하중단계와 하중제거주기를 그대로 사용하였다.



재 료 표					
설치부위	품 명	기호	산출근거	소요수량 (개)	비고
소켓부	철근응력계	■	7개소×2개 = 14개	15	제작
	콘크리트응력계	□	10개소×2개 = 20개	22	제작
강관부	강관응력계	●	6개소×2개 = 12개	13	제작
속채움 콘크리트부	콘크리트응력계	□	5개소×2개=10개	11	제작

그림 5. 반력말뚝 (P2)에 대한 센서 설치도

표 2. 반력말뚝들에 대한 인발저항력의 사전검토

반력 말뚝	극한 인발력 MN (수치 계산방법)	극한 인발력 MN (지지력 공식)	허용인발 저항력 MN (안전율 6.0 적용)	인발 변위 (mm)
P6	10.72	28.0	4.7 ~ 17.8	4.28
P13	12.4	32.6	5.4 ~ 20.7	4.26
P2	10.0	27.3	4.6 ~ 16.6	3.83
P9	9.0	24.6	4.1 ~ 15.1	3.82

표 3. 하중재하 방법

사 용 된 반 력		반력말뚝의 인발저항력
시험 최대 하중		20 MN
하중 단계 수		16단계
cycle 수		8 cycle
하중 유지 시간	최초하중단계	· 30분 이상의 일정시간 · 시간당 침하율이 0.25 mm/hr보다 작을때까지 · 또는, 최대 2시간이상
	반복하중단계	· 최대 20분이상
	최대재하하중단계	· 12시간 이상
	0하중단계	· 2시간 이상
계측 시간	최초하중단계	· 실시간 계속 계측
	반복하중단계	· 실시간 계속 계측
	0하중단계	· 실시간 계속 계측

4. 대구경 반력 말뚝의 거동

4.1 말뚝머리 인발 하중 - 인발변위 관계

풍화대에 소켓된 반력말뚝들 (P6, P13)은 인발지지력이 다소 부족할 수 있을 것으로 예상되었으므로 말뚝정재하시험 도중 말뚝머리의 인발변위를 지속적으로 측정하였다. 각 하중단계별로 반력말뚝 P2와 P9에 대한 인발변위를 측정하여 그림 6에 나타내었다. 반력말뚝들에 편심하중이 작용되어 P6에는 약 10MN의 인발하중에서 최대 7.5mm의 최대인발변위가 발생하였으나 하중을 제거한 상태에서는 최종잔류인발량은 약 1mm가 되었다. P13에는 약 10MN들의 인발하중에서 4.5mm의 최대인발변위가 발생하였고 최종잔류인발량은 약 1mm였다. 따라서 최대압축하중 20MN까지 상재한 말뚝정재하시험의 반력말뚝으로 사용된 대구경 풍화대 소켓강관말뚝의 인발에 대한 안정성은 문제가 없었다.

암반에 소켓된 반력말뚝들 (P2, P9)의 인발변위는 LVDT의 고장과 충분할 것으로 예측되었던 인발지지력으로 인하여 측정하지 못하였으나 개략적인 인발변위는 광과거리계로 확인하였는데, 최대변위는 5mm 정도 였다.

