

대형기초의 굴착공벽면 거칠기 및 연직도 측정

Measurements of Socket roughness and Vertical Offsets for Large Foundations

박봉근¹⁾, Bong-geun Park, 남문석²⁾, Moon S. Nam, 최용규³⁾, Yongkyu Choi

¹⁾ (주)백경지앤씨 대표이사, President, Backyoung G & C Co., Ltd.

²⁾ 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, Senior Researcher, Expressway & Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation

³⁾ 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungung University

SYNOPSIS : Recently, construction of high-rise buildings have been increased all around the world, and their foundation are designed to carry heavy loads form superstructures. For this reason, the use of drilled shafts have been increased, and the proper understanding of drilled shafts have been issued, especially for socket roughness and vertical offsets. In this study, the BKS-LRPS using laser sensor was developed for the measurement of socket roughness and vertical offsets for the first time in Korea. The BKS-LRPS was applied for measuring of socket roughness and also vertical offsets at the specific field sites,. Based on this study, BKS-LRPS was successfully applied for measurement of socket roughness and vertical offsets the in the fields, and more appropriate quality control for the vertical offsets have to be needed.

Keywords : high-rise buildings, drilled shafts, BKS-LRPS, socket roughness, vertical offsets

1. 서론

최근 Horvath 등(1983), O'Neill 등(1995), Seidel과 Collingwood(2001)의 연구에 따르면 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변마찰력은 암석의 일축압축강도 외에 굴착면의 거칠기, 암반의 재료특성, 초기 수직응력, 말뚝의 직경, 암반의 절리 및 풍화도 등에 크게 영향을 받는 것으로 알려졌다. 특히 주변 마찰력에 영향을 미치는 인자 중 굴착공의 거칠기는 암반의 종류, 말뚝의 직경, 그리고 말뚝의 시공법에 따른 영향이 큰 것으로 알려져 있다(박봉근, 2007).

대부분 레이저 센서에 관한 연구들은 공기 중에 국한되어 연구되었다. 또한 굴착공의 거칠기 측정을 위한 시스템 개발에 관한 연구는 휴스턴 대학교(Nam, 2004)와 모나쉬 대학교(Collingwood, 2000)에서 연구되어 왔다. 그러나 이러한 연구들은 공기 중에서 제한적으로 적용되었다. 따라서 현장 시공조건을 고려하여 공기 중과 수중에서 동시에 거칠기 및 수직도 측정이 가능하고, 현장 적용성이 우수한 측정 시스템에 대한 연구의 필요성을 인식하게 되었다.

국내의 경우 조천환(2003)에 따르면 굴착공벽면의 거칠기를 분석하기 위하여 암반 소켓부의 거칠기 형상에 대한 본을 제작하고, 이를 레이저 프로파일 게이지로 디지털화(digitizing)하였다. 그리고 통계프로그램(EXCEL, SPSS)을 이용하여 디지털화된 수치자료를 입체형상화하고 요소길이를 조정하여 이상화된 프로파일의 거칠기 높이와 각도를 분석하여 국내 현장타설말뚝 굴착공의 거칠기를 정량화 하였다.

말뚝의 시공 과정에서 시공 오차는 발생할 수밖에 없다. 이러한 시공 오차는 연직도와 평면위치 이동

으로 분류된다. 국내외의 시방 및 규정에서는 이러한 시공 오차에 대한 규정이 있으므로 대부분의 현장에서는 초음파(코덴) 측정에 의한 연직도 측정을 하고 있다. 그러나 이러한 장비는 케이싱을 사용하지 않고 벤토나이트와 같은 안정액을 사용하는 공법에서 굴착공 공벽 붕괴가 예상되는 지하연속벽(slurry wall)에서 연직도 측정에 적합한 측정 장치이다. 그러나 국내에서는 현장타설말뚝에 적합한 연직도 측정 장치가 없어 정밀도가 떨어지지만 널리 보급되어 사용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 정밀도가 높은 레이저 센서를 이용한 Backyoung-KyungSung Laser Roughness Profiling System(이하 BKS-LRPS라 칭함)을 개발하였다. 이러한 BKS-LRPS를 활용하여 암반 소켓부의 거칠기 형상에 대한 본을 제작하는 과정 없이 풍화암에 근입된 현장타설말뚝 굴착공벽면 거칠기를 측정하였다. 또한 현장타설말뚝 시공 과정 중 공기 중과 수중 상태에 있는 케이싱 및 암반 근입부에 대한 연직도 측정을 수행하였다. 이러한 측정 결과를 바탕으로 거칠기 측정 및 연직도 측정에 대한 새로운 접근 방법을 제안하고자 한다.

2. 시험 계획

BKS-LRPS의 현장 적용시험은 고속철도 OO 현장과 양산 OO 현장에서 실시하였다. 시험 수량 및 말뚝 시공 조건에 대하여 표 1.에 나타내었다.

