

현장타설말뚝의 비검측공 건전도시험법에 관한 해석적 고찰 (II)

Theoretical Considerations in the Application of Impact Echo and Impulse Response Techniques to Integrity Tests on Drilled Shafts (II)

이 병 식*¹ Lee, Byung-Sik

이 원 구*² Lee, Won-Goo

Abstract

A variety of theoretical studies has been conducted to improve applicabilities of non-destructive out-hole testing methods, impact-echo and impulse-response, to integrity tests on drilled shafts. Among these studies, those verifying resolutions of the testing methods and to examine the influence of geotechnical site conditions on test results are mainly dealt with in this paper. As a result of the studies, it has been verified that the resolution of the impulse-response method is significantly affected by a relative volume of shaft, in addition to the well known factors such as the stiffness contrast between a soil and a shaft material, and the ratio of length to diameter of shaft. In addition, it has been shown that the layered soil condition as well as the penetration depth of drilled shaft to the firm soil deposit basically influence the dynamic boundary condition of shaft. Consequently, it has been concluded that these effects should be carefully considered when test results are analyzed based on resonant frequencies of the shaft.

요 지

비검측공 시험법을 현장타설말뚝의 건전도 평가 목적으로 적용함에 있어서 시험법의 적용성을 향상시키기 위한 연구가 진행되어 오고 있다. 본 논문에서는 같은 맥락에서 수행되어 온 일련의 해석적 연구 결과 중 시험법의 해상도에 관한 문제와 말뚝 주변 및 선단지반의 강성이 비검측공 시험결과에 미치는 영향에 대해 다루었다. 본 논문에서 수행한 연구결과에 의하면 충격응답기법의 해상도를 평가하기 위해서는 말뚝재료에 대한 지반의 강성비 (V_s/V_c)와 말뚝의 길이에 대한 직경의 비(L/D)에 의존하는 기존 평가기준에 부가하여 말뚝의 상대적인 체적변화가 필히 고려되어야 한다는 결론을 얻었다. 한편, 말뚝이 수평으로 층이 진 주변 지반을 통과하여 말뚝선단부를 지지하는 지반(선단지반)에 근입되거나 지지되는 경우에 말뚝의 자유단 혹은 고정단 경계 조건은 주변 지반과 선단 지반의 강성비와 선단 지반에 대한 말뚝의 근입깊이에 따라 변화한다는 사실을 규명하였다. 말뚝의 건전도 평가 시에 사용하게 되는 말뚝의 공진주파수가 이들 조건에 따라 변화하므로 결과적으로 시험결과분석에 있어서 이들 영향이 필히 고려되어야 한다는 결론을 얻었다.

Keywords : Dynamic boundary condition, Impact echo, Impulse response, Integrity of drilled shaft, Slime

1. 서 론

비검측공 시험법을 현장타설말뚝의 건전도 평가 목

적으로 적용함에 있어서 시험법의 적용성을 향상시키기 위한 연구가 진행되어 오고 있다(김 등, 1999; 이 등, 2000; 이 등, 2000; Mok 등, 2001). 본 논문에서는

*1 정희원, 공주대학교 공과대학 토목환경공학과 조교수

*2 정희원, 공주대학교 대학원 토목공학과

같은 맥락에서 수행되어 온 일련의 해석적 연구 결과 중 시험법의 해상도에 관한 문제와 더불어서 말뚝의 주변 지반과 말뚝의 선단을 지지하는 선단지반의 강성이 시험법의 결과에 미치는 영향에 대해서 다루었다.

비점측공 시험법의 해상도(resolution)는 다양한 말뚝-지반 조건에서 말뚝의 강성이나 길이, 혹은 결함을 탐지함에 있어서 시험결과로부터 이들 특성들을 탐지할 수 있는지의 여부를 결정한다. 해상도에 영향을 미치는 인자들은 매우 다양하지만 본 논문에서는 가장 기본적인 문제들인 말뚝의 크기와 더불어서 말뚝강성에 대한 주변 지반의 강성비에 의한 영향에 대해서 충격응답기법을 중심으로 다루었다.

한편, 말뚝과 접해있는 지반의 강성도는 말뚝의 동적 거동을 지배하는 경계조건에 영향을 미치므로 시험법의 결과분석에 있어서 고려되어야 할 중요한 영향인자이다. 비점측공시험법으로부터 말뚝이나 결함의 제반 특성을 알아내기 위해서는 측정된 신호의 공진주파수에 의존하게 되는데 말뚝의 공진주파수가 선단지반과 주변지반의 강성조건에 따라서 자유단-자유단, 자유단-고정단, 혹은 이들의 중간조건 등에 따라 변화할 것으로 예상되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 충격반향기법을 중심으로 말뚝의 경계조건 변화에 영향을 미치는 다양한 인자들 중에서도 말뚝 주변과 선단부 지반의 강성과 선단부 지반에 대한 말뚝의 근입깊이 등의 영향을 조사하기 위한 일련의 해석적 연구를 수행하였다.

