

입자-유체 상호거동을 고려한 지진시 포화 모래지반의 밀도 결정

Determination of Density of Saturated Sand Considering Particle-fluid Interaction During Earthquake

김 현 옥¹ Kim, Hyun-Uk

이 세 현² Lee, Sei-Hyun

윤 준 응³ Youn, Jun-Ung

Abstract

The mass density of the medium (ρ) used to calculate the maximum shear modulus (G_{max}) of the saturated ground based on the shear wave velocity is unclear. Therefore, to determine the mass density, a verification formula and five scenarios were established. Laboratory tests were conducted, and the obtained results were compared. The mass density of the medium was assumed to be saturated (ρ_{sat}), wet (ρ_t), dry (ρ_{dry}), and submerged conditions (ρ_{sub}), and the V_s ratios of saturated to dry condition were obtained from each case. Assuming the saturated density (ρ_{sat}), the V_s ratio was consistent with the value from the resonant column test (RCT) results, and the value from the bender element test results was consistent with the wet density assumption (ρ_t). Considering the frequency range of earthquakes, it is concluded that applying the saturated density (ρ_{sat}) is reasonable as in the RCT results.

요 지

전단파 속도를 기반으로 포화 지반의 최대 전단탄성계수를 산정하는데 이용되는 매질의 밀도가 명확하지 않아 이를 결정하고자 검증식을 구성하고, 시나리오를 수립하여 실내 실험결과와 비교하였다. 매질의 밀도는 포화, 습윤, 건조, 수중 밀도 조건으로 가정하였고, 각 경우별 건조지반 전단파속도 대비 포화지반 전단파속도의 비를 산정하였다. 포화 밀도 가정시 전단파속도 비는 공진주 실험 결과에 의한 전단파속도 비와 일치하였고, 습윤 밀도 가정시에는 벤더엘리먼트 실험 결과에 의한 값과 일치하였다. 이는 특성 주파수를 경계로 흡입자와 유체의 거동을 정의하는 Biot(1956)의 이론과 일치하는 결과이며, 일반적으로 고려되는 지진의 주파수 범위를 고려한다면 포화 지반에서는 포화 밀도를 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

Keywords : Mass density, Maximum shear modulus, Particle-fluid interaction, Saturated sand, Site response analysis

1 정회원, 한국수력원자력 중앙연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KHNP CRI, Tel: +82-42-870- 5384, kimhyunuk@khnp.co.kr, Corresponding author, 교신 저자)

2 정회원, 한국원자력안전기술원 원자력검사단 한울규제실 (Member, Principal Researcher, Korea Institute of Nuclear Safety)

3 정회원, 국토안전관리원 기업성장응답센터 (Member, Senior Manager, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지진시 지표와 지층 내 가속도, 변위 응답을 산정하기 위해 지반응답해석을 수행하며 실무에서는 적정 수준의 정확성과 편이성을 고려하여 1차원 파동 전달 이론에 근거한 1차원 전응력 등가선형 해석을 널리 이용하고 있다. 흙은 일반적으로 다른 건설 재료에 비해 상대적으로 간극비가 높기 때문에 함수비에 따라 공학적 특성이 달라진다. 1차원 전응력 등가선형 해석에서 심도별 최대 전단 탄성계수(G_{max})는 지반의 전단파속도(V_s)와 밀도(ρ)에 의해 결정되며, 이 값들 역시 지반 함수비의 영향을 받는다. 포화 지반의 전단파속도의 경우 현장실험을 통해 결정되며, 단위 중량으로는 Proshake User's Manual(1996), Destegul(2004), Arefi(2014)에서와 같이 포화 단위중량을 이용하는 것이 일반적이다. 그러나, 수중 단위중량과 유효구속압에 근거하여 최대 전단 탄성계수를 산정하는 Hardin and Black(1968)의 관계식을 고려한다면, 최대 전단탄성계수 산정시 포화, 습윤, 건조, 수중밀도 중 어떤 값을 사용하는 것이 적절한지에 대해 혼란이 야기될 수 있다. 일례로 Kim et al.(2005)은 공진주 실험(RCT, Resonant Column Test)과 벤더엘리먼트 실험(BET, Bender Element Test)을 통해 건조 상태와 포화 상태 시료의 전단파속도를 측정하고 특성 주파수를 경계로 흙입자와 유체의 거동을 정의하는 Biot(1956a,b)의 이론을 고려하여 최대 전단탄성계수를 산정하였으나, 매질의 밀도 적용에 대한 이론 자체를 검증하지는 않았다. 지반응답해석은 입력변수의 지수의 승수 차이로 인해 전단파속도의 영향을 더 크게 받지만, 밀도에 있어서도 포화 밀도와 수중 밀도를 비교한다면 응답에 대한 밀도의 영향이 크다고 볼 수 있을 것이다. Santamarina et al.(2001)에 의하면 입자로 구성된 흙의 경우, 포화시 고체상인 흙입자와 유체상인 물이 함께 존재하며 동하중 조건에서는 하중 주파수가 커질 때 두가지 다른 상 사이의 관성효과로 인하여 상대 변위가 발생하게 되고 이로 인해 흙입자와 물이 각각 따로 거동할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 포화 지반의 최대 전단 탄성계수 산정에 이용되는 흙의 밀도와 전단파속도를 가정하고 공진주 실험과 벤더엘리먼트 실험에 의한 건조, 포화 지반의 전단파속도 비를 산정하여 입자-유체 상호작용에 대한 이론을 검증하였고 결과적으로 포화 상태의 지반응답해석에 적합한 지반의 밀도를 고찰해 보았다.

