

현장시험에 의한 충격반향기법의 말뚝 건전도 검사 적용성 평가

Verifications of the Impact-echo Technique for Integrity Evaluations of the Drilled Shaft using Full Scale Tests

정경자¹⁾, Gyungja Jung, 조성민²⁾, Sung-Min Cho, 김홍중³⁾, Hong-Jong Kim, 정종홍³⁾, Jonghong Jung

- 1) 한국도로공사 도로교통기술원 연구원, Researcher, HTTI, Korea Highway Corporation
- 2) 한국도로공사 제2연륙교건설사업소 수석연구원, Research Director, Korea Highway Corporation
- 3) 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원, Chief Researcher, HTTI, Korea Highway Corporation

SYNOPSIS : Impact-echo test, a kind of simple and economical method to evaluate the integrity of drilled piles has some limitations to use because the stress wave can be generated only on the head of a pile and the wave propagation in the pile with surrounding soils are very complicated. Numerical analyses and model tests in the laboratory have shown that both the ratio of length to diameter of a pile and the stiffness ratio of pile to soil have influence on the resolution of testing results. Full scale testing piles which have artificial defects were used to verify the capability of impact-echo technique as a tool for the pile integrity evaluation. Behaviour of the reflected signal of stress wave was investigated according to the type of defects. Elastic modulus of the pile was calculated using the wave velocity in the pile and the unconfined strength of concrete specimen. Influences of the stiffness difference between the pile and the ground on the characteristics of a wave signal were also examined.

Key words : Impact-echo Test, Integrity, Defects, Elastic-modulus, Stiffness Ratio

1. 서 론

1.1 충격반향기법의 개요

충격반향(impact-echo, IE) 기법에 의한 현장타설말뚝의 건전도(integrity) 시험은 말뚝 머리에서 발생하여 콘크리트 내부로 전파되는 응력파가 다른 성질의 매질을 만날 때 일부가 반사되어 머리부로 되돌아오는 원리를 이용한 것이다. 밀도, 단면적, 탄성계수가 각각 ρ_1, A_1, E_1 인 매질에서 ρ_2, A_2, E_2 인 매질로 진행되는 응력파 에너지의 일부는 반사(reflection)되어 원래의 매질 쪽으로 돌아가고 나머지는 다른 매질 쪽으로 투과(transmission)한다. 이 때 말뚝 머리에서 시간에 따라 응력파의 속도 변화를 측정하게 되면 그림 1과 같이 매질의 변화를 알 수 있게 된다. 이러한 응력파의 반사 및 투과 특성은 두 매질의 임피던스(impedance) 차이에 주로 영향을 받게 되는데, 매질의 경계면에서 발생하는 입사파와 반사파, 투과파에 대한 속도와 힘의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_1(\sigma_i + \sigma_r) = A_2 \sigma_t \quad V_i + V_r = V_t \quad (1)$$

$$u_i = f_1(x - v_1 t), \quad u_r = g_2(x + v_1 t), \quad u_t = f_2(x - v_2 t) \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 σ_i , σ_r , σ_t 는 각각 입사파, 반사파, 투과파의 응력이며, V_i , V_r , V_t 는 각 파의 속도, u_i , u_r , u_t 는 각 파에 의한 변위를 나타낸다. 투과파와 반사파의 응력을 입사파의 함수로 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\sigma_t = \frac{2A_1\rho_2V_2}{A_1\rho_1V_1 + A_2\rho_2V_2}\sigma_i, \quad \sigma_r = \frac{A_2\rho_2V_2 - A_1\rho_1V_1}{A_1\rho_1V_1 + A_2\rho_2V_2}\sigma_i \quad (3)$$

임피던스, Z 는 식 (4)와 같이 특정 위치의 힘을 탄성과 속도로 나눈 값으로 나타낼 수 있으며, 이는 다시 단면적과 밀도, 탄성계수의 항으로 표시된다.

$$Z = \frac{F}{V} = A \sqrt{\rho E} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 식 (5)와 같이 투과파와 반사파의 응력을 입사파 응력 σ_i 과 두 매질의 임피던스 Z_1 , Z_2 로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_t = \frac{2(Z_2/Z_1)(A_1/A_2)}{1 + (Z_2/Z_1)}\sigma_i, \quad \sigma_r = \frac{(Z_2/Z_1) - 1}{1 + (Z_2/Z_1)}\sigma_i \quad (5)$$

식 (5)에서, Z_2 가 Z_1 보다 작으면 반사파는 음(-)의 값을 갖는 인장파로 나타나며, 그 반대의 경우에는 양(+)의 값을 가지는 압축파로 나타남을 알 수 있다.