2. 시험법의 해상도

말뚝의 크기와 더불어서 말뚝과 주변 지반의 강성이 충격응답기법의 해상도에 미치는 영향에 대해 조사한 기존 연구결과가 있다. 이들 연구에서 충격응답기법의 해상도는 말뚝의 길이(L)에 대한 직경(D)의 비율, L/D와 말뚝과 주변 지반의 상대적인 강성비, 즉 탄성계수로 표현하는 경우, E_d/E_s (여기에서 c와 s는 각각 말뚝과 지반을 칭함)의 변화에 따라 변화하는 것으로 알려졌다. Liao와 Roesset(1997)은 일련의 해석적 연구로부터 $L/D < 30$ 이고, $E_d/E_s > 50$ 인(혹은 $V_d/V_c < \text{약 } 0.1$) 조건에서 충격응답기법을 적용할 수 있다고 하였다. Gassman(1998)도 유사한 결과를 제안하였다. 그러나 본 연구를 수행하는 과정에서 기존 결과에서는 말뚝의 크기에 의한 영향이 말뚝의 치수인 L/D로 단순히 정규화되어 실제로 해상도에 대한 말뚝체적변화의 영향이 적절하게 고려되지 못

했다는 근본적인 문제가 발견되었다. 본 연구에서 수행한 해석적 연구결과에 의거하여 이 문제점에 관해 상세히 설명하고 충격응답기법의 해상도를 보다 명확하게 평가하는 기준을 제안하였다.

2.1 해석대상 말뚝 및 해석조건

직경이 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m인 경우에 L/D 값이 각각 5, 10, 20, 30, 40이 되는 길이를 가진 말뚝들, 즉 말뚝의 체적이 직경과 길이방향으로 동시에 확대되는 경우들에 대해서 비점측공시험법의 해상도에 대한 말뚝의 상대적 체적변화의 영향을 평가하였다. 이들 해석 대상 말뚝들의 제원을 정리하여 표 1에 보였다.

이들 말뚝에 대해 충격응답기법을 이용한 건전도 시험 시 얻는 결과를 1차원 유한요소해석으로 재현하였다. 유한요소해석을 위해서 말뚝을 트러스 요소로 고려하고, 말뚝 주변지반-말뚝의 접촉면과 단부에서 발생하는 지반저항은 스프링과 감쇠요소로 고려하였다. 말뚝 요소는 밀도 2300 kg/cm^3 , 포와송비 0.2, 탄성변형계수 33.1 GPa , 압축파 속도 $3,800 \text{ m/sec}$ 의 재질로 가정하였다. 지반조건으로는 표 2에 보인 바와 같은 다섯 가지의 지반을 선정하였다. 각 지반조건에 대해 해석에 사용된 지반물성치를 표 2에 보였다. 이 표에 보인 지반 특성치를 기준으로 Liao와 Roesset(1997)이 사용한 관계식을 이용하여 스프링계수와 감쇠계수를 말뚝의 단위길이에 대해 정했다. 또한 같은 표에는 각 지반에 대해 지반과

표 1. 해석 대상 말뚝의 제원과 L/D 값

L/D \ 치수	D = 0.5 m	D = 1.0 m	D = 1.5 m
	L (m)	L (m)	L (m)
5	2.5	5.0	7.5
10	5.0	10.0	15.0
20	10.0	20.0	30.0
30	15.0	30.0	45.0
40	20.0	40.0	60.0

표 2. 기초 지반의 특성치

특성치 지반구분	ρ_s (kg/cm^3)	ν_s	E_s (MPa)	V_s (m/sec)	V_d/V_c ($\approx E_d/E_s$)
모래	1800	0.40	0.50	100	0.026 (657)
포화된모래	1900	0.40	1.92	190	0.050 (172)
연약점토	1950	0.40	3.41	250	0.066 (97)
자갈 섞인 모래	2100	0.40	7.20	350	0.092 (46)
보통암	2500	0.23	15.90	439	0.116 (21)

말뚝의 상대 강성비를 함께 보였다.

해석에 적용된 충격 하중은 반파장의 Sine 곡선, $P(t) = P_0 \sin \frac{\pi}{T_d} t$ 로 가정하였으며, 지속시간(T_d)은 1.5×10^{-3} sec, 최대진폭(P_0)은 $15,570 \text{ N/m}^2$ 로 말뚝의 중심에서 반경 25.4 mm의 원형면적에 등분포하는 조건으로 가정하였다.

유한요소 해석에는 범용해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 충격하중에 의해 발생하는 탄성파에 대한 말뚝-지반시스템의 응답을 0.2048초까지 1024 단계에 대해 직접적분법으로 해석하였다. 해석결과로부터 얻은 응답파의 시간이력을 충격응답기법을 이용하여 분석하고 말뚝의 운동성(mobility)을 주파수 영역에서 구했다.

2.2 해상도 지수

해석결과로부터 충격응답시험법의 해상도를 일관성 있게 평가하기 위해서는 해상도지수(resolution index)의 정의가 필요하였다. 해상도지수를 설명하기 위해 L/D 값이 각각 10과 40인 말뚝에 대한 해석결과를 충격응답 기법으로 처리하여 얻은 운동성 스펙트럼을 그림 1과 2에 각각 보였다.

기존 연구(Liao와 Roesset, 1997; Gassman, 1998)에서는 해상도 지수를 그림 1에 보인 바와 같은 운동성의 최고치 p 와 최저치 q 의 비율, p/q 로 정의하고, 이 값이 일정기준을 만족하면 시험법의 해상도가 확보되는 것으로 보았다. 그러나 본 연구의 수행과정에서 이렇게 정의된 해상도지수를 적용하는 경우에 p 와 q , 두 값들이 모두 대수축에서 한 지수 범위 내에 있지 않는 경우에는 해상도를 적절하게 표현하지 못한다는 문제점이 발견되었다.

