

충격반향기법에 의한 현장타설 말뚝기초의 선단 조건 평가

Evaluation of Drilled Shaft's End Condition by Impact-Echo Method

김동수*, 김형우[†]

Dong-Soo Kim* and Hyung-Woo Kim[†]

초 록 본 논문은 탄성파를 이용한 비파괴검사 방법 중에 하나인 충격반향기법에 의하여 현장타설 말뚝기초의 선단 조건을 평가하는 연구로, 실내실험 및 현장실험을 수행하였다. 말뚝 선단 조건 평가를 위하여 직경 6cm, 길이 2m인 시멘트 모르타르 모형말뚝을 제작하였으며, 선단 조건은 자유단 조건, 고정단 조건, 암반근입 조건, 그리고 연약 선단 조건의 네 가지로 구분하였고 연약 선단 조건은 다시 말뚝과 주위 지반과의 접촉 상태가 양호한 경우와 불량한 경우로 나누어 실내실험을 실시하였다. 실내실험 결과 탄성파 전파방법에 의하여 말뚝 선단 조건 가운데 자유단 조건, 고정단 조건 및 암반근입 조건을 각각 구별, 평가할 수 있었다. 또한 암반에 근입되어 있는 깊이도 정확히 산정할 수 있었으며, 말뚝과 주위 지반과의 접촉상태가 불량한 경우의 연약 선단도 탐지할 수 있었다. 탄성파 전파방법의 현장 적용성을 평가하기 위하여 국내 현장에 건설되어 있는 현장타설 말뚝기초에 대하여 현장실험을 수행한 결과, 탄성파 전파방법에 의하여 현장타설 말뚝기초의 선단 조건 평가가 가능함을 확인하였다.

주요어: 탄성파 전파, 현장타설 말뚝기초, 선단 조건, 암반근입, 충격반향기법

Abstract Experimental model studies were carried out to evaluate the end condition for drilled shafts by applying elastic impact on the top of the shaft, which is one of the various methods using stress waves. Typical impact responses corresponding to the various end conditions including free, fixed, rock-socketed, and soft-bottom with good and poor side contact conditions, were investigated. In order to simulate these conditions, mock-up shaft models made of cement mortar were used. Small-scale laboratory experiments were also performed, and field tests were carried out for the shafts that were socketed into weathered rock. It is found that the rock-socketed condition and depth of penetration into rock can be identified from the reflection at the interface between the soil and rock in the waveform. The soft bottom condition can be identified, only when the side contact between shaft and surrounding rock is poor, whereas it cannot be identified when the side contact is good because the waveform is similar to that of fixed end condition.

Keywords: stress wave propagation, drilled shafts, end-conditions, rock-socketed, impact-echo method

1. 서 론

현재 국내에서는 대규모 토목, 건축 구조물의 기초 형식으로 현장타설 콘크리트 말뚝기초가 널리

사용되고 있다. 현장타설 콘크리트 말뚝기초는 직경이 크고 (0.75 m 이상) 소수의 말뚝이 상부 구조물 전체를 지지하는 형식으로 시공되어, 한 개의 말뚝이 지지하는 하중이 매우 크다[1,2]. 만일 말뚝

내부에 결함이 발생하면, 말뚝의 변형 및 파손을 유발하고, 상부 구조물의 안전이 위협 받게 되므로 이들 말뚝기초의 유지관리 및 안정성 확보가 중요한 과제로 부각되고 있다. 따라서 말뚝 기초의 구조적 결함이나 주변 지반과의 지지 및 접촉 상태를 파악할 수 있는 조사 방법에 대한 연구가 이루어지고 있다.

우리 나라는 대부분의 현장타설 말뚝이 암반(풍화암, 연암, 또는 경암)에 근입되어 시공되는데[2], 시공 과정에서 말뚝 선단 바닥에 슬라임(slime)과 같은 연약층이 생기기도 하고, 말뚝 주변부와 주위 암반과의 접촉이 불량해지는 경우도 발생한다. 그러므로 슬라임의 존재 여부 및 말뚝 주변부와 암반과의 접촉상태는 현장타설 말뚝기초의 품질을 좌우하는 중요한 요소 중의 하나라고 할 수 있다. 이와 같은 현장타설 말뚝기초의 선단 조건을 정확히 평가하기 위해서는 말뚝을 천공하여 그 내부상태를 직접 확인하는 것이 가장 최선의 방법이지만[3], 이 방법은 시간적, 경제적으로 비효율적이며 말뚝 구조물에 손상을 준다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 최근에는 시공된 구조물에 손상을 주지 않고 내부의 결함을 조사하는 비파괴검사 기법이 각광을 받고 있다[4].