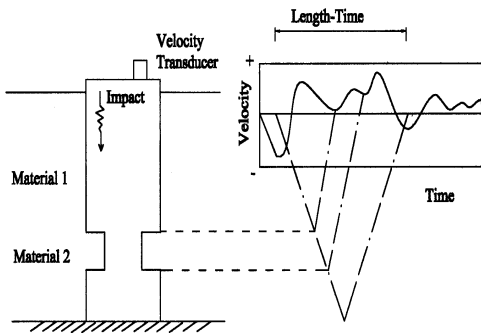


그림 1. 임피던스 차이에 의한 탄성과 속도 변화(말뚝머리 측정)

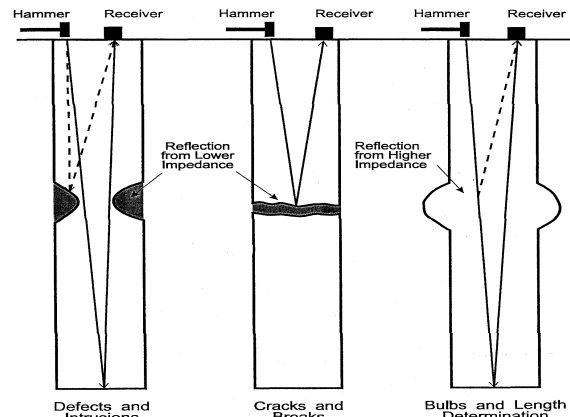


그림 2. 현장타설말뚝에 존재 가능한 반사원

그림 2는 결함을 가진 현장타설말뚝에서 존재할 수 있는 반사원을 보여주고 있는데, 이러한 말뚝 내부의 반사원 외에도 말뚝과 근입 지반의 경계면, 다층지반에서 강성 차이가 큰 말뚝 주변 지반의 지층 경계면도 반사원이 될 수 있으므로, 말뚝 머리에서 측정하는 실제의 탄성과 속도 프로파일은 매우 복잡한 양상을 보이게 된다.

한편, 말뚝 머리에서 생성한 응력파는 그 파장이 말뚝의 직경보다 크기 때문에 주파수에 따라 파의 전달속도가 달라지는 분산현상이 일어나지 않는다고 보고, 파는 말뚝의 길이방향을 따라 1차원적으로 진행한다고 가정한다. 그러나 응력파의 파장이 말뚝의 직경보다 작을 경우에는 이러한 가정이 유효하지 않게 되며, 파는 분산되어 그 전달 속도는 주파수에 따라 달라지게 된다. 콘크리트 내에서 응력파의 전달 속도를 4,000 m/s라고 보면, 1 m 직경의 말뚝에 대해서는 주파수가 4 kHz보다 낮을 경우에만 상기 가정이 유효하며, 또한 말뚝의 직경이 2 m일 때에는 파의 주파수가 2 kHz보다 저주파이어야 한다. 그리고, 응

력과 속도는 콘크리트의 강도에 비례하므로 강도가 작은 구간에서는 속도가 감소하게 되나, 이를 고려하는 것은 현실적으로 매우 어려우므로, 일반적인 해석시에는 말뚝 전체 길이에 대하여 응력파의 전달속도가 일정하다고 가정한다.

1.2 말뚝 건전도 검사 적용에 대한 기존의 연구

충격반향시험은 비파괴적인 방법이며, 간편하고 경제적이므로 말뚝의 건전도 검사 외에도 각종 구조물의 안전진단 분야에도 활용될 수 있다. 최근에도 터널의 라이닝 두께, 배면 공동 감지 등에 적용하기 위한 연구(안제훈 외, 2004)와 구조물의 안전진단을 위하여 반사 신호의 해상도를 향상시키기 위한 연구(조미라, 2002) 등이 이루어졌다.

