

국내최초 고속국도 제20호선 익산-장수간 건설공사 제8공구 단일 현장타설말뚝 재하시험



김 상 귀
삼부토건(주) 상무



여 규 권
삼부토건(주) 연구팀장
(moonju@sambu.co.kr)



이 승 환
삼부토건(주) 차장



봉 영 재
한국도로공사 교통분석팀장

1. 서론

효율적인 단일 현장타설말뚝의 설계 및 건설품질을 확보하기 위하여 삼부토건(주)에서 2001년 11월 22일~2007년 12월 21일까지 시공완료한 “고속국도 제20호선 익산~장수간 건설공사 제8공구” 구간중 단양교에 설치된 단일 현장타설말뚝의 시험시공말뚝에 대하여 하중전이 선단재하시험 및 본 시공말뚝과의 수평재하시험을 통해 설계의 적정성을 검증하였다. 현장 여건 및 지반조건에 대한 방대한 분량의 정보를 반영하여 단일 현장타설말뚝에 대한 평가를 수행하고, 그 결과를 설계에 반영하는 정보화 개념의 신뢰도 높은 최적설계를 실시하였다. 본 현장실험에서는 신규교량공사에 대한 설계 시 활용할 자료와 과업구간에 적용된 단일 현장타설말뚝의 안정성을 확인하였다.

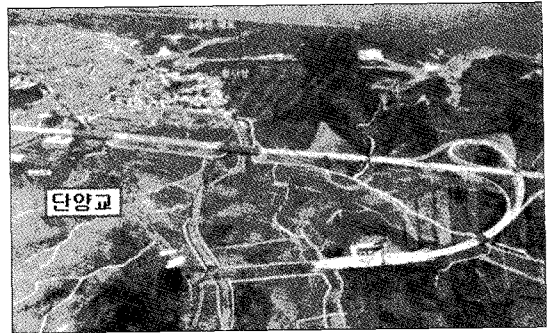


그림 1. 단양교 시공위치

2. 시험말뚝 시공

2.1 시험위치

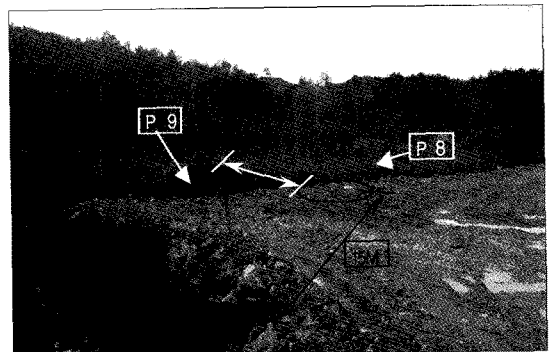


그림 2. 시험말뚝 위치

표 1. 선단재하시험 소요일정표

공정		소요일수	
말뚝 시공	선단시험장치 설치 및 타설말뚝시공	위치확인/천공	7일
		철근망 조립	3일
		하중전이센서 설치	3일
		Toe Cylinder 설치	1일
		LVDT 설치	1일
		Telltale gauge 설치	1일
		철근망 투입	1일
		Hydraulic cylinder test	1일
		콘크리트 타설	2일
	공시체 제작 (현장지원)	타설시	
양생(설계강도 이상) 일축압축시험	(현장지원)	7,14,21일	
시험 준비 (4일)	Telltale gauge rod 설치 재하장비 반입 재하장비 설치	Reference beam 설치	1일
		LVDT/Pressure transducer 설치	1일
		Hydraulic system 설치	1일
			1일
현장시험 (2일)	재하시험	1~2일	
현장 정리 (1일)	재하장비 해체 장비 상차 및 반출 복토(후속공정 진행)	1일 1일 (현장지원)	

표 2. 수평재하시험 소요일정표

공정		소요일수	
RCD시공(정재하 및 선단재하 시험용)			
말뚝시공	직업장 준비 (현장지원)	1일	
	두부정리 (현장지원)	1일	
	재하대/장비 반입	1일	
	재하장치대 설치	Pile Protector 설치 Hydraulic jack 설치 Main beam 설치 측정장비 설치	1일
현장시험	수평재하시험	1일	
현장정리 (1일)	재하장치대 해체	LVDT 해체	1일
		Hydraulic system 해체 재하대 해체	
	재하대/장비 상차 및 반출 복토(후속공정 진행)		1일

본 사례지역은 “고속국도 제20호선 익산~장수간 건설 공사 제8공구” 단양교 하행선 P8~P9 사이의 시험시공 말뚝 및 P8-장수방향에서 실시하였다.

