

비파괴시험을 이용한 현장타설말뚝의 건전도 평가에 관한 연구

Application of Non-Destructive Testing Techniques to the Evaluation of Integrity of Drilled Shaft

채종훈* · 유재명** · 김대규*** · 이우진****

Chae, Jong-Hoon · Yu, Jae-Myung · Kim, Dae-Kyu · Lee, Woo-jin

ABSTRACT

The NDT(Non-Destructive Testing) technique, detecting defects without damaging foundations, has, lately, been a matter of concern. In this study, the applicability of the borehole methods(CSL, CT, PS) and the surface reflection methods(SE, IR) to the evaluation of integrity of drilled shaft was investigated through field test. Ten drilled shafts, 0.4 m in diameter and 7.0 m long each, were constructed, one shaft with no defect and nine shafts intentionally with the combination of the common defects such as soft bottom, necking, bulging, cave-in, and/or weak concrete.

Analysing each NDP test result on the constructed drilled shafts, an optimum combination of the NDP methods as well as the applicability of each NDP method to detecting defects of drilled shaft have been investigated.

Keywords : NDT(Non-Destructive Testing), CSL, CT, PS, SE, IR

요 지

최근 구조물기초에 큰 변형 및 손상을 가하지 않고 안정성에 대한 정보를 비교적 쉽게 얻을 수 있는 비파괴시험(NDT, Non-Destructive Testing)기법이 큰 관심을 얻고 있다. 본 연구에서는 비파괴시험 중 검측공 기법(CSL, CT, PS)과 표면파 기법(SE, IR)을 현장타설말뚝의 건전도 평가에 이용하기 위한 적용성의 문제를 현장시험을 통하여 고찰하였다. 이를 위하여 결함이 없는 한 본의 정상말뚝과 연약전단, 단면축소·확대, 불량콘크리트 타설 등 현장에서 발생하기 쉬운 결함의 종류, 크기, 위치 등을 변화·조합한 9본의 현장타설말뚝(직경 0.4m, 길이 7.0m)을 시공하여 다양한 비파괴시험을 수행하였다. 시험을 통하여 각 기법을 현장타설말뚝의 건전도 평가에 적용할 때의 문제점과 각 기법의 합리적인 조합에 대하여 고찰하였다.

주요어 : 비파괴시험, CSL시험, CT시험, PS시험, SE시험, IR시험

* 정회원 · (주)한석엔지니어링 토질부 대리

** 정회원 · 고려대학교 토목환경공학과 박사과정

*** 정회원 · 고대 부설 방재과학기술연구소 선임연구원

**** 정회원 · 고려대학교 토목환경공학과 부교수

1. 서론

최근 구조물의 대형화 추세에 따라 기초의 형식도 대 형화되는 경향을 나타내고 있다. 이에 따라 구조물 기초 의 건전도 평가가 중요한 항목으로 강조되고 있으며, 이 를 위한 방법으로 구조물 및 기초에 큰 손상과 변형을 가 하지 않는 비파괴시험(NDT, Non-Destructive Testing) 의 필요성이 대두되고 있다 (Davis and Dunn, 1975; Baker 등, 1993).

비파괴시험은 검측공 기법(Borehole Method)과 표 면파 기법(Surface Reflection Method) 등 크게 2가지로 대별된다. 검측공(Bohehole)을 이용하는 검측공 기법에는 CSL(Crosshole Sonic Logging)시험, CT(Crosshole Tomography)시험, PS(Parallel Seismic)시험 등이 있으 며, 대상물에 직접 시험을 하는 표면파 기법에는 SE(Sonic Echo)시험, IR(Impulse Response)시험 등이 있 다. 이러한 기법들은 현장 여건이나 시험목적에 따라 적 절히 조합될 수 있다. 본 연구에서는, 현장타설말뚝의 건 전도 평가에 대한 각 비파괴시험 기법의 적용성 및 시험 기법의 적절한 조합에 대하여 현장시험을 통하여 고찰하 였다. 이를 위해 남양주시에 현장타설말뚝 10본을 조성하 였다. 결함이 없는 말뚝 1본 및 현장타설말뚝 시공 시 발 생할 수 있는 여러 결함을 인위적으로 조성한 9본의 말뚝 을 시공하여 다양한 비파괴시험을 수행하였다. 시험결과 를 분석하여 각 비파괴시험 기법에 대한 이해, 적용성 평 가 및 목적에 따른 시험기법의 조합을 고찰하였다.

2. 검측공 기법(Borehole Method)

2.1 CSL(Crosshole Sonic Logging) 시험

검측공 기법에서는 시험 시에 검측공 내부에 탄성과 감지기를 설치하여 발신장치에서 발생시킨 신호를 수신 한다. 검측공(Borehole)이 반드시 필요하기 때문에 시험 이 번거롭고 이미 시공된 말뚝에 대해서는 적용이 제한을 받는 반면, 깊이에 따른 파의 변화를 볼 수 있기 때문에 표면파 기법보다는 정확한 결과를 알아 낼 수 있다는 장 점이 있다. 그림 1과 같이 말뚝 최하부에서 수신자와 발 신자를 동시에 인발하여 깊이-도달시간 또는 에너지 그 래프를 얻을 수 있으며, 이를 통해 결함이 존재하는 위치

를 확인할 수 있다. 만약, 압축파의 도달시간이 증가하거 나 에너지의 감소가 발생한다면, 콘크리트 내부의 결함 또는 시험튜브와 콘크리트와의 결합부 부실(Debonding) 이 존재한다고 판단한다. CSL 시험 결과를 이용한 콘크 리트의 품질 평가기준은 아직 명확히 정립되지 않았으나 현재까지 이루어진 연구결과를 종합하면 표 1과 같다.