그러나 교량, 터널 등과는 달리 지중에 매입된 말뚝 구조물의 경우는 그 길이와 상관없이 지표에 노출된 지점에서만 응력과 에너지를 발생시킬 수 있으며, 또한 말뚝 재질 특성은 물론 주변 지반조건이 응력과 전달 과정에 큰 영향을 미친다는 점에서 건전도 검사에 대한 적용에는 다소의 어려움이 있다. 따라서, 이 기법을 말뚝의 건전도 평가에 효과적으로 적용하기 위해서는 말뚝의 길이와 주변 지반조건 등에 따라 말뚝 선단으로부터 반사된 신호를 감지하고 그 특성을 분석하는 과정들이 필요하게 된다. Stain(1982)이 말뚝 주변 지반이 단단한 경우에 응력과 에너지의 대부분이 주변 지반으로 소산되어 말뚝 선단으로부터 반사되는 응력파가 너무 약해 감지하기 어렵다고 지적한 이후로 많은 연구자들이 말뚝과 주변지반의 강성, 또는 전단파 속도 차이의 영향 등을 검토하였다. Liao와 Roesset(1997)은 수치해석을 통해 말뚝 직경에 대한 길이비(L/D)가 30 이하이고 말뚝과 지반의 탄성계수 비($=E_c/E_s$)로 나타낸 강성비가 50 이상인 조건에서 말뚝 선단의 반사 신호를 감지할 수 있다고 하였고, 김형우(2003)는 E_c/E_s 가 77보다 작거나, 또는 말뚝 내부의 전단파 속도(V_{sc})에 대한 지반의 전단파 속도(V_{ss})의 비가 0.1 이하이고, V_{ss} 가 300 m/s 보다 클 경우는 말뚝 선단으로부터 반사되는 응력과 신호를 식별하기 어렵다고 하였다. 이 외에도 플라스틱 원형 봉을 이용한 모형실험과 수치해석을 통하여 단면축소가 전단면 대비 50% 이상일 경우에 결함의 감지가 가능하며, 또한 주파수 영역보다는 시간영역 해석을 통해 보다 작은 결함을 감지할 수 있다는 연구결과도 있다(김동수 외, 2000).

Finno 등(1998)은 타격시의 힘을 측정할 수 있는 해머를 이용하는 충격응답(impact-response) 시험에서 말뚝의 운동성에 따른 길이비(L/D)별 해상도와 V_{ss}/V_{sc} 값의 상관관계를 제안하였으며, 국내에서는 수치해석을 통하여 L/D 값에 따른 기존의 제한 조건과 말뚝 직경에 따른 체적 증가가 해상도를 감소시킨다는 보고가 있다(이원구 외, 1999). 암반에 근입된 말뚝에서 암반의 강성 및 암반 내 근입 깊이에 따른 말뚝의 선단 조건별로 응력파의 반사 신호가 달라지며, 이는 말뚝의 공진주파수 변화에 기인한다는 연구결과도 있다(김동수 외, 2004; 이병식 외, 2001).

1.3 연구의 목적

기존 연구 결과는 대부분 수치해석과 모형말뚝을 이용한 실내시험에 근거하고 있으며, 실제 규모 말뚝을 대상으로 한 연구 성과는 많지 않다. 실규모 현장시험은 연구 단계에서 매우 중요한 역할을 하게 되나, 소요되는 비용이 막대할 뿐 아니라, 현장에서는 응력과 전달 과정에 매우 다양한 변수와 불확실성이 존재하여 감지된 반사 신호에 대한 정확한 해석이 쉽지 않기 때문이다.

이 연구에서는 우리나라의 시공 여건상 가장 빈번하게 발생하는 대표적인 결함을 인위적으로 모사한 실규모의 현장타설 콘크리트말뚝을 설치한 후 충격반향시험을 실시하고, 말뚝의 결함 유무와 그 유형에 따라 응력과 전달 특성의 차이를 규명하고자 하였다. 이와 더불어 별도의 지반조사와 현장시험을 통해 말뚝 주변 지반에 대한 말뚝의 강성비를 산정하여, 지반의 강성이 시험 결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 기존 연구 결과들과도 비교하였다. 또한, 채취한 시료를 통해 구한 말뚝의 일축압축강도로 산출한

탄성계수와 말뚝 내부의 응력과 전달 속도로 구한 탄성계수의 상관성을 분석하여 현장 말뚝에 대한 충격 반향시험 수행 및 분석시 초기 응력과 전달속도 결정에 활용할 수 있도록 하였다.

2. 시험말뚝 제작 및 시험

시험용 실규모 현장타설 콘크리트말뚝은 직경 1 m, 길이 14 m인 1본과 직경 1 m, 길이 13.5 m인 4 본으로 구성되어 있으며, 베노토(Benoto)공법으로 한국도로공사 도로교통기술원 야외시험장에 설치하였다(그림 3). 그림 10에서 알 수 있듯이 말뚝 설치 지반은 지표면부터 깊이 약 10 m까지는 매립토층이며, 각 말뚝은 풍화암층 이상의 암반에 3 m 이상 근입되었다.