2. 포화 지반의 최대 전단탄성계수 산정을 위해 가 정된 밀도와 그 영향

2.1 포화 지반의 밀도에 대한 가정

포화 지반의 최대 전단탄성계수 산정에 이용되는 매질의 밀도를 결정하기 위해 건조한 지반과 포화 지반의 두가지 조건을 고려하였다. 이때, 건조한 지반의 경우는 최대 전단탄성계수 산정을 위한 밀도 값을 논쟁의 여지 없이 건조 밀도로 볼 수 있으므로 대조군으로 고려하였다. 포화 지반의 경우 흙의 밀도 또는 전단파속도 또는 두 가지 모두가 변화하여 최대 전단탄성계수가 변화한다. 본 연구에서는 포화 상태의 지반응답해석에 적합한 지반의 밀도를 찾고자 건조 지반이 포화 지반으로 변화할 때 밀도와 전단파속도의 변화에 대하여 5가지 경우를 고려해 보았다.

첫 번째, 포화 상태 매질의 밀도는 수중 밀도인 ρ_{sub} 로 고려되며, 전단파속도가 변한다.

두 번째, 포화 상태에서 전단파속도는 건조 상태와 동일하다.

세 번째, 포화 상태 매질의 밀도는 건조 밀도인 ρ_{dry} 로 고려되며, 전단파속도가 변한다.

네 번째, 포화 상태 매질의 밀도는 $\rho_{dry} \sim \rho_{sat}$ 범위에 존재하는 습윤 밀도 ρ_t 이며, 전단파속도가 변한다.

다섯 번째, 포화 상태 매질의 밀도는 포화 밀도인 ρ_{sat} 로 고려되며, 전단파속도가 변한다.

2.2 가정된 각 밀도의 타당성 평가를 위한 식 구성

크로스홀 등 현장실험에서는 전단파속도와 매질의 밀도를 이용하여 식 (1)에 따라 지반의 최대 전단탄성계수를 산정한다. 따라서, 식 (1)에 의한 건조 상태와 포화 지반의 최대 전단탄성계수 비율 $G_{max(dry)}/G_{max(sat)}$ 은 식 (2)와 같이 정리될 수 있다. 여기서, ρ_A , $V_{s(A)}$ 와 ρ_B , $V_{s(B)}$ 는 각각 건조 상태와 포화 상태에서의 지반의 밀도와 전단파속도이다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

$$\frac{G_{max(dry)}}{G_{max(sat)}} = \left(\frac{\rho_A}{\rho_B}\right) \left(\frac{V_{s(A)}^2}{V_{s(B)}^2}\right) \quad (2)$$