1975년 Steinbach와 Vey[5]는 케이슨 기초와 말뚝 기초의 결함을 탐지하기 위하여 탄성과 전파방법에 의한 실내실험과 현장실험을 수행하였다. 이들은 탄성과 전파방법이 케이슨 기초와 말뚝기초의 결함을 탐지하는데 있어서 간단하고 경제적이며 신속하며 신뢰성 있는 방법임을 실험을 통하여 보여 주었다. 1981년 Hearne 등[6]은 말뚝 표면에 설치한 감지기에 의한 탄성과 전파방법 및 매설된 감지기에 의한 탄성과 전파방법의 두 가지 방법을 제시하였다. 이들은 탄성과 전파방법이 현장타설 말뚝기초의 전반적인 구조적 건전성을 평가하는데 있어 경제적이며 신속한 방법임을 보여주었으며, 말뚝 표면에 설치한 감지기에 의한 탄성과 전파방법 및 매설된 감지기에 의한 탄성과 전파방법 각각에 대한 장점과 단점을 비교 제시하였다. 1991년 Lin 등[7]은 주파수 영역에서 해석할 수 있는 또 다른 방법을 제안하였으며, 이 방법을 충격반향기법(impact-echo method)이라고 명명하였다. 한편, 1994년 Liao[8]는 유한요소모델에 의한 해석적 방법으로 탄성과 전파 및 충격응답의 특성을 연구하였다.

본 논문에서는 탄성과 전파방법(stress wave propagation method) 중 대표적 시험법인 충격반향기법[9]을 사용하여 자유단, 고정단, 암반 근입 및 연약 선단 조건에 대한 동적 거동 특성을 살펴보았으며, 이를 위하여 소규모 모형실험 및 실물 크기의 현장실험을 수행하였다.

2. 소규모 모형실험

2.1. 개요

탄성과 전파방법에 의한 현장타설 말뚝기초의 선단 조건 평가를 위하여 시멘트 모르타르를 이용하여 소규모 모형말뚝을 제작하였다. 선단 조건은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 자유단 조건, 고정단 조건, 암반 근입 조건, 말뚝과 주위 지반과의 접촉 상태가 양호한 조건 및 불량한 조건 등으로 나눌 수 있다.

Fig. 1(a)는 연약지반에 근입되어 있는 말뚝으로서 이 경우의 말뚝 지지력은 말뚝의 주변 마찰력 및 선단 지지력의 합이 되므로 선단 조건은 자유단 조건이라고 할 수 있다. Fig. 1(b) 말뚝은 말뚝의 선단이 암반에 놓여 있으므로 고정단 조건이라고 할 수 있다. Fig. 1(c)는 말뚝 직경의 1~2 배의 깊이로 암반에 근입되어 있는 말뚝으로서, 암반근입 조건으로 불린다. Fig. 1(d)는 말뚝 바닥에 슬라임(slime)이 존재하여 연약선단 조건을 가지는 말뚝이다. 특히, 이 연약선단 조건 말뚝은 말뚝 콘크리트와 주위 암반과의 부착상태가 양호한 경우와 불량한 경우로 다시 구분할 수 있다.

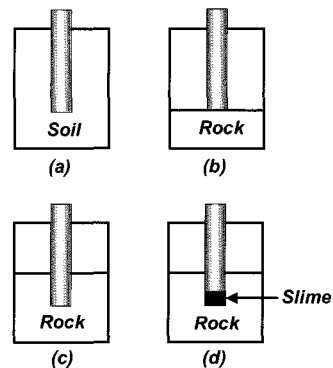


Fig. 1 End conditions of drilled shaft in the field: (a) free end condition; (b) fixed end condition; (c) rock-socketed condition; and (d) soft bottom condition

2.2. 모형말뚝 제작

Fig. 1에 제시되어 있는 대표적인 현장타설 말뚝 기조를 Fig. 2와 같이 시멘트 모르타르 모형말뚝으로 제작하였다. 말뚝 본체는 시멘트 모르타르로 제작하였으며, 암반은 콘크리트로 제작하였다. 콘크리트는 비선형, 불균질 재료이며, 작은 공극과 같은 결함을 많이 포함하고 있는 재료이다. 이와는 반대로 모르타르는 콘크리트 보다 균질하며, 콘크리트에서처럼 모르타르와 굵은 골재에서 발생하는 반사가 적게 일어난다. 따라서, 파 에너지의 산란(scattering) 또는 펄스의 감쇠(attenuation) 등이 콘크리트에서 보다 적게 발생한다는 장점이 있다[5].

시멘트 모르타르가 경화하면 시멘트 모르타르의 막대와 속도(rod wave velocity)와 관련된 탄성계수 값이 급격히 증가한다. 시멘트 모르타르의 막대와 속도는 양단 자유단 공진주 시험(FFRC, Free Free Resonant Column)[10]에 의하여 시멘트 모르타르 타설 14일 후에 측정하였다. 시멘트 모르타르의 밀도는 실험실에서 직접 측정하였으며, 막대와 속도 및 밀도로부터 탄성계수를 계산하였다. 측정된 막대와 속도 및 밀도는 Table 1에 제시되어 있다.

