

벤더 엘리먼트 센서를 이용한 선행 재하공법 현장의 간극비 변화 추정 Estimating Void Ratio Changes of a Pre-loading Site Using Bender Elements Sensors.

김학성¹⁾, Hak-Sung Kim, 정영훈²⁾, Young-Hoon Jung, 김병철³⁾, Byung-Chul Kim, 목영진⁴⁾, Young-Jin Mok,

¹⁾경희대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University.

²⁾경희대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University.

³⁾대림산업(주) 기술연구소 과장, Manager, Daelim Technology Research Institute.

⁴⁾경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University.

SYNOPSIS : Void ratios are one of the key parameters for exact calculation of settlement of soft ground. In the study, shear wave velocities of a soft ground were used to measure the field void ratio using bender elements sensors. The bender-element probes were installed *in situ* at the depths of 3, 5 and 8m on a pre-loading site near Incheon, Korea. During 90 days after installation, the changes of shear wave velocity and ground surface settlement were measured. The field void ratio was estimated from measured shear wave velocities. The void ratio estimated by the shear wave velocity measured by bender elements agrees well with the measured values in the field.

Key words : bender elements, field void ratio, pre-loading consolidation, shear wave velocity

1. 서 론

연약지반에서의 현장 간극비는 지반의 압밀침하특성과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 일반적으로 압밀침하 현장의 경우 간극수압계의 설치를 통해 간극수압의 소산정도로서 압밀도를 산출하고 이를 바탕으로 연약지반의 침하량을 산정한다. 그러나 압밀침하 현장에 설치된 간극수압계의 유지관리가 어려워 현장의 압밀모니터링에 큰 어려움을 초래하는 경우가 발생하는 문제점이 있다. 따라서 현재의 압밀모니터링 방법을 보완할 수 있는 방법이 필요하다. 최근에 들어 지반의 전단파 속도를 측정하고 이를 토대로 지반의 강도와 간극비를 추정하는 연구가 활발하게 진행되어지고 있다(Mok et al., 2009, Jung et al., 2008, 오상훈 외, 2008). 본 연구에서는 선행 재하 공법(pre-loading)을 이용한 압밀 침하현장에 벤더 엘리먼트 센서(bender elements sensors)를 적용하여 연약지반의 전단파 속도를 측정하고, 현장의 간극비를 추정하여 보았다.

2. 매설형 계측기의 설치 및 전단파 신호 계측

인천의 한 연약지반 현장에 벤더 엘리먼트 센서를 이용한 매설형 전단파 센서를 설치하였다. 설치된 현장은 PBD공법으로 연약지반을 개량하는 현장으로 PBD 설치 후, 선행 재하 공법의 하중 성토 이전에 매설형 센서를 설치하였다. 계측기 매설 현장의 표층부에 경질화된 부분이 혼재하나 지표로부터

약 10m까지 연약한 정규압밀 점성토지반으로 구성되어 센서의 설치 및 진단과 계측이 용이하여 이 깊이에 설치하였다. 표 1은 센서가 매설된 위치의 지반 물성치이다.

표 1 선행 압밀 현장의 지반 물성치

지하 수위	USCS	함수비 (%)	Gs	Atterberg Limits(%)		시료채취 심도(m)	C_c	C_r
				LL	PI			
0.2 m	CL	34.2	2.67	34.4	12.6	3.0~3.8	0.332	0.020
		36.8	2.69	45.3	26.0	6.0~6.8	0.332	0.020

현장의 수직 배수재는 2.4×2.4 m(가로×세로)의 간격으로 시공되어졌으며, 4개의 매설형 센서를 깊이 3 m, 5 m, 8 m에 각각 설치하여 성토 후 깊이별 진단과 속도 변화를 측정하여 대상지반의 강성 증가를 확인하였다. 또한 그림 1에서 보는 바와 같이 한 개의 로드에는 3개의 장비를 연결하여 3 m, 5 m, 8 m 깊이에 설치하였다. 그림 2는 매설형 센서와 장비의 설치 및 설치 직후 진단과 신호의 측정모습이다. 설치과정에서 신호선의 보호를 위하여 PVC 관을 시공하였고, 선행 재하과정에서 다시 PVC관을 연장하여 최종 설치를 완료하였다.