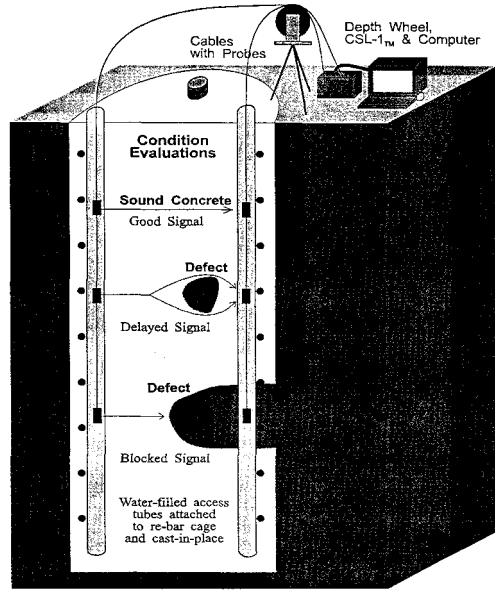


그림 1. CSL시험의 원리

표 1. CSL시험결과에 의한 평가기준

평가등급	시험 결과
Good	초음파 전달속도 변화 10% 이내
Questionable	약간(10~20%)의 전달속도 저하 및 에너지 감쇠 → 약간의 Soil Intrusion 또는 콘크리트 강도저하 가능성 (경우에 따라 정상적인 콘크리트인 경우도 있음)
Poor/Defect	현저한(20% 이상) 전달속도 저하 및 에너지 감쇠 → Slurry Contamination 또는 Soil Intrusion, 콘크리트 강도저하
No Signal	신호 완전 차단 → 심각한 결합부에 의해 신호가 완전히 흡수 또는 튜브와 콘크리트의 Debonding
Water	초음파 전달속도가 물에서의 속도(1500 m/sec)와 동일 → 물로 채워진 공동 또는 Gravel Intrusion 등의 심각한 결함

2.2 CT(Crosshole Tomography) 시험

CT시험의 수행방법은 CSL시험과 유사하나, 단면에 대한 보다 정확한 정보를 얻기 위해 수신자를 고정시킨 상태에서 발신자를 이동시킨다는 점이 다르다. 분석하고자 하는 단면을 여러 개의 셀로 나눈 후 한 셀에서의 탄성과 도착시간을 그림 2와 같이 여러 개의 파 경로로부터 구하여 표시한다. 시험은 통상 CSL시험으로부터 확인된 결함 위치 중심에서 수행되며, 그 결과로부터 결함의 개략적인 분포를 알 수 있다.

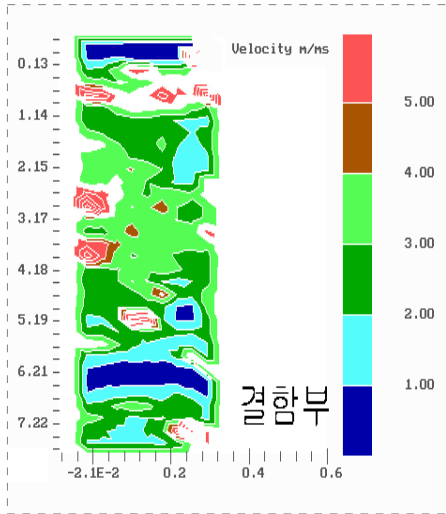


그림 2. CT시험 결과

2.3 PS(Parallel Seismic) 시험

PS 시험은 말뚝의 두부가 노출되지 않아 압축파 발생이 어려운 경우, 즉 표면파 기법의 적용이 곤란한 경우 검측공을 그림 3과 같이 근접 시공하여 해당 기초의 깊이를 추정할 수 있는 시험이다. 로드셀(Load-Cell)이 부착된 해머에 충격이 가해진 순간부터 Hydrophone이 탄성파를 측정하게 되므로 시험결과로부터 파의 도착시간을 측정할 수 있으며, 지반과 말뚝위치에서의 다른 파의 도착시간을 이용하여 말뚝 길이를 산출할 수 있다.