Fig. 2에 네 가지의 각기 다른 선단 조건을 갖는 시멘트 모르타르 모형말뚝(직경 0.065m, 길이 1.955m)을 제시하였다. 콘크리트 모형 암반(직경 0.25m, 길이 0.15m)도 함께 제작되었으며, 자유단 조건을 만들기 위하여, Fig. 2(a)에 제시되어 있는 바와 같이, 모형말뚝을 스티로폼(styrofoam) 위에 올려 놓았다. 고정단 조건을 만족시키기 위하여, Fig. 2(b)에 제시되어 있는 바와 같이 모형말뚝의

선단을 콘크리트 모형암반 위에 에폭시를 사용하여 단단히 고정시켰다. 암반근입 조건은 Fig. 2(c)에 제시되어 있는 바와 같이 모형말뚝을 모형암반에 깊이 0.1m 근입되도록 하여 만들었다. 이 때 근입부 주면과 모형말뚝 바닥은 시멘트 모르타르 모형말뚝의 배합비와 동일한 배합비의 시멘트 모르타르로 채웠다. 시멘트 모르타르가 경화함에 따라 모형말뚝과 모형암반과의 부착상태는 불량한 상태에서 양호한 상태로 변화하며, 시간 경과에 따른 시멘트 모르타르의 막대와 속도를 측정하기 위하여 세 개의 공시체를 제작하였다. 마지막으로 연약선단 조건을 만들기 위하여 스티로폼을 모형말뚝 바닥에 설치하였으며, Fig. 2(d)에 제시되어 있는 바와 같이 근입부 주면은 시멘트 모르타르로 채웠다. 콘크리트 모형암반에 대한 시멘트 모르타르 모형말뚝의

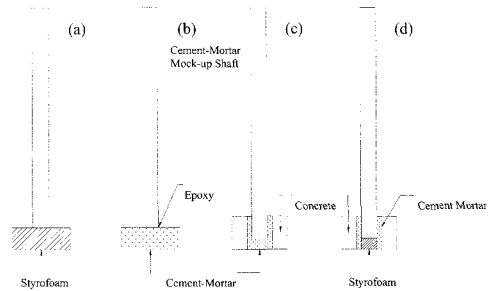


Fig. 2 Cement-mortar mock-up shafts that have different end condition (not to scale): (a) free end condition, (b) fixed end condition, (c) rock-socketed condition, and (d) soft bottom condition. (Note: In rock-socketed and soft bottom conditions, the socketed depth is 10 cm)

Table 1 Dimensions, material properties, rod wave velocity, and acoustic impedances of mock-up shafts and rocks

Mock-up	Material	Diameter, d (m)	Density, r (kg/m ³)	Young's Modulus, E (GPa)	Acoustic Impedance* (Z)	Rod wave Velocity [®] V _{rod} (m/s)
Shaft	Mortar [†]	0.065	2289	28.8	26.93	3545
Rock	Concrete	0.25	2230	33.1	428.30	3794

* Acoustic Impedance: $Z = A\sqrt{\rho E}$. (A: Cross-sectional area)

[†] Young's modulus of cement-mortar was measured at two weeks (14 days) after cement-mortar placement.

[®]Rod wave velocity was measured at four weeks (28 days) after placement.

음향학적 임피던스 비(acoustic impedance ratio)는 약 1/16로 계산되는데, 이 값은 실제 현장에서의 암반근입 말뚝이 반무한 탄성 지반 내에 근입되어 있는 경우를 고려하면 적당한 값이라고 판단된다.

2.3. 실험 방법

탄성과 전파방법에 의하여 말뚝의 선단 조건을 평가할 수 있는 지를 살펴보기 위하여 실내실험을 수행하였다. 실험 장비로 (1) 압축파를 발생시키는 데 유효한 직경 30mm의 강철 쇠구슬, (2) 가속도계(PCB 353B15, voltage sensitivity: 10.48 mV/g, frequency range: 1~10,000Hz), (3) 가속도 신호를 증폭시켜 주는 신호 조절기(charge conditioner), (4) 동적신호분석기(Agilent Technologies 35670A)를 사용하였으며 다음과 같은 방법으로 실험을 수행하였다. 먼저, 가속도계를 진공 그리스(grease)를 사용하여 말뚝의 표면에 견고히 부착한 다음 미리 정해진 높이에서 강철 쇠구슬을 떨어뜨림으로써 탄성파를 발생시킨다. 쇠구슬이 말뚝 표면에 부딪히면 동적신호분석기는 트리거(trigger)되며, 이 때 가속도계의 신호가 기록된다. 동적신호분석기의 샘플링 주파수는 102.4 kHz이며, 데이터 개수는 1024개로 설정하였다.

