

# 시추공간 음파검층법을 이용한 심층혼합 개량지반의 건전도 조사<sup>+</sup>

김진후 · 조성경  
동아대학교 토목 · 해양공학부

## Integrity Test of DCM Treated Soils with a Cross-hole Sonic Logging

JIN-HOO KIM AND SUNG-KYUNG CHO

School of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea

**KEY WORDS:** Cross-hole sonic logging(CSL) 시추공간 음파 검층, Integrity test 건전도 조사, Non-destructive test 비파괴 시험, Elastic modulus 탄성계수, Compressive strength 압축강도, Deep cement mixing 심층 시멘트 혼합처리

**ABSTRACT:** Soundness evaluation of a structure being constructed under the sea is usually difficult. In this study, a cross-hole sonic logging(CSL) which have been used for non-destructive test of concrete piles is adopted for the integrity test and monitoring of DCM(deep cement mixing) treated soils. Chemical and physical characteristics of raw ground materials are analysed to delineate ground environmental effects on the strength of DCM treated soils. In order to convert cross-hole sonic logging data into compressive strength, correlations between compressive strengths and wave velocities of core samples have been obtained. It is found that there is little effect of ground environment on the strength of the DCM treated soils, and the density distribution of core samples and cross-hole logging data show that a defective zone may exist in the DCM treated soils. With the time lapse, however, the defective zone has been cured and consequently, compressive strength of the DCM treated soils increases and satisfies the design parameter. From this study it can be concluded that the cross-hole sonic logging can be used for the integrity test as well as monitoring the curing stage of the structures, successfully.

### 1. 서 론

최근 우리나라에서도 해양개발과 함께 영종도 국제공항 건설, 해안 국가공단 건설, 가덕도 신항만 건설, 광안대교 건설 등 많은 해양구조물들이 새로 건설되고 있으며, 항만, 방파제 등 기존의 해양구조물들이 노후화 됨에 따라 이들 구조물에 대한 품질관리 및 안전진단에 대한 관심이 높아가고 있을 뿐만 아니라 새로운 과제로 부상하고 있다. 대형 교량 붕괴사고와 관련하여 교각 기초구조물의 결함여부가 거론된 바 있고, 앞으로 서·남해안 개발 등과 관련하여 열악한 지반조건에서 대형 및 중요 구조물의 축조가 증대할 것임을 미루어 볼 때 해양기초구조물의 품질관리측면에서 결함조사 및 손상평가의 필요성은 한층 더 높아질 것이다. 특히 해안에 건설되어 있는 부두, 방파제, 교량 등은 지진, 파도, 조류, 해일이나 선박의 충돌 등에 의해 대규모의 외력을 끊임없이 받고 있어 육상의 구조물에 비해 노후화의 속도가 빠르며, 이에 따른 교통 두절 등 2차 피해도 예상되기 때문에 해양구조물의 효율적 관리를 위한 과학적이고 체계적인 안전진단기술을 구축하는 것이 시급한 실정이다. 그러나, 우리는 늘어나는 해양구조물을 유지 관리함에 있어서 해양구조물의 형식별 부위별 안전점검 및 진단 기술에 대한 체계적인 기준과 평가체계가 미비하여 해양구조

물의 노후화 진행상황을 사전에 정확히 예측할 수 있는 결함 조사법과 관련한 세부 기술사항에 대한 이해가 크게 부족한 것은 물론, 그 필요성에 대한 인식조차 미흡한 실정이라 하겠다. 또한 지금까지 국내·외에서 개발된 토건 구조물에 대한 결함조사 방법은 대부분 대기 중에서 수행하는 방법으로 수중에 있는 기초구조물의 손상평가나 건전도 조사에 직접 활용하기에는 많은 제한이 따른다.

수중 구조물에 대한 건전도 조사 또는 비파괴 결함조사를 수행하기 위해서는 탄성과 또는 초음파가 사용되고 있다. 지금까지 발표된 연구들은 대부분 콘크리트 구조물 또는 부재에 대한 결함 조사법이거나, 수치모델링, 또는 모형실험 등이다. 국내 연구로서 우(1995)는 응력파를 이용한 현장 타설식 콘크리트 말뚝기초의 비파괴 시험법을, 김 등(1997)은 충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사법을, 김 등(1995)과 김 등(1998)은 탄성파를 이용한 국내·외의 콘크리트 비파괴시험 현황을 상세히 소개하였으며, 정(1993)과 서 등(1996)은 암석시험에 대한 균열조사방법 등을 제시하였다. Hearn 등(1983), Kissenpfennig 등(1984), 그리고 Samman 등(1997)은 탄성과 투과법을 이용한 콘크리트 파일의 건전도 조사에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구는 해양기초구조물로 사용하기 위해 심층혼합 처리공

<sup>+</sup> 이 논문은 1999학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었음

법으로 개량한 연약지반 개량체의 건전도 조사를 위해 탄성과 투과법의 일종인 초음파 수평검층법을 적용하였다. 이 과정에서 개량 대상 연약지반의 물리·화학적 특성을 분석하였으며, 개량체의 탄성 역학적 특성을 분석하였다. 본 연구를 통하여 개량체의 균질성 여부와 시간에 따른 개량체의 강도 증가를 확인할 수 있었으며, 설계강도 도달여부도 예측이 가능하였다.