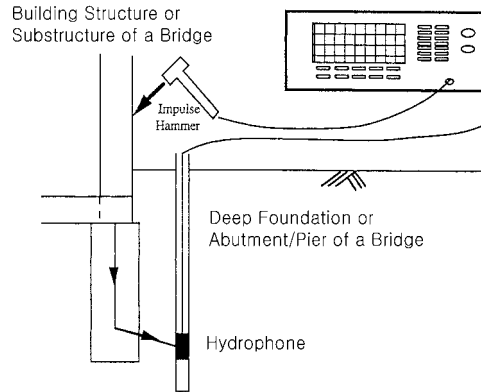


그림 3. PS시험의 원리

3. 표면파 기법(Surface Reflection Method)

표면파 기법은 그림 4와 같이 말뚝의 두부가 노출되었을 경우, 로드셀(Load-Cell)이 부착된 해머를 이용하여 압축파를 발생시킨 후, 반사파를 속도계(Geophone) 또는 가속도계(Accelerometer)를 이용하여 측정한다. 측정된 반사파를 시간대 영역(Time Domain)에서 해석할 경우 SE(Sonic Echo) 시험, 주파수 영역(Frequency Domain)에서 해석할 경우 IR(Impulse Response)시험이라 한다.

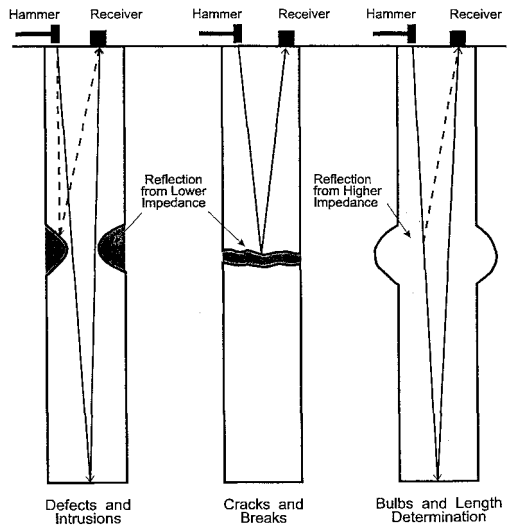


그림 4. 표면파 기법(Surface Reflection Method)

3.1 SE(Sonic Echo) 시험

속도계 또는 가속도계에 의해서 측정된 결과는 그림 5와 같으며 반사파의 발생 깊이 또는 말뚝의 길이 D를 압축파의 속도 V_p 와 시간 t_p 을 이용하여 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$D = V_p \times \frac{t_p}{2} \quad (1)$$

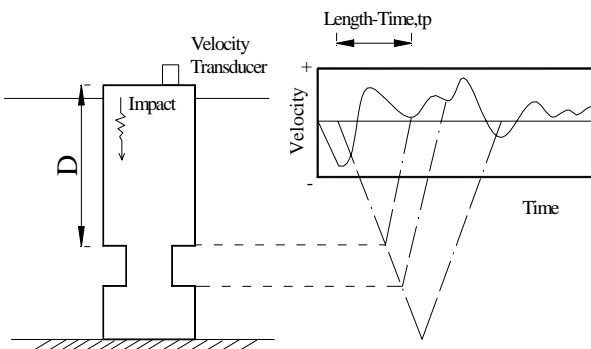


그림 5. SE시험 개요

3.2 IR(Impulse Response) 시험

측정된 결과를 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 주파수 영역으로 변환한 후, 이를 이용하여 그림 6과 같은 여러 개의 첨두점이 존재하는 충격응답곡선(Impulse Response Curve) 또는 유동도 곡선(Mobility Curve)을 구한다. 여기서, 일정한 간격을 가지는 Δf 를 이용하여 그 발생깊이(결함의 깊이 혹은 말뚝의 길이)를 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$D = \frac{V_p}{2\Delta f} \quad (2)$$

충격응답곡선의 결함 위치에서 이론적인 유동도(Mobility, N)와 측정된 유동도로부터 말뚝의 단면적 감소를 예측할 수 있으며, 식(3)과 같이 f_M 까지의 기울기를 이용하여 하중-재하 곡선에서의 초기 기울기를 추측, 이를 재하 대상 말뚝의 선정에 이용할 수 있다.

$$E = 2\pi \frac{f_M}{M} \quad (3)$$

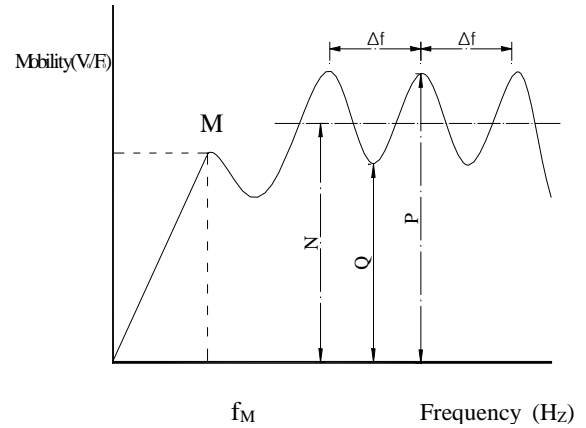


그림 6. 유동도곡선(Mobility Curve)

검측공 기법, 표면파 기법 등 비파괴시험은 Holeyman (1992), Linkins 등 (1993), NCHRP 보고서 (1996), Finno and Gassman (1998), Olson 등 (1998) 등에 상세히 기술되어 있다.