표면에 설치된 감지기에 의한 압축파 전파방법으로는 말뚝 내부의 막대파 속도를 직접적으로 정확히 측정할 수 없으므로[6], 미리 제작한 공시체를 가지고 FF-RC를 하여 막대파 속도를 측정하였다.

2.4. 선단 조건별 실험결과 및 토의

2.4.1. 자유단 및 고정단 조건

Fig. 3은 자유단 조건에 대한 가속도의 시간영역 신호를 나타낸다. 먼저, 자유단 조건에서의 신호(가는 실선)를 보면, 몇 개의 반사파 도달신호를 얻을 수 있었으며, 첫 번째 반사신호는 초기 도달신호와 동일한 극성(polarity)을 갖고 있음을 알 수 있는데, 이는 압축파가 말뚝 바닥에서는 인장파로 반사되었음을 보여주는 것이다. 말뚝 길이, L 은 초기 압축파 도달과 두 번째 반사파 도달 사이의 시간간격으로부터 추정할 수 있다. 이렇게 하여 추정된 시멘트 모르타르 모형말뚝의 길이, L 은 1.966 m로

서 실제 말뚝 길이 1.955 m와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

반면에, 고정단 조건(굵은 실선)은 자유단 조건과는 달리 초기 도달신호와 첫 번째 반사신호의 극성(polarity)이 서로 다르며, 이는 압축파가 말뚝 바닥에서 압축파로 반사되었음을 의미한다. Fig. 3으로부터 자유단의 신호와 고정단의 신호는 극성의 차이에 의해 서로 구별이 가능함을 알 수 있다.

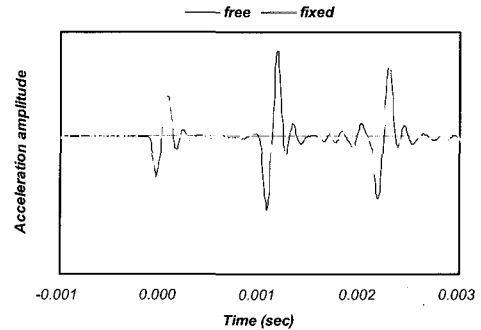


Fig. 3 Acceleration waveforms of cement-mortar shaft for free end condition and fixed end condition

2.4.2. 암반근입 조건

암반근입 조건을 탄성과 전파방법에 의하여 평가하기 위하여 Fig. 2(c)에 제시되어 있는 시멘트 모르타르 모형말뚝을 사용하였으며, 모형말뚝과 모형암반 사이에 시멘트 모르타르를 넣고 24시간 경과 후 실험을 수행하였다. 시간이 경과함에 따라 시멘트 모르타르의 탄성계수가 증가하는데, 24시간 경과 후의 모형말뚝에 대한 주위 시멘트 모르타르의 탄성계수 비는 47.0%로 측정되었으며, 음향학적 임피던스 비는 10 이상으로 계산되었다.

Fig. 4는 암반근입 조건에 대한 가속도의 시간영역 신호(굵은 실선)와 고정단 조건에 대한 신호(가는 실선)를 나타낸다. 이 그림에서 보는 바와 같이, 암반근입 조건의 신호는 고정단 조건의 신호와 그 형태가 유사함을 알 수 있다. 하지만 암반근입 조건에서의 첫 번째 도달시간이 고정단 조건에서 보다 빠르다는 사실은 흥미로우며, 이는 반사가 모형말뚝과 모형암반 사이의 근입부 경계면에서 이루어졌음을 나타내는 것이다. 암반근입 조건과 고정단 조건 사이에서 첫 번째 도달시간 차이를 알면

근입부의 깊이를 산정할 수 있는데, 이렇게 하여 계산된 깊이는 0.13 m로서 실제 깊이인 0.1 m와 비슷한 것으로 나타났다.

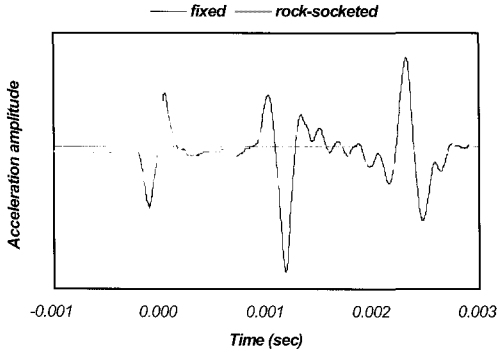


Fig. 4 Acceleration waveforms of cement-mortar shaft for fixed end condition and rock-socketed condition