시험 말뚝에는 현장에서 가장 발생하기 쉬운 재료분리, 선단불량, 단면축소를 모사한 인위적 결함을 포함시켰다. 재료분리 결함은 실제 현장 조건과 동일하게 수중 콘크리트 타설 중 트레미관을 들어올리는 방법으로 형성하였으며, 선단불량 결함은 암반 굴착 후 선단청소를 하지 않은 상태에서 진흙을 투척하여 만들었다. 단면축소 결함은 토사를 담은 자루를 말뚝의 주철근 케이지에 고정시키는 방법을 사용하였는데, 올케이싱 공법의 경우 토사층의 공벽 유지를 위해 암반층 상단부까지만 케이싱을 삽입하는 것이 일반적임을 감안하여 결함의 위치를 토사층과 암반층의 경계부로 하였다. 지반의 공학적 특성을 평가하기 위하여 시추조사, 표준관입시험, 공내채하시험, 콘관입시험 등을 실시하였다.

충격반향시험은 해머와 수진기 및 데이터로거 본체로 구성된 사용 장비를 이용하였다. 그림 4는 시험을 위하여 말뚝 머리를 해머로 타격하는 모습이다. IE 기법 외에도 시공 중 유발된 결함을 감지하고, 심화 연구에 활용하기 위하여 말뚝의 전길이에 걸쳐 시험관을 설치하고 공대공 초음파 검층(crosshole sonic logging, CSL)을 실시하고 결과를 분석, 활용하였다(조성민 외, 2003).



그림 3. 현장타설말뚝 시공 장면 : 베노토 공법



그림 4. 충격반향기법 건전도 검사 모습

3. 충격반향시험 결과 및 분석

3.1 결함별 시험 결과

5본의 시험용 암반근입말뚝에 대하여 각 3회씩 충격반향기법의 건전도 검사를 실시하고 얻은 파형 기록을 그림 5, 6, 8, 9, 10에 나타내었다. 각 말뚝에 대한 다수의 반복시험을 통해서 하여 IE 기법의 재현성을 평가할 수도 있다.

분석시, 콘크리트 말뚝 내부를 통과하는 응력파의 속도는 3,800 m/s로 가정하였다.

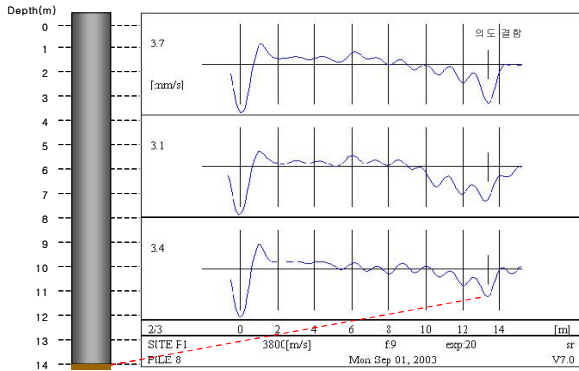


그림 5. P1-선단불량 결함 말뚝의 시험결과

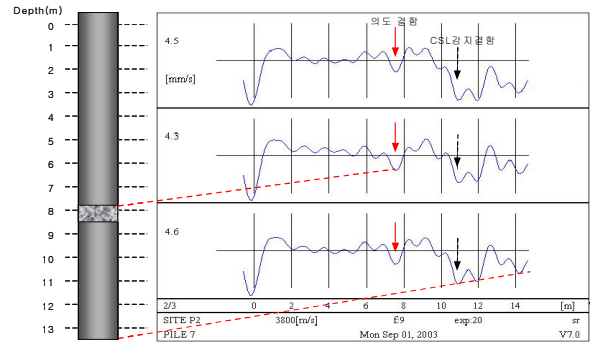


그림 6. P2-재료분리 결함 말뚝의 시험결과

그림 5는 선단불량을 인위적으로 구현한 말뚝 P1의 결과로서, 말뚝 길이가 13.3 m인 지점에서 인장파로 반사되는 파를 확인할 수 있다. 재료분리 결함을 가진 말뚝 P2의 조사 결과인 그림 6에서는 길이 7.5 m 지점의 의도결함을 확인하였으며, 예상과 달리 길이 10.9 m 지점에서도 이상신호가 관찰되었다. IE기법과 병행한 공대공초음파검층(CSL)에서 이 위치의 결함은 시공 과정에서 발생한 것으로 확인되었다. 그림 7은 CSL로 구한 P2 말뚝의 초음파 프로파일로서, 오른쪽의 두 실선 그래프는 각각 초음파의 에너지 크기와 도달시간을 나타낸다. 두 지점에서 에너지는 감소하고 도달시간이 길어짐을 알 수 있다.