2.2 시험기간

말뚝 시험 관련 소요 일정은 표 1~표 2와 같으며, 하중전이를 포함한 경우는 하중전이 센서(응력계) 설치 기간 2주 및 시험 준비 기간 1주 추가로 소요되었다.

2.3 하중전이 선단재하시험 말뚝 시공

철근망을 조립하면 주철근에 steel gauge 및 concrete gauge를 설치하고, lead cable을 연결하고, steel gauge에 silicon을 도포하여 보호 조치한다.

시험말뚝 시공시 말뚝 선단 부 철근망 하단에 유압 셀을 장착한 Plate를 아래 그림과 같이 고정하여 설치하고, LVDT 및 Telltale Gauge를 설치하였다.



그림 3. 시험말뚝 철근망 제작



그림 4. 하중전이 게이지 설치

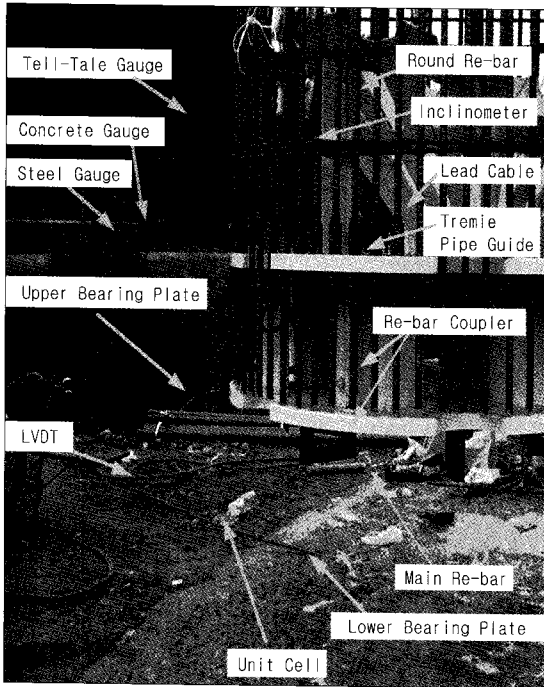


그림 5. 선단Cell 조립

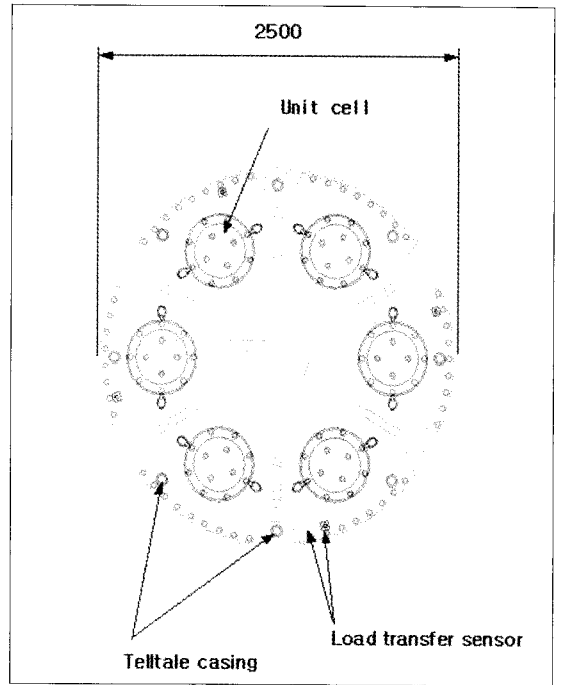
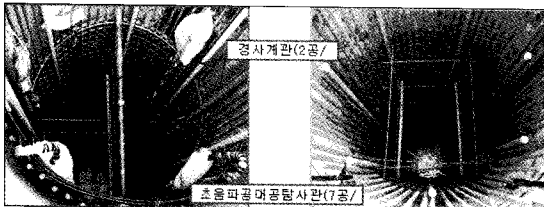


그림 6. 하중전이용 센서 설치 위치도

2.4 수평재하시험 말뚝 시공

시험말뚝 시공 시 말뚝에 경사계를 설치한다. 설치현황은 그림 7과 같다.

말뚝 시공 후 말뚝 주변을 1.2m 굴착한다.