Hardin and Black(1968)은 지반의 유효응력 의존성을 고려하여 최대 전단탄성계수를 식 (3)과 같이 정의하였

다. 여기서, K 는 무차원계수, P_a 는 대기압, σ'_m 은 평균 유효응력으로 식 (4)와 같이 정의하고, K_0 은 정지 토압계수, σ'_v 은 유효 연직 응력, n 은 구속압 영향지수를 의미하며 본 연구에 이용된 토요라 모래를 비롯하여 일반적인 사질토의 구속압 영향지수는 Iwasaki and Tatsuoka(1977), Kokusho(1980), Park et al.(2002), Choo et al.(2005)의 연구에서와 같이 0.5를 적용한다. 동일한 종류와 상대밀도 조건에서의 흙은 일반적으로 포화도 변화에 따른 계수 K 와 지수 n 의 변화가 없다고 하며, 포화 지반 조건에서 유효 연직응력은 수중 단위중량 $\gamma_{sub} = \rho_{sub} \times g$ 에 의해 계산되므로 $G_{max(dry)}/G_{max(sat)}$ 은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{max} = K P_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

$$\sigma'_m = [(1+2K_0)/3] \sigma'_v \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{G_{max(dry)}}{G_{max(sat)}} &= \left[\frac{\sigma'_m(dry)}{\sigma'_m(sat)} \right]^{0.5} \\ &= \left[\frac{(1+2K_0)/3 \sigma'_v(dry)}{(1+2K_0)/3 \sigma'_v(sat)} \right]^{0.5} = \sqrt{\frac{\rho_{dry}}{\rho_{sub}}} \end{aligned} \quad (5)$$

건조 지반과 포화 지반의 최대 전단탄성계수 비율을 나타내는 식 (2)와 식 (5)를 결합하면 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 여기서, 건조 지반 밀도 $\rho_A = \rho_{dry}$ 이다.

$$\left(\frac{\rho_A}{\rho_B} \right) \left(\frac{V_{s(A)}^2}{V_{s(B)}^2} \right) = \sqrt{\frac{\rho_{dry}}{\rho_{sub}}} \quad (6)$$

건조 지반이 포화 지반으로 변화할 때 지반의 밀도와 전단파속도의 변화에 대한 5가지 경우를 식 (6)을 이용하여 정리하고 그 결과를 $V_{s(B)}/V_{s(A)}$ 비율로 나타내면 Table 1과 같다.

Table 1. Assumptions and ratio of $V_{s(B)}/V_{s(A)}$ results by scenario

No. of scenario	Assumptions	Calculated results based on assumption
1	$\rho_B = \rho_{sub}$	$V_{s(B)}/V_{s(A)} = (\rho_{dry}/\rho_{sub})^{0.25}$
2	$V_{s(B)}/V_{s(A)} = 1$	$\rho_B = (\rho_{dry} \cdot \rho_{sub})^{0.5}$
3	$\rho_B = \rho_{dry}$	$V_{s(B)}/V_{s(A)} = (\rho_{sub}/\rho_{dry})^{0.25}$
4	$\rho_B = \rho_t$	$V_{s(B)}/V_{s(A)} = [(\rho_{dry} \cdot \rho_{sub})^{0.5}/\rho_t]^{0.5}$
5	$\rho_B = \rho_{sat}$	$V_{s(B)}/V_{s(A)} = [(\rho_{dry} \cdot \rho_{sub})^{0.5}/\rho_{sat}]^{0.5}$

Table 2. Physical properties of toyoura sand (Kim et al., 2005)

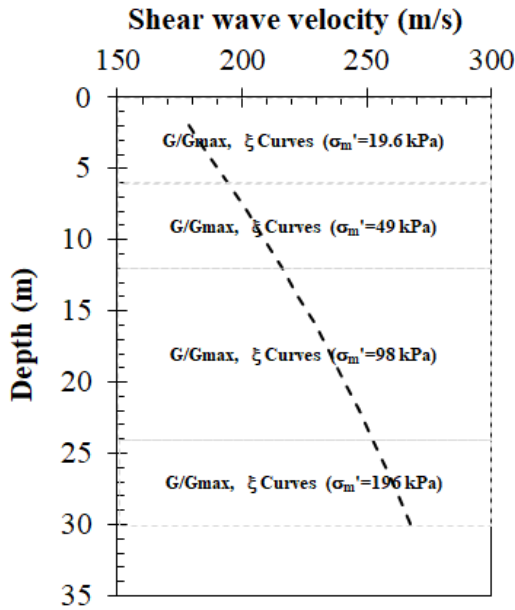
Grain shape	G_s	D_{50} (mm)	e_{max}	e_{min}	C_c	C_u	USCS
Subangular	2.65	0.199	0.982	0.617	1.0	1.29	SP