따라서 본 논문에서는 해상도를 p 와 q 가 1보다 작은

조건에서 $\log(q)/\log(p)$ 의 값으로 정의하여 사용하기로 하였다. 이 경우에 그림 1과 2의 결과에 대해서 해상도는 각각 1.061과 1.000로 구해지고, 이 경우에 $\log(q)/\log(p)$ 가 1에 가까우면 시험결과를 사용할 수 없게 됨을 알 수 있었다. 본 연구에서 수행한 일련의 연구결과, 해상도를 나타내는 $\log(q)/\log(p)$ 값이 대체적으로 1.005 이상(p/q 값은 1.05 이상) 일 경우에 시험결과와 해상도가 적절함을 알 수 있었다.

2.3 해상도 종합평가

표 1에 보인 여러 가지 치수의 말뚝에 대해서 1 차원 유한요소해석을 실시하고 결과로부터 그림 1과 2에 보인 바와 같은 형식으로 주파수 영역에서 말뚝 운동성의 변화를 각각 구했다. 이들 결과로부터 각 조건에서 충격응답기법의 해상도를 결정하여 지반과 말뚝의 상대강성비와 말뚝의 체적변화에 따른 해상도지수의 변화를 평가하기로 한다.

이를 위해서 말뚝의 직경이 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m인 경우에 대해 L/D 값과 상대강성비의 변화에 따른 해상도지수의 변화를 그림 3, 4, 5에 각각 보였다. 이들 그림의 결과로부터 우선 지반과 말뚝의 상대강성비(V_s/V_c)가 커질수록 해상도가 감소함을 알 수 있었다. 이 추세는 기존연구결과에서 이미 밝혀진 바와 같았다.

한편, 본 논문에서 제시하고자 하는 결과인 말뚝의 체적변화에 따른 해상도의 변화를 같은 그림의 결과들을 이용하여 설명할 수 있다. 각 그림의 결과에서 같은 L/D 값의 조건에 대해서 말뚝의 직경이 변화함에 따라서 각각 구해진 해상도지수를 비교하면 말뚝의 직경이 증가함에 따라 해상도가 불량해짐을 알 수 있다. 이러한 결과에 근거하여 말뚝의 직경 즉, 체적을 고려치 않고