(A) 시험시공말뚝

(B) P-8장수방향

그림 7. 케이싱 설치

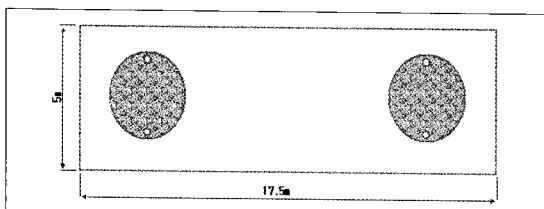


그림 8. 케이싱 설치

3. 현장시험

3.1 선단재하시험 방법

기초말뚝의 지지력을 추정하는 수단으로는 정역학적 지지력 공식과 동역학적 지지력 공식 등이 있으나, 이 방법들의 신뢰도가 낮으며, 재하시험도 실제의 상이한 조건하에서 시행되므로 그 방법이나 결과의 해석에 약간의 문제가 남아있기는 하나 현재의 기술 수준으로는 재하시험을 실시하여 지지력을 직접 확인하는 방법이 최선이라고 판단된다.

본 현장에서는 말뚝의 연직 하중전이 선단 재하시험으로 표 3의 시험을 실시하였다.

3.1.1 하중전이 측정

선단재하시험 시에 실시하며, 두부정리 후에 Lead Cable을 정리하여 Multi-ch-box에 연결하여, Data logger로 연결한 후 각단계별 변형량을 scanning하여 저장하였다. 이때 하중단계 및 주기는 표 3 시험주기표에 따랐다.

표 3. 선단재하시험 하중 재하주기표

주 기	1st cycle		2nd cycle		3rd cycle		4th cycle		5th cycle		비 고
	load	time	load	time	load	time	load	time	load	time	
Loading	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	관측시간은 시간 당 침하속도가 1/100' 이내이면 다음 단계 하중을 인가하며, 지속적인 침하가 진행되면 각 단계에서 1시간 이 후 다음 단계 하중을 가하였다. 5주기에서 2500ton가력시 침하량이 과대하게 발생되어 시험을 종료함
	250	20	250	10	250	10	250	10	250	10	
	500	30	500	10	500	10	500	10	500	10	
		750	60	750	10	750	10	750	10		
			1000	30	1000	10	1000	10	1000	10	
					1250	60	1250	10	1250	10	
					1500	60	1500	10	1500	10	
							1750	60	1750	10	
							2000	60	2000	10	
									2250	60	
Re-bounding									2500	40	
								2000	10		
							1500	10	1500	10	
					1000	10	1000	10	1000	10	
	250	10	500	10	500	10	500	10	500	10	
	0	20	0	50	0	30	0	30	0	90	

3.1.2 선단 변위 측정 방법

선단 변위의 측정은 시험시공말뚝 시공 시 기설치된 선단 Cell 상단 및 하단 Plate에 각기 3개씩 설치된 관에 Tell-tale gauge를 설치하고 상부에 Plate를 조립후 LVDT를 설치하여, Data logger에 연결하여 측정하였다.



그림 9. 말뚝두부 LVDT설치

3.1.3 하중측정

하중측정은 Load Transmeter의 값을 Data logger에 연결하여 측정하였다.

3.2 수평재하시험 방법

수평방향 시험은 ASTM D3966의 반력말뚝 시험방법을 따르며, 동 규정 6.1항의 표준재하방법에 의하였다. 각 단계별 Loading time은 10분 이상으로 하였다. Loading 및

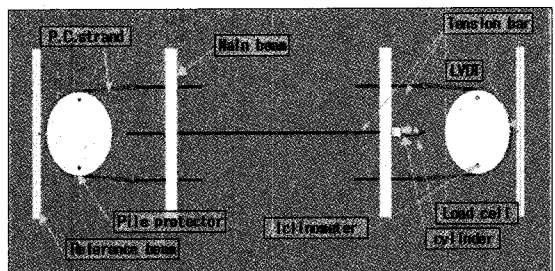


그림 10. 시험말뚝 평면도

표 4. 수평재하시험 하중 재하주기표

cycle	1st cycle		2nd cycle		비고
	Load(ton)	Time(min)	Load(ton)	Time(min)	
Loading	0	10	0	10	환산 범위가 시간당 1/100" 이내 이면 다음 단계 하중 인가
	14	10	14	10	
	28	10	28	10	
	42	10	42	10	
	56	15	56	15	
			70	20	
			84	20	
			98	20	
Re-Bounding			112	20	
			84	10	
			56	10	
	28	10	28	10	
	0	30	0	30	

unloading을 계획하여 Pa와 Pt(목표 하중) 사이를 8단계로 나누어 2주기로 재하하였다.