2.4.3. 연약선단 조건

연약선단 조건을 탄성과 전파방법에 의하여 평가하기 위하여 Fig. 2(d)에 제시되어 있는 시멘트 모르타르 모형말뚝을 사용하였으며, 모형말뚝과 모형암반 사이에 시멘트 모르타르를 넣고 1시간 경과 후 10분 간격으로 실험을 수행하였다. 시멘트 모르타르가 경화함에 따라 모형말뚝 주위의 시멘트 모르타르의 강성이 증가하므로 모형말뚝과 모형암반 사이의 부착상태가 처음에 불량한 상태에서 점차적으로 양호한 상태로 변화하는 과정을 단계적으로 살펴볼 수 있는 것이다. Fig. 5는 시멘트 모르타르를 부은 후 1.5시간 및 27시간이 경과했을 때의 각각의 가속도 신호를 나타낸 것이다. 이 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 1.5시간 경과 후에는 첫 번째 반사신호의 극성이 초기 도달신호의 극성과 동일함을 명확히 알 수 있지만, 27시간 경과 후에는 (이 때의 탄성계수, $E_m=14.5$ GPa), 첫 번째 반사신호의 극성이 초기 도달신호의 극성과 반대가 됨을 알 수 있다. 따라서, 주면과 접촉상태가 불량한 연약선단 조건에서의 신호는 자유단 조건에서의 신호와 유사하며, 탄성과 전파기법에 의해 연약선단이 탐지 가능함을 암시한다. 하지만, 주면과 접촉상태가 양호한 연약선단 조건에서의 신호는 고정단 조건에서의 신호와 유사하므로 탄성과 전파기법에 의해 연약선단 탐지가 어려울 것으로 판단된다.

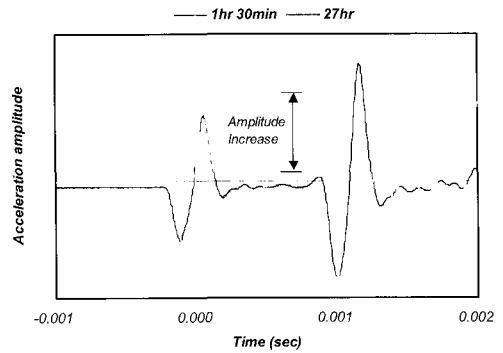


Fig. 5 Acceleration waveform for soft bottom with good or poor side contact condition: good side contact condition (1.5 hrs), poor side contact condition (27 hrs)

반사신호에 대한 주면 접촉조건의 효과를 정량적으로 살펴보기 위하여, 각각의 양생시간별로 가속도 신호를 Fig. 6 및 Table 2에 제시하였다. 모형말뚝에 대한 주위 시멘트 모르타르 탄성계수 비가 증가함에 따라 불량한 접촉조건에서 양호한 접촉조건으로 변화함을 알 수 있었으며, 이 때 자유단 조건이 고정단 조건으로 변화함을 확인할 수 있었다.

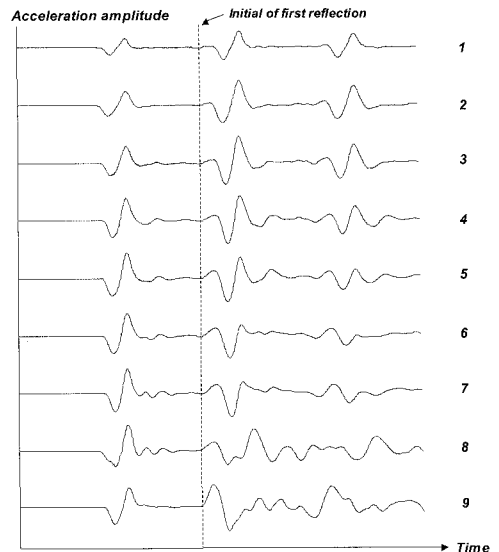


Fig. 6 Change of acceleration waveforms according to the elapsed time

Table 2 Change of acceleration waveforms according to the elapsed time

Curve No.	Elapsed time (hr)	Young's modulus of cement-mortar, E_m (GPa)	Young's modulus of cement-mortar, E_c (GPa)	E_m / E_c (%)
1	1.0	N.A.*	28.8	-
2	1.5	N.A.		-
3	2.0	N.A.		-
4	2.5	N.A.		-
5	3.0	0.03		0.1
6	3.5	0.5		1.6
7	4.0	0.9		3.2
8	7.0	3.5		12.0
9	27.0	14.5		50.2

* N.A.: Measuring was not available by FFRC test because the impact surface was very weak.

3. 현장실험

3.1. 개요

실내 모형실험으로부터 얻은 결과를 토대로 말뚝 기초의 선단조건을 평가하기 위한 충격반향기법의 현장 적용성을 검토하기 위해 현장실험을 수행하였다. 현장은 평택 시 근처에 위치해 있으며, 선단 조건이 자유단 조건인 말뚝 1개와 암반근입 조건인 말뚝 3개에 대하여 실험을 수행하였다. 말뚝의 직경, 길이 및 선단 조건은 Table 3에 정리되어 있다.