4. 현장타설말뚝 시험

비파괴시험의 적용성 연구를 위한 현장시험이 경기도 남양주시의 현장에서 10본의 현장타설말뚝을 시공하여 수행되었다. 시험지반은 SPT(표준관입시험)결과, 7m 부근까지 N치가 20-30 정도의 매립토로 구성되어 있으며, 지하수위는 약 7m 이하에 존재하는 것으로 확인되었다. 매립층은 실내 입도분포 시험으로부터 SW(Well Graded Sand) 지반으로 분류되었다.

현장타설말뚝 10본을 직경 0.4m, 길이 약 7.0m로 시공하였으며, 천공 후 바로 콘크리트 타설을 실시하여 공벽 붕괴, 선단에서의 슬라임(Slime) 퇴적을 방지하였다. 천공 후 조립된 철근을 홀에 삽입하고 콘크리트를 타설하였으며, 사용된 콘크리트의 제원은 표 2와 같다.

표 2. 콘크리트 제원

압축강도 (kg/cm ²)	굵은골재 최대치수(mm)	슬럼프(cm)	시멘트 종류
210	25	15	포틀랜드

본 연구의 목적이 비파괴시험 기법 중, 검측공 기법(CSL, CT, PS)과 표면파 기법(SE, IR)의 현장타설말뚝의 건진도 평가에 대한 적용성을 실제 현장시험을 통하여 고

찰하는 것이므로, 결함이 없는 한 본의 정상말뚝과 연약 선단, 단면축소·확대, 불량콘크리트 타설 등 현장에서 발생하기 쉬운 결함의 종류, 크기, 위치 등을 변화·조합한 9본의 현장타설말뚝을 매립도 지반에 시공하였다. 인위적인 결함의 조성을 위해 철근을 삽입하여 검측공과 모래주머니를 고정시켰다. 각 말뚝의 길이와 형태, 조성된 결함의 종류 및 위치는 그림 7과 같다.

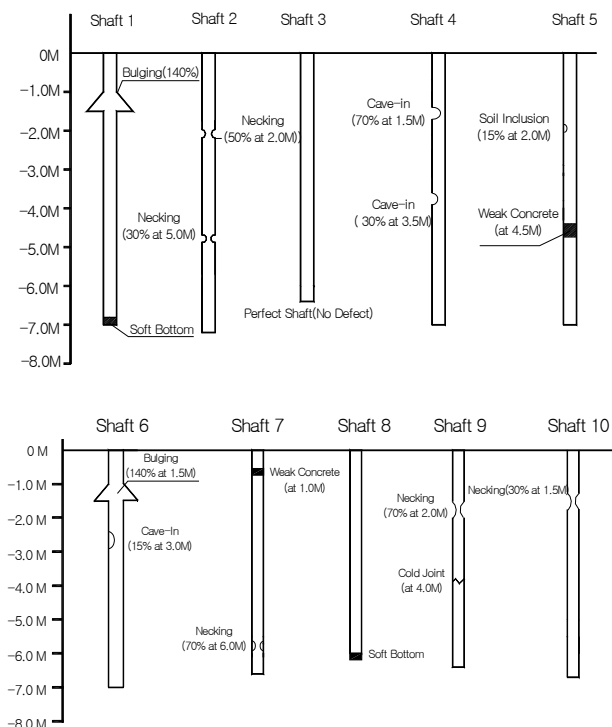


그림 7. 시험현장타설말뚝

5. 시험결과 및 분석

5.1 CSL(Crosshole Sonic Logging) 시험

1) 결함의 위치

CSL 시험결과, 그림 8과 같이 결함이 없는 정상적인 부분에 비해 결함이 있는 부분은 도달시간 증가와 에너지의 감소 현상이 나타났으며, 이를 이용하여 결함의 위치를 추정하였다. 말뚝별 CSL시험결과는 표 3과 같으며, 실제 결함위치와 거의 일치하는 시험결과를 나타내었다.

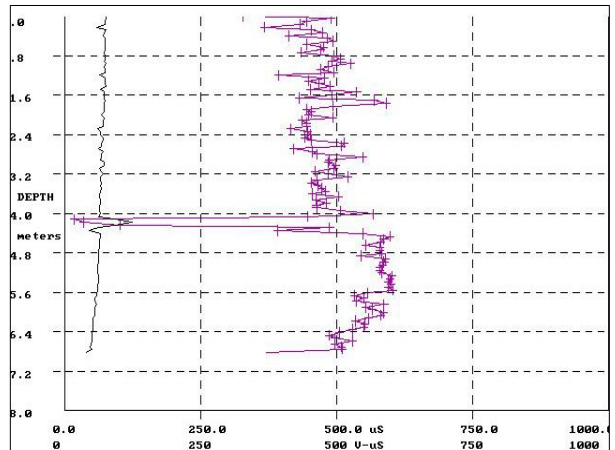


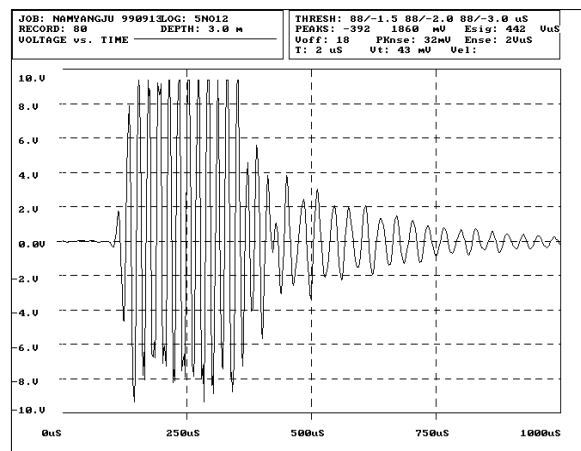
그림 8. CSL시험 결과(Shaft 5, 결함위치)