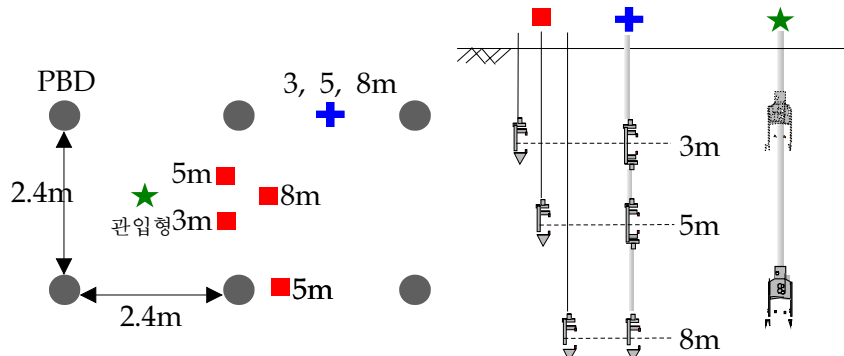


그림 1 현장 장비 설치의 위치 배치



(a) 매설형 센서

(b) 센서의 설치

(c) 센서 설치 후 신호측정

그림 2 현장 측정 장치

그림 2(c)와 같이 측정 장치의 설치가 끝난 직후에 진단과 속도를 측정하였다. 진단파의 도달시간은 깊이에 따라 약 1.0~2.0 m/sec 범위에 있었으며, 발진자와 수신기 사이의 간격 100 mm를 도달시간으로 나누어 60~100 m/sec 범위의 진단파 속도를 얻었다. 진단파 신호의 측정 시, 발진자 가동 전압은 전압 증폭기를 통하여 30 V로 하고, 발진자와 수신기 사이의 계측거리가 진단파 파장의 2배 이상이 되도록 고주파수를 사용하였다. 총 7개의 매설형 센서 중 1개는 작동하지 않았으며, 몸체를 타고 들어가는 노이즈와 전기적 간섭문제가 발생하였으나 지반을 통해 전파된 진단파 신호를 확실히 구분할 수 있을 정도의 양질의 진단파 신호를 계측할 수 있을 정도의 수준이었다. 센서의 매설 시점으로부터 약 3개월이

경과한 후 다시 현장을 방문하여 전단파 신호를 계측하였다. 그림 3은 성토 직 후 계측한 5 m와 8 m에서의 전단파 신호로 다소 전단파 속도가 증가한 것을 확인 할 수 있다. 이때 증가되어 측정된 전단파 속도는 80~100 m/sec로 초기에 비해 약 10~20 m/sec 만큼 증가하였다.