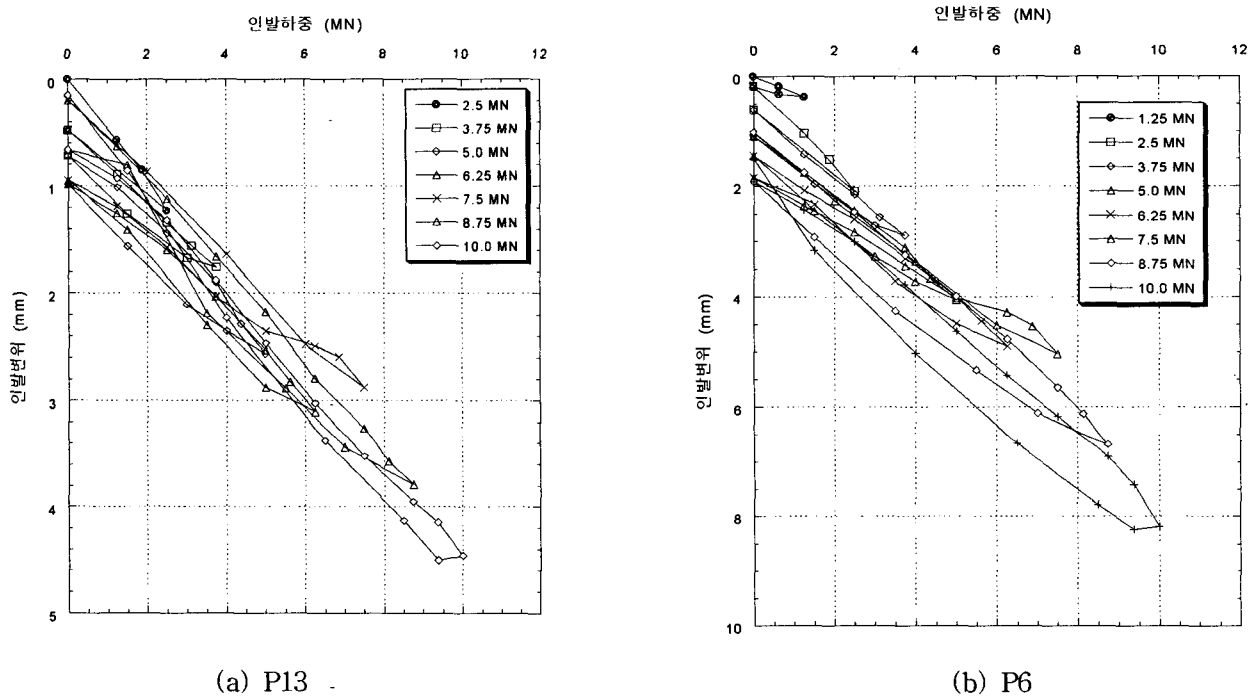


그림 6. 말뚝머리의 인발하중 - 인발변위 관계

4.2 인발하중의 분포도

축하중계측용센서가 설치된 반력말뚝 P2에 대한 인발하중의 분포도를 그림 7에 도시하였다. 인발하중의 분포도는 압축정재하시험에서 측정된 압축축하중의 분포도와 다소 상이하였다. 즉, 대부분의 압축축하중은 상부 풍화암층에서 발휘되었고, 하부풍화암층에서는 일부분만 발휘되었으며, 암반 층에서는 거의 발휘되지 않았다. 그러나 대부분의 인발하중은 풍화암층과 암반층에 소켓된 철근콘크리트부와 강관부에서 발휘되었다. 10MN의 인발하중재하시험 암반 층의 소켓부에서 약 1MN이 발휘되었으며, 풍화대의 소켓부에서 약 8.5MN이 발휘되었다.

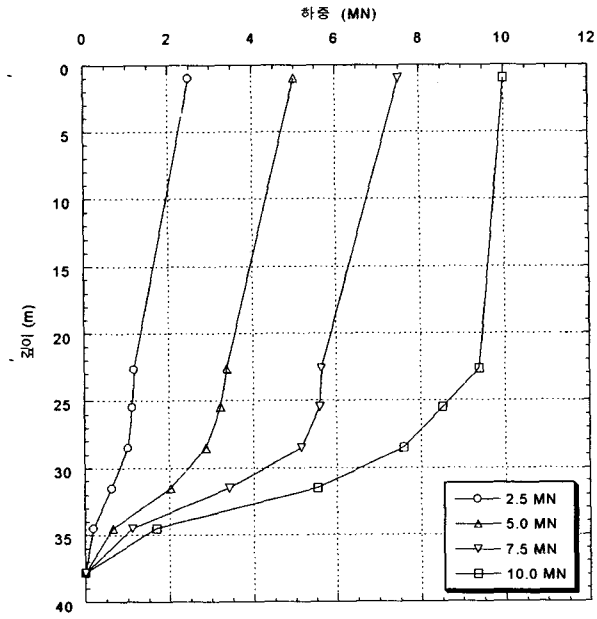


그림 7. 말뚝관입깊이에 따른 인발하중의 분포도 (P2)

5. 결론

해상에 시공된 대구경($\phi = 2500\text{mm}$) 암반소켓 강관말뚝을 반력말뚝으로하여 말뚝정재하시험을 성공적으로 수행하였다. 반력말뚝들은 실제로 사용될 말뚝이었으므로 축하중 계측용 센서와 말뚝머리변위계를 사용하여 반력말뚝의 안정성을 확보하면서 말뚝정재하시험을 수행하였다.

20MN의 최대 압축재하하중에서 풍화 대에 소켓된 반력말뚝의 최대인발변위는 4.5 ~ 7.5mm이었으며 최대잔류인발변위는 약 10mm였다. 또한, 암반에 소켓된 반력말뚝의 인발하중은 하부풍화대에서 약 6.7MN이 발휘되었으며, 상부풍화대에서 약 1.8MN, 암반층에서는 약 1.0MN의 인발하중이 발휘되었다

참고문헌

1. 최용규 (2000), "광안대로 건설공사의 대구경 말뚝정재하시험과 수치해석을 통한 말뚝기초의 안정성 검토 보고서". 2000. 2
2. Cox, W. R., Cameron, H. K. and Clarke, J. (1992), "Static and cyclic axial load tests on two 762mm diameter pipe piles in clays", Large-scale pile tests in clay, Proceedings of the conference Recent large-scale fully instrumented pile tests in clay held at the Institution of Civil Engineers, London, June 23 - 24, 1992, PP 268 - 284
3. ASTM D1143 - 81(1994), "Standard test method for piles under static axial compressive load"
4. ASTM D3689 - 90(1995), "Standard test method for individual piles under static axial tensile load"