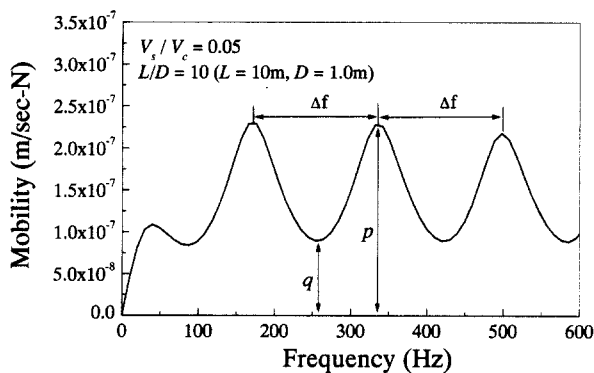


그림 1. 해상도가 양호한 경우의 운동성

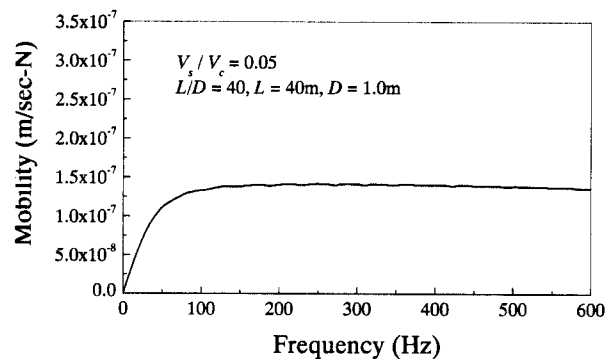


그림 2. 해상도가 불량한 경우의 운동성

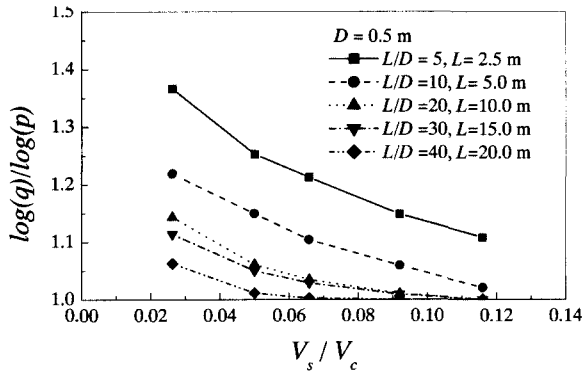


그림 3. $D=0.5\text{m}$ 일 때 L/D 가 변화하는 경우

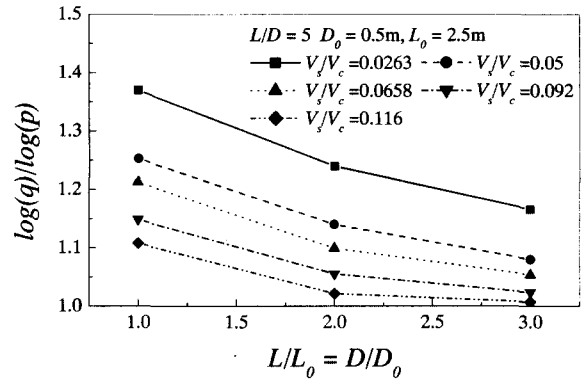


그림 6. $L/D=5$ 로 일정하고 체적이 변하는 경우

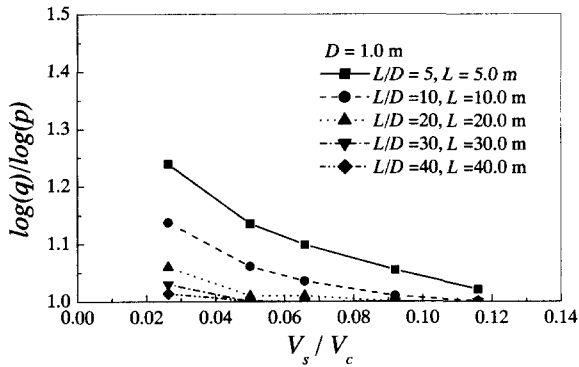


그림 4. $D=1.0\text{m}$ 일 때 L/D 가 변화하는 경우

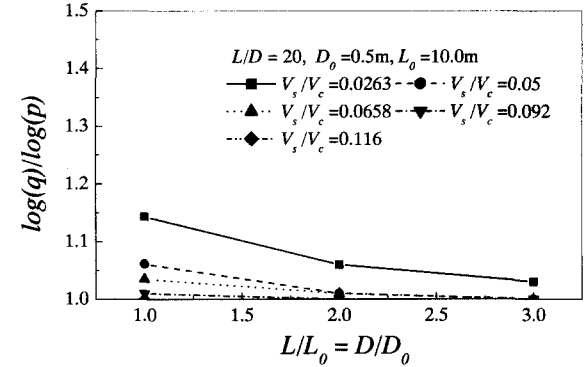


그림 7. $L/D=20$ 로 일정하고 체적이 변하는 경우

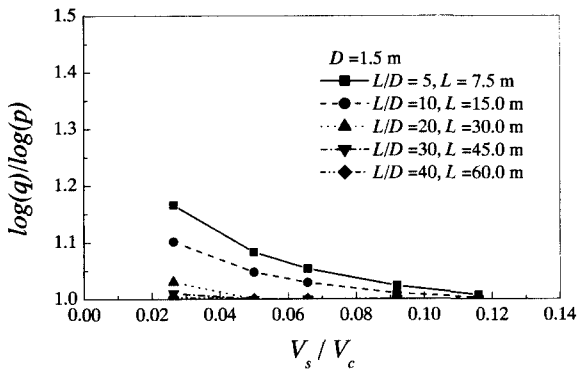


그림 5. $D=1.5\text{m}$ 일 때 L/D 가 변화하는 경우

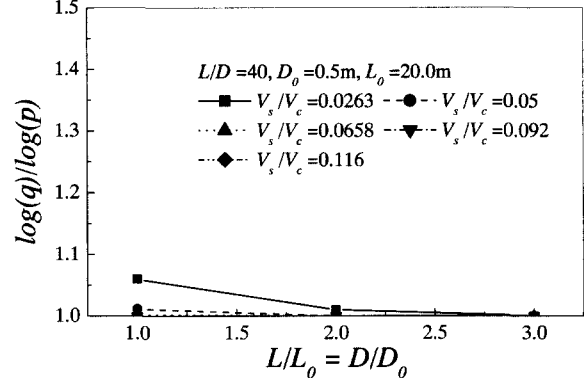


그림 8. $L/D=40$ 로 일정하고 체적이 변하는 경우

L/D 값의 조건에만 의존하여 해상도를 평가하는 기존의 방법에는 문제가 있음을 알 수 있었다.

또한, 그림 3, 4, 5의 결과를 동일한 L/D 값에 대해 정리하여 그림 6, 7, 8과 같이 나타내면 해상도를 평가하는 기존방법의 문제점을 더욱 분명히 알 수 있었다. 그림 6, 7, 8은 직경과 길이가 각각 D_0 와 L_0 인 체적이 가장 작은 말뚝과 직경(D) 및 길이(L)가 동일한 비율로 증가되어 체적이 상대적으로 커지지만 L/D 는 각각 5, 20, 40으로 일정한 말뚝들에 대해서 강성비에 따른 해상

도의 변화를 나타내고 있다. 만약 해상도의 평가에 있어서 L/D 값만에 의존하는 경우에 이들 그림의 결과는 각 강성비에 대해서 체적의 변화, 즉 L/L_0 혹은 D/D_0 의 변화와 상관없이 일정한 해상도를 보여야 한다. 그러나 그림의 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 해상도는 L/L_0 혹은 D/D_0 의 변화에 따라 변화하고 있음을 알 수 있었다.

그림 6, 7, 8의 결과를 이용하여 직경이 1.5 m, 길이가 30 m($L/D = 20$)이고 말뚝과 지반의 강성비가 0.05(탄성계수로 나타낼 경우에는 172)인 말뚝에 대해서 충격응

답기법의 적용성을 평가하는 예를 들어보기로 하였다. 이 말뚝에 대해서 2절에서 설명한 바와 같이 체적의 변화를 고려하지 않는 기존 평가방법으로는 $L/D < 30$ 이고 $V_s/V_c < 0.1$ 이므로 해상도가 양호한 것으로 평가되었다. 그러나 그림 7의 결과에 의하면 같은 말뚝에 대해 충격 응답기법의 해상도는 매우 낮다는 것을 알 수 있었다. 또한, 이 경우의 해상도는 직경이 0.5 m이고 길이가 20 m ($L/D = 40$)인 경우보다도 낮음을 그림 8의 결과로부터 알 수 있었다. 따라서 충격응답기법의 해상도 평가에 있어서 단순히 L/D 만 평가되어야 하는 것이 아니고 말뚝의 상대적인 체적변화가 함께 고려되어야 한다는 결론을 내릴 수 있었다.