## 2. 시험방법

### 2.1 원지반의 물리·화학적특성 시험

원지반의 심층혼합 개량은 진해 해상점성토를 대상으로 하였으며, 혼합용 시멘트는 KSL 5201(포틀랜드 시멘트)을 사용하였다. 점성토 1m<sup>3</sup> 당 시멘트 300kg의 비율로 혼합하였고, 물과 시멘트의 중량비율은 1:1로 하였다. 개량지반의 규모는 대략 L=700m, W=20m, H=10m 이다.

초음파 수평검층을 실시하기 전에 원지반의 물리·화학적 특성을 조사하기 위해 개량지반 기점에서 300m, 600m 떨어진 곳의 외해 약 5m 지점에서 BH2-3, BH1-3 등 2개의 시추공을 뚫고 UD관을 이용하여 모두 11개의 시료를 채취하였다. 채취된 시료를 이용하여 비중( $G_s$ ), 입도조성, 함수비( $w_n$ ), 단위중량( $\gamma$ ), Atterberg 한계, pH, 강열감량( $L_i$ ) 등을 측정하였다.

Gotoh(1996)와 Iina *et al.*(1991)은 원지반이 충적토일 경우 심층혼합법으로 조성한 개량지반의 강도는 시멘트함량과 선형의 관계가 있음을 제시하였고, 이 시멘트 함량은 원지반의 pH, 강열감량, 함수비 및 세립질 함량에 따라 다음과 같이 수정하여 사용할 것을 제안하였다.

pH < 8 인 경우

$$F = W_c \times \frac{1}{9.0 - \text{pH}} \times \frac{L_{i\text{avg}}}{L_i} \times \frac{w_{n\text{avg}}}{w_n} \times \frac{F_{c\text{avg}}}{F_c}$$

pH ≥ 8 인 경우

$$F = W_c \times 1.0 \times \frac{L_{i\text{avg}}}{L_i} \times \frac{w_{n\text{avg}}}{w_n} \times \frac{F_{c\text{avg}}}{F_c}$$

여기서,  $F$ 는 시멘트 함량의 수정치(kg/m<sup>3</sup>)이며,  $W_c$ 는 시멘트 함량(kg/m<sup>3</sup>),  $F_c$ 는 세립질의 함량(%)을 나타낸다. 첨자 *avg.*는 각 값의 평균치를 나타낸다.

식 (1)로부터 원지반의 pH가 8 이하인 경우 pH가 감소할수록 강도는 떨어지며, 일반적으로 강열감량이 클수록, 함수비가 클수록, 세립질의 함량이 많을수록 개량지반의 강도는 떨어질 것으로 예측된다.

### 2.2 탄성역학시험

탄성역학시험을 위하여 개량지반 기점에서 300m, 600m 떨어진 4개의 시추공에서 채취한 8개의 코어 시료에 대한 일축압축강도 시험 및 초음파 속도측정을 실시하였다. Table 1은 코어 시료의 채취 위치 및 일축압축강도를 나타내며, 채취 심도는 2.0~9.7m로 고루 분포도록 하였다. 초음파 속도측정에서 얻어진 P파와 S속도를 이용하여 동적 Poisson 비( $\nu_d$ )를 다음식에 의해 산출하였다.

**Table 1** Sampling locations of core samples and compressive strength ( $Q_u$ )

Sample ID	Sampling hole ID	$Q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Hole location distance from the origin (m)	Sampling depth from the seafloor (m)
C1-1-1	BH1-1	31.0	600	6.8
C1-2-1	BH1-2	29.2	600	6.0
C1-2-2	BH1-2	29.4	600	7.4
C2-1-1	BH2-1	26.3	300	2.0
C2-1-2	BH2-1	30.0	300	3.4
C2-2-1	BH2-2	31.4	300	4.6
C2-2-2	BH2-2	28.5	300	6.1
C2-2-3	BH2-2	33.3	300	9.7

$$\nu_d = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right)} \quad (2)$$

여기서  $\nu_d$ 는 무차원이며,  $V_p$ 와  $V_s$ 는 각각 P파와 S파의 속도(km/sec)이다. 이렇게 얻어진 동적 Poisson 비로부터 동적 강성률( $G_d$ )과 영률( $E_d$ )을 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

$$G_d = \rho V_s^2 \quad (3)$$

$$E_d = 2 G_d (1 + \nu_d) \quad (4)$$

여기서  $\rho$ 는 매질의 밀도(g/cm<sup>3</sup>)이며,  $G_d$ 와  $E_d$ 의 단위는 GPa 이다.