표 1. 시험 수량 및 말뚝 시공 조건

구분	현장명	말뚝직경	공법	말뚝번호	측정 조건	말뚝길이(m)
거칠기 측정	고속철도 OO 현장	φ1500	베네토	B-1	공기중	12.2
연직도 측정	양산 OO현장		RCD (회생강관)	A-1	공기 중 및 수중	34.1
				A-2		35.2
				A-3		32.0
	고속철도 OO 현장		베네토	B-1	공기 중	12.2
				B-2		10.8
				B-3		10.1

3. 거칠기 측정 사례

3.1 시험 개요

본 현장에서의 말뚝 시공은 풍화암층까지 케이싱을 근입시킨 다음 슬라임 제거 등을 거쳐 레미콘을 타설하면서 케이싱을 인발하였다. 이때 굴착공의 거칠기는 케이싱이 근입된 풍화암 지반에서 형성된다. 이러한 점에 착안하여 케이싱을 1m정도 인발한 후 거칠기 측정을 하였다. 이때 지하수 유입으로 인한 풍화대의 확공 현상도 발생할 수 있을 것으로 예상되었다. 인발 후 풍화암층의 거칠기 측정과 지하수 유입에 의한 선단부의 확공 현상을 확인하기 위해 BKS-LRPS에 의한 거칠기 측정을 수행하였다.

3.2 지반 조건

지반조사 결과에 근거하면, 본 현장의 지층은 지표면에서부터 매립층, 퇴적층, 풍화토층, 풍화암층으로 구성되어 있다. 풍화토층은 GL 4.5m에서부터 GL 14.8m까지 분포하고, 풍화암층은 GL 14.8m에서부터 분포되어 있는 것으로 조사되었다. 현장타설말뚝은 원지반에서 약 4m 터파기 후에 시공되었다. 시험말뚝에 대한 지층 개요는 표 2.에 요약 정리하였다. 그리고 사진 1.은 말뚝 시공 중에 굴착한 풍화암층을 나타내었다.

표 2. 고속철도 OO현장 지층개요

고속철도 OO현장 실험말뚝		
지층명	분포심도(m)	공학적 특성
매립층	0.0 ~ 1.8	실트섞인 모래, 자갈, 전석으로 매립 습윤, 느슨
퇴적층	1.8 ~ 4.5	실트질 모래, 황갈색, 습윤, 느슨 내지 보통조밀
풍화토층	4.5 ~ 14.8	회갈색, 상부 조밀한 상태에서 하부로 갈수록 매우 조밀한 상태로 됨
풍화암층	14.8 ~	매우 조밀, 심한 풍화 상태, 회갈색

3.3 현장 시험

현장타설말뚝은 풍화암층에 근입되는 올케이싱 공법으로 설계되었다. 그리고 말뚝의 설계 심도는 4m 터파기 후 약 20m로 풍화암 10m이상 근입되었다. 설계 심도까지 시공 완료 후 거칠기 측정은 슬라임 제거 및 레미콘 타설 등과 같은 후속 공정으로 시간적 제한을 받을 수 있었다. 따라서 현장에서 후속 공정이 없는 시점을 선정하여 풍화암층 중간 지점인 약 12m까지 시공한 후 약 1m 정도 케이싱을 인발한 다음 굴착공 거칠기 측정을 수행하였다. 이때 굴착 직후에는 물이 없는 상태였으나 차츰 수위가 발생하였다. 사진 2.는 BKS-LRPS의 현장 적용 시험 과정을 나타내고 있다.

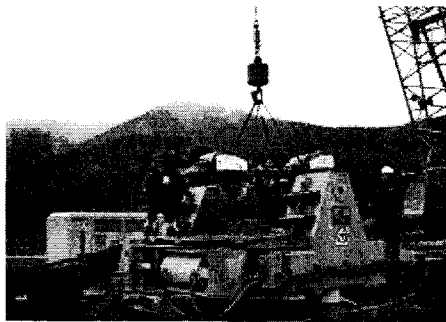


(a) 상부 지층

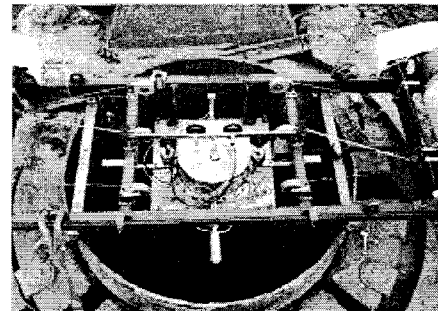


(b) 하부 지층

사진 1. 거칠기 측정용 말뚝에서 회수된 풍화대의 굴착파쇄 암편



(a) 케이싱 위에 BKS-LRPS 거치전 상태



(b) 케이싱 위에 BKS-LRPS 거치 상태

사진 2. 고속철도 OO현장 BKS-LRPS 현장 적용 시험 전경

3.4 측정결과 및 분석

고속철도 OO 현장에서 얻어진 BKS-LRPS 프로파일링 결과를 그림 1.에 나타내었다. 그림에서와 같

이 원으로 표시된 부분은 케이싱 인발 후 풍화암층의 거칠기 형태를 보이고 있다. 여기서 센서 1번(S1)과 센서 2번(S2)의 프로파일링은 공기 중에서 바람에 의해 측정 장치가 내려가는 방향으로 약간의 흔들림이 발생하고 있음을 알 수 있다. 반면 센서 3번(S3)과 센서 4번(S4)의 경우 프로파일링은 공기 중에서 바람에 의한 영향이 거의 나타나지 않았다.

