

오스터버어그 셀을 이용한 말뚝 재하시험방법 및 적용 사례 연구

1. 서론
2. 지반조건
3. 현장타설말뚝 설계 및 시공
4. O-cell을 이용한 말뚝 재하시험
5. 시험결과
6. 분석 및 고찰

김원철

Won-Cheul Kim

한양대학교 토목공학과 겸임교수

Instructor, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.

최용규

Yongkyu Choi

경성대학교 건설환경공학부 교수

Professor, Dept of Civil & Environmental Eng., Kyusung Univ.

임태경

Tea-Kyong Lim

경성대학교 토목공학과 석사과정

Graduate Student, Dept of Civil Eng., Kyusung Univ.

정창규

Chang-Kyu Jung

부산광역시 건설본부 교량건설1과장

Manager, Construction Headquarter, Busan Metropolitan City.

박봉근

Bong-Keun Park

(주)백경 지앤씨 이사

Director, Baikgeung G & C.

오스터버어그 셀을 이용한 말뚝 재하시험방법 및 적용 사례 연구

김원철¹⁾, Won-Cheul Kim, 최용규²⁾, Yongkyu Choi, 임태경³⁾, Tea-Kyong Lim,
정창규⁴⁾, Chang-Kyu Jung, 박봉근⁵⁾, Bong-Keun Park

- 1) 한양대학교 토목공학과 겸임교수, Instructor, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.
- 2) 경성대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept of Civil & Environmental Eng., Kyusung Univ.
- 3) 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept of Civil Eng., Kyusung Univ.
- 4) 부산광역시 건설본부 교량건설1과장, Manager, Construction Headquarter, Busan Metropolitan City.
- 5) (주)백경 지앤씨 이사, Director, Baikgeung G & C.

1. 서 론

말뚝기초의 지지력예측방법으로는 말뚝재하시험에 의한 방법, 실내역학시험결과를 이용한 정역학적 방법, 현장원위치시험 결과에 의한 방법, 파동방정식에 기초한 방법, 항타공식 등 동역학적 방법 그리고 수치적 해석기법 등을 들 수 있다. 시험수행과정이나 시험결과의 해석에 있어 다소 불확실성이 내재하고 있기는 하지만 말뚝기초의 지지력예측방법으로는 말뚝재하시험에 의한 예측방법이 가장 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다. 그러나 설계 목적의 말뚝재하시험의 중요성이 인식되지 않아 그 동안 정역학적 공식에 의해 말뚝의 지지력을 예측하고 설계하중의 지지 가능 여부를 확인하는 목적으로 재하시험을 수행해 오고 있는 실정이다. 이로 인해 대부분 말뚝의 지지력이 과소평가되며, 말뚝기초의 과잉 설계로 인한 경제적 손실은 실로 막대하다고 추정된다.

일반적으로 조립질 모래, 조밀한 실트, 풍화암 등에서의 지지력은 예측치보다 실측치가 3~5배 정도 크게 나타나며 특히, 경암의 경우에는 이 비율이 5~15배까지 증가한다고 알려져 있다(Osterberg, 1998). 따라서 본 수행사례에서는 Osterberg-cell을 이용한 ○○교 건설공사현장에서 현장타설말뚝의 재하시험을 통해 말뚝의 지지거동 및 지지력을 측정하여 설계 지지력을 만족하는 지 확인하였다. 특히, 정재하시험과 O-cell 시험을 비교하기 위하여 현장타설말뚝에 스트레인게이지를 설치하여 각각의 재하시험시 주면마찰력을 측정하였고 또한 O-cell을 설치하여 선단지지력을 측정하였으나, 본 논문에서는 O-cell 시험 자료만을 분석하였다.

2. 지반조건

지하수위는 G.L. -5m이며 지반조사 결과는 아래 표 1과 같다.