표 3. 말뚝별 CSL시험 결과

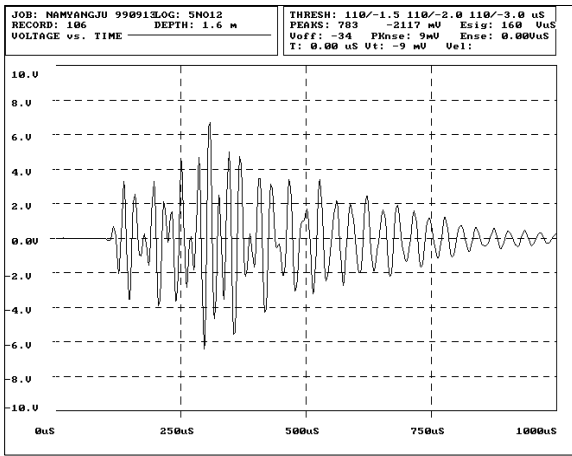
shaft	공번	총 에너지 (v- μ s)		압축파 속도 (m/s)	
		결함부위	결함부위	결함부위	결함부위
2	1-2	63-140	71-180	2200-2500	2600-2800
	1-3	-	500-650	-	-
	2-3	180-280	250-300	2300-2400	2400-2500
5	1-2	30-60	0-50	1300-1500	90-1300
	1-3	25-50	0-50	2000-2300	130-2100
	2-3	20-50	0-50	1900-2300	150-2300
9	1-2	280-300	70-300	3000-3100	3000-3100
	1-3	180-300	30-250	2800-2900	1100-2300
	2-3	-	30-300	-	1200-2000

2) 결함의 크기

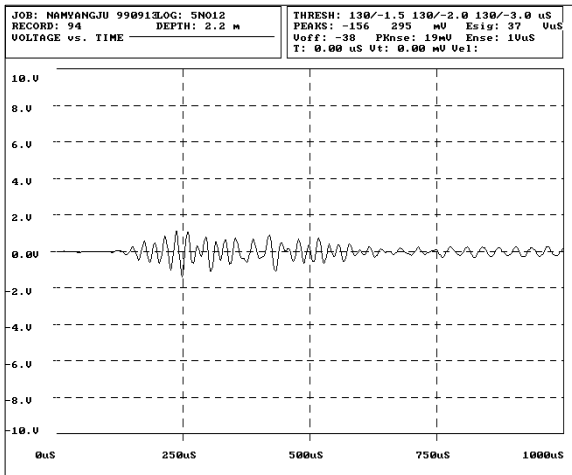
결함의 크기에 따라 진폭의 크기가 변화하므로, 말뚝 내부 정상파형과의 비교를 통해 결함 크기를 추정하였다. 그림 9는 Shaft 5에서의 시험결과를 나타낸다.



(a) 정상파형



(b) 부분 단면적 감소(15%)



(c) 큰 단면적 감소(Weak Concrete)

그림 9. CSL시험 결과(Shaft 5, 결함크기)

3) 시험시기 결정

현장에서는 시공 후, 가능한 한 콘크리트의 압축강도가 발현되기 전에 결함의 유무를 파악하여 보강 또는 폐기 여부를 결정하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 양생기간 중 결함이 판별 가능한 시점에 대한 평가를 수행하였다.

시험말뚝 시공 후 1, 4, 6, 8, 11일 후인 5회에 걸쳐 시험 시기별 파의 도달시간을 측정하였으며 그 결과는 그림 10 과 같다. 시험 결과 지표면 아래 2.3m 부근에서 파의 도달시간이 현저히 증가하는 양상을 나타내며, 말뚝의 지지력과 허용 압축응력에 영향을 미칠 정도의 결함은 4일 이내에 판별 가능한 것으로 평가되었다.