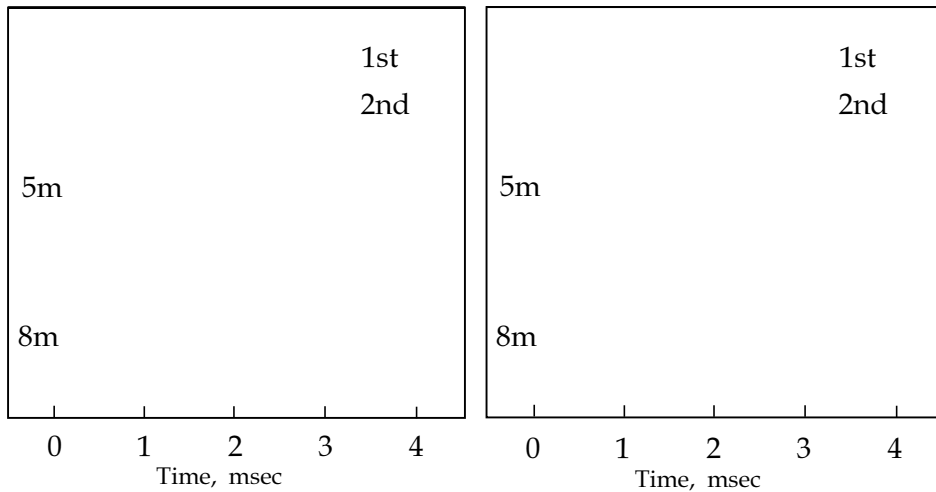


그림 3 3개월 후 계측 전단파 신호

3. 압밀 진행에 따른 간극비 변화 추정

센서의 설치 시점으로부터 3개월 후까지의 압밀과정 동안 침하판을 설치하여 지표면 침하량을 측정해 보았다. 설치된 센서를 이용하여 전단파 속도를 측정하고 이를 이용하여 현장 간극비를 확인하였다. 전단파 속도를 이용하여 간극비를 추정하는 방법은 기본적으로 최대전단탄성계수(G_{max})와 간극비 사이의 관계를 규명한 경험식을 이용한다. 이와 관련하여 Hardin과 Black(1968), Hardin과 Drnevich(1972)이 유효응력 항에 의한 지반 탄성과 지반 조성의 관계에 대하여 경험식을 제시하였다. Hardin에 의해서 제시된 경험식을 일반식으로 바꾸면 식 (1)과 같다.

$$G_{max} = \frac{A OCR^k}{F(e)} (P_a)^{1-n} (p')^n \quad (1)$$

여기서, A 는 계수, P_a 는 대기압, p' 은 평균유효응력, $F(e)$ 는 간극비 함수, OCR 은 과압밀비, k , n 은 탄성특성계수이다. 식 (1)은 대상 지반물성에 따라 많은 학자들에 의해 다양하게 변형되어져 적용되었으며, 계수 A 가 전단탄성계수와 간극비 관계에 가장 큰 영향을 주는 인자가 된다. 본 연구에서는 인천의 실트질 지반을 대상으로 도출된 경험식(박동선, 2008)을 적용하여 사용하였다. 전단파 속도를 이용하여 현장의 간극비를 확인하는 방법은 개략적으로 아래와 같다.

- ① 선행 재하 전에 매설형 또는 관입형의 전단파 속도 센서를 통하여 압밀 전, 현장의 전단파 속도 ($V_{s, t=0}$)를 측정한다. 또한 침하판을 설치하여 침하량을 측정한다.
- ② 압밀이 진행되면 침하판을 통하여 지표면 침하량을 측정하고, 침하량 검측시기에 따라 매설된 센서를 통하여 전단파 속도를 측정한다.
- ③ 전단파 속도를 측정된 위치를 기준으로 층을 나누어 현장의 층별 간극비를 산정한다.

4. 선행 재하 3개월 후 간극비 분포

앞에서 설명한 내용을 인천의 연약지반 현장에서 측정된 결과에 적용해 보았다.