표 1. 지반조사 결과

심도 (m)	층 후 (m)	지층명	N치 (회/cm)	비 고
0~5.2	5.2	매립층	5~10/30	황갈색 점토, 잔자갈 혼합층
5.2~10.7	5.5	모래층	7~9/30	암갈색 세립질 모래에 소량의 실트 및 점토 혼재됨
10.7~15.5	4.8	점토층	3~4/30	암회색 점토에 페각류 및 유기질토 혼재됨. 느슨한 상태
15.5~16.8	1.3	자갈층	25/30	암갈색 자갈, 실트, 모래 혼재됨
16.8~24.5	7.7	풍화토층	13~42/30	녹회색 입도균등한 점토질 풍화토
24.5~31.6	7.1	풍화암층	50/3~5	담황색 연암의 풍화대층으로 조밀한 상태
31.6~36.8	5.2	연암층	50/2	담녹색 절리와 균열이 발달함 심도 36.8 m에서 시추종료

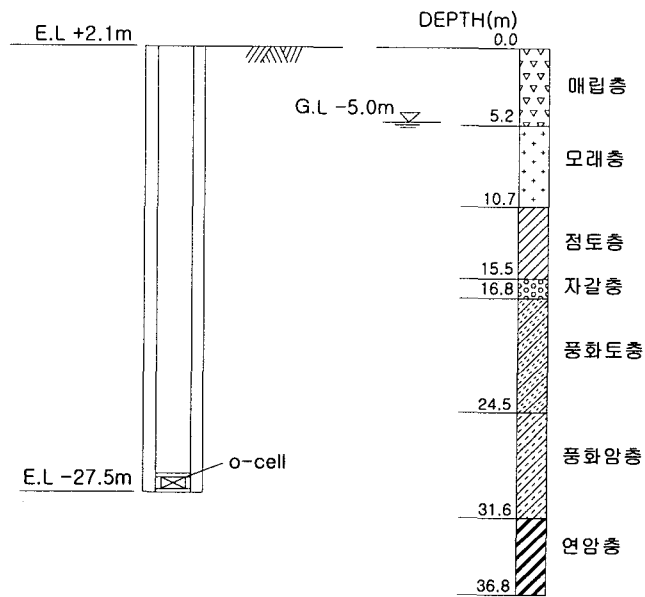


그림 1. 시험말뚝 및 지반조건

3. 현장타설말뚝 설계 및 시공

3.1 설계

실시 설계에서는 “도로교표준시방서 하부구조편-말뚝기초의 설계 (대한토목학회, 1996)”에 근거하여 정역학적 지지력 공식으로 말뚝의 허용지지력을 산정하였다. 시공도중 설계하중이 과다하게 산정된 것

으로 사료되어 원설계를 수정하여 설계변경을 실시하였다. 즉, 실시설계에서는 당시의 지반조사결과를 토대로 연암에 1m만큼 근입시킨 길이 54.5m의 현장타설말뚝으로 설계하였으나, 시공초기에 실시된 지반조사결과를 참조하여 풍화대에 3-4m정도 소켓시키는 길이 29.6 m정도의 현장타설말뚝으로 변경하였다. 이 때 변경설계된 말뚝의 허용지지력은 390 ton으로 산정되었으며, 말뚝 한 본당 설계하중은 평상시 319.8 ton이었다. 실시설계와 변경된 설계에서 현장타설말뚝의 지지력은 도로교 표준시방서에 제시된 산정공식에 의하여 구하였으며 결과는 표 2에 요약하였다.