본 현장의 지층은 Fig. 7에서 보는 바와 같이 실트질 모래(SM)(두께 1.8~4.4 m)와 점토층(CL)(깊이 약 7.2 m 까지)으로 구성되어 있으며, 점토층 아래에는 풍화암(weathered rock)이 놓여 있으며, 여기에 말뚝이 근입되어 있다. 이들 말뚝 가운데 2번, 3번 및 4번 말뚝은 암반근입 말뚝이며, 1번 말뚝은 말뚝 선단에 두께 0.3 m의 스티로폼이 설치되어 있어서 자유단 조건을 갖는다[11].

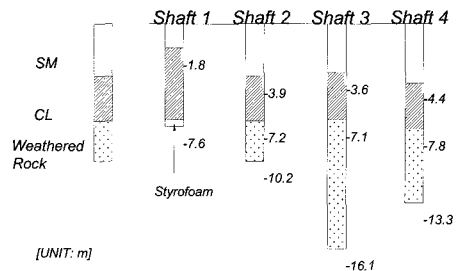


Fig. 7 Soil profile of drilled shafts for different end conditions in Pyungtaek site (not to scale) [11]

현장실험에 필요한 장비로는 (1) 동적신호분석기, (2) 4.5 Hz 속도계(vertical geophone), (3) 충격 해머, (4) low pass filter 등이며, 동적신호분석기의 샘플링 주파수는 12.8~51.2 kHz, 데이터 개수는 1024개로 설정하였다. 속도계는 말뚝 머리를 핸드 그라인더로 부드럽게 갈아낸 다음 말뚝 표면과의 접촉을 좋게 하기 위하여 진공 그리스를 사용하여

Table 3 Shaft length, diameter and end condition for field tests

Shaft No.	Length, L (m)	Diameter, D (m)	L/D	Socketed depth (m)	End condition
1	7.6	0.4	19.0	0.0	Free
2	10.2	0.4	25.5	3.0	Rock-socketed
3	16.1	0.4	40.3	9.0	Rock-socketed
4	13.3	0.4	33.3	6.0	Rock-socketed

말뚝 머리에 부착시켰다. 충격원(impact source)으로는 충격 해머를 사용하였으며, 명확하고 안정적인 신호가 얻어질 때까지 반복 실험을 수행하였다.

말뚝 표면의 감지기에 의한 탄성과 전파방법의 가장 중요한 한계성은 탄성파의 반사파 도달시간 동안에 말뚝 표면을 왕복하는 표면파가 발생한다는 점이다. 이 표면파는 탄성파의 반사 도달신호를 복잡하게 하며, 또한 방해하는 잡음으로 작용한다[6]. 따라서, 반사 도달신호를 왜곡시키는 원하지 않는 주파수 또는 잡음을 제거하기 위하여 low pass filter를 사용하여야 한다. 본 현장실험에서는 cut-off filter frequency를 1 kHz로 설정한 low pass filter를 사용하였다.

3.2. 현장실험 결과 및 토의

3.2.1. 자유단 조건

선단 조건이 자유단 조건인 1번 말뚝에 대한 속도신호는 Fig. 8(a)에 제시되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 첫 번째 반사신호와 초기 도달은 동일한 극성을 보이며, 이것은 실내 모형실험 결과(Fig. 3)와 일치하는 것이다. 첫 번째 반사신호와 초기 도달신호 사이의 시간간격, dt로부터 아래 식 (1)과 같이 말뚝의 탄성과 속도를 측정하였으며, 이 속도는 나머지 말뚝의 선단 조건을 평가하는데 사용하였다.

$$V_{rod} = \frac{2 \times L}{dt} = \frac{2 \times 7.6}{0.003693} = 4115.9 \text{ m/s} \quad (1)$$

3.2.2. 고정단 조건

(1) 2번 말뚝

풍화암에 3m 깊이로 근입된 2번 말뚝의 속도신호가 Fig. 8(b)에 제시되어 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 화살표로 표시된 두 개의 반사신호를 찾아볼 수 있는데, 1번 반사신호는 흙과 풍화암 사이의 경계면에서의 반사신호이며, 2번 반사신호는 말뚝 바닥에서의 반사신호로 추정된다. 1번 반사신호의 진폭이 작은 것은 경계면에서 탄성과 에너지가 소량 반사했기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 말뚝 콘크리트와 주위 암반 사이의 음향학적 임피던스 차이가 상대적으로 작기 때문에 발생하는

것으로서, 말뚝과 주위 암반 사이의 접촉 조건이 보통 수준일 것이라고 사료된다.