초기 간극비 결정: 센서가 설치된 지점의 지하수위는 지표로부터 0.2 m에 있었으나 지표로 가정하였

다. 매설형 센서를 설치할 심도(지표로부터 3 m, 5 m, 8 m)에서 불교란 시료를 채취하여, 실트질 세립분의 습윤 단위중량을 $19kN/m^3$, $K_0=0.412$, 각 위치별 간극비(e_0)를 0.84, 0.81, 0.77로 확인하였다. 불교란 시료를 채취한 위치와 동일한 위치에 매설형 센서를 설치하여 선행 재하 하중을 적용하기 전에 지반의 전단파 속도를 측정하였다. 초기의 전단파 속도는 각 심도별로 64 m/sec, 82 m/sec, 95 m/sec로 측정되었다. 측정된 전단파 속도를 이용하여 각 심도별 초기 간극비를 식 (2)과 식 (3)(박동선, 2008)를 이용하여 산출한다. 본 연구에서 다룬 지반은 실트질 세립분을 다량 포함하고 있는 연약지반이었다. 따라서 실트질 세립분과 관련된 식 (3)을 사용하였으나, 대상 지반의 구성이 다를 경우 다른 제안식을 이용하여 전단변형계수를 계산하여야 한다. 계산된 결과와 불교란 시료를 통해 얻은 각 층의 초기 간극비(e_i)는 표 2에 정리하였다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (2)$$

$$G_{max} = 2400 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \sqrt{p'} \quad (3)$$

여기서, G_{max} 와 p' 의 단위는 kPa이고, ρ : 밀도, p' 는 평균유효응력이다. 평균유효응력은 $p' = \frac{1 + 2K_0}{3} \cdot \sigma_v'$ 로 계산하였다. σ_v' 은 연직유효응력이다.

표 2 초기 간극비의 결정

깊이(m)	V_s (m/sec)	G_{max} (kPa)	계산된 e_i	측정된 e_i
3	64	7933	0.83	0.84
5	82	13023	0.82	0.81
8	95	17480	0.78	0.77

표 2에서 불교란 시료로부터 획득한 간극비와 전단파 속도로부터 계산된 간극비가 매우 유사함을 확인하였고, 이후 계산에 사용한 초기 간극비는 시료를 통해 얻은 값이다.

층 분할: 지표면으로부터 센서가 매설된 지점을 기준으로 각 센서간 거리의 중점을 기점으로 토층을 그림 4와 같이 나누었다.

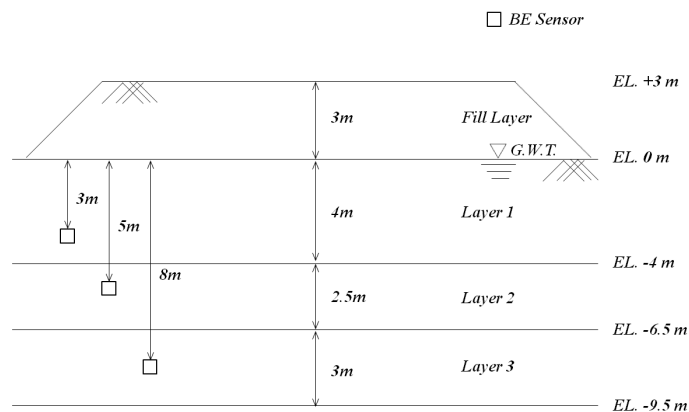


그림 4 센서 설치위치에 따른 토층의 분할

수평방향 압밀도(U)의 계산: 그림 1(a)과 같이 설치된 연직배수재를 고려하여 Hansbo(1981)의 연직배수공법의 압밀이론을 통해 압밀도를 계산하였다. Hansbo의 압밀이론은 국내사례에 많이 적용된 방법

으로 임의의 배수재를 통하여 수평방향의 흐름만 있는 원통형 지반을 대상으로 일정변형률 가정을 도입하여 해석하고, 스미어 영역(smear zone)과 통수저항(well resistance)을 모두 고려 할 수 있다. 본 연구에서는 연직 배수재를 통해 수평배수만 발생하는 것으로 가정하여 수평방향의 평균 압밀도만을 고려하였다. Hansbo의 해석방법에서의 평균 압밀도는 식 (4)과 같다.