그림 2는 Seidel과 Harberfield(1995)가 제안한 거칠기 정량화 방법을 사용하여 풍화암층인 케이싱 하단부에 대한 거칠기 정량화를 위한 그래프이다. 그 결과 일정 현의 길이(요소 길이)의 변화에 대하여 곡선의 기울기가 증가하였으며 약 25mm 이상에서는 거칠기의 크기가 수렴하는 특징을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 실시한 풍화암층에 근입된 $\phi 1500$ 시험 말뚝에 대하여 적절한 현의 길이(요소 길이)는 약 25mm로 판단되었다. 아울러 이때 측정된 굴착면 거칠기는 약 12.4mm를 보였다. 또한 거칠기 정량화 값을 표 3에 나타내었다.

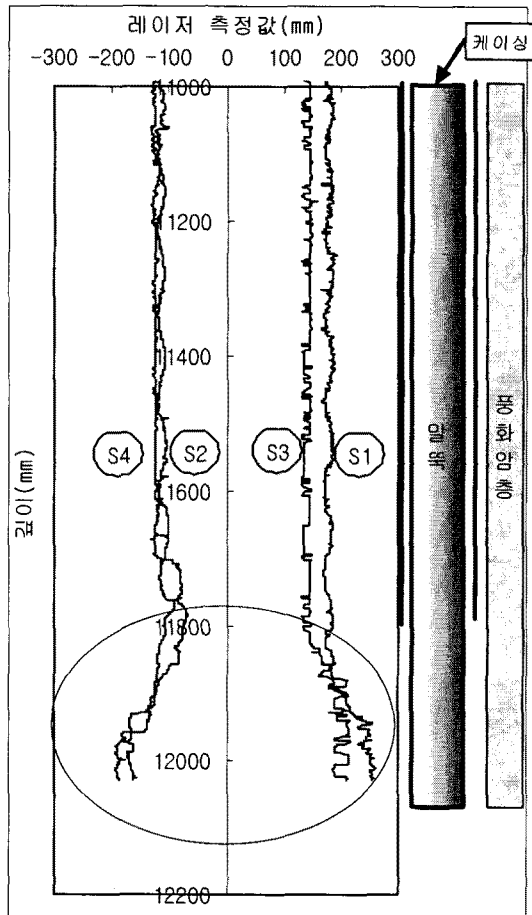


그림 1. 말뚝 B-1의 거칠기 프로파일링

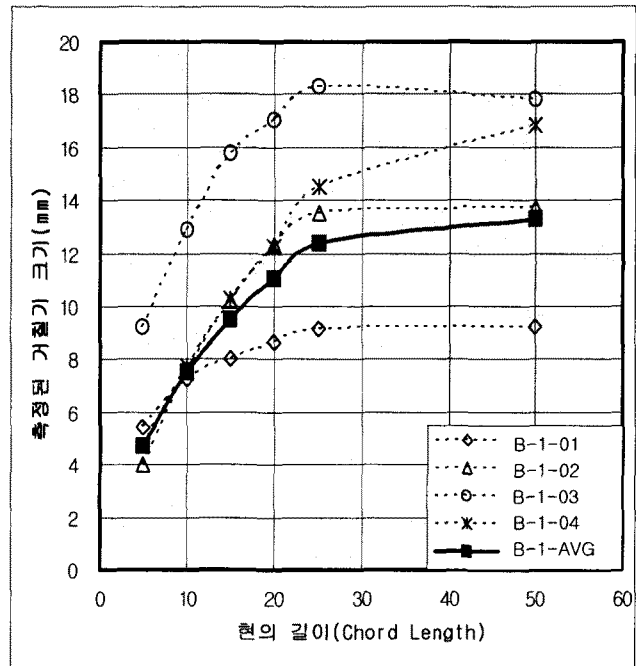


그림 2. 말뚝 B-1의 거칠기 정량화

표 3. 고속철도 OO현장에서 측정된 굴착면 거칠기의 정량화 값

현의 길이(mm)				5	10	15	20	25	50
거칠기 높이	풍화암	B-1	$\phi 1500$	4.7	7.5	9.5	11.1	12.4	13.3
평균치(mm)									

4. 연직도 측정 사례

본 연구에서는 양산 OO 현장과 고속철도 OO 현장에서 BKS-LRPS를 이용하여 현장타설말뚝의 연직도를 측정하였다.