표 2. 지지력 산정 결과

구 분		극한지지력 (ton)	허용지지력 (ton)	말뚝길이 (m)	말뚝직경 (mm)	비 고
설계 변경전	주면마찰력 (안전율 = 4)	3207.5	801.9	54.5	1500	연암 1m 소켓
	선단지지력 (안전율 = 3)	530.1	176.7			
	전체지지력	3737.6	978.6			
설계 변경후	주면마찰력 (안전율 = 4)	852.5	213.1	29.6	1500	풍화암 3-4m 소켓
	선단지지력 (안전율 = 3)	530.1	176.7			
	전체지지력	1382.6	389.8			

3.2 시험말뚝시공

희생강관의 진동항타관입 및 해머그랩과 RCD굴착장비를 이용한 강관내부 속파기를 병행하였다. 여러 번의 항타관입과 굴착을 반복하여 희생강관을 풍화암층 상부까지 관입시킨 다음 RCD굴착에 의해 풍화암층에 3-4m 정도 나공부를 형성시켰다. 조립된 철근망 선단에 O-cell과 LVDT 그리고 변위봉(Telltale)을 그림 2과 같이 설치한 다음 철근망을 투입한 후 콘크리트를 타설하였다. 이 때 LVDT는 O-cell의 피스톤의 변위를 측정할 수 있게 설치하였으며, 변위봉은 말뚝의 상향변위와 하향변위를 각각 측정할 수 있게 설치하였다. 그리고 말뚝머리의 변위를 측정하였다. 여기서 사용한 O-cell의 제원은 표 3과 같다 (백경지앤씨, 2002).

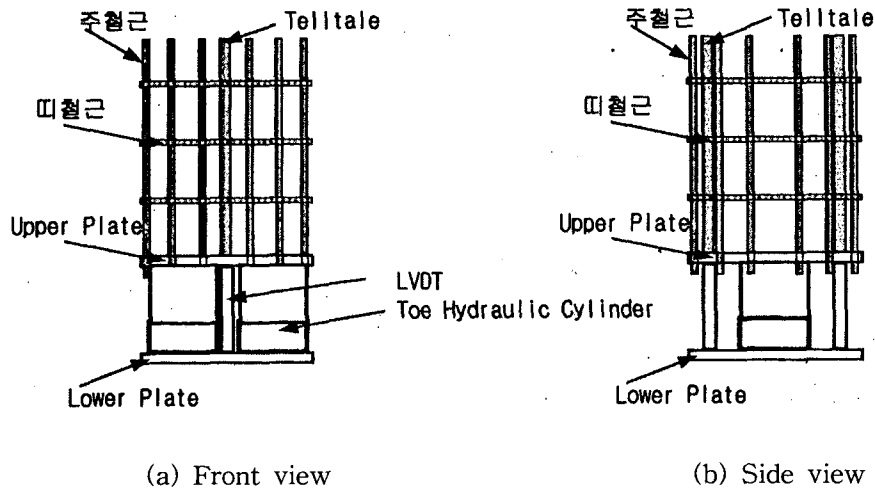


그림 2. 철근망 선단에 설치된 O-cell

표 3. O-cell의 제원

명 칭		제 원	수 량
Hydraulic cylinder		Capacity : 600 ton Dimension : O.D.430×H595mm Max. stroke : 250 mm Effective area : 854.8 cm ² Weight : 679 kg/EA	2 EA
Hydraulic hose	Hose	Capacity : 600 kg/cm ² Length : 37 m	4 set
	Protector	HDPE주름관	140 m
Bearing plate	A(Lower)	Dimension : O.D.1250×t50mm Area : 9705.73 cm ² Weight : 388 kg	1 EA
	B(Upper)	Dimension : O.D.1250×t50mm Area : 9303.61 cm ² Weight : 372 kg	1 EA

4. O-cell을 이용한 말뚝 재하시험

4.1 시험원리

O-cell 방법은 미국 노스웨스턴 대의 명예 교수인 Jorj O. Osterberg 박사에 의해 고안되었으며 특수하게 고안된 유압식 잭(Jack)을 일반적으로 말뚝 선단 가까이 설치하여 선단 지지력과 주변 마찰력에 의해 재하에 필요한 반력을 상호간에 마련해 주는 방식이다. 지상에서 유압을 가하면 Cell의 하부는 하향

으로 움직여 선단지지력을 발생시키고 Cell의 상부는 동일한 힘으로 상향으로 움직이면서 말뚝에 주변 마찰력을 발생시킨다.