초음파 속도측정값과 일축압축강도와의 회귀분석 분석을 통하여 두 측정값 사이의 상관관계를 구하였으며, 탄성계수와 일축압축강도와의 상관관계 분석도 시도하였다.

### 2.3 초음파 수평검층

초음파 수평검층을 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 철제 파이프를 이용하여 개량지반 내에 검층공을 설치하고 1개의 검층공에는 발진기(Tx)를, 다른 검층공에는 수신기(Rx)를 같은 깊이로 넣어 두 검층공 사이의 초음파 전파속도와 진폭의 변화를 기록하였다. 초음파 수평검층은 코어 시료를 채취한 BH1-1 및 BH1-2이 위치한 600m 지점과 BH2-1 및 BH2-2이 위치한 300m 지점 등 2곳에서 수행하였다. BH1-1과 BH2-1를 발진기 공으로, BH1-2와 BH2-2를 수신기 공으로 사용하였으며 발진기 공과 수신기 공 사이의 간격은 1m를 유지토록 하였다.

초음파 수평검층은 구조물의 깊이에 따라 건전도 조사를 정밀하게 시행할 수 있고, 조사 깊이를 정확히 측정할 수 있는 것이 큰 장점이다. 그러나 검층공을 설치하여야 하므로 기초구조물의 손상이 불가피하고 특히 많은 수의 시험이 필요한 경우에는 시간과 경비적 측면에서 경제성이 낮은 것이 단점이다. 또한 해양에서 검층공 설치를 위한 천공작업에 어려움이 따르며, 두 검층공의 수평 이격거리가 일정해야 한다.

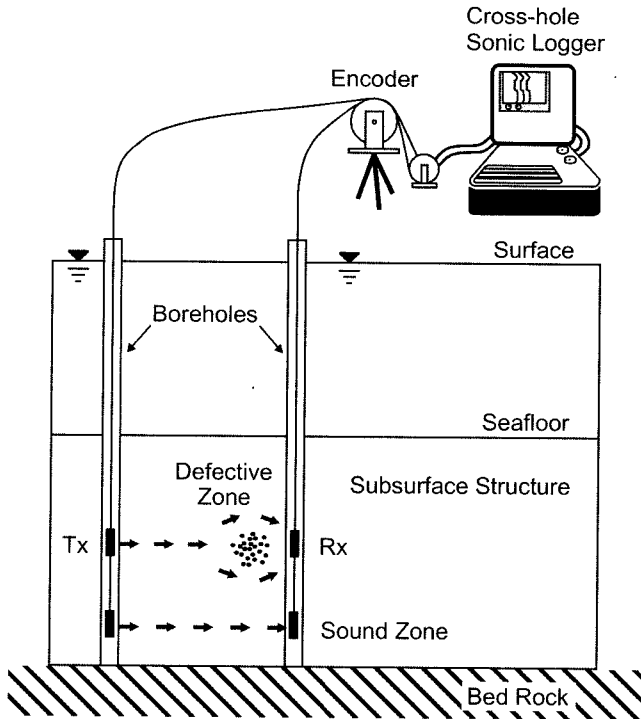


Fig. 1 Schematic diagram of cross-hole sonic logging

초음파 수평검층에서는 짧은 지속시간을 갖는 펄스형태의 파를 일정시간 간격을 두고 연속적으로 발생시킬 수 있는 압전식(piezoelectric) 트랜스듀서를 사용하여 P파를 발생시키며, 수신된 신호의 분석은 직접파(direct arrival waves)를 대상으로 한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 결합이 있는 지역에서의 직접파 주시(traveltime)는 건전한 지역에서의 주시보다 늦게되며, 진폭도 더 감소되어 수신된다. 따라서 깊이에 따른 주시와 진폭의 변화를 비교함으로써 구조물의 건전도를 파악할 수 있다.

초음파 전파속도( $V$ , km/sec)는

$$V = \Delta D / \Delta T \quad (5)$$

에서 구할 수 있다. 여기서  $\Delta T$ 는 직접파의 주시(msec)이고,  $\Delta D$ 는 두 검층공 사이의 간격(m)이다.

발전기 및 수신기는 기록계와 케이블로 연결되어 있으며 이 케이블은 엔코더를 거치도록 되어 있어 자동 심도계측이 가능하다.

### 3. 시험결과 및 고찰

#### 3.1 원지반의 물리·화학적 특성

원지반에 대한 물리·화학적 특성을 요약하면 Table 2와 같다. Table 2에서 보는 바와 같이 원지반의 pH는 8.5~9.4의 분포를 보이는 약 알칼리성이며, 심도가 깊어질수록 약간 증가하는 경향을 보인다. 조사대상 지반의 경우 pH가 8 이상이므로, 개량지반 내의 시멘트 함량이 일정하다면 심도에 따른 pH 변화는 압축강도 변화에 별 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.