4.1 양산 OO현장 사례

4.1.1 시험 개요

양산 OO 현장은 연약지반층이 약 30m 정도 분포하여 현장타설말뚝 시공을 위해 케이싱을 희생강관으로 사용하도록 설계되었다. 그러나 희생강관에 대해 선단 보강이 되지 않은 상태로 설계되어 시공 과정에서 선단부의 변형에 대한 조사가 요구되었다. 이러한 점을 확인하기 위하여 BKS-LRPS에 의한 연직도 측정을 수행하였다.

4.1.2 지반 조건

지반조사 결과에 근거하면, 본 현장의 지층은 지표면에서부터 매립토층, 퇴적토층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 구성되어 있다. 양산 OO 현장에 대한 지반 물성 결과를 표 4.에 나타내었다.

표 4. 양산 OO 현장의 지반 물성 요약

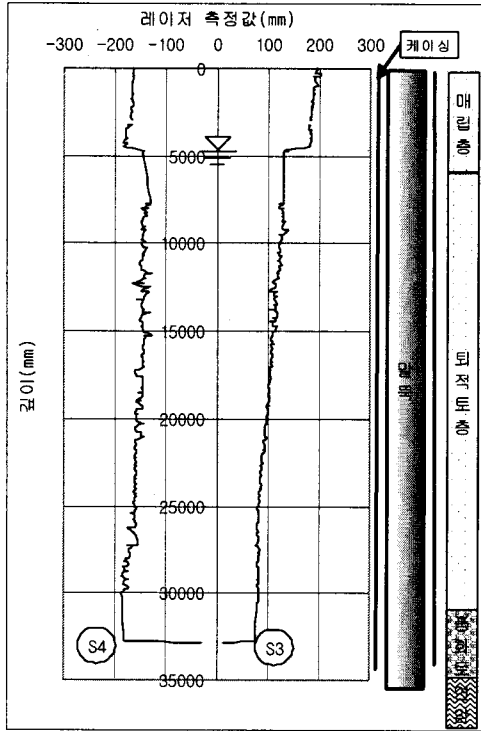
1번 교대		
지층명	분포심도(m)	공학적 특성
매립토층	0 ~ 6.5	황갈색, 습윤상태, 느슨함.
퇴적토층	6.5 ~ 32.7	점토질 실트, 실트질 모래, 모래질 자갈
풍화암층	32.7 ~ 35.4	회갈색, 습윤상태, 매우조밀함
연암층	35.4 ~	담홍색, 보통 풍화, TCR = 40%

4.1.3 현장 시험

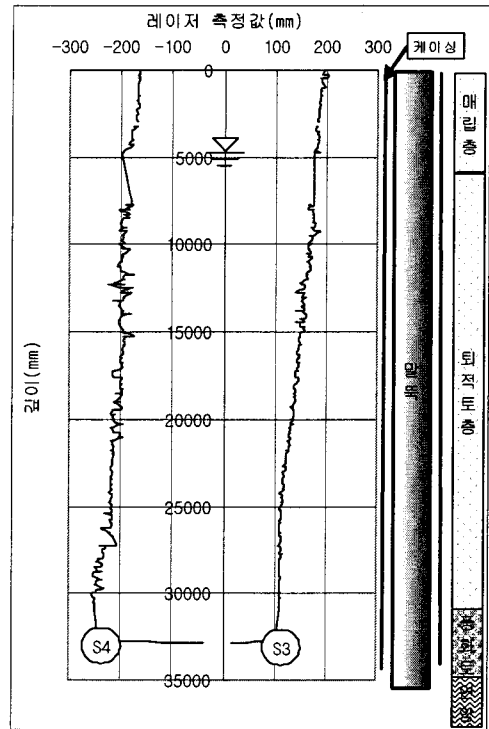
현장타설말뚝은 연약층 심도가 깊어 케이싱($\phi 1500 \times 16t$)을 희생강관으로 사용하여 연암층에 근입시키는 RCD 공법으로 설계되어 있었다. 시공 순서는 현장 여건 때문에 케이싱 근입이 가능한 지층까지 시공 후 연암층에 대하여 RCD 장비에 의한 굴착을 하였다. 따라서 연직도 측정은 말뚝 내부의 슬라임을 제거하지 않은 상태에서 7일 이상 방치 후에 실시하였다. 말뚝 내부에 슬라임이 약 2m 정도 존재하여 연암 소켓부의 거칠기 측정은 할 수 없었다. 그러나 본 현장시험에서 BKS-LRPS 시스템의 현장 적용시험은 와이어로 측정 장치를 내릴 때 흔들림 분석, 수중 약 30m 이상에서 수압에 의한 레이저 센서 시스템의 안정성 분석, 그리고 현장의 혼탁도에 따른 측정 가능 여부를 판단하는데 중요한 의의가 있었다.