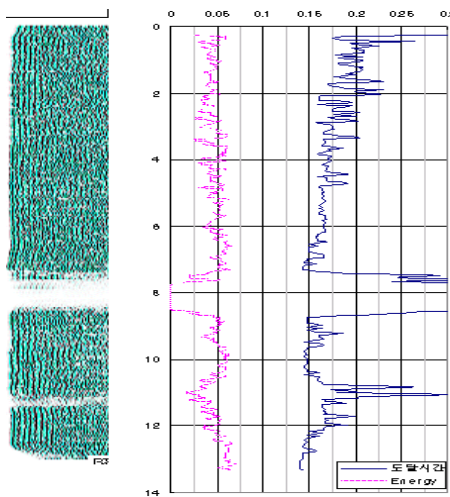


그림 7. CSL 프로파일 기록 : P2

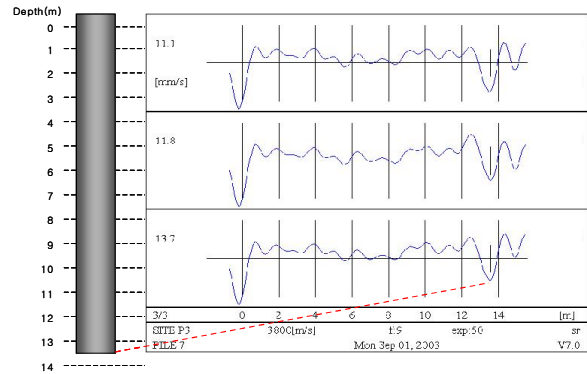


그림 8. P3-무결함 말뚝의 시험결과

그림 8은 결함 없이 시공한 P3 말뚝의 결과로서, 선단의 인장과 반사 신호가 관찰된다.

다음의 그림 9, 10은 단면축소 결함을 지닌 P4(단면축소율 10%), P5(단면축소율 20%) 말뚝으로서, 선단부의 반사 신호가 상대적으로 다소 복잡함을 알 수 있다. 이는 토사 혼입 등으로 말뚝의 콘크리트 단면이 감소하는 결함의 위치가 지층 강성이 급변하는 토사층과 암반층의 경계면 부근에 있으며, 또한 파의 반사가 발생하는 말뚝 선단으로부터 비교적 가깝기 때문이다. 두 말뚝 모두 근입된 암반에서 반사된 압축파 신호가 감지되었으며, 단면 축소 결함에 의한 신호는 이들 압축파 반사신호와 섞여 따로 식별하기가 어렵다. 이러한 결과는 재료분리와 같이 말뚝 단면의 전체에 걸쳐 형성된 결함과 달리, 단면의 일부에만 국한된 결함은 인지하기가 쉽지 않음을 말해주며, 김동수 등(2000)이 실내모형시험을 통해 단면축소율이 50% 이상이 되어야 결함 식별이 가능하다는 보고와도 유사하다.

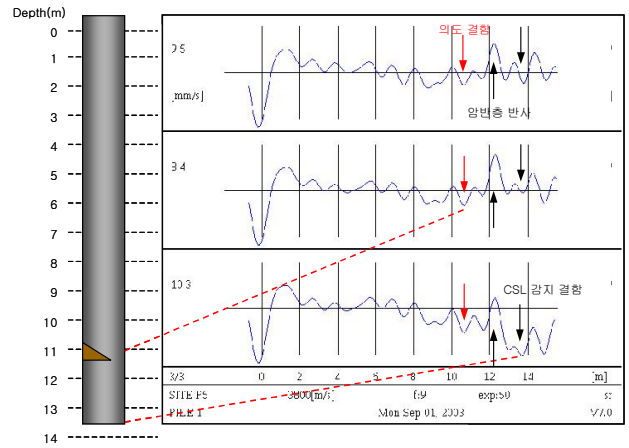
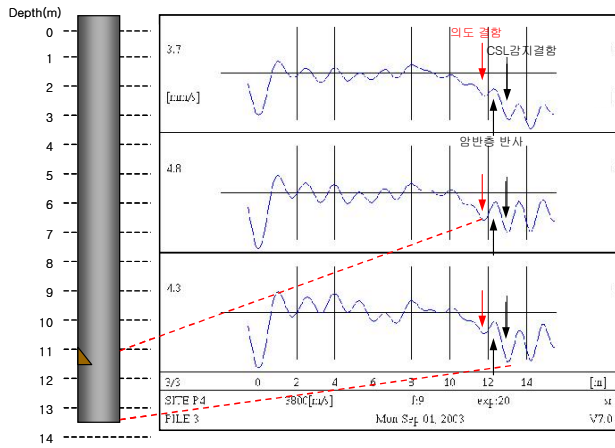