4. 선단재하 시험 결과 분석

본 시험방법은 Barrette Pile, Caisson 기초, Drilled Pier 등의 대규모 말뚝에서 극한하중까지의 시험이 가능하다. 말뚝 선단에 상하 플레이트 사이에 유압실린더 및 LVDT를 설치하여 실린더의 Stroke를 측정하고, 플레이트 및 말

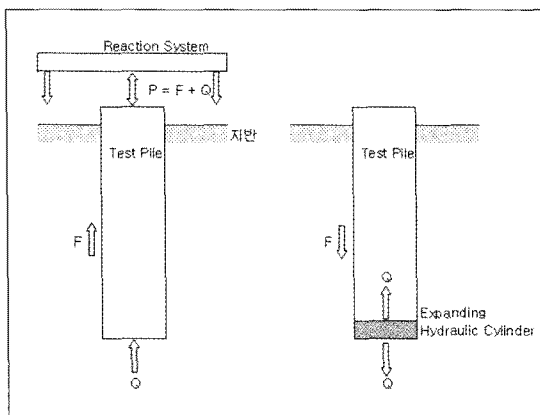


그림 11. 선단재하 시험 개요도

뚝 두부의 거동을 Telltale Gauge 및 LVDT로 측정하여 말뚝 주면의 저항과 선단 지지력을 동시에 측정한다. 본 시험 방법은 Northwestern 대학 명예 교수였던 Jorj Osterberg 박사가 창안한 바에 따라 명명되었으며, 1984년 Jurj Osterberg 박사와 Case Foundation, Inc.가 처음 시험에 적용하였다.

국내에서의 시험은 2002년 4월에 부산 수영3호교에서 처음 실시되었으며, 그후 남항대교, 부산지하철 2공구 양산선, 영동선, 거금도연육교 등에 적용되었고, 해외에서의 시험방법과는 달리 유압 cell을 사용하여 하중전이를 분석하도록 설계되었고, 시험후 선단 그라우팅이 가능한 구조로, 철근정착구를 이용해 철근망과 조립하고, 콘크리트의 타설이 용이하도록 트리미관 가이드가 설치되어 있는 특성이 있다. 일반적인 압축시험방법과 비교한 본 시험방법의 특징은 다음과 같다.

- a. 경제성(Economy) : 본 시험방법은 일반적인 정재하 시험방법에 비해 재하장치의 설치 해체 과정 및 재하대 설치공간이 불필요하며, 재하대 검토 등이 필요없어 경제적인 시험방법으로 시험하중이 높을수록 유리하며, 시험비용은 일반적인 정재하에 비해 1/3~2/3의 비용이 소요된다.
- b. 높은 시험하중(High Load Capacity) : Kentucky, Massachusetts와 Georgia에서 5,510ton, 5,714ton, 6,734ton이 시험에 적용되었으며, 초 고하중의 시험도 가능하다.
- c. 주면마찰력과 선단지지력의 동시 측정 : 본 시험은 자동으로 선단과 주면이 분리된 값이 측정된다.
- d. 안정성 : 지중에서 시험되므로 안정적인.
- e. 암반관입 : 말뚝 선단암의 극한지지력을 알 수 있다.
- f. 작은 작업공간 : 6,734ton의 재하에도 3m 이내의 공간에서 시험이 가능함.
- g. 정적 Creep 이나 Setup 효과 : 본 시험은 정하중으로 진행되는 시험이며, ASTM D 4719의 Pressuremeter 시험과 유사하다.
- h. 연속 시험 : Florida 대학에서 1994년부터 1996년 6월까지 시험하였다.