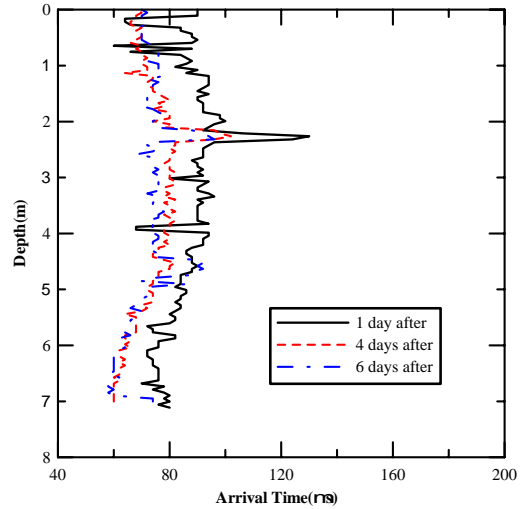
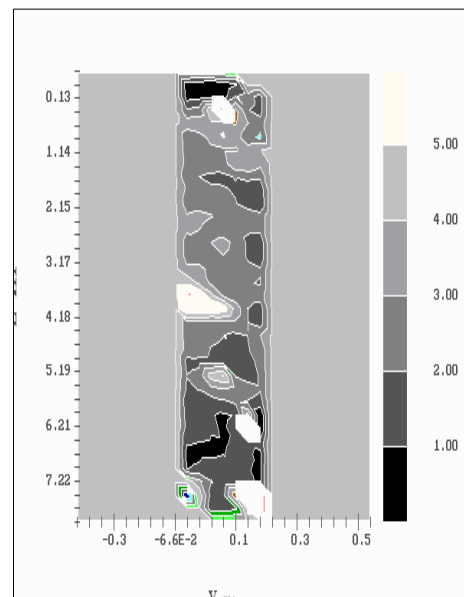


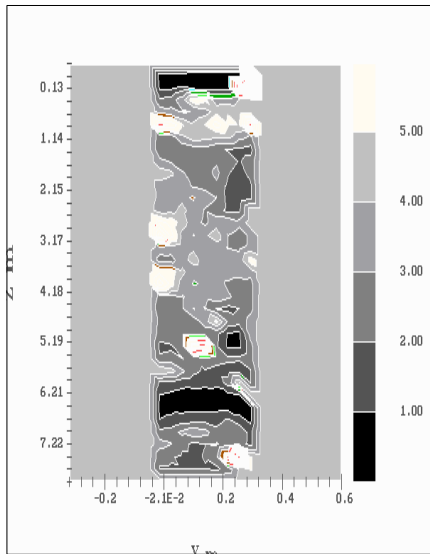
그림 10. 시점별 CSL시험 결과

5.2 CT(Crosshole Tomography) 시험

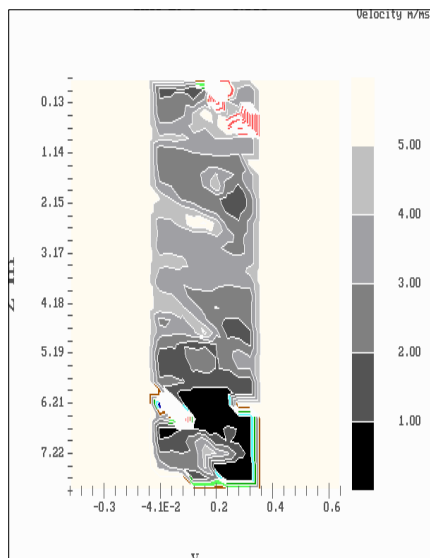
그림 11은 Shaft 5에서의 CT시험 결과를 보여준다. 시험결과는 계획 결함과의 위치 및 크기 뿐 아니라 CSL시험 결과와도 일치함을 보여주고 있다. 즉, 약 2.0m 구간의 토사 유입과 4.5m 부근의 weak concrete로 인한 말뚝의 단면 감소가 정확하게 측정되었다.



(a) 검측공 1-2



(b) 검측공 2-3



(c) 검측공 1-3

그림 11. CT시험 결과(Shaft 5)

5.3 PS(Parallel Seismic) 시험

그림 12는 Shaft 1에서 PS시험을 통해 측정된 깊이별 도달시간을 보여준다. 파의 도달시간으로부터 구한 콘크리트 말뚝에서의 압축파 속도(3,157m/s)와 지반에서의 속도(2,057m/s)는 현저한 차이를 나타내고 있다. 이를 이용하여 추정된 말뚝의 길이는 6.8m로 실제 말뚝 길이(7.0m)와 거의 일치함을 알 수 있다.

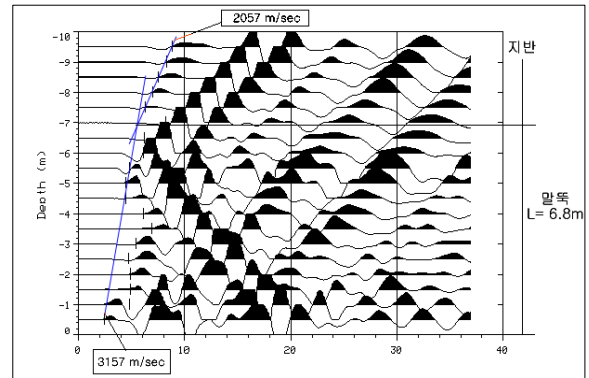


그림 12. PS시험 결과(Shaft 1)

PS 시험 결과로부터 추정된 기초 길이와 실제 길이와의 차이는 표 4에 나타내었다. 전체적으로 10% 내외의 오차를 보이고 있어, 기초 길이 산정에 있어 PS 시험이 높은 정확도를 보이고 있음을 알 수 있다.