그림 3은 O-cell 시험방법과 일반적인 말뚝 정재하시험방법과의 차이점을 보여준다.

왼쪽에 나타낸 종래 말뚝 정재하시험은 두부에서 하중을 재하하므로 반력말뚝이나 큰 재하장치가 필요하다. 이때 말뚝두부에 재하되는 하중 P는 주변마찰력 F와 선단지지력 Q로 지지되며, 말뚝의 탄성계수와 함께 변형을 또는 압축량을 스트레인게이지 등을 통해 측정해야만 이 두 지지력을 분리할 수 있다.

O-cell 방법은 정적인 하중에 의한 말뚝의 압축시험이라는 면에서는 종래의 정재하시험과 같지만 하중을 말뚝두부가 아닌 선단이나 말뚝의 임의 위치에서 재하하게 된다. O-cell이 팽창함에 따라, O-cell의 최대용량 또는 선단지지력과 주변마찰력중 하나가 극한값에 도달할 때까지 선단지지력 Q와 주변마찰력 F는 서로에 대하여 반력으로 작용하게 된다.

그림 4는 O-cell의 장치 개념도를 나타낸 것으로, 일반적으로 O-cell의 팽창량은 LVDT의 선단을 하부판에 설치하여 구하며, 상부판의 변위량은 상부판에 연결한 telltale로 직접 측정한다. O-cell의 팽창량에서 상부판의 변위량을 감하면 하부판의 변위량을 구할 수 있다. 또한 말뚝두부의 변위량은 다이얼게이지나 LVDT를 이용해 구할 수 있으며 상부판의 변위량과 말뚝두부의 변위량의 차이가 말뚝의 압축량이 된다.