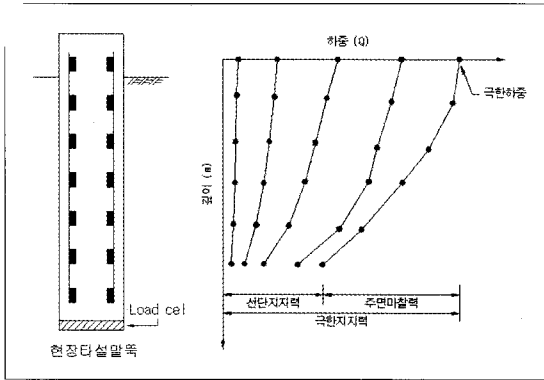


그림 12. 하중전이 해석법 개요도

5. 하중전이 시험 결과의 분석

5.1 하중전이 해석법

본 실험에서 사용하는 분석법은 실험적인 방법 (Experimental approach)으로써 강관 말뚝과 현장타설말뚝에 축하중 계측 장치를 부착 또는 매설하여 축하중의 분포를 각재하단계별로 직접 측정하는 것이다.

5.2 축하중 측정용 센서 설치

본 시험에서는 말뚝재하시험 중 말뚝부재에 발생하는 변형률을 측정하기 위해서 속채움 철근망에 완전결선형 전기저항식 변형률센서를 고정시켰다. 철근 접착형센서는 센서를 부착한 변형봉을 주철근에 접착시켰는데 먼저 실내에서 변형봉을 제작하여 현장에서 주철근에 접착시킨 후 완전결선회로를 이루도록 하였다. 그리고 철근을 철근망에 끼워 넣어 고정시켰다.

콘크리트계측용 변형률계는 연구실에서 4개의 변형률계를 변형봉에 접착시킨 후 완전결선회로를 이루도록 하였으며 완성된 콘크리트계측용 변형률계는 철근망의 전단 철근에 고정하였다.

완전결선형 전기저항식 변형률센서는 4개의 전기저항식 활성 스트레인 게이지(Active strain gauge)를 주철근 표면에 부착하여 방수 및 방충처리를 하였고, 완전결선회로(Full bridge circuit)로 형성되어 있으므로 온도차에 의

한 오차를 상쇄시킬 수 있었다.

이러한 센서의 위치는 그림 13과 같다.

5.3 시험결과 및 분석

현장재하시험결과 측정된 하중단계별 주면마찰력 분포도는 그림 14와 같다.

위 그래프의 분석결과 시험최대하중인 2,500 tonf일 때의 주면마찰력의 분포를 보면 연암층과 풍화암층에서 마찰력의 대부분이 발휘되고 있는 것을 알 수 있었으며 특히 풍화암층에서 마찰력의 약 28.8%정도가, 연암층에서는 마찰력의 약 64.6%정도가 발휘되었다.

이 결과를 이용하여 등가하중-침하량곡선과 그림 14의 주면마찰력 분포도를 이용하여 축하중 분포도를 작성하였

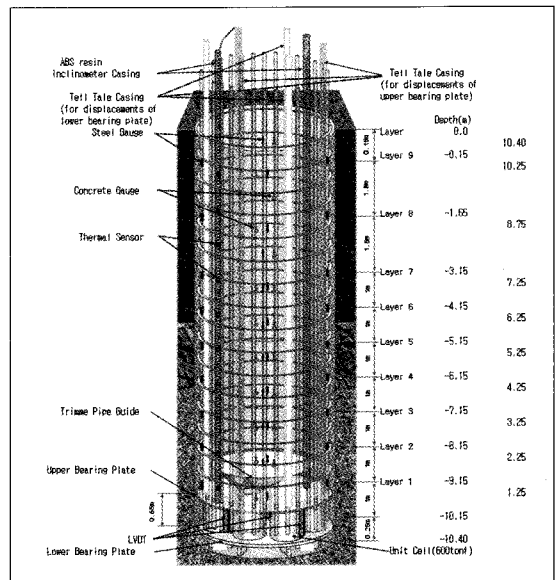


그림 13. 센서 부착 모식도

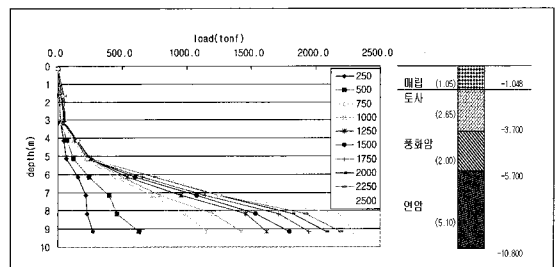


그림 14. 하중단계별 주면마찰력 분포도

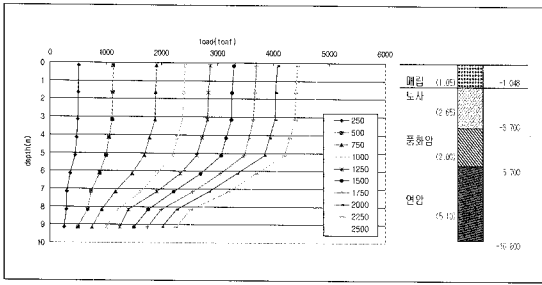


그림 15. 하중단계별 말뚝 축하중 분포도

으며, 그 결과를 그림 15에 나타내었다.