Table 2 Chemical and physical properties of the soil

Sample ID	Depth (m)	$G_s$	Contents			$\omega_n$ (%)	$\gamma$ ( $t/m^3$ )	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	pH	$L_i$ (%)
			Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)						
BH1-3-1	2.9	2.712	50	48	2	134.36	1.37	66.90	38.64	8.5	4.67
BH1-3-2	4.4	2.708	43	56	1	115.26	1.41	72.02	42.29	8.9	5.26
BH1-3-3	5.9	2.711	48	51	1	103.75	1.45	70.59	37.04	8.8	5.29
BH1-3-4	7.4	2.710	54	45	1	111.04	1.43	71.75	39.52	8.9	5.07
BH1-3-5	8.9	2.707	19	29	52	108.91	1.43	75.22	42.86	9.4	5.16
BH1-3-6	10.4	2.708	41	49	10	98.20	1.47	70.65	38.16	9.4	4.60
BH1-3-7	11.9	2.695	24	26	50	25.79	2.00	28.43	17.88	8.8	5.48
BH2-3-1	2.8	2.716	49	49	2	106.97	1.44	74.52	30.47	8.7	5.34
BH2-3-2	4.3	2.714	47	49	4	109.87	1.43	67.26	33.22	8.9	4.87
BH2-3-3	5.8	2.721	46	53	1	103.72	1.45	73.01	45.71	8.8	5.32
BH2-3-4	7.3	2.716	41	56	3	91.79	1.49	65.41	38.61	8.9	5.59
Average		2.71	42.0	46.5	11.5	100.87	1.48	66.88	33.70	8.90	5.15

원지반의 강열감량( $L_i$ )은 4.67~5.59%의 분포를 보이며 심도에 따라 약간 증가하는 경향을 보인다. 따라서 조사대상 지반의 경우, 시멘트 함량이 일정하다면 심도가 깊어짐에 따라 압축강도가 다소 감소할 것으로 예상되나, 측정결과는 Table 1에서 보는 바와 같이 심도에 따라 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다.

함수비( $\omega_n$ )는 점토질의 모래에서 26%를 보인 것을 제외하고는 실트질의 모래, 소성이 큰 무기질 실트, 무기질 점토 및 유기질 점토에서 90~135%의 범위를 보이며, 심도에 따라 약간 감소하는 경향을 보인다. 따라서 조사대상 지반의 경우, 개량지반 내의 시멘트 함량이 일정하다면 심도가 깊어짐에 따라 압축강도가 다소 증가할 것으로 예상되며, 측정결과 역시 Table 1에서 보는 바와 같이 심도에 따라 대체로 증가하는 경향을 보이고 있다.

점토와 실트 등 세립질의 함량은 조립질 층과 다수의 sand seam이 발견된 일부 지층을 제외하고는 96~99%의 분포를 보이고 있으며, 그 편차가 매우 작아 세립질 함량 변화에 따른 압축강도 변화는 거의 없는 것으로 보인다. 그러나 세립질의 함량이 작은 경우 압축강도는 크게 증가할 것으로 예상된다.

이밖에 원지반의 비중( $G_s$ ) 및 단위중량( $\gamma$ ) 변화와 Atterberg 한계 변화는 Table 2에서 보는 바와 같다.

Sand seam을 제외한 원지반의 강열감량 평균치, 함수비 평균치 및 세립질의 평균치와 지반개량에 사용된 시멘트 함량( $300kg/m^3$ )을 식(1)에 대입하여 구한  $F$ 의 최대값과 최소값은 각각  $335kg/m^3$ 과  $272kg/m^3$ 이다. 시멘트의 함량과 일축압축강도는 선형의 관계가 있음을 고려할 때, 개량지반의 압축강도는 약  $\pm 12\%$  이내에서 변화 가능함을 제시한다. 실제 측정결과 Table 1에서 보는 바와 같이, 압축강도의 평균치는  $30.4kg/cm^2$ 이며, 약  $\pm 10\%$ 의 편차를 보이고 있다.

Fig. 2는 개량지반에서 채취한 코어 시료의 압축강도와 원지반의 물성변화에 따른 시멘트 함량의 수정치를 거의 같은 심

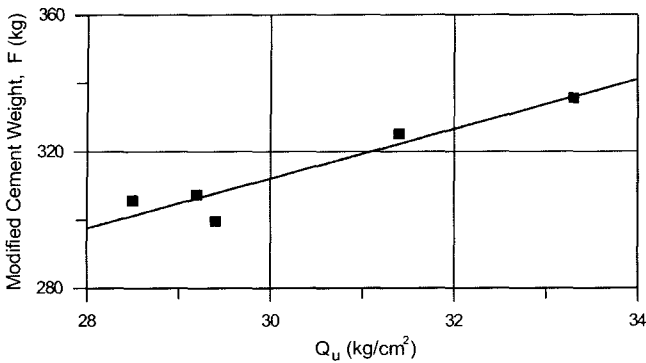


Fig. 2 Comparison between compressive strength (Qu) and modified cement weight (F)

도에서 채취한 자료만을 이용하여 상호 비교한 것이다. 이들 사이의 상관관계는 0.95로 비교적 높은 편이며, 이는 원지반의 물성변화가 개량지반의 압축강도에 영향을 미치고 있음을 보여준다.