표 4. 말뚝별 PS시험 결과

shaft	실제길이(m)	측정길이(m)	오차(%)
1	6.7	6.8	1.5
3	6.4	7.0	9.4
7	6.6	7.6	15.2
8	7.0	6.6	5.7

5.4 SE(Sonic Echo) 시험

그림 13은 Shaft 2의 SE시험 결과인 결함과 선단에서 측정된 반사파를 보여준다. 이러한 반사파는 식 (1)을 이용하여 각각 깊이 2.15m, 5.45m에서 발생한 것으로 판명되었으며, 말뚝의 길이는 7.26m로 추정되었다. 표 5는 말뚝별 SE시험 결과를 보여준다. 표 5에서 볼 수 있듯이 SE시험은 결함의 위치추정 보다는 말뚝 길이 추정에 있어서 정확도가 더 높음을 알 수 있으며, CSL, CT시험 결과와는 달리 그 결함의 크기는 판별이 불가능함을 알 수 있다.

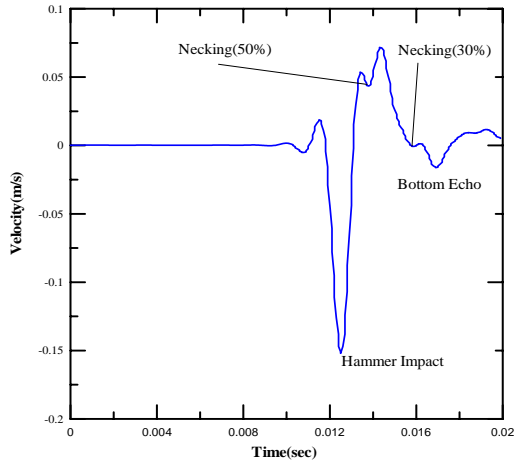


그림 13. SE시험 결과(Shaft 2)

표 5. 말뚝별 SE시험 결과

(a)결함위치

shaft	실제		측정	오차 (%)*
	결함위치(m)	결함종류	결함위치(m)	
1	1.5	단면확대	1.65	10.0
	7.0	Soft Bottom	-	-
2	2.0	50% 단면적 감소	2.15	7.5
	5.0	30% 단면적 감소	5.45	9.0
3	정상		-	-
4	1.5	토사유입	1.58	5.3
	3.5	토사유입	3.80	8.6
5	2.0	토사유입	2.08	4.0
	4.0	Weak concrete	4.09	2.3
6	1.5	단면확대	1.78	18.7
	3.0	토사유입	3.33	11.0
7	1.0	Weak Concrete	2.28	-
	5.0	Necking	5.78	15.6
8	7.0	Soft Bottom	-	-
9	2.0	Necking	2.21	10.5
	4.0	Cold Joint	3.86	-3.5
10	1.5	Necking	1.68	12.0

(b)말뚝길이

shaft	실제 길이(m)	측정 길이(m)	오차(%)*
1	6.7	6.5	-3.0
2	7.2	7.4	0.8
3	6.4	6.9	8.3
4	7.4	8.3	12.4
5	7.1	7.5	5.9
6	6.9	6.9	0.0
7	6.6	7.5	13.5
8	7.0	7.1	0.5
9	6.4	7.4	16.1
10	6.7	7.3	9.4

*실제 말뚝길이 > 측정 말뚝길이일 경우 - 값

5.5 IR(Impulse Response) 시험

그림 14는 Shaft 9에서의 IR시험 결과이고 표 6은 말뚝별 IR시험 결과를 보여준다. 표 6에서 보듯이 IR시험은 결함의 크기, 위치 추정보다는 말뚝의 근입깊이 산정에 있어 높은 정확도를 나타내었다. 그림 9에서는 일정한 간격을 가진 두 개의 침두점이 존재함을 알 수 있다. 결함의 위치와 말뚝의 길이는 일정한 주파수의 간격을 이용하여 구하였으며, 직경의 감소를 유동도(Mobility)로부터 산출하였다.

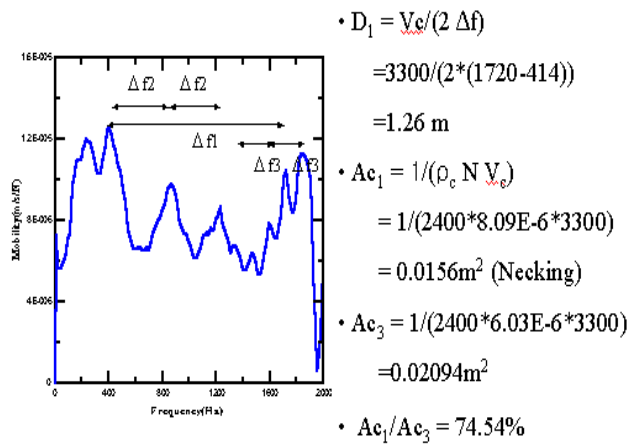


그림 14. IR시험 결과(Shaft 9)