2.3 각 경우별 가정된 밀도를 이용한 지반 응답 영향 평가

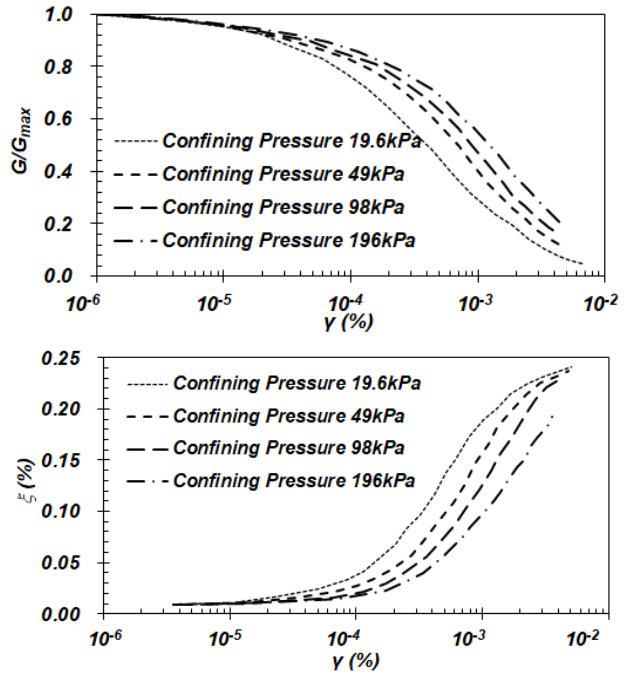
지반의 최대 전단탄성계수 산정에 이용되는 밀도를 수중 밀도에서부터 포화 밀도까지로 고려할 때, 달라지는 지반의 가속도 응답을 평가하기 위해 Kottke and Rathje (2008)가 개발한 상용 프로그램 Strata를 이용하여 1차원 전응력 등가선형 지반응답해석을 수행하였다. 지반 조건으로는 본 연구에서 실험 검증에 수행할 때 이용한 상대밀도 80% 토요라 모래가 30m 깊이로 분포하고 있는 것으로 설정하였다. 본 연구에 이용된 토요라 모래의 기본적인 물성은 Table 2와 같다. 여기서, G_s 는 입자의 비중, D_{50} 은 증량백분율 50% 해당 평균 입경, e_{max} 와 e_{min} 은 각각 최대, 최소 간극비, C_c 는 곡률계수, C_u 는 균등계수, USCS는 통일분류법을 의미한다. 지반응답해석에는 Table 2의 기본적인 물성에 근거하여 값을 명확히 구할 수 있는 포화, 건조, 수중 단위중량을 이용하였고, 각각은 19.4, 15.4, 9.6kN/m³이다.

지반응답해석에 이용된 지반의 전단파속도 주상도와 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max} - \log \gamma$) 및 감쇠비 곡선($\xi - \log \gamma$) 그래프는 Fig. 1과 같다. 여기서 Fig. 1(a)의 심도별 전단파속도 주상도는 본 연구의 실험 검증에 이용된 Kim et al.(2005)의 공진주 실험 결과에 근거하여 작성하였고, Fig. 1(b)는 Kokusho(1980)의 공진주 실험결과를 이용하였다.

지반응답해석에 이용된 지진파는 각각 장주기 성분과 단주기 성분이 우세한 Hachinohe 지진파와 Northridge 지진파로서 Rathje et al.(1998)이 제안한 지진파의 평균주기 T_m 값을 계산하면 각각 0.56초, 0.3초이다. 두 지진파는 토층 하부의 기반암 노두 응답 기준으로 영주기 가속도 0.11g 값을 갖는다. 지반응답해석결과, 평균 주기가 차이가 있는 두 지진파를 사용하였음에도 지층의