이에 반해, 2번 반사신호는 큰 진폭의 뚜렷한 반사신호를 보이고 있으며, 초기 도달신호와 반대의 극성을 보이고 있으므로 고정단 조건임을 알 수 있다. 암반 경계면의 깊이, D는 다음 식 (2)로부터 계산할 수 있으며, 실제 암반 경계면의 깊이 7.2 m와 비교해 볼 때 근사적으로 일치하는 것으로 나타났다(오차율 % = 6).

$$D = \frac{V_p \times dt}{2} = \frac{4115.9 \times 0.003325}{2} = 6.8 \text{ m} \quad (2)$$

말뚝 길이, L은 다음 식 (3)에 의해서 계산할 수 있으며, 이 값은 실제 말뚝 길이인 10.2 m와 거의 일치하는 것으로 나타났다(오차율 % = 2).

$$L = \frac{V_p \times dt}{2} = \frac{4115.9 \times 0.004855}{2} = 10.0 \text{ m} \quad (3)$$

(2) 3번 말뚝

3번 말뚝의 속도신호는 Fig. 8(c)에 제시되어 있으며, 3개의 반사신호가 화살표로 표시되어 있다. 주위 지반과 풍화암의 장성은 그다지 크지 않아 반사신호를 획득할 수 있었다. 1번 반사신호는 말뚝 내부의 얇은 깊이에서의 결함으로부터 반사된 신호로 보여지는데, 그 이유는 압축파가 인장파로 반사하는 자유단의 조건을 갖기 때문이다. 2번 반사신호는 흙과 주위 풍화암 사이 경계면에서의 반사신호로 추정된다. 암반 경계면까지의 깊이는 5.4 m로 계산되는데 이 값은 실제 깊이인 7.1 m와 비교할 때 작은 것으로 나타났다(오차율 % = 31). 이렇게 오차가 크게 나타나는 이유는 말뚝과 주위 지반 사이의 접촉상태가 말뚝 위 부분에서 주로 일어났거나, 또는 얇은 깊이에서의 결함 반사신호 때문에 신호가 왜곡되었기 때문인 것으로 추정된다. 0.00723 sec에서 발생한 3번 반사신호는 말뚝 바닥으로부터의 반사신호이다. 이 값으로부터 추정된 말뚝길이는 14.9 m로서 실제 말뚝 길이인 16.1 m 보다는 작은 값을 보이고 있다(오차율 % = 8). 3번 말뚝의 경우 말뚝 주변과 말뚝 바닥에서 탄성파의 반사신호가 있었으며, 이들 신호로부터 말뚝과 주위 지반 사이의 접촉 조건을 추정해 볼 때 보통 상태일 것으로 추정된다.

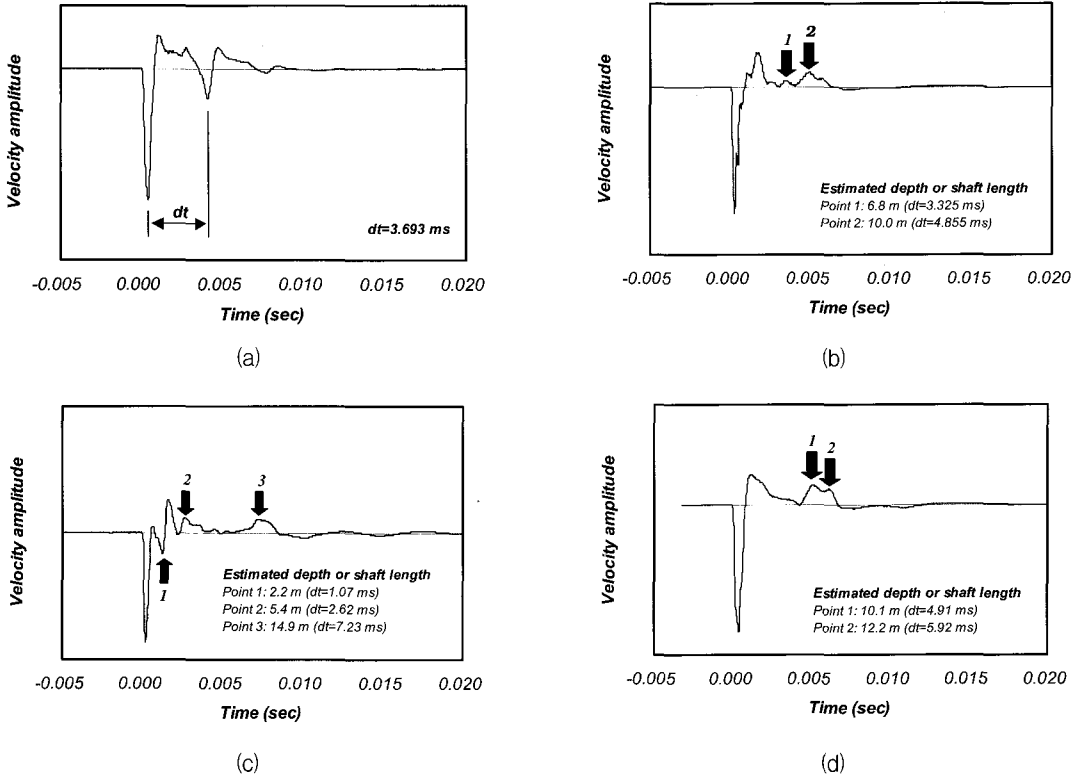


Fig. 8 Velocity waveforms: (a) Shaft 1 (free end condition), (b) Shaft 2 (rock-socketed condition), (c) Shaft 3 (rock-socketed condition), and (d) Shaft 4 (rock-socketed condition) (Note: cut-off filter frequency of 1.0 kHz)