6. 말뚝 수평재하시험 결과 해석

6.1 P-8(장수방향) 말뚝 최종 평가

P-8(장수방향) 수평재하시험 결과는 그림 16, 그림 17과 같다.

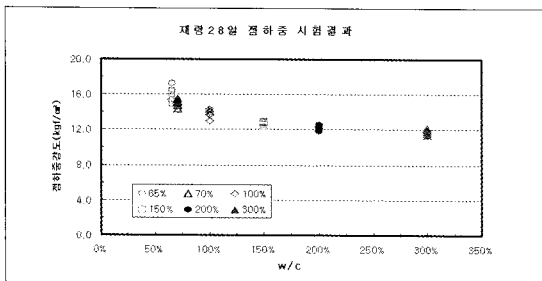


그림 16. Residual & Elastic Displacement Curve

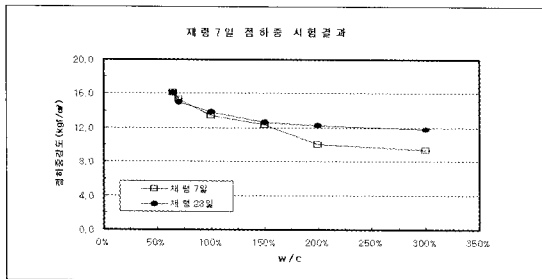


그림 17. P-D Curve

표 5. 수평하중-변위 분석 결과표

최대재하하중(ton)	최종변위량(mm)	1/4~25mm 변위시 하중
112.0	1.08	변위 발생 없음

수평하중 대 수평변위는 다음 그림 18과 같으며, 최대하중에서의 변위점은 두부정리선에서 50cm 위 지점으로 최대재하하중까지 허용이내 변위를 나타내며, 수평방향 지반반력계수는 5.121 kg/cm^3 으로 나타났다.

6.2 시험시공 말뚝 최종 평가

시험시공말뚝 수평재하시험 결과는 그림 19, 그림 20과 같다.