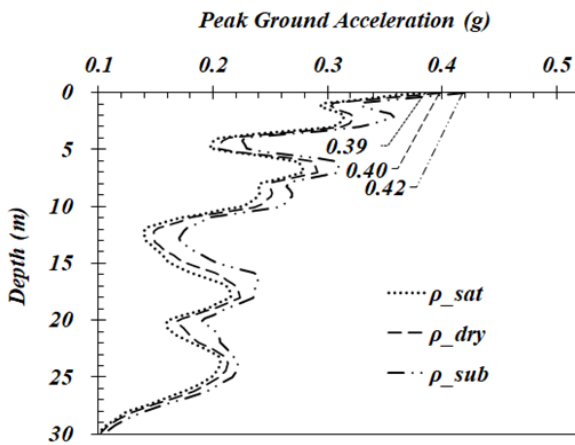


(a) Shear wave velocity–depth relationship

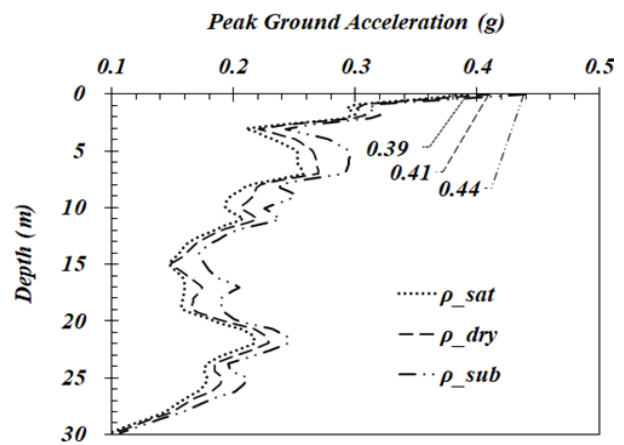


(b) Modulus reduction (G/G_{max}) and damping ratio (ξ) curves

Fig. 1. Shear wave velocity profile and resonant column test results



(a) Hachinohe earthquake



(b) Northridge earthquake

Fig. 2. Site response analysis results by each mass density assumption

전단변형과 이에 따른 깊이별 가속도 분포 양상 및 크기는 유사하였다. Fig. 2(a)의 Hachinohe 지진파는 각 경우별 밀도에 따라 지표면 최대 가속도(PGA, Peak Ground Acceleration)가 0.39~0.42g로 나타났으며, Fig. 2(b)의 Northridge 지진파는 0.39~0.44g로 나타났다. 전체적으로 수중 밀도 적용시 지표면 최대 가속도 값은 포화 밀도를 적용하였을 때의 값에 비해 8~12%의 차이를 보이므로 매질의 밀도는 가속도 응답에 의미 있는 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

3. 이론과 실험적 검증에 의한 포화 지반 밀도 결정

3.1 입자-유체 상호거동에 대한 이론

Biot(1956a,b)은 흙입자와 물 입자의 이 상(Two Phase) 거동의 경계를 정의하기 위해 투수계수 k_h 를 포함하는 특성 주파수(characteristic frequency) f_c 를 식 (7)과 같이 정의하였다. 여기서, n 은 간극률, η 는 유체의 점도, ρ_f 는 유체의 밀도, K 는 절대 투수계수, g 는 중력가속도, k_h 는 투수계수를 의미한다.

$$f_c = \frac{n\eta}{2\pi\rho_f K} = \frac{n\eta}{2\pi k_h} \quad (7)$$

하중 주파수(f)가 $0.1f_c$ 보다 작은 경우에는 흙입자와 물이 함께 거동하여 저주파수 전단파속도($V_{s(0)}$)를 나타내고, 하중 주파수가 f_c 보다 훨씬 큰 경우에는 흙입자와 물이 각각 따로 거동하는 고주파수 전단파속도($V_{s(\infty)}$)를 나타내는데, 흙의 전단파속도가 400m/sec 보다 작고 구조적 체적강성이 흙입자의 체적강성 보다 훨씬 작은 조건에서 포화된 흙의 고주파수 전단파속도와 저주파수 전단파속도를 Biot-Gassmann의 점근해(asymptotic solution)로 제시하였다. 먼저, $f < 0.1f_c$ 조건에서는 분모로 흙입자와 물의 밀도를 모두 고려하여 저주파수 전단파속도를 식 (8)과 같이 결정한다. 여기서, G_{sk} 는 흙 구조의 전단강성, ρ_g 는 흙입자의 밀도를 나타낸다.