이 결과는 시멘트가 원지반과 균일하게 혼합되었다는 가정 하에서의 분석이다. 만일 시멘트가 균일하게 혼합되지 않은 경우에는 식(1)에서  $W_c$  값이 변하게 되며, 이는 직접적으로 시멘트 함량 수정치에 영향을 미치게 되고, 결국 개량지반의 압축강도에 영향을 미치게 된다. 따라서, 개량지반의 강도는 원지반의 물리·화학적 특성뿐만 아니라, 지반개량을 시행함에 있어 시멘트가 원지반과 얼마나 균일하게 혼합되었는가에 상당한 영향을 받을 것으로 보인다.

3.2 구조물의 탄성역학적 특성

심층혼합법으로 조성한 개량지반에서 채취한 8개의 코어 시료(Table 1 참조)에 대한 초음파 속도는 P파의 경우 1.79~2.28km/sec의 분포를 보이며, S파의 경우 1.18~1.48km/sec의 분포를 보인다. 시료에 대한 초음파 속도는 깊이에 따라 다소 불규칙하게 변하는 양상을 띤다. 이는 원지반의 단위중량이 깊이에 따라 별 변화가 없는 것과는 대조적인 것으로, 지반개량을 시행함에 있어 시멘트가 일부 균일하지 않게 섞였을 가능성이 매우 큼을 시사한다.

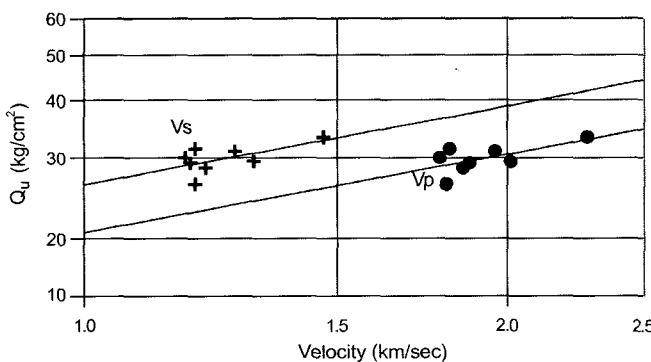


Fig. 3 Correlations between P-wave velocity (Vp) and compressional strength (Qu), and S-wave velocity (Vs) and compressional strength (Qu)

Fig. 3은 채취한 코어 시료의 초음파 속도와 일축압축강도와 의 상관관계를 보여주고 있다. P파의 경우

$$Q_u = 20.645 V_p^{0.564} \tag{6}$$

의 상관관계를 보이고 있으나, 상관계수는 0.64로 낮은 편이다. 또한, S 파의 경우

$$Q_u = 26.217 V_s^{0.568} \tag{7}$$

의 상관관계를 보이고 있으나, 상관계수는 0.62로 P파의 상관계수와 비슷한 정도로 낮은 편이다. 이와 같이 상관계수가 낮은 것은 탄성과 속도가 일축압축강도 뿐만 아니라, 공극률, 공극의 형태, 포화의 정도, 공극수내의 압력 등 기타 많은 요인에 의해 영향을 받기 때문으로 생각된다.

초음파 속도로 산출한 동적 포아송비는 0.11~0.17로 콘크리트의 포아송비인 0.11~0.21과 비슷한 분포를 보인다. 이는 주로 세립질 해성토와 모로 구성된 원지반의 포아송비가 일반적으로 0.4 이상임과 비교해 볼 때 원지반은 시멘트의 침투 혼합에 의해 탄성역학적 특성이 콘크리트와 비슷하게 변화하였음을 보여준다.

일반적으로 매질의 일축압축강도는 영률, 전단계수 등 동탄성계수보다는 영률×전단계수와 더 높은 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다(김진후, 1994). 초음파 속도와 밀도측정에서 얻은 영률×전단계수와 일축압축강도와의 상관관계는 Fig. 4에서 보는 바와 같이

$$\log Q_u = 0.00525 G \times E + 1.4242 \tag{8}$$

의 관계를 보이며 상관계수는 0.66으로 P파 또는 S파와 일축압축강도와의 상관관계보다 약간 높은 상관관계를 보이고는 있으나 여전히 낮은 편이다. 이는 앞서 언급한 바와 마찬가지로 탄성과 속도가 일축압축강도 뿐만 아니라, 기타 다른 요인에 의해 많은 영향을 받기 때문으로 생각된다. 비록 본 연구를 통하여 일축압축강도와 탄성과 속도 사이에 높은 상관관계를 얻을 수는 없었으나, P파 및 S파 속도와 밀도를 측정하여 영률과 전단계수를 구하면, 이를 이용하여 일축압축강도를 예측할 수 있으며, 초음파 수평검층과 같이 S파 측정을 할 수 없는 경우