그림 9. P4-단면축소 10% 결함 말뚝의 시험결과 그림 10. P5-단면축소 20% 결함 말뚝의 시험결과

한편, P3 말뚝은 선단부가 연암층에 양호하게 근입되었음에도 불구하고, 말뚝 선단에서 인장파가 반사되었다. 이는 같은 암반층이라 할지라도 강도 및 변형 특성이 다르고, 지반의 강성이 말뚝의 강성에 비하여 작기 때문으로 판단되며, 지반과 말뚝의 강성 차이에 대하여 분석한 다음 절 및 그림 12에서 확인할 수 있다. 따라서, 암반에 근입된 말뚝에서 선단의 인장과 반사 신호만으로 선단 불량이라고 단정하기는 어려우며, 실제로 선단이 불량하게 시공된 P1 말뚝의 결과인 그림 5와 비교할 때, 인장 반사파의 전후 신호 양상에 차이가 있으므로 향후 이에 대한 추가적인 분석이 필요하다.

3.3 말뚝과 지반의 강성에 대한 분석

말뚝이 근입된 암반의 특성이 머리부에서 발진한 응력파의 반사 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 깊이별로 암반층과 말뚝의 탄성계수를 이용하여 강성비의 차이를 분석하였다.

충격반향시험 해석시에는 말뚝 내에서 응력파가 전달되는 속도가 일정하다고 가정한다. 그러나 시공 기록이 있어 말뚝의 길이(L)를 정확히 알 경우에는 선단에서 반사된 신호의 도달시간, t_p 를 이용하여 식 (6)으로 응력파 속도, V_c 를 계산하고, 식 (7)의 관계에 따라 말뚝 재료의 탄성계수(E_c)를 추정할 수 있다.

$$V_c = \frac{2 \times L}{t_p} \quad (6)$$

$$E_c = V_c^2 \times \rho = \left(\frac{2 \times L}{t_p} \right)^2 \times \rho \quad (7)$$

식 (7)은 원래 긴 막대를 압축파가 통과하는 경우의 관계식으로, 무한매질에서는 탄성과 속도가 포와 와송비의 영향을 받는 반면에 횡방향 변위가 가능한 말뚝 기초에서는 그 영향이 없음을 보여준다. 이에 따라 깊은 말뚝 기초를 통과하는 압축파의 속도는 무한매질에서보다 5~15 % 정도 작다. 콘크리트의 밀도(ρ)는 일반적인 값인 2.3 g/cm^3 을 사용하였다.

한편, 말뚝의 탄성계수는 재료인 콘크리트의 일축압축강도를 이용하여 구할 수도 있다. BS 8100에서는 콘크리트의 일축압축강도(q_{cu} , MPa)와 초기 탄성계수 E_i (GPa)의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$E_i = 9.1 \times q_{cu}^{0.33} \quad (8)$$

표 1에서 충격반향시험으로 얻은 말뚝 선단의 반사 신호를 기준으로 산출한 V_c 를 이용하여 구한 말뚝의 탄성계수와 말뚝에서 채취한 시료를 q_{cu} 에 의한 탄성계수를 비교하였으며, 그림 11은 이를 그림으로 나타낸 것이다. 응력과 속도로 구한 탄성계수가 강도로 구한 값보다 12~22% 가량 크게 나타났다.