3. 지반조건의 영향

현장 타설 콘크리트 말뚝은 소요의 지지력을 얻기 위해 말뚝의 선단을 지반 강성이 비교적 큰 지반(예를 들면, 연암 이상)에 어느 정도 근입하여 설치한다. 말뚝 선단을 지지하는 기초지반 및 주변 지반의 강성과 근입 깊이에 따라 말뚝은 자유단-자유단, 자유단-고정단, 혹은 이들 중간 조건에 따른 동적 거동을 하게 된다. 여기서는 이러한 말뚝 주변 조건의 변화에 따른 말뚝 경계조건의 변화를 분석하였다.

3.1 해석대상 말뚝

해석 대상 말뚝은 길이가 20 m이고 직경은 1 m로서, 그림 9에 보인 바와 같이 지표면으로부터 1 m 돌출하여 설치되었고, 주변 지반을 깊이 L_a 로 관통하여 깊이 L_b 만큼 선단지반에 근입되어 있는 것으로 가정하였다. 말뚝의 재료는 밀도 $2,300 \text{ g/cm}^3$, 포아송비 0.2, 탄성계수 33.1 GPa, 압축파 속도 3,800 m/sec, 전단파 속도 2,327 m/sec의 콘크리트로 가정하였다.

이러한 말뚝에 대해 선단 지반에 대한 말뚝의 근입 깊이(L_b)를 0 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m로 변화시키고, 주변 지반에 대한 선단 지반의 강성비를 표 3에 나타난 바와 같은 조합으로 변화시킨 경우들을 고려하였다. 이러한 말뚝-지반시스템에 대해 충격하중에 대한 말뚝의 동적 거동을 1차원 유한요소해석으로 구하고 그 결과를 충격 반향기법으로 신호 처리하여 말뚝의 조건에 따른 공진 주파수의 변화를 분석하였다.

표 3. 주변 지반과 선단 지반 물성치

경우	주변 지반	V_{s1} (m/sec)	선단 지반	V_{s2} (m/sec)	V_{s2}/V_{s1}
1	모래	100	포화된 모래	190	1.9
			연약 점토	250	2.5
			빙적토	350	3.5
			보통암	439	4.4
2	포화된 모래	190	연약 점토	250	1.3
			빙적토	350	1.8
			보통암	439	2.3
			극경암	1166	6.1
3	연약 점토	250	빙적토	350	1.4
			보통암	439	1.8
			극경암	1166	4.7

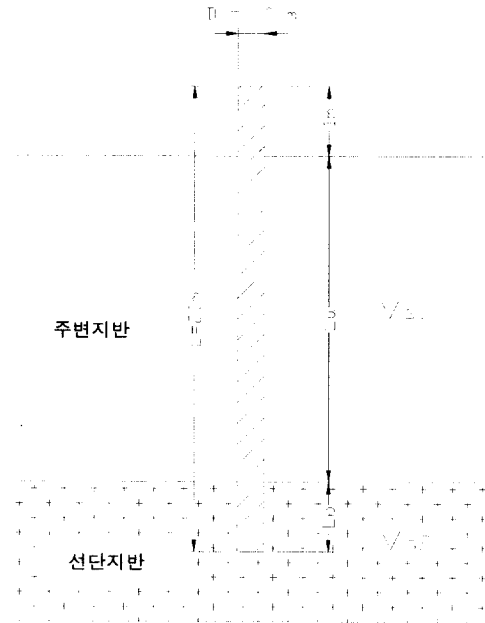


그림 9. 기초 지반에 근입된 말뚝-지반 시스템

3.2 말뚝 주변 지반조건에 따른 공진주파수의 변화

그림 9에 보인 해석 대상 말뚝이 공기 중에 있는 경우에 대한 1차 모드의 공진 주파수를 경계조건에 대하여 각각 구하면 다음과 같다.

① 자유단-자유단 경계조건의 경우 :

$$f_1 = \frac{nV_c}{2L} = \frac{1 \times 3800}{2 \times 20} = 95 \text{ Hz}$$

② 자유단-고정단 경계조건의 경우 :

$$f_1 = \frac{nV_c}{4L} = \frac{1 \times 3800}{4 \times 20} = 47.5 \text{ Hz}$$

같은 방법으로 각 경계조건에 대해 고차 모드의 공진주파수를 구하면 자유단-자유단 경계조건의 경우에 모드 별 공진 주파수는 95 Hz, 190 Hz, 285 Hz, 380 Hz, ... 등으로, 자유단-고정단 경계조건의 경우에는 47.5 Hz, 142.5 Hz, 234.5 Hz, 332.5 Hz ... 등으로 구해진다. 즉, 말뚝은 자유단-자유단 경계조건인 경우에 자유단-고정단 경계조건인 경우보다 모드 별로 $V_d/4L$ 만큼 높은 주파수에서 공진한다.

표 3에 보인 각 경우에 대한 1차 모드의 공진주파수는 말뚝 선단을 완전 자유단 혹은 완전 고정단으로 가정하는 경우에 대해 위에서 구한 1차 모드 공진주파수들인 95 Hz와 47.5 Hz의 영역에서 변화할 것으로 예상된다. 이를 상세히 알아보기 위해서 표 3의 각 경우에 대한 공진주파수의 변화를 지반의 강성비의 영향과 말뚝 선단의 근입깊이 변화에 의한 영향으로 크게 구분하여 설명하기로 한다.