4.1.4 측정결과 및 분석

양산 OO 현장에서 말뚝 3본에 대해 연직도 측정을 하였다. 이때 얻어진 BKS-LRPS 프로파일링 결과는 센서 4개 중 2번 센서(S2)가 작동되지 않아 3번 센서(S3)와 4번 센서(S4)에 의한 프로파일링 결과만을 그림 4.~6.에 나타내었다. 그림 4(a)는 말뚝 A-1에 대해 공기 중과 수중(약 5m 지점)에서 측정한 프로파일링을 나타내고 있다. 여기서 매질 변화가 있는 5m 지점에서 레이저 측정값은 크게 감소하는 경향

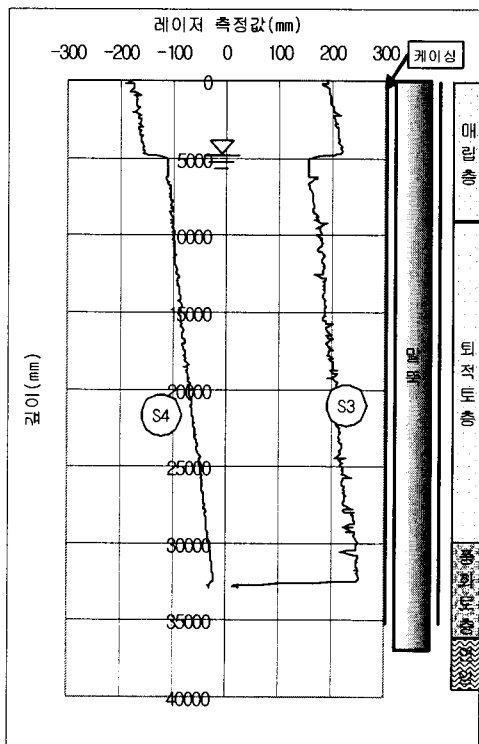


(a) 공기 중과 수중에서의 측정 결과

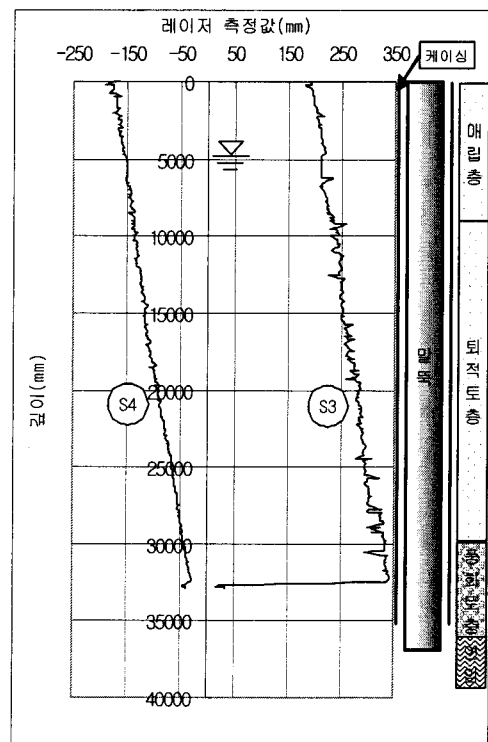


(b) BKS-LRPS 보정계수 적용 결과

그림 4. 말뚝 A-1에 대한 연직도 측정 결과

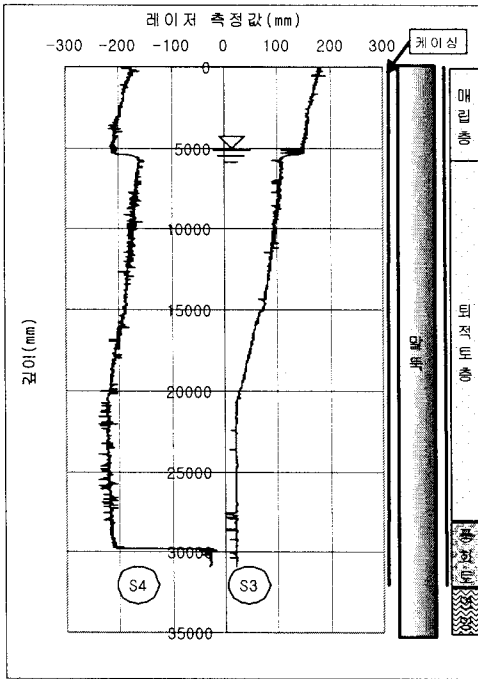


(a) 공기 중과 수중에서의 측정 결과

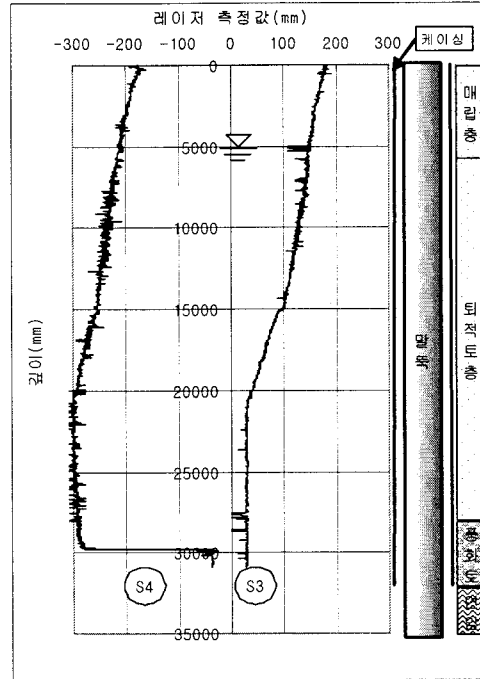


(b) BKS-LRPS 보정계수 적용 결과

그림 5. 말뚝 A-2에 대한 연직도 측정 결과



(a) 공기 중과 수중에서의 측정 결과



(b) BKS-LRPS 보정계수 적용 결과

그림 6. 말뚝 A-3에 대한 연직도 측정 결과

을 보이고 있다. 이러한 현상은 레이저 센서의 매질 변화에 따른 영향에 기인한다. 그림 6.(b)은 그림 6.(a) 결과에 BKS-LRPS 실내모형검증실험 결과로부터 제안된 수중에서 방수시스템에 대한 보정계수 1.350(박봉근, 2007)을 적용한 결과를 나타내고 있다. 그 결과 수중에서의 결과를 공기 중 조건으로 변환하여 연직도 분석을 할 수 있었다. 그림 5와 6.의 경우도 그림4와 동일한 방법으로 분석하였다. 그림 6.(a)의 경우 20m 지점에서 3번 센서(S3)는 케이싱에 너무 밀착되어 측정 영역을 벗어난 것으로 판단된다. 아울러 4번 센서(S4)는 유효측정영역을 벗어나지는 않았으나 정상적인 상태에서의 측정값이 아닌 것으로 판단된다. 따라서 말뚝 A-3에 대한 연직도 분석시 말뚝 심도를 20m로 기준하였다. 양산 OO 현장의 연직도 측정 결과를 표 5.에 요약 정리하였다. 양산 OO 현장에서의 연직도 결과를 살펴보면 두 개의 센서에 의해 측정된 결과가 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 따라서 두 개의 센서에서 얻어진 평균 연직도는 말뚝의 허용 시공오차를 평가하기에 충분한 것으로 판단된다.

표 5. 양산 OO 현장의 연직도 측정 결과

말뚝 번호	센서	레이저 측정값(mm)		A-B(mm)	말뚝심도 (B:m)	연직도 : (A-B)/B	평균 연직도