$$U = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F}\right) \quad (4)$$

여기서, $F: F(n) + F_s + F_r$

$$F(n) = \ln\left(\frac{d_e}{d_w}\right) - \frac{3}{4} : \text{배수재 타설 간격에 의한 영향}$$

$$F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1\right) \cdot \ln\left(\frac{d_s}{d_w}\right) : \text{smear zone 영향}$$

$$F_r = \pi z(L - z) \frac{k_h}{q_w} : \text{well resistance의 영향}$$

$$d_e : \text{영향원의 직경, } d_w : d_w = \sqrt{\frac{4q_w}{\pi k_w}} \text{ (} q_w : \text{배수재 통수능력), 연직배수재의 직경}$$

$$k_s, k_h : \text{smear zone 및 점토지반 각각의 수평투수계수, } k_w : \text{연직배수재의 투수 계수}$$

$$z : \text{임의의 심도, } L : \text{배수재의 배수 길이.}$$

$$T_h : \text{수평방향의 시간계수, } T_h = \frac{c_h t}{(d_e)^2}, c_h : \text{수평방향 압밀계수}$$

압밀도 계산은 $d_e = 1.13d \times 2.4 \text{ m} = 2.712 \text{ m}$ (배수재의 사각형 배열), $d_w = 66.85 \text{ mm}$ 임을 이용하여 배수재 타설 간격에 의한 영향치($F(n) = 2.95$)을 구하였다. $\frac{k_h}{k_s} = 2.0$, $d_s = 500 \text{ mm}$ 를 이용하여 스미어 영역의 영향치($F_s = 2.01$)를 얻었다. 통수능력의 영향치, F_r 의 경우 z 를 연약층 총 두께 H 로 가정할 경우 평균압밀도가 과소평가될 수 있으므로 $z \approx 0.5H$ 를 적용하였다(최인걸 외 2006). $k_h = 2.25 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$, $q_w = 140 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 를 사용하여 $F_r = 1.14 \times 10^{-3}$ 을 얻었다. 각 영향치의 합인 $F = 1.948$ 로 결정되었다.

수평방향의 시간계수는 $c_h = 0.00406 \text{ m}^2/\text{day}$, $t = 90 \text{ days}$ 를 통해 0.0497을 얻었다. 최종적으로 계산된 F 와 T_h 와 식 (4)을 이용하여 3개월 후의 수평방향 평균 압밀도는 7.7 %로 평가되었다. 연직 배수재는 깊이에 상관없이 동일한 간격으로 배치되어 있으므로 모든 토층의 평균 압밀도는 깊이에 따라 동일한 것으로 가정한다.

3개월 후의 각 층별 유효구속응력 증가분의 계산: 유효구속응력 증가분은 앞서 구한 수평방향 압밀도를 평균압밀도로 가정하여 선행하중으로 작용한 성토재의 단위중량: $\gamma_{fill} = 18.6 \text{ kN/m}^3$, 토층 두께 3 m의 매립층의 유효수직응력 증가분을 산정한 후, 그림 4에서와 같이 분할된 각 층별 유효구속응력 증가분으로 계산하였다. 표 3에 각 층별 대표 깊이에서의 3개월 후 유효구속응력 증가량을 정리하였다.

표 3 대표깊이에서의 3개월 후의 유효구속응력 증가량

Layer No.	층 두께(m)	초기 σ'_v (kPa)	$\sigma'_{v, t=90days}$ (kPa)	초기 p' (kPa)	$p'_{t=90days}$ (kPa)
1	4	18.4	22.7	11.2	13.8
2	2.5	48.2	52.5	29.3	31.9
3	3	73.5	77.8	44.7	47.3

전단파 속도를 이용한 3개월 후의 간극비 산정: 각 층별로 계산된 3개월 후의 유효구속응력과 3개

월 후 측정된 전단파 속도를 식 (2)과 식 (3)를 이용하여 3개월 후의 전단탄성계수와 간극비를 계산하였다. 계산된 각 층의 간극비와 초기 간극비 사이의 변화량을 측정한다. 계산된 결과는 표 4와 같다.