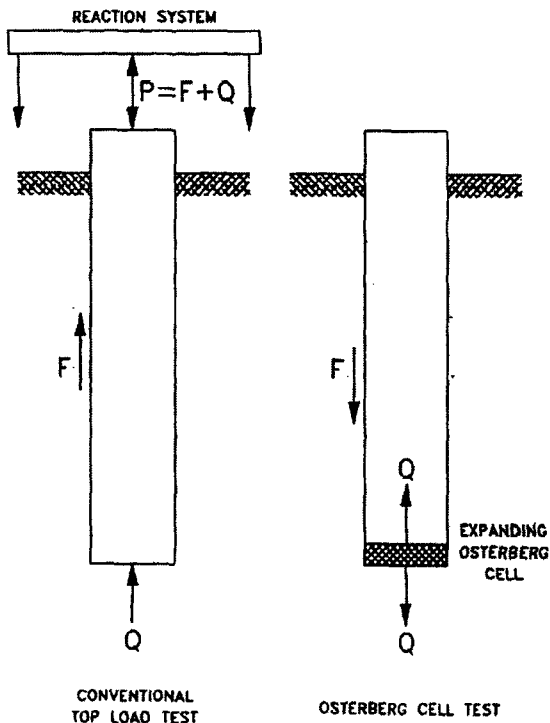


그림 3. 일반적인 말뚝 정재하시험과 O-cell 시험의 차이

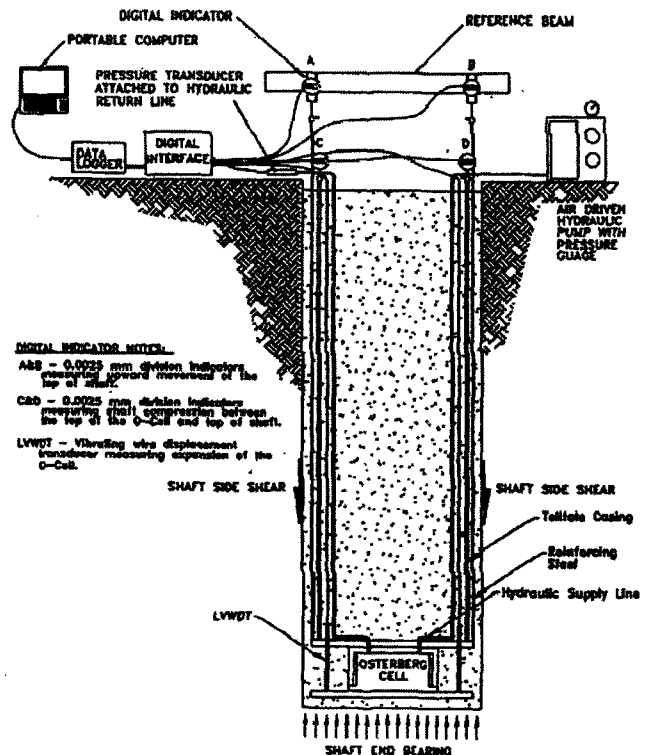


그림 4. 일반적인 O-cell 장치 개념도

4.2 재하시험절차

O-cell 시험은 일반적으로 ASTM D-1143 (1981) 급속재하시험방법에 따라 수행된다 (Schmertmann et al., 1998). 그러나 본 시험에서는 정재하시험과의 비교를 용이하게 하기 위하여 ASTM D-1143 (1981)의 표준재하방법과 주기재하방법에 따라 실시하였다. 즉, 하중단계를 정재하시험의 경우에는 9주기로 하였으며, O-cell 시험의 경우에는 정재하시험 하중단계의 1/2만큼씩 재하하여 8주기로 설정하였다. 정재하시험을 수행한 후에 가해진 모든 하중을 제거하고 난 다음 O-cell 시험을 수행하였다.

5. 시험결과

5.1 하중-변위 곡선

그림 5는 O-cell의 하중단계(1~8주기)별 재하시험결과를 나타낸 것으로서 O-cell 재하시험에서는 두 개의 하중-변위 곡선이 직접 구해진다. 그중 하나는 O-cell 하부판의 하향이동에 대한 하중-하향변위 곡선이며, 다른 하나는 O-cell 상부판의 상향이동에 대한 하중-상향변위 곡선이다.

그림 6은 각 주기에서의 최대의 하중과 변위의 관계를 도시한 것으로서 O-cell 하중이 500 ton 이하 일 때 O-cell의 하부판이 상부방향으로 움직인 것으로 나타난 데이터는 하부판과 지반이 완전히 밀착되지 않아서 발생한 것으로 판단되었다. 따라서, 이 부분은 그림 7과 같이 500 ton 이상의 데이터를 이용해 회귀분석하여 외삽법으로 산정하였다. 또한 시험말뚝을 시공한 후에 측정된 선단하중의 크기는 약 147.5 ton 이었으며, 이 하중은 말뚝의 자중(the buoyant weight of the test pile)으로 인해 발생한 것으로 판단되었다. 그림 6의 하중-상향변위 곡선에서 나타나듯이 이 자중까지의 상부판의 변위는 대략 '0'에 가깝다는 것을 알 수 있었다. 따라서 이 자중은 주변마찰력-변위 곡선상에서 상향변위량에 따른 주변마찰력을 구할 때는 반드시 감해주어야 한다.

시험결과 그림 7에서 보여진 대로 선단지지력과 주변마찰력 모두 항복점을 보이지 않았으며 따라서 선단지지력과 주변마찰력 모두 극한하중에 도달하지 못했다. 또한 그림 5에서 보여진 대로 최대하중 1250 ton까지의 반복하중에 의한 거동도 탄성영역내에 있는 것으로 보여진다.