		초기(A:m)	최종(B:m)				
A-1	S3	198	114	84	30	-1/344	1/355
	S4	166	253	-87		1/355	
A-2	S3	191	337	-146	32	-1/219	1/229
	S4	165	30	135		1/238	
A-3	S3	183	40	143	20	1/140	1/155
	S4	176	294	-118		-1/169	

4.2 고속철도 OO현장 사례

고속철도 OO 현장에 대한 지반 조건 및 현장 시험에 대하여 앞서 3.2와 3.3에서 설명하였다. 따라서

지반 조건 및 현장 시험에 대하여 별도로 설명하지 않았다.

고속철도 OO 현장에서 말뚝 3본에 대해 연직도 측정을 하였다. 이때 얻어진 BKS-LRPS 프로파일링 결과는 그림 7.~9.에 나타내었다. 아울러 레이저 센서를 사용하는 BKS-LRPS에 의한 연직도 측정 결과와 초음파 센서를 사용하는 코덴에 의한 연직도 측정 결과의 정성적인 비교를 위해 그림 10.에 타 현장에서 코덴으로 연직도 측정한 결과를 나타내었다.

고속철도 OO 현장에서의 연직도 측정은 양산 OO 현장과 비교할 때 공기 중에서 실시되어 수중에서 방수시스템에 의한 보정계수를 적용하지 않았으며, 희생강관(용접)을 사용하지 않고 케이싱(볼트 연결)이 근입된 상태에서 측정이 이루어졌다. 따라서 그림 8.의 경우 약 3.0m와 5.5m 지점 그리고 그림 9.의 경우 0m와 2m 지점에서 미세한 변곡점을 보이고 있다. 이것은 케이싱 조합시 볼트 연결부에 의한 프로파일링 변화에 기인한다. 이와 같이 BKS-LRPS에 의한 연직도 측정 방법은 미세한 변화까지도 측정 가능하므로 거칠기 측정, 연직도 측정 뿐 만아니라 케이싱 근입시 지반에 의한 변형과 케이싱 조합 상태까지도 분석 가능할 것으로 판단된다. 고속철도 OO 현장에서의 연직도 측정 결과를 표 6.에 요약 정리하였다. 고속철도 OO 현장에서의 연직도 결과를 살펴보면 두 개의 센서에 의해 측정된 결과가 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있었다. 따라서 두 개의 센서에서 얻어진 평균 연직도는 말뚝의 허용 시공오차를 평가하기에 충분한 것으로 판단된다. 측정된 평균 연직도의 경우 1/203~1/232로 거의 균일하게 나타났다. 반면 양산 OO 현장에서 측정된 결과는 1/155~1/355로 다소 불규칙적인 시공 오차를 보였다. 이러한 원인은 양산 OO 현장의 경우 연약지반이 깊고 케이싱 근입 선단부가 약한 지층인 반면 고속철도 OO 현장의 경우 연약지반이 없고 케이싱 근입 선단부가 단단한 지층이라는 지반 특성과 케이싱의 두께 등에 기인하는 것으로 판단된다.