표 1. 산정방법별 말뚝의 탄성계수 비교

말뚝	t_p (msec)	V_c (m/s)	V_c 로 구한 E_c (GPa)	q_{cu} (MPa)	q_{cu} 로 구한 E_c (GPa)
P1	7.000	4,000	36.8	38.6	30.4
P2	7.105	3,800	33.2	35.4	29.5
P3	7.158	3,772	32.7	28.4	27.4
P4	6.842	3,946	35.8	35.1	29.4
P5	7.105	3,800	33.2	30.8	28.2

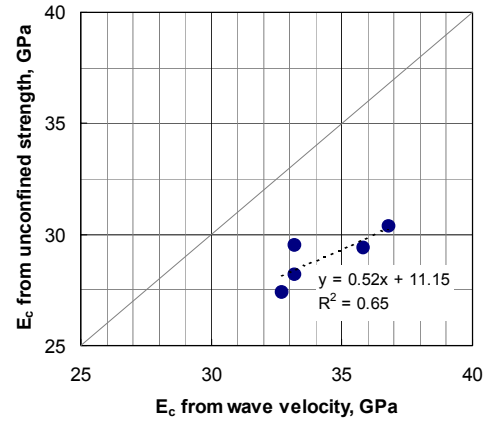


그림 11. 표 1의 말뚝 탄성계수 비교

말뚝이 근입된 풍화암층 이상 지반의 탄성계수, E_s 는 공내재하시험을 통해 구하였다. 공내재하시험을 위하여 지표면에서 말뚝 사이에 5 m 간격으로 6공의 시추를 실시했다(그림 12). 시험을 통해 말뚝의 선단은 연암층 이상의 지반에 근입되었으며, 선단부 주변은 풍화암층 이상의 암반에 3 m 이상 근입되어 있음을 확인하였다. 시험 결과, 시추 주상도에서는 동일하게 연암층으로 분류되었으나, 13 m 깊이를 기준으로 공내재하시험에 의해 산정한 E_s 는 78~612 MPa로 큰 차이를 보였다.

이렇게 구한 암반층 지반의 탄성계수(E_s)와 표 1에서 응력과 속도로 계산한 말뚝의 탄성계수(E_c)의 비(E_c/E_s)를 두 매질의 강성비 K_E 로 정의하였다. 그림 12는 말뚝과 시추공 위치, 그리고 깊이별 말뚝-지반 강성비 K_E 를 정리하여 도시한 것이다.