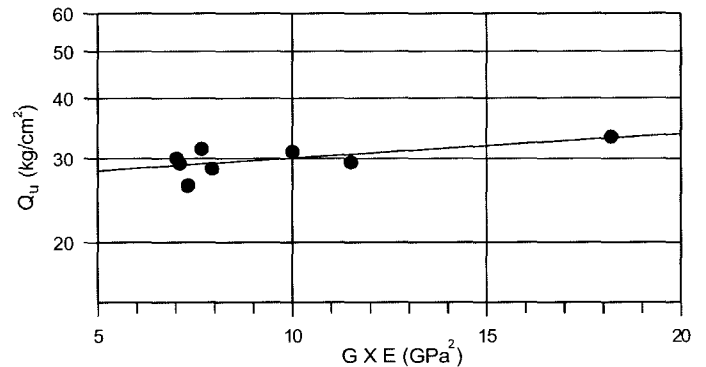


Fig. 4 Correlations between G×E (product of shear and Young's modulus) and compressional strength (Qu)

에는 P파 속도만을 이용한 일축압축강도 예측이 어느 정도 가능할 것으로 본다.

**3.3 초음파 수평검층 결과**

시추공 BH2-1과 BH2-2을 이용한 초음파 수평검층은 재령 34일, 46일, 54일, 63일 등 시간간격을 두고 총 4회 측정하였다. Fig. 5는 재령 34일 경과 후의 측정결과를, Fig. 6은 재령 63일 경과 후 측정된 초음파 수평검층 결과를 보여준다. 그림에서 첫 번째 트랙은 수신된 초음파 신호의 원시자료(raw data)를 가변밀도(variable area) 형식으로 나타낸 것으로 검은 부분은 (+) 진폭을 나타낸다. 두 번째 트랙은 원시자료에서 독립한 초동(first arrival)의 주시를 나타내며, 세 번째 트랙은 진폭을 나타내는 데, 최대진폭을 50으로 하여 파의 전파에 따른 감쇠정도를 보여준다.

Fig. 5와 Fig. 6 모두 깊이에 따라 속도가 일반적으로 증가하여 주시가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 깊이 14.5~17m 구간과 19~21m 구간에 속도가 다소 불규칙하게 변하는 구간을 볼 수 있다. Fig. 5에 나타난 이들 구간의 진폭 역시 다른 구간

에 비해 작은 값을 가지며 불규칙하게 나타나고 있어, 이들 구간의 개량지반이 타 구간에 비해 건전성이 떨어질 것으로 예상된다.

그러나 Fig. 6에 보이고 있는 측정결과 16~17m 구간과 19~21m 구간의 진폭은 타 구간과 거의 비슷한 값을 보이고 있는데, 이를 통하여 시간 경과에 따라 이 구간의 건전성이 크게 개선되었음을 알 수 있다. 그러나 14.5~15.5m 구간에서는 별다른 개선이 관찰되지 않고 있다. 이는 시멘트가 완전히 혼합되지 않은 일부 구간이 존재하기 때문으로 해석된다.

Fig. 7은 네 차례에 걸친 초음파 수평검층 결과 중 초동의 주시를 중첩시켜 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 초기의 측정결과에 비해 시기적으로 나중에 측정된 초음파 주시가 다소 짧아지는 경향을 보이고는 있으나 그 편차는 약 5% 이내로 측정오차를 감안 할 때 큰 차이가 없는 것으로 보인다.

결국 위의 사실들을 종합해 볼 때, 본 개량지반은 일부 구간에서 시공 초기에 건전성이 떨어지는 구간이 일부 발견되고 있으나, 시간경과에 따라 양생이 진행되면서 건전성이 크게 개선되었으며, 전체적으로 균질한 기초구조물을 형성하고 있음을 알 수 있다.