표 4. 하중재하표

시 험 주 기							
1주기	2주기	3주기	4주기	5주기	6주기	7주기	8주기
0	0	0	0	0	0	0	0
62.5							
125.0	125.0	125.0	125.0	125.0	125.0	125.0	125.0
	187.5						
	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0
		312.5					
		375.0	375.0	375.0	375.0	375.0	375.0
			437.5				
			500.0	500.0	500.0	500.0	500.0
				562.5			
				625.0	625.0	625.0	625.0
					687.5		
					750.0	750.0	750.0
						812.5	
						875.0	875.0
							937.5
							1000.0
							1062.5
							1125.0
							1187.5
							1250.0
							1125.0
							1000.0
							937.5
							875.0
						812.5	
						750.0	750.0
					687.5		
					625.0	625.0	625.0
				562.5			
				500.0	500.0	500.0	500.0
			437.5				
			375.0	375.0	375.0	375.0	375.0
		312.5					
		250.0	250.0	250.0	250.0	250.0	250.0
	187.5						
	125.0	125.0	125.0	125.0	125.0	125.0	125.0
62.5							
0	0	0	0	0	0	0	0

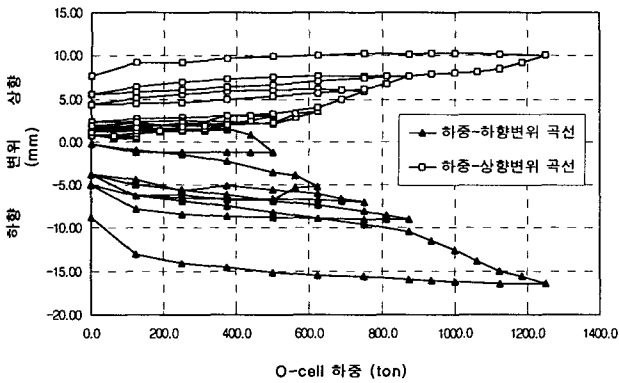


그림 5. 하중 단계별 O-cell test 결과

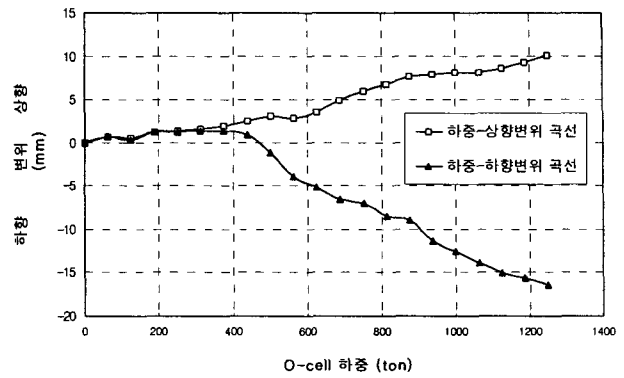


그림 6. 각 주기에서의 최대 하중과 변위

5.2 등가 하중-침하량 곡선 (Equivalent top loaded settlement curve)

O-cell 시험으로 얻은 두 개의 하중-변위 곡선을 이용하여 등가 하중-침하량 곡선을 그릴 수 있다. 등가 하중-침하량 곡선은 하중이 말뚝의 두부에 작용할 때 재하하중과 말뚝 두부의 침하량 사이의 관계를 하중-상향변위 곡선과 하중-하향변위 곡선으로부터 결정된 것이며, 이 등가 하중-침하량 곡선은 다음과 같은 가정아래서 산정된다.

- 1) 종래의 말뚝 정재하시험으로 구한 선단지지력-침하량 곡선은 O-cell의 하부판의 이동에 의해 구해지는 하중-침하량 곡선과 같다.
- 2) O-cell 시험에서 상부판 이동에 대한 하중-변위 곡선은 종래의 시험방법에서 말뚝의 주변마찰력-침하량 곡선과 같다.
- 3) 말뚝 몸체의 압축에 의한 변형은 무시할 수 있는 정도이며, 몸체는 강체로 가정한다. 일반적으로 현장타설말뚝의 압축량은 극한하중에서 1~3 mm 정도이다(Schmertmann & Hayes, 1997).