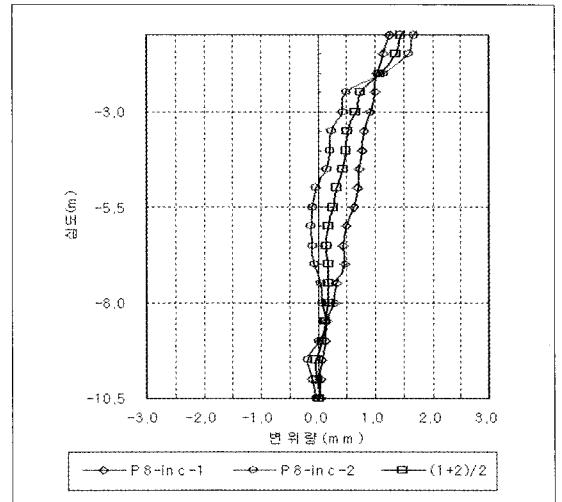


그림 18. Lateral displacement & Deflection Curve

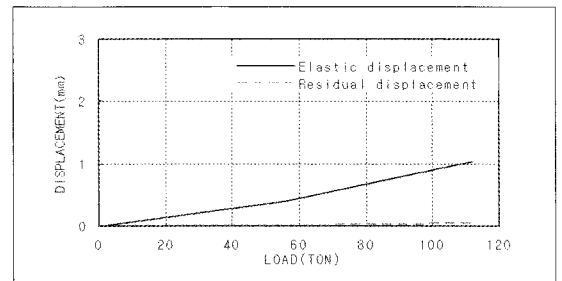


그림 19. Residual & Elastic Displacement Curve

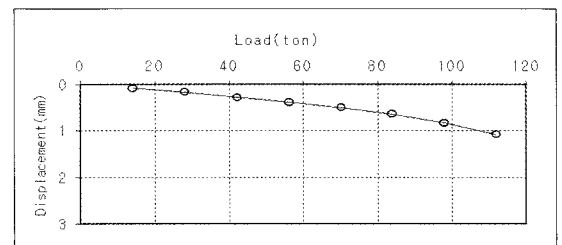


그림 20. P-D Curve

표 6. 수평하중-변위 분석 결과표

최대재하하중 (ton)	최종변위량 (mm)	1/4~25mm 변위시 하중
112.0	1.14	변위 발생 없음

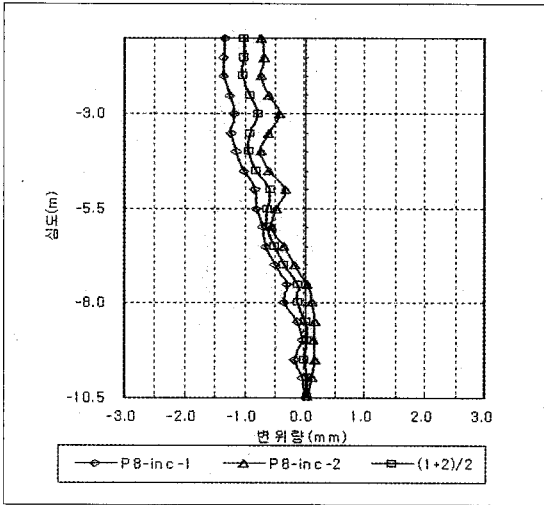


그림 21. Lateral displacement & Deflection Curve

6.3 수평재하시험 결과 요약

본 시험 결과를 요약하면 다음 표 7과 같다.

- 본 시험에서 설계시 말뚝의 수평지지력은 본 교량 기초말뚝의 최대 수평지지력을 적용한 것으로 해당 말뚝의 지지력과는 상이하다. 또한 본 시험 결과는 단항의 결과이며, 두부자유 상태에서 시험된 결과임에 유의하여 적용되어야 한다.

7. 결론

표 7. 시험결과 요약표

시험말뚝 번호	말뚝길이 (m)	시험일자	최대시험하중 (톤)	최대수평변위 (mm)	수평 지반반력계수 (Kn·kg/cm)	말뚝 허용 수평지 지력(톤)	설계 하중 에서의 변위량(mm)	설계시 말뚝 수평지지력(톤)
P8-익산방향	10.3	2004-11-29	112.0	1.08	5.121	112.0	0.41	52
시험시공 말뚝	10.3	2004-11-29	112.0	1.14	5.639	112.0	0.47	52

건설품질을 확보하기 위하여 삼부토건(주)에서 2001년 11월 22일~2007년 12월 21일까지 시공완료한 "고속국도 제20호선 익산~장수간 건설공사 제8공구" 구간중 단양교에 설치된 단일 현장타설말뚝의 본 시공말뚝과 시험시공 말뚝에 대하여 하중전이 선단재하시험 및 수평재하시험을 실시한 결과 주면마찰력 2500톤 작용시 평균 마찰응력은 매립층에서 0,163 kgf/cm², 토사층에서 0,714kgf/cm², 풍화암층에서 4,591 kgf/cm², 연암층에서 6,856 kgf/cm² 만큼 발생되어 풍화암층과 연암층에서 대부분의 마찰력이 발휘되었다.

수평재하시험 결과 최대 수평변위는 P-8에서 1.08mm 시험시공말뚝에서 1.14mm가 발생하여 교량기초의 안정성 확보는 가능한 것으로 판단되었다. 하지만 본 시험의 경우 말뚝의 수평지지력은 본 교량 기초말뚝의 최대 수평지지력을 적용한 것으로 해당 말뚝의 지지력과는 상이하며 단항의 말뚝에 두부자유 상태의 조건으로 시험된 결과임으로 유의하여 적용되어야 한다. 추후 단일현장타설말뚝에 대한 시공시 보다 많은 변수에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 전경수, 김명목(1999), "풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 연직 및 횡방향 지지거동 분석", 한국지반공학회지, 제15권 제6호, pp.155~165
2. 고속국도 제20호선 익산~장수간 건설공사 제8공구 단일현장 타설말뚝 재하시험 보고서, (2004), 삼부토건주식회사
3. 단일현장 타설말뚝 기초공법 적용 기준, (2004), 한국도로공사