표 6. 고속철도 OO 현장의 연직도 측정 결과

말뚝 번호	센서	레이저 측정값(mm)		A-B(mm)	말뚝심도 (B:m)	연직도 : (A-B)/B	평균 연직도
		초기(A:m)	최종(B:m)				
B-1	S3	160	214	-54	12	-1/222	1/211
	S4	-118	-178	60		1/200	
B-2	S3	222	182	40	8.5	1/213	1/232
	S4	-169	-181	12		1/250	
B-3	S3	205	166	39	7.0	1/179	1/203
	S4	-179	-210	31		1/226	

4.3 연직도 관리

일반적으로 말뚝 시공에 있어 말뚝 시공허용오차에 대한 국내와 해외 시방기준을 표 7.에 나타내었다. 대부분 국내외의 시방 및 규정의 경우 말뚝의 연직도와 말뚝의 평면위치에 대한 시공허용오차의 기준을 기술하고 있으나 측정 방법, 측정 장치의 검증, 허용기준 초과시 보강 대책 등에 대한 구체적인 사항이 없는 실정이다. 따라서 대부분의 현장에서 감독관 또는 감리자의 판단으로 시공 여부를 판단하고 있다.

현장타설말뚝의 품질관리 항목 중 건전도 시험은 시험에 앞서 모형검증시험을 통해 장비에 대해 현장에서 검증을 한 후 사용 여부를 감독관 또는 감리자가 판단하고 있다. 그러나 연직도 측정 장비의 경우 그렇지 못한 실정이다. 국내에서 주로 사용되는 연직도 측정 장비(코덴)에 의한 측정 사례를 그림 10.에 나타내었다.

국내에서 주로 사용되고 있는 연직도 측정 장비(코덴)를 현장에서 사용할 때의 문제점은 다음과 같다.

- 1) 우수한 장비라도 사용 전에 사용자가 쉽게 검증할 수 없다.
- 2) 일반적으로 물이 없는 굴착공의 경우 측정할 수 없다. 따라서 연직도 측정을 위해 굴착공에 물을 주입하는 문제점이 발생한다.