말뚝 몸체의 변형을 무시하게 되면 말뚝 두부에 하중재하시 주면과 선단에서의 침하량은 같게 된다. 따라서, O-cell 시험에서 구한 두 개의 하중-변위 곡선(그림 7)에서 같은 변위량에서의 주변마찰력과 선단하중을 각각 구해 합하면 그것이 말뚝에 작용된 전체 하중이 되며 등가 하중-침하량 곡선상의 한점으로 나타낼 수 있다. 같은 방법으로 여러 점을 구하면 그림 8과 같이 등가 하중-침하량 곡선을 구할 수 있다 (Osterberg, 2001).

그림 8에서 의하면 말뚝 두부에 하중이 약 2000 ton이 가해졌을 때 침하량은 10 mm 정도이며, 거의 선형적인 거동을 함으로 극한상태에 도달하지 않았다.

6. 분석 및 고찰

본 연구에서는 앞에서 언급한 것과 같이 원설계의 지지력이 과다하게 산정된 것으로 사료되어 연암에 1m 만큼 관입시켰던 원설계를 풍화암에 3-4m 정도 소켓시켜 현장타설말뚝의 실제 시공길이를 약 24 m 줄이는 것으로 원설계를 변경시켰다. 이와 같은 변경된 설계개념의 합리성을 입증하기 위하여 O-cell 시험을 실시하였다. O-cell 시험에서 최대 2,500톤의 하중을 재하하였으나 이 때에도 현장타설말뚝의 거동은 하중-침하량 관계에서 거의 직선으로 나타나, 항복거동은 확인할 수가 없었으며 탄성영역내의 거동을 보였다. 이것은 풍화암층에서의 지지력의 예측치보다 실측치가 3~5배의 정도 크게 된다는 경향과 잘 일치한다. 이 때 가해진 최대하중 2500 ton은 수정된 허용지지력 390 ton과 비교해 볼 때 약 6.4배로 나타나 암반에 근입된 현타말뚝의 기존 설계법은 너무 과다한 설계인 것을 알 수 있었다. 더구나 만약 설계 변경 없이 원안대로 시공을 하였다면 이것은 엄청난 과다 설계임을 다시 한번 입증하였다.