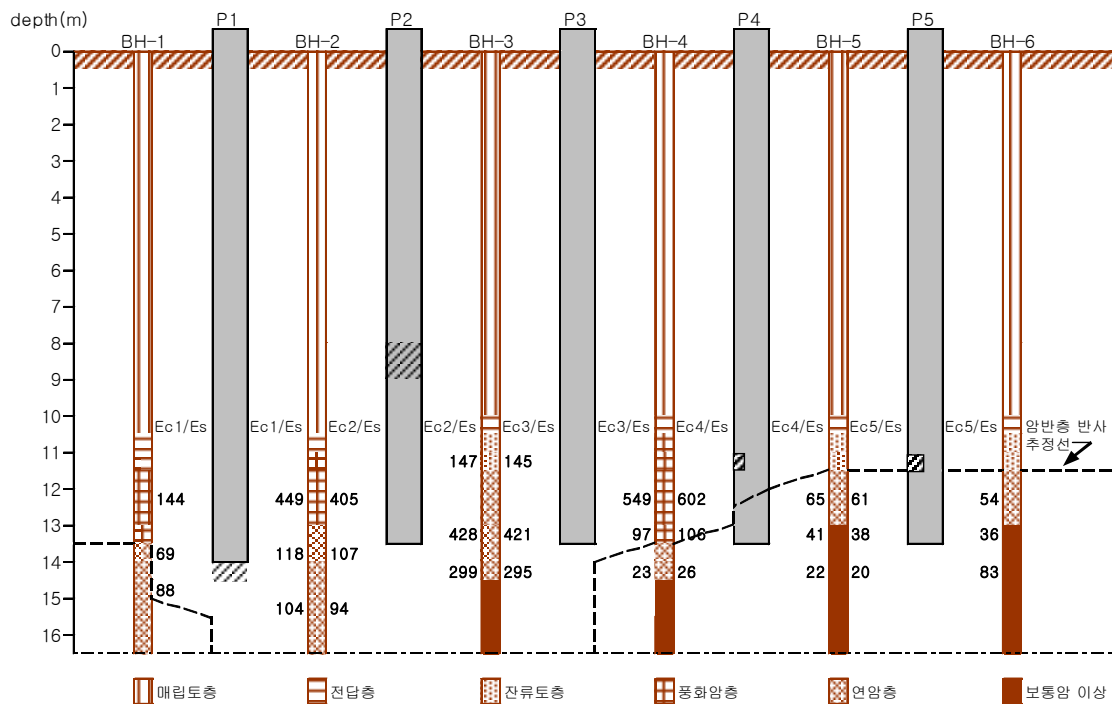


그림 12. 시험말뚝 주변 지반과 말뚝의 강성비

그림 12에서 선단의 압축과 반사신호가 감지된 P4, P5 말뚝 주변의 K_E 가 가장 작게 나타났다. 이는 콘크리트 말뚝과 선단 암반층의 강성 차이가 상대적으로 적다는 것을 의미한다. 반사된 인장과 신호로 말뚝 선단을 용이하게 확인한 P1, P3의 경우는 말뚝 선단부의 K_E 가 100 이상의 값을 보였다.

4. 결론

인위적인 결함을 포함한 실규모 현장타설콘크리트 말뚝을 대상으로 충격반향기법에 의한 건전도 검사를 실시하고 결함의 종류별로 그 결과를 분석하였다. 말뚝 설치 도중 콘크리트 재료분리 등으로 말뚝의 전단면에 걸쳐 발생한 결함은 경계면의 응력과 반사 신호가 매우 뚜렷하여 감지가 용이하였으나, 토사혼입 등으로 유발되는 단면의 부분적인 축소는 반사 신호 분석만으로는 확인하기가 쉽지 않았다. 말뚝 선단부는 비교적 쉽게 인지되었으나, 선단 불량 여부는 반사 신호에 대한 분석 외에도 근입 암반과 말뚝의 강성 차이에 대한 평가를 병행하여 판정할 필요가 있다. 응력과 전달속도와 콘크리트 시료의 압축강도를 이용하여 말뚝의 탄성계수를 각각 구하여 비교하였으며, 공내재하시험으로 구한 지반의 탄성계수에 대한 비로서, 말뚝-지반의 강성비를 산정하고, 응력과 신호 거동과 대비하였다. 이번 현장시험에서는 연암층 등 시추주상도로 분류한 특정 암반 지층의 경계가 아닌, 암반에 대한 말뚝의 강성비 K_E 가 대략 70 이하인 경계면에서 반사된 신호가 주로 감지되었으며, 이는 암반에 충분히 근입된 말뚝의 경우에도 선단 지반의 탄성계수가 작다면 인장과 반사신호가 도달할 수 있음을 말해준다.

참고문헌

1. 김동수, 김형우(2000), “모형말뚝을 이용한 충격반향기법의 영향 요소 연구”, 한국지반공학회지, Vol. 16, No. 3, p.131~144.
2. 김형우(2003), “응력과 전파 방법에 의한 현장타설 말뚝기초의 건전성 평가”, 한국과학기술원, 박사학위논문, pp.113~151.
3. 안제훈, 서백수(2004), “충격반향기법의 주파수영역 해석을 이용한 구조물 안전진단에 관한 연구”, 한국암반공학회지, Vol.14, No.1, p.35~42.
4. 이병식, 이원구(2001), “현장타설말뚝의 비검측공 건전도시험법에 관한 해석적 고찰(II)”, 한국지반공학회지, Vol.17, No.5, pp.107~114.
5. 이원구, 이병식(1999), “현장타설 콘크리트 말뚝의 건전도 평가를 위한 충격반향기법의 해상도 평가”, 대한토목학회 1999년도 학술발표회 논문집, p.275~278.
6. 조미라(2002), “충격반향기법의 신뢰성 향상을 위한 탄성과 파동 전파 특성의 연구”, 콘크리트학회 논문집, Vol.14, No.2, p.266~274.
7. 조성민, 김홍중, 정경자, 정중홍, 안태송, 전경수(2003), “현장타설 콘크리트 말뚝의 건전도 시험방법”, 한국도로공사 도로교통기술원, GE-03-06, 경기도, pp.131~209.
8. Finno, R. J. and Gassman, S. L.(1998), "Impulse Response Evaluation of Drilled Shafts" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental, Vol.124, No.10, p.965~975.
9. Kim, D. S., and Kim, H. W.(2004), "Evaluation of the Base Condition of Drilled Shafts by the Impact-Echo Method", Geotechnical Testing Journal, Vol.27, No.5, p.1~8.
10. Liao, S. T. and Roesset, J. M.(1997), "Dynamic Response of Intact Piles to Impulse Loads", International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 21, p.255~275.
11. Stain R. T.(1982), "Integrity Testing", Civil Engineering, London, April, pp.53~59.