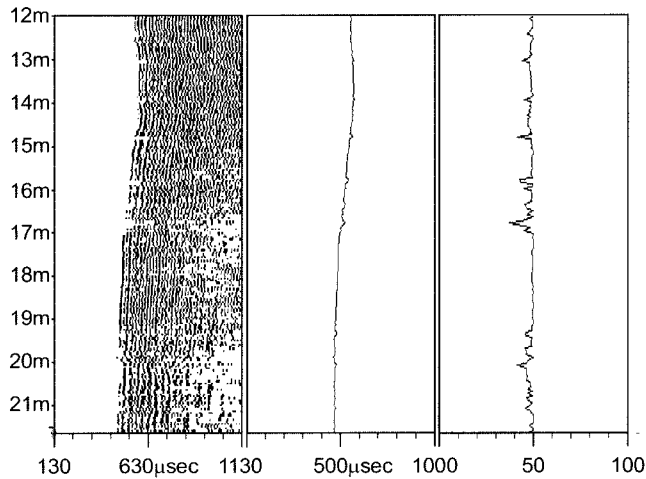


Fig. 5 Cross-hole sonic logging result obtained after 34 curing days

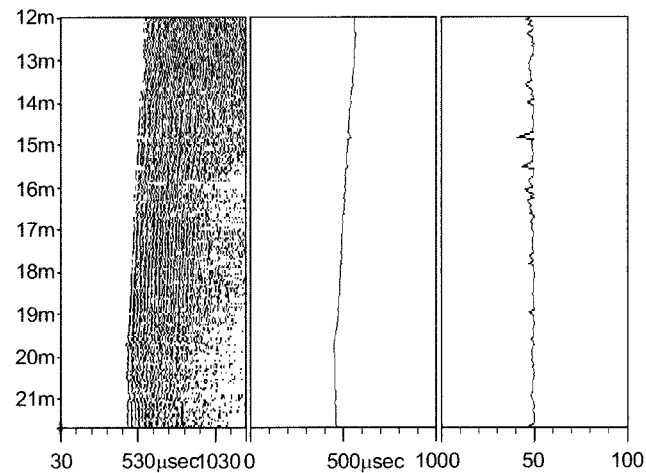


Fig. 6 Cross-hole sonic logging result obtained after 63 curing days

**3.4 압축강도 예측**

시추공 BH2-1과 BH2-2을 이용한 초음파 수평검층 결과 중 최종적으로 실시한 재령 63일 경과 후의 수평검층 결과를 이용하여 압축강도를 예측하여 이를 Fig. 8에 나타내었다. 압축강도는 초동의 주시로부터 계산한 초음파 속도와 (5)식의 상관관계를 이용하여 구했다. 그림에서 보는 바와 같이 개량지반의 압축강도 예상치는 28.2~29.8 kg/cm<sup>2</sup>로 코어 시료에 대한 압축강도 시험 결과치인 26.3~31.4 kg/cm<sup>2</sup>의 범위 내에서 깊이에 따라 증가하는 비교적 균질한 구조물임을 알 수 있다. 설계강도가 15 kg/cm<sup>2</sup>임을 감안할 때 본 개량지반은 설계강도를 충족하고 있다.