표 6. 말뚝별 IR시험 결과

(a)결함위치

shaft	실제		측정		
	결함위치(m)	직경(m)	결함위치(m)	오차(%)*	직경(m)
1	1.5	0.4	1.9	28.7	0.13
	7.0	0.4	-	-	
2	2.0	0.4	1.3	-35.0	0.46
	5.0	0.4	4.5	-10.0	
3	정상		-	-	-
4	1.5	0.4	1.9	28.0	0.17
	3.5	0.4	4.5	28.6	
5	2.0	0.4	1.9	-3.5	0.18
	4.0	0.4	4.5	12.5	
6	1.5	0.4	1.7	14.0	0.17
	3.0	0.4	3.1	2.6	
7	1.0	0.4	1.2	15.0	0.14
	5.0	0.4	6.8	35.8	
8	7.0	0.4	-	-	0.15
9	2.0	0.4	1.3	-37.0	0.16
	4.0	0.4	4.1	2.0	
10	1.5	0.4	1.0	-33.0	0.17

(b)말뚝길이

shaft	실제길이(m)	측정길이(m)	오차(%)*
1	6.7	6.4	-4.2
2	7.2	7.1	-2.1
3	6.4	6.9	7.5
4	7.4	7.5	1.4
5	7.1	7.1	0.0
6	6.9	7.1	3.5
7	6.6	6.9	3.8
8	7.0	6.8	-3.3
9	6.4	6.5	0.8
10	6.7	6.7	0.0

*실제 길이(위치) > 측정 길이(위치)일 경우 - 값

각 말뚝별 유동도 곡선으로부터 구한 저변형 강성계수 (Low-Strain Stiffness) 값은 그림 15와 같다. 정상말뚝인 Shaft 3의 강성계수 값이 가장 크며 결함을 포함하거나 연약 선단인 말뚝은 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

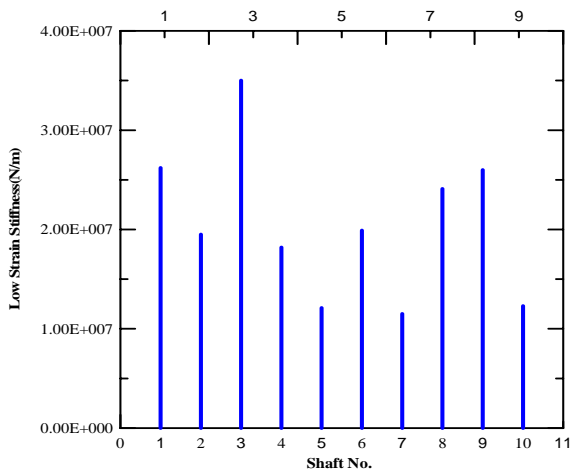


그림 15. 말뚝별 강성계수

6. 결론

- 1) 적용된 NDT기법 중, 검측공 기법(CSL, CT)은 검측공이 반드시 필요하다는 단점이 있으나 결함의 위치 및 15%의 단면적 감소까지도 찾아내는 높은 정확도를 나타내었다.
- 2) CT시험은 해석능력이 우수하나 시간과 경비가 많이 소요된다는 단점이 있어 CSL시험과 병행하여 CSL시험을 통해 확인된 결함 부근에서 실시하는 것이 바람직하다.
- 3) 기초 하부 방향으로 압축파를 발생시키기 어려운 상황에서는 해당 기초 주변에 검측공(Borehole)을 설치하는 PS 시험을 이용하여 정확한 기초의 깊이를 산출해 낼 수 있으며, 압축파 속도를 구할 수 있어 기초의 재질도 유추 가능하다.
- 4) 표면파 기법(SE, IR)은 시공단계 뿐 아니라 기존의 말뚝에 적용 가능하다는 큰 장점이 있으나, 반사파가 많이 발생하여 해석에 어려움이 있다. 따라서 결함의 크기, 위치 추정보다는 말뚝의 근입깊이 산정에 있어 높은 정확도를 나타낸다.
- 5) 각 비파괴시험 기법의 특징을 파악, 적절히 조합하여 시험을 수행하면, 결함의 위치, 크기, 기초의 근입깊이, 재질 등의 확인 및 시공 시 품질관리 방법에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

(접수일자 : 2001. 7. 18)

참 고 문 헌

1. Baker, C. N., Parikh, G., Briaud, J. L., Drumright E. E. and Mensah, F. (1993), Drilled Shafts for Bridge Foudations, FHWA Technical Report
2. Davis, A. G. and Dunn, C. S. (1975), From Theory to Field Experience with the Non-Destructive Vibration Testing of Piles, Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 960-964
3. Finno, R. J. and Gassman, S. (1998), Impulse Response Evaluation of Drilled Shafts, Journal of Geotechnical Engineeing, ASCE, Vol. 124, No. 10, pp. 965-975
4. Holeyman, A. E. (1992), Keynote lecture : Technology of pile dynamic testing, Application of Stress-Wave Theory to Piles, pp. 195-215
5. Linkins G., Rausche F., Miner R. and Hussein, M. (1993), Verification of Deep Foundations by NDT Methods, Design and Performance of Deep Foundations. ASCE Geotechnical Special Publication, No. 38, pp. 76-90
6. NCHRP. (1996), Nondestructive Testing of Unknown Subsurface Bridge Foundations, Research Results Digest. No. 213
7. Olson, L. D., Aouad, M. F. and Sack, D. (1998), NDT Diagnosis of Drilled Shaft Foundations, Transportation Research Board 77th Annual Meeting, No. 9.8-0595