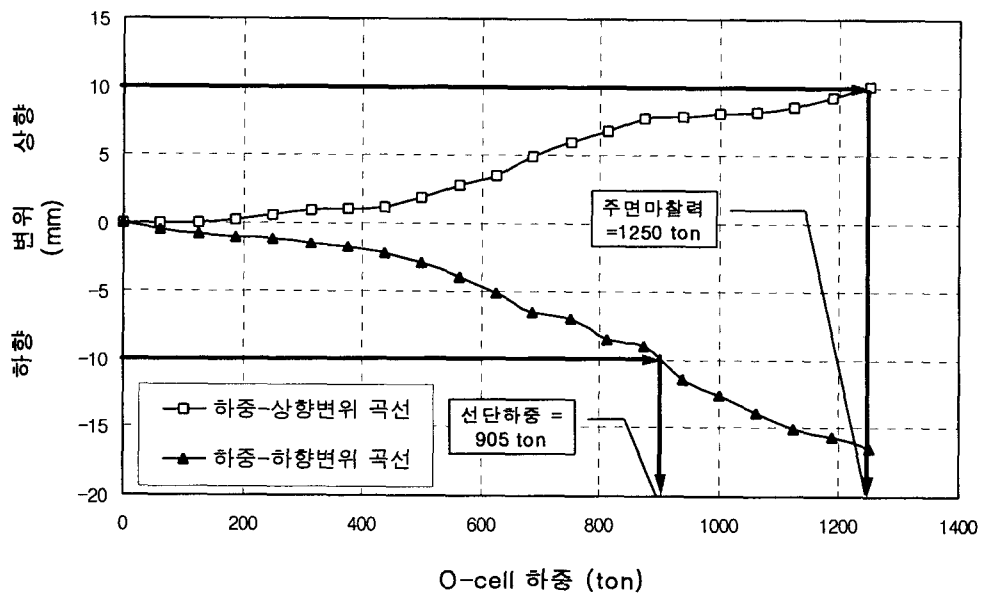
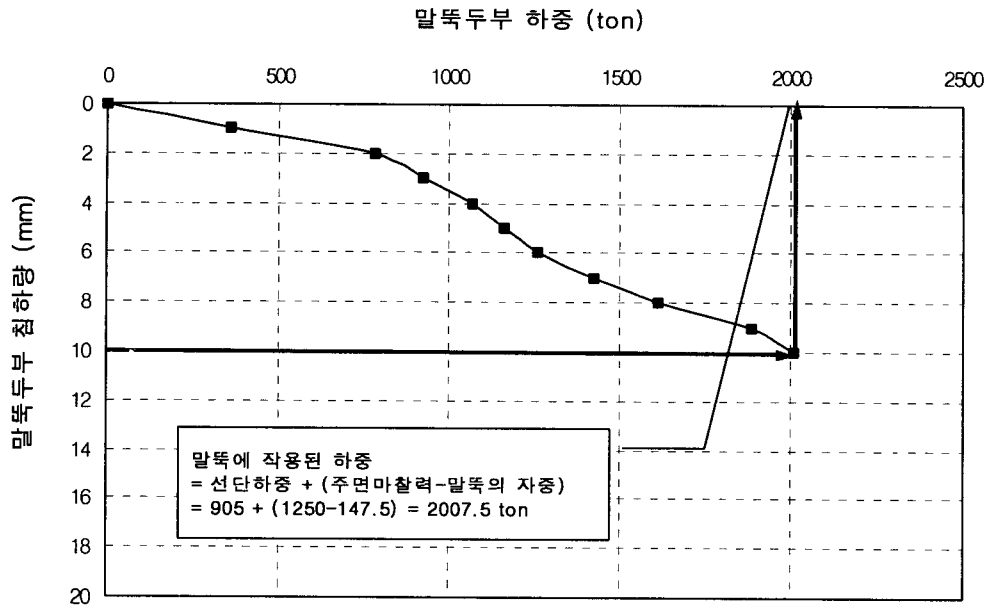


그림 7. 수정된 O-cell test 결과



7. 참고문헌

1. 대한토목학회 (1996), "도로교 표준시방서", 건설교통부 제정
2. (주)백경지앤씨(2002), 현장타설말뚝 재하시험 제안서
3. ASTM D-1143 (1981), "Standard Test Method for Piles under Static Axial Compressive Load"
4. Osterberg, J. O.(1998), "The Osterberg Load Test Method for Bored and Driven Piles the First Ten Years", *Proc. of 7th Inter. Conf. on Deep Foundations*, Vienna, Austria, Deep Foundation Institute, 1998.
5. Osterberg, J. O.(2001), "Load Testing High Capacity Piles What Have We Learned?", *Proc. of 5th Inter. Conf. on Deep Foundation Practice*, Singapore, April, 2001.
6. Schmertmann, J. H., Hayes, J. A.(1997), "The Osterberg Cell and Bored Pile Testing-A Symbiosis", *Proc. of 3th Annual Geotechnical Engineering Conference*, Cairo University, Cairo, Egypt, January, 1997.
7. Schmertmann, J. H., Hayes, J. A., Molnit, T., Osterberg, J. O.(1998), "O-cell Testing Case Histories Demonstrate the Importance of Bored Pile (Drilled Shaft) Construction Technique", *Proc. of 4th Inter. Conf. on Case Histories*, University of Missouri, Rolla, Missouri, March, 1998.