$$V_{s(0)} = \sqrt{\frac{G_{sk}}{(1-n)\rho_g + n\rho_f}} \quad (8)$$

$f \gg f_c$ 조건에서의 고주파수 전단파속도 $V_{s(\infty)}$ 는 흙입자와 물의 이상 거동을 고려하여 식 (9)에 의해 결정된다. 여기서, α 는 비틀림 계수(tortuosity factor)로 구형입자 가정시Berryman(1981)의 제안에 따라 간극률을 이용하여 $\alpha = [1 + n]/2n$ 과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{V_{s(\infty)}}{V_{s(0)}} &= \sqrt{\frac{(1-n)\frac{\rho_g}{\rho_f} + n}{(1-n)\frac{\rho_g}{\rho_f} + n(1-\frac{1}{\alpha})}} \\ &= \sqrt{\frac{(1-n)\rho_g + n\rho_f}{(1-n)\rho_g + n\rho_f(1-\frac{1}{\alpha})}} \end{aligned} \quad (9)$$

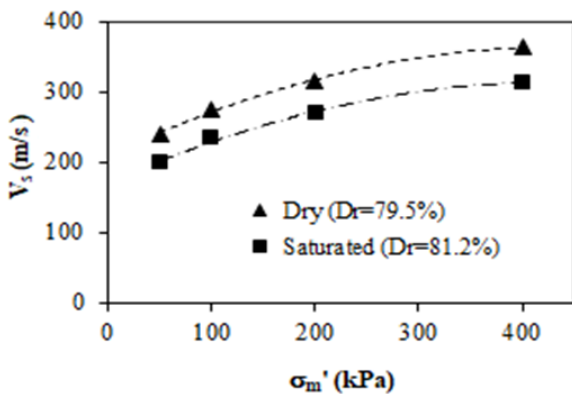
고주파수 전단파속도와 저주파수 전단파속도와와의 비율로 정의되는 식 (9)는 저주파수 전단파속도에 대한 식 (8)을 고려하여 고주파수 전단파속도만의 식 (10)으로 정의할 수 있다.

$$V_{s(\infty)} = \sqrt{\frac{G_{sk}}{(1-n)\rho_g + n\rho_f(1-\frac{1}{\alpha})}} \quad (10)$$

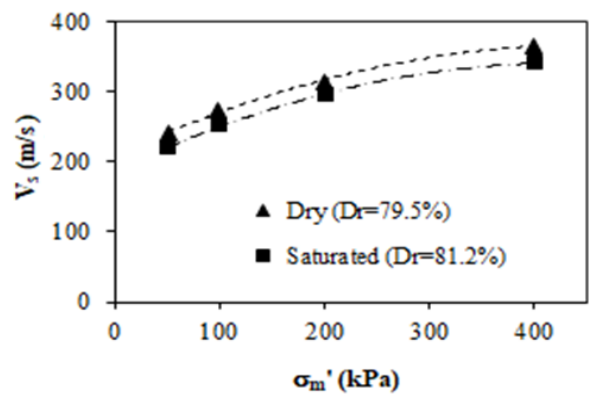
3.2 실내실험에 의한 건조 지반과 포화 지반의 전단파속도 변화 분석

Kim et al.(2005)은 CO₂ 및 물 순환을 통해 포화가 가능하게 만들어진 Stokoe식 공진주 시험기에 벤틀리먼트 장비를 부착하여 건조/포화조건 모두 동일한 토요라 모래에 대해 공진주 실험과 벤틀리먼트 실험을 수행하였고, 각 실험방법과 포화도에 따른 흙 입자의 전단파속도의 차이를 확인하였다. 몰드내 입자의 자유낙하를 조절하여 다양한 상대밀도를 조성한 해당 실험연구와 관련하여 본 연구에서는 상대밀도가 비교적 높은 시료의 결과를 이용하였다. 건조 시료의 상대밀도는 79.5%이고 포화 시료의 상대밀도는 81.2%로 일부 차이는 존재하나, 그 정도가 공학적 특성의 차이를 보일 수준은 아니므로 본 연구에서는 두 시료의 상대밀도 조건을 80%로 동일하게 간주하였다. 각 실험에서 평균 유효 구속압은 50, 100, 200, 400kPa이며, 구속압 조건에 따른 건조, 포화 시료의 전단파속도는 아래의 Fig. 3과 같다.