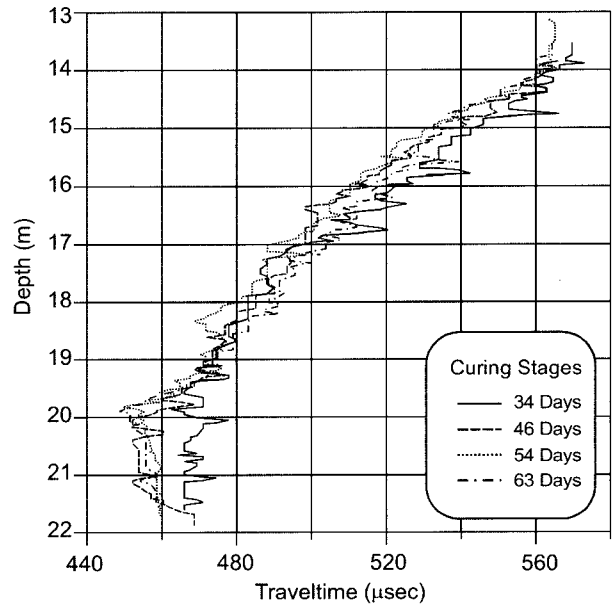


Fig. 7 Variation of wave traveltimes with curing stages

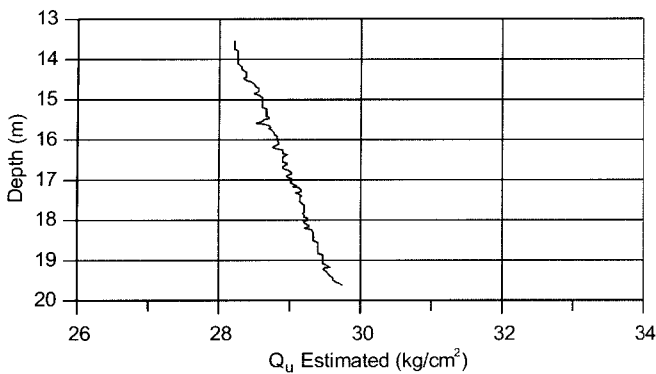


Fig. 8 Estimated compressional strength form cross-hole sonic logging

#### 4. 결 론

본 연구는 해양구조물의 효율적 관리를 위한 과학적이고 체계적인 안전진단기술이 필요하다는 인식하에 해양 기초구조물로 사용하기 위해 심층혼합 처리공법으로 개량한 개량지반의 건전도 조사를 위해 초음파 수평검층법을 적용하였다. 초음파 수평검층에 앞서 원지반의 물성을 파악하기 위한 물리·화학적 분석이 수행되었고, 원지반의 특성이 압축강도에 미치는 영향, 개량지반의 균질성 여부, 시간에 따른 강도 변화 및 설계강도 도달여부에 대한 분석이 수행되었으며 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 원지반의 물리·화학적 특성은 개량지반의 압축강도에 약 10% 내외의 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 기초구조물의 강도는 지반의 물리·화학적 특성과 지반을 개량함에 있어 시멘트가 원지반과 얼마나 균일하게 혼합되었는가에 따라 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.
- (2) 초음파 속도 중 P파 속도와 일축압축강도와의 상관관계는  $Q_u = 20.645 V_p^{0.564}$  이고 상관계수는 0.64로 낮은 편이다. 이는 탄성과 속도가 일축압축강도 뿐만 아니라, 공극률, 공극의 형태, 포화의 정도, 공극수내의 압력 등 기타 많은 요인에 의해 영향을 받기 때문으로 생각된다. 동적 포아송비는 0.11~0.17로 콘크리트의 포아송비와 비슷한 분포를 보이고 있어, 원지반이 시멘트의 심층 혼합에 의해 탄성역학적 특성이 콘크리트와 비슷하게 변화하였음을 알 수 있다.
- (3) 초음파 수평검층 결과 개량체 일부 구간에서 양생기간이 짧은 경우 속도가 감소하고 수신 에너지가 감쇠하는 등 결함이 발견되고 있으나, 양생이 진행되면서 건전성이 일부 개선된 것을 에너지 감쇠가 확연히 줄어든 사실로 인지할 수 있다. 재령 34일이 경과한 후에도 양생은 계속 진행되고 있음을 알 수 있으며, 시간 경과에 따라 비교적 균질한 개량지반이 형성되어 가는 과정을 시간에 따른 초음파 수평검층을 통해 확인할 수 있었다.
- (4) 초음파 수평검층으로 예상한 개량체의 압축강도는 28.2~29.8  $kg/cm^2$  로, 깊이에 따라 증가하는 경향을 보인다. 설계강

도가 15  $kg/cm^2$  임을 감안할 때 본 개량지반은 설계강도를 충족하고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 전체 700m 구간 중 300m 간격으로 2 군데서 채취한 원지반 및 코어 시료와 초음파 수평검층 자료를 이용하였기 때문에 전체 개량지반의 특성을 대표한다고 볼 수는 없으나, 지반개량 성과분석을 위한 효율적이고 체계적인 접근 방법을 제시하고 있다. 앞으로 다양한 해양환경에서 많은 자료를 이용한 체계적인 분석을 통하여 안전진단기술의 표준화가 시급히 앞당겨져야 할 것으로 생각한다.

#### 참 고 문 헌

- 김동수, 박형춘, 이광명(1997). “충격반향기법을 이용한 콘크리트 부재의 비파괴 검사”, 콘크리트학회지, 제9권 제2호, pp 109~119.
- 김동수, 이광명(1998). “탄성파를 이용한 콘크리트 구조물의 비파괴검사”, 콘크리트학회지, 제10권 제2호, pp 40~49.
- 김영환, 이세경, 김호철(1995). “탄성파를 이용한 콘크리트 비파괴시험 현황”, 비파괴검사학회지, 제15권 제1호, pp 318~325.
- 김진후(1994). “초음파속도측정에 의한 암반분류에 관한 연구”, 추계학술발표대회 강연논문집, 한국해양공학회, pp 277~283.
- 서백수, 백환조, 민경원(1996). “암석시편의 균열조사를 위한 탄성과 주시 및 진폭변화에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제6권, pp 239~244.
- 우제윤(1995). “비파괴 시험기법을 이용한 지반조사와 토건구조물의 안전진단 및 품질관리: 비파괴 시험기법을 이용한 현장타설말뚝의 품질관리”, 한국지반공학회 전문가 초청 학술세미나, pp 175~228.
- 정희옥(1993). “미세균열을 포함하는 암석의 탄성파속도 감쇠에 관한 연구”, 한국지구과학회지, 제14권 제2호, pp 212-218.
- Hearne, Thomas M. Jr., Stokoe, Kenneth H., and Reese, Lyndon C.(1983). “Drilled-shaft integrity by wave propagation method”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, pp 1599~1604.
- Kissenpfennig, J. F. and Motherwell, Jonathan T.(1984). “Integrity testing of bored piles using sonic logging”, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, pp 1079~1090.
- Poston, Randall W., Whitlock, A. Rhett, and Kesner, Keith E. (1995). “Condition assessment using nondestructive evaluation”, Concrete International, Vol. 17, pp 36~42.
- Samman, Mahmud M. and O'Neill, Michael W.(1997). “The reliability of sonic testing of drilled shafts”, Concrete International, Vol. 19, pp 45~54.

2000년 11월 14일 원고 접수

2001년 1월 25일 수정본 채택