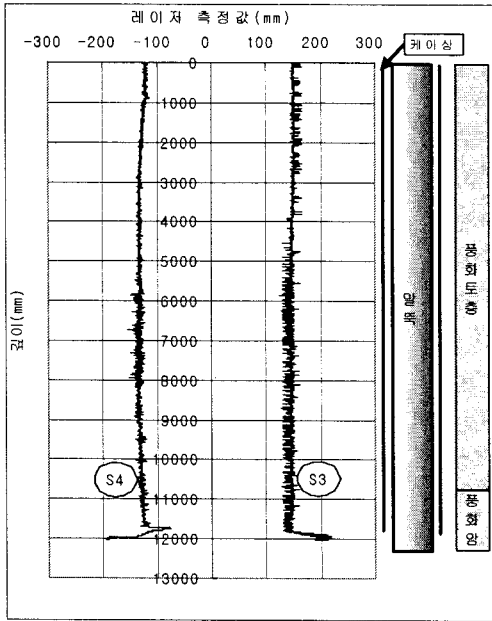


그림 7. 말뚝 B-1에 대한 연직도 측정 결과

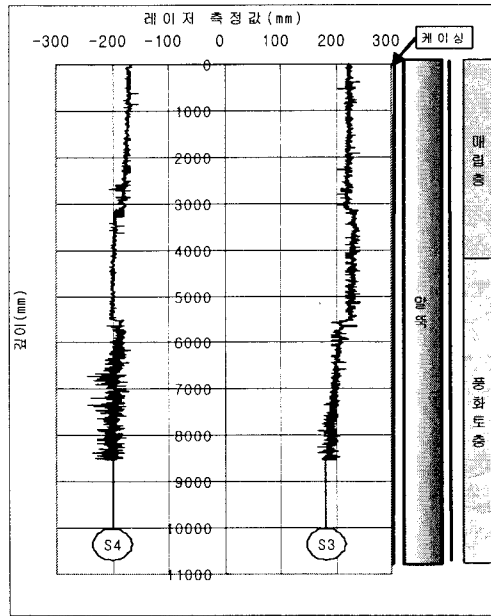


그림 8. 말뚝 B-2에 대한 연직도 측정 결과

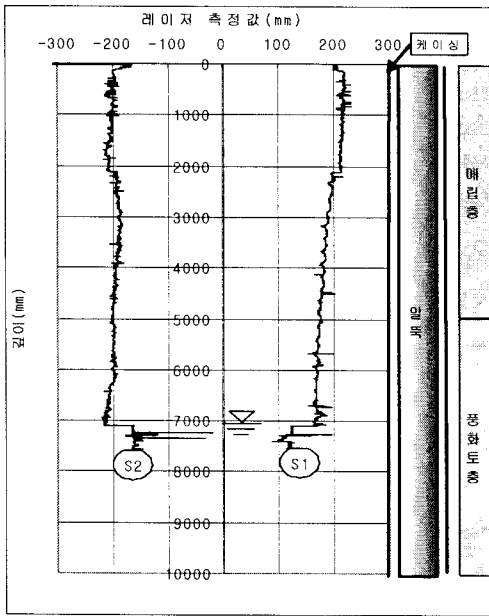


그림 9. 말뚝 B-3에 대한 연직도 측정 결과

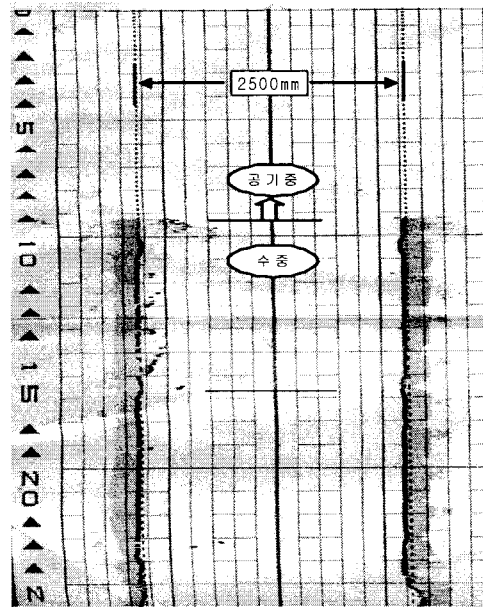


그림 10. 코덴 장비에 의한 연직도 측정 사례

표 7. 말뚝의 시공허용오차에 대한 국내외 관련 기준

구분		항목	시공허용오차	비고
국내 기준	도로공사표준시방서	연직도	1/100 이내	D:말뚝 직경
	고속철도공사 전문시방서	평면위치	D/4와 100mm 중 큰 값	
해외 기준	B.S	8004	연직도	1/75
			평면위치	75mm
	해양 구조	육상	연직도	1/100
		해상	평면위치	100mm
		연직도	1/75	
		평면위치	75mm	

- 3) 측정 장비의 수평이 맞지 않거나 말뚝이 약간 기울어져 있을 경우 반사된 초음파를 수신하지 못한다.
- 4) 초음파 센서의 정밀도는 측정 범위에 대해 0.2%의 오차가 있다. 따라서 말뚝 심도가 작을 경우에는 연직도 측정에 많은 오차를 수반한다.

5. 요약 및 제언

- 1) 최근 국내외에서 국내 건설사들에 의해 초고층 건축물 시공사례가 증가하고 있다. 아울러 대형기초의 설계하중 또한 매우 높아졌다. 따라서 굴착공 벽면 거칠기 측정과 연직도 측정을 위한 시스템 개발이 요구되고 있다.
- 2) 국내 최초로 개발된 BKS-LRPS를 활용하여 고속철도 OO 현장에서 풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 굴착공벽면 거칠기를 측정하였다.
- 3) 연약 지반과 양호한 지반에서 굴착공의 연직도 측정 결과를 비교한 결과 연약 지반의 경우 양호한 지반에 비해 다소 불규칙적인 시공 오차를 보였다.
- 4) 효율적인 연직도 관리를 위해서는 현장에서 모형체를 만들어 측정 장비를 검증하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참고문헌

1. 박봉근(2007), “BKS-LRPS(Backyoung-KyoungSung Laser Roughness Profiling System)의 개발 및 검증에 관한 연구”, 경성대학교 박사학위논문
2. 조천환, 이명환, 김성희(2003), “국내 현장타설말뚝의 주면 접촉부에 대한 일정 강성 진단시험”, 한국지반공학회, 한국지반공학회 정기학술대회, pp.147~152.
3. Collingwood, B.(2000), “The Effects of Construction Practices on the Performance of Rock Socket Bored Piles”, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, Vic., Australia.
4. Horvath, R. G., Kenney, T. C., and Kozicki, P.(1983), “Methods of Improving the Performance of Drilled Piers in Weak Rock”, Canadian Geotechnical Journal, Vol.20, pp.758~772.
5. Moon S. Nam(2004), “Improved Design for Drilled Shafts in Rock”, Ph. D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, Texas. Department of Electrical Engineering, University of Houston, Texas.
6. O'Neill, M. W., Townsend, F. C., Hassan, K. M., Buller, A., and Chan, P. S.(1996), “Load Transfer for Drilled Shafts in Intermediate Geomaterials.” FHWA Publication No. FHWA-RD-95-172, Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research and Development, McLean, VA.
7. Seidel, J. P., and Collingwood B.(2001), “A New Socket Roughness Factor for Prediction of Rock Socket Shaft Resistance”, Canadian Geotechnical Journal, February pp.138~153.
8. Seidel, J. P., and Harberfield C. M., 1995, “Towards an understanding of Joint Roughness”, Rock Mechanics and Rock Engineering Journal, Vol. 28, No.2. pp.69~92