(1) 주변지반에 대한 선단 지반 강성비의 영향

선단 지반에 대한 말뚝의 근입깊이가 1 m인 말뚝 ($L_b/L=0.05$)에 대해 말뚝의 주변 지반이 모래이고 선단 지반의 강성이 변하는 조건 들(표 3의 “경우 1”)대해 각 조건에서 말뚝의 공진 주파수를 구해 그림 10에 나타냈다. 또한 말뚝의 주변 지반이 포화된 모래일 때 선단 지반의 강성이 변하는 조건 들 (표 3의 “경우 2”)과 주변 지반이 연약 점토일 때 여러 가지 선단 지반의 강성에 대해 각 조건(표 3의 “경우 3”)에서 말뚝의 공진 주파수를 구해 그림 11과 12에 각각 나타냈다.

이들 그림에 보인 결과로부터 판단할 때 공진 주파수의 변화는 주변 지반에 대한 기초 지반의 강성비에 따라 말뚝이 1) 자유단으로 거동하는 구간, 2) 자유단에서 고정단으로 변화하는 변이구간, 3) 고정단으로 거동하는 구간의 세 구간으로 나누어 고려할 수 있음을 알 수 있었다. 그림 10의 결과에 대해서는 강성비가 약 3.5보다 작을 경우에는 각 모드의 공진 주파수가 약 82 Hz, 165 Hz, 250 Hz 등으로 나타나 자유단으로 거동함을 알 수 있었다. 반면에 같은 그림의 결과에서 강성비가 약 9.0 보다 클 경우에 각 모드의 주파수는 약 35 Hz, 120 Hz, 204 Hz, 290 Hz 등으로 나타나 고정단으로 거동함을 알 수 있었다. 그러나 강성비가 3.5에서 9.0 사이인 경우들에 대해서는 공진 주파수의 진폭이 상대적으로 작아 이를 명확하게 구분하기가 어려웠다.

그림 11과 12에서 보인 경우들은 주변 지반의 강성이

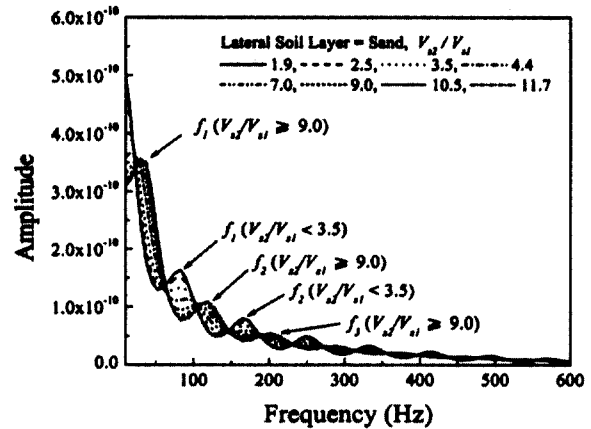


그림 10. 주변 지반이 모래이고 기초 지반의 강성 변화 시 말뚝의 공진 주파수 변화

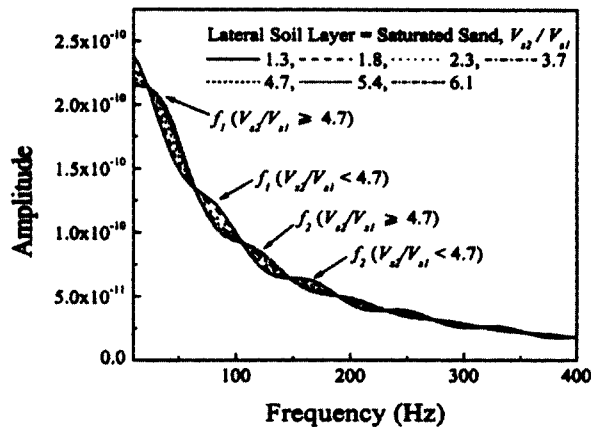


그림 11. 주변 지반이 포화된 모래이고 기초 지반의 강성 변화 시 말뚝의 공진 주파수

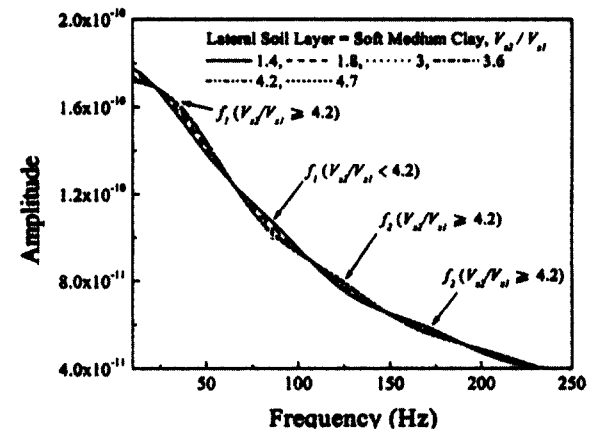


그림 12. 주변 지반이 연약 점토이고 기초 지반의 강성 변화 시 말뚝의 공진 주파수

그림 10의 경우보다 커서 주파수 영역에서의 진폭이 크게 감소하므로 그림의 결과로부터 말뚝의 자유단 혹은 고정단의 거동을 뚜렷하게 구분하기가 어렵게 되었다.

하지만 그림10의 결과에서 나타낸 바와 유사하게 이 결과들(그림 11과 12)도 말뚝의 경계조건이 지반 강성비의 변화에 따라 변이되는 추세를 개략적으로 나타내고 있었다. 즉, 개략적으로 강성비가 약 4정도의 값 주변에서 말뚝의 경계조건이 자유단 조건으로 변화한다고 볼 수 있었다.