(3) 4번 말뚝

4번 말뚝에 대한 속도신호는 Fig. 8(d)에 제시되어 있으며, 두 개의 반사신호(화살표 표시)를 획득하였다. 1번 반사신호는 비교적 큰 진폭을 가진 뚜렷한 반사신호로서 흙과 주위 풍화암 사이 경계면에서의 반사신호인 것으로 파악된다. 경계면의 깊이는 10.1 m로 계산되며, 이 값은 실제 값 7.8 m보다 큰 것으로 나타났다(오차율 % = 29). 2번 반사신호는 말뚝 바닥에서의 반사신호로 생각되며, 이로부터 추정된 말뚝 길이는 12.2 m로서 실제 말뚝 길이 13.3 m와 근사적으로 일치하는 것으로 나타났다(오차율 % = 8). 특히, 2번 반사신호의 진폭은 작으며, 또한 1번 반사신호에 의하여 둘러싸인 것을 볼 수 있는데, 이는 대부분의 에너지가 말뚝 주변 접착부에서 반사되었고 말뚝과 주위 지반 사이의 접착상태가 말뚝 하부에서 매우 양호하기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구로부터 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 충격반향기법은 말뚝의 선단조건을 규명하는데 좋은 정보를 제공해 주는 것으로 나타났다. 즉, 자유단 조건은 속도신호에 있어서 극성이 고정된 조건과 서로 반대이며, 이로부터 이들 두 개의 조건을 서로 뚜렷이 구별할 수 있었다.
- (2) 암반근입 조건은 흙과 암반 사이의 경계면에서의 신호로부터 확인할 수 있었으며, 암반근입 깊이를 정확히 산정할 수 있었다. 또한 시간영역의 속도신호 진폭의 크기로부터 말뚝과 주위 암반과의 부착상태(양호 또는 불량)를 추정할 수 있었다.
- (3) 연약선단 조건은 말뚝과 주위 암반과의 부착상태가 불량한 경우에만 확인이 가능했으며, 이때 신호는 자유단 조건의 신호와 유사하다. 하지만,

말뚝과 주위 암반과의 부착상태가 양호한 경우에는 신호가 고정단 조건의 신호와 유사하게 나타나므로 연약선단 조건을 확인할 수 없는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 선정한 스마트 사회기반 시설연구센터 (생산기반 분야/ERC)의 연구비 지원으로 수행된 것으로서 이에 감사 드립니다. 또한 현장타설 말뚝 부지에서 실험을 할 수 있도록 많은 협조를 해 주신 한국도로공사 관계자 여러분께 깊은 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] 건설교통부, 구조물 기초 설계기준, pp. 216-220, (1997)
- [2] 건설교통부, 도로교 표준시방서 설계편, pp. 600-620, (1996)
- [3] 한국지반공학회, 지반공학 시리즈 4, 깊은기초, 구미서관, pp. 284-286, (1997)
- [4] Report of a Task Force Sponsored by the G-I Deep Foundations Committee, "Nondestructive Evaluation of Drilled Shafts," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 92-95, (2000)
- [5] J. Steinbach and E. Vey, "Caisson Evaluation by Stress Wave Propagation Method," Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 101, No. 4, pp. 361-378, (1975)
- [6] T. M. Hearne, K. H. Stokoe, II and L. C. Reese, "Drilled-Shaft Integrity by Wave Propagation Method," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 107, No. 10, pp. 1327-1344, (1981)
- [7] Y. Lin, M. Sansalone, and N. J. Carino, "Impact-Echo Response of Concrete Shaft," Geotechnical Testing Journal, Vol. 14, No. 2, pp. 121-137, (1991)
- [8] S. Liao, Nondestructive Testing of Piles, Ph. D Dissertation, The University of Texas at Austin, (1994)
- [9] M. Sansalone and W. B. Streett, Impact-Echo Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y, (1997)
- [10] D. S. Kim and G. C. Kweon, "Calibration of Testing Equipment for Reliable Small-Strain Deformation Measurements Using Synthetic Specimens," Geotechnical Testing Journal, Vol. 23, No. 4, pp. 454-463, (2000)
- [11] 전경수, 풍화암에 근입된 현장타설 말뚝의 연직 및 횡방향 지지거동 분석, 서울대학교 박사학위 논문, pp. 47-61, (2000)