표 4 3개월 후의 각 층별 전단파 속도와 간극비

Layer No.	$V_{s,t=90days}$ (m/sec)	$p'_{t=90days}$ (kPa)	G_{max} (kPa)	전단파 속도로 구한 $e_{t=90days}$
1	78	13.8	11783	0.68
2	88	31.9	14999	0.77
3	100	47.3	19368	0.74

실측 간극비와의 비교: 3개월의 선행 재하기간 동안 침하판에서 측정된 침하량 225mm를 이용하여 각 층별 간극비를 계산하였다. 간극비 계산을 위해 실측 침하량을 토대로 압축지수(C_c)를 정규압밀 침하량, 식 (5)로부터 계산하였다.

$$S = \sum \frac{C_c}{1 + e_i} H_i \cdot \log\left(\frac{p'_i + \Delta p'_i}{p'_i}\right) \quad (5)$$

여기서, S 는 전체 침하량, e_i 는 각 층의 초기 간극비, H_i 는 각 층의 토층 두께, p'_i 은 각 층의 초기 평균유효응력, $\Delta p'_i$ 은 각 층의 평균유효응력 증가분이다. 식 (5)를 통하여 C_c 는 0.773을 얻었다. 식 (6)을 통하여 각 토층의 간극비 변화량(Δe_i)를 구하여 3개월 후의 각 층별 실측 간극비를 정리하면 표 5와 같다.

$$\Delta e_i = C_c \cdot \log\left(\frac{p'_i + \Delta p'_i}{p'_i}\right) \quad (6)$$

표 5 실측 간극비

Layer No.	e_i	Δe_i	실측 간극비	전단파 속도로 구한 간극비
			$e_{t=90days}$	$e_{t=90days}$
1	0.84	0.07	0.77	0.68
2	0.81	0.03	0.78	0.77
3	0.77	0.02	0.75	0.74

5. 결론

본 연구에서는 전단파 속도측정을 이용하여 압밀침하 현장의 간극비를 추정하는 방법을 제시하였다. 전단파 속도 변화를 통해 간극비의 변화량을 계산하고, 실제 침하량을 바탕으로 현장의 간극비를 측정하여 계산된 간극비와의 비교를 시도하였다. 그 결과, 원지반으로부터 3 m에서는 상이한 양상을 보였으나 나머지 측정에서는 매우 유사한 결과를 보였다. 앞으로 전단파 속도를 이용하여 간극비를 평가할 경우, 다양한 대상지반에 대하여 전단탄성계수와 간극비 간의 상관관계를 활발히 연구할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 2단계 두뇌한국(BK)21 사업의 지원기관 중 대림산업주식회사의 일부 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 박동선(2008), “실트질 세립토의 비배수강도와 전단탄성계수의 상관 관계”, **박사학위논문**, 경희대학교, pp. 66~68.
2. 오상훈, 박동선, 정재우, 박철수, 목영진(2008), “실트의 비배수 전단강도 및 밀도와 전단파속도와의 상관관계”, **한국지반공학회논문집**, 제 24권, 제 5호, pp. 79~87.
3. 최인걸, 박영목(2006), **현장실무를 위한 지반공학**, 구미서관, pp. 226~262.
4. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of Fine grained Soils by Prefabricated Drains", *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 677~682.
5. Hardin, B. O. and Blacl, W.L.(1968), "Vibration modulus of normally consolidated clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 94, No. SM2, pp. 353~369.
6. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.(1972), "Shear modulus and damping in soils: Mesurement and parameter effects", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM6, pp. 667~692
7. Mok, Y.J., Park, D. S., Jung, J. W. and Kim, H. S.(2009), "Spanning static properties of a normally consolidated silt with dynamic stiffness", *Proceeding of international conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering(IS-tokyo2009)*, Tokyo, Japan, pp. 1301~1305(CD-ROM).
8. Jung, J. W., Kim, H. S., Kim, B. C., Park, I. B. and Mok, Y. J.(2008), *Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China(C D-ROM).