이상과 같은 조사를 토대로 선단 지반에 근입된 말뚝의 근입깊이가 1 m인 경우에 대해서는 말뚝의 경계조건을 주변 지반에 대한 선단 지반의 강성비가 약 3.5 이하인 경우에는 자유단으로, 약 9.0 이상인 경우에는 고정단으로 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다. 그러나 경계조건을 구분하는 이 값들은 말뚝의 근입깊이가 달라지는 경우에는 변화될 것으로 예상되었다.

(2) 선단 지반에 대한 말뚝 근입 깊이의 영향

표 3의 “경우 1”, 즉 말뚝의 주변 지반이 모래이고,

선단 지반의 강성이 변화하는 경우에 선단 지반에 대한 말뚝의 근입깊이를 0 m, 1 m, 2 m, 3 m와 4 m로 변화시켜 근입깊이가 말뚝의 경계 조건에 미치는 영향을 살펴 보았다. 이들 경우에 대해 얻은 공진 주파수 변화는 근입 깊이가 1 m인 경우에 대해서는 앞서 보인 그림 10의 결과와 같고, 근입깊이가 0 m($L_b/L=0$), 2 m($L_b/L=0.1$), 3 m($L_b/L=0.15$)와 4 m($L_b/L=0.2$)인 경우에 대해서는 그림 13, 그림 14, 그림 15와 그림 16에 각각 나타냈다.

말뚝의 근입깊이가 0 m인 경우인 그림 13의 결과는 근입깊이가 1 m인 경우인 그림 10의 결과와 거의 동일하므로 근입깊이의 변화에 대해 공진주파수가 변화하지 않았음을 알 수 있었다.

선단 지반에 근입된 말뚝의 근입깊이가 2 m인 경우인 그림 14의 결과를 살펴보면, 말뚝의 동적 거동(경계 조건)은 근입 깊이가 1 m인 경우(그림 10)와는 달리 강성비가 2.5 보다 작은 구간에서 자유단으로 거동하고,

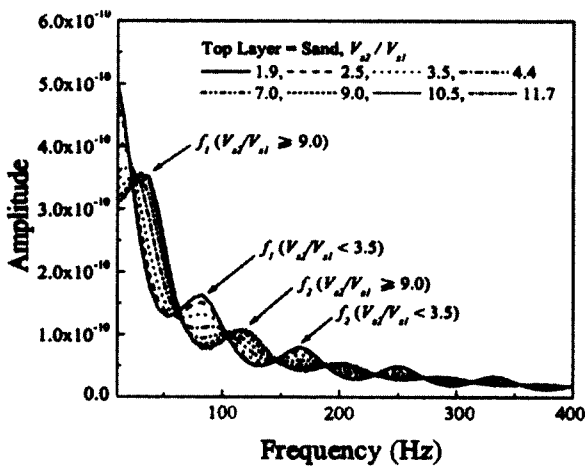


그림 13. 선단지반 근입 깊이가 0m인 경우

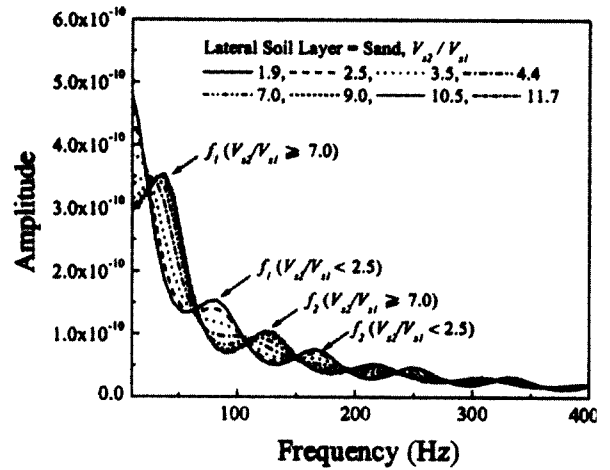


그림 14. 선단지반 근입 깊이가 2m인 경우

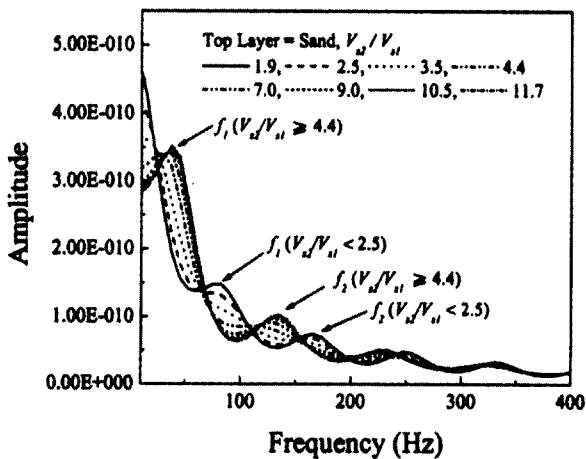


그림 15. 선단지반 근입 깊이가 3m인 경우

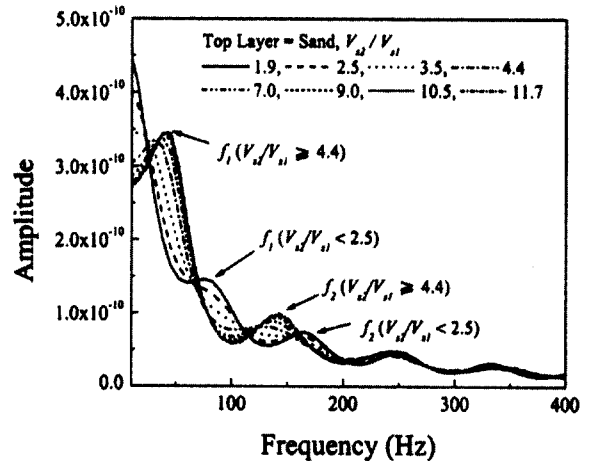


그림 16. 선단지반 근입 깊이가 4m인 경우

표 4. 말뚝의 근입 깊이와 주변 지반 조건의 변화에 따른 말뚝의 동적 거동 특성 변화

근입 깊이	경계조건	말뚝의 동적 거동 특성	
		자유단	고정단
0 m ($L_b/L = 0.00$)		$V_{s2}/V_{s1} < 3.5$	$V_{s2}/V_{s1} \geq 9.0$
1 m ($L_b/L = 0.05$)		$V_{s2}/V_{s1} < 3.5$	$V_{s2}/V_{s1} \geq 9.0$
2 m ($L_b/L = 0.10$)		$V_{s2}/V_{s1} < 2.5$	$V_{s2}/V_{s1} \geq 7.0$
3 m ($L_b/L = 0.15$)		$V_{s2}/V_{s1} < 2.5$	$V_{s2}/V_{s1} \geq 4.4$
4 m ($L_b/L = 0.20$)		$V_{s2}/V_{s1} < 2.5$	$V_{s2}/V_{s1} \geq 4.4$

7.0 보다 큰 구간에서는 고정단으로 거동하는 특성을 보임을 알 수 있었다. 또한 근입 깊이가 3 m와 4 m로 증가된 그림 15와 16의 경우에서도 이와 비슷한 추세로 말뚝의 동적 거동(경계조건)을 구분 짓는 강성비가 자유단 거동 구간의 경우 2.5로, 고정단 거동 구간의 경우 4.4로 감소되는 것을 알 수 있었다. 즉, 말뚝의 선단 지반 근입깊이가 깊어짐에 따라 말뚝의 경계조건을 구분 짓는 주변 지반에 대한 선단 지반의 강성비가 감소하는 경향을 보임을 알 수 있었다. 따라서 선단 지반에 근입된 말뚝의 근입깊이가 말뚝의 경계조건에 크게 영향을 미칠 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

위의 (1)과 (2)절에서 얻은 결과를 정리하여 말뚝의 주변 지반 조건과 말뚝의 근입 깊이 변화에 따른 말뚝의 경계조건 변화를 나타내면 표 4와 같다.

4. 결론

충격응답기법을 이용한 현장 타설 콘크리트 말뚝의 진전도 평가에서 시험기법의 해상도는 말뚝재료에 대한 지반의 강성비 (V_s/V_c)와 L/D 값이 증가함에 따라 감소한다는 사실이 알려져 있다. 본 논문에서 보인 연구결과에 의하면 시험법의 해상도는 기존의 기준에 부가하여 말뚝의 상대적인 체적변화가 필히 고려하여야 한다는 결론을 얻었다.

지반 조건과 선단 지반에 대한 말뚝의 근입깊이의 변화가 말뚝의 공진주파수의 변화에 미치는 영향에 관해서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 말뚝이 수평으로 충이 진 주변 지반을 통과하여 단부가 선단 지반에 근입되거나 지지되는 경우에 말뚝의 자유단 혹은 고정단 경계 조건은 주변 지반과 선단 지반의 강성비와 선단 지반에 대한 말뚝선단의 근입깊이에 따라 변화하였다.

- (2) 주변 지반에 대한 선단 지반의 강성비, V_{s2}/V_{s1} 가 약 3 이하이면 말뚝이 자유단 경계 조건으로 거동하였고, 강성비가 약 9 이상이면 고정단 경계 조건으로 거동하였다.
- (3) 말뚝의 기초 지반 근입깊이가 말뚝 전체 길이에 대해 10% 이상($L_b/L > 0.1$)이 되면 근입깊이가 말뚝의 동적거동을 지배하는 경계 조건 변화에 크게 영향을 미치는 것으로 조사되었다.
- (4) 말뚝의 경계조건이 본 연구에서 정의한 변이구간에 속하는 경우에 말뚝의 길이나 강성을 충격반향기법의 결과로부터 추정하려면 1차 모드에 의존하기보다는 공진주파수 간의 간격을 이용하여 추정하여야 적절한 결과를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 98-0601-0201-3)에 의하여 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김동수, 박연홍(1999), "충격반향기법을 이용한 깊은 기초의 진전도 평가(수치해석)", 한국지반공학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 139-152.
2. 이원구, 이병식(1999), "현장 타설 콘크리트 말뚝의 진전도 평가를 위한 충격반향기법의 해상도 평가", 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol.2, pp.275-278.
3. 이병식, 이원구(2000), "지반조건이 현장 타설 말뚝 선단부의 동적 경계조건에 미치는 영향", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.159-165.
4. Gassman, S. L.(1997), "Impulse Response Evaluation of Inaccessible Foundations", Ph.D. Dissertation, Northwestern University, Evanston, Illinois.
5. Liao, S. T. and Roesset, J. M.(1997), "Dynamic Response of Intact Piles to Impulse Loads", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.21, pp.255-275.
6. Mok, Y. J., Lee, B. S., Kim, D. S., Joh, S. H. and Lee, S. R.(2001), "Integrity Evaluation of Drilled Shafts Using Borehole and Non-Borehole Seismic Methods", *Proc. of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Turkey, pp.463-466.

(접수일자 2001. 6. 14)