Fig. 4에서와 같이 동일한 심도에서 포화도 변화에 따른 전단파속도의 변화를 평가하기 위해 먼저, 건조 지반과 포화 지반에서의 평균 유효 구속압-전단파속도 관계식



(a) Shear wave velocity results from RCT



(b) Shear wave velocity results from BET

Fig. 3. Shear wave velocity – confining pressure relationships (Kim et al., 2005)

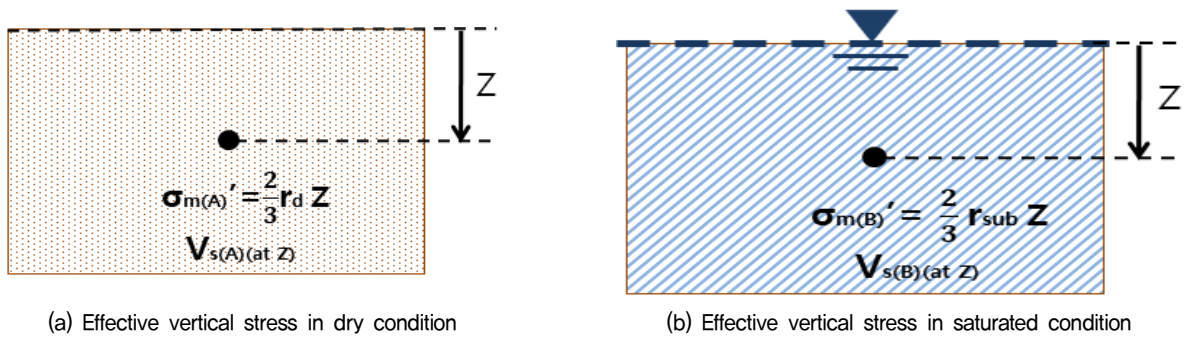


Fig. 4. Effective vertical stress at same depth under dry and saturated conditions

을 도출하였고, 건조 지반의 평균 유효 연직응력($\sigma_{m(A)'}'$)을 기준으로 동일한 심도에서의 포화 지반의 평균 유효 연직응력($\sigma_{m(B)'}'$)을 계산한 다음, 건조 지반 유효 연직응력에서의 전단파속도($V_{s(A)}$)와 포화 지반 유효 연직응력에서의 전단파속도($V_{s(B)}$)를 구하여 이들을 비교하였다. 정지토압계수 $K_0=0.5$ 를 고려하면, 건조 지반에서 심도 Z 지점은 $Z = \alpha_v(A)' / \gamma_d = 1.5\sigma_{m(A)'}' / \gamma_d$ 가 되고 전단파속도는 $V_{s(A)}$ 이다. 지반이 포화되면 동일한 심도 Z 에서의 평균 유효 구속압 $\sigma_{m(B)'}' = 0.67\gamma_{sub}Z$ 가 되고 전단파속도는 $V_{s(B)}$ 로 변한다. 여기서, γ_d 는 지반의 건조 단위중량, γ_{sub} 는 지반의 수중 단위중량이다.

아래의 Table 3은 공진주 실험 결과와 벤더엘리먼트 실험 결과로부터 얻어진 건조 지반과 포화 지반의 $V_{s(B)}/V_{s(A)}$ 비율이다. 각 실험방법에 따라 명확한 값의 차이를 보이지만, 구속압 변화에 따른 비율은 큰 차이를 보이지 않았다.

3.3 실험결과에 근거한 이론 검증 및 고찰

Table 4는 Table 1에 제시된 각 경우에 대해 계산된 $V_{s(B)}/V_{s(A)}$ 비를 공진주 실험과 벤더엘리먼트 실험에 의한 $V_{s(B)}/V_{s(A)}$ 비와 비교한 결과를 나타낸다.

구속압 변화에 따른 시료의 미세한 간극율 변화를 고려하면 토요라 모래의 투수계수는 $0.018 \sim 0.02 \text{cm/s}$ 범위에 있으며 식 (8)에 의해 계산된 특성 주파수는 $3.2 \times 10^3 \sim 3.4 \times 10^3 \text{Hz}$ 가 된다. 토요라 모래는 입도분포가 나쁘기 때문에 자연적인 모래에 비해 투수계수가 크므로 자연적인 모래의 특성 주파수는 토요라 모래보다 크다. 본 연구에서 수행된 공진주 실험에서는 시료의 공진 주파수 즉, 하중 주파수(f)가 $58 \sim 91.4 \text{Hz}$ 범위로 $f < 0.1f_c$ 조건이 되므로 이론적으로는 흡입자와 물이 함께 거동하게 된다. 이와는 달리 벤더엘리먼트실험에서는 하중 주파

Table 3. Ratio of shear wave velocity of dry and saturated ground by each test method

Test	Dry condition		Saturated condition		Ratio of $V_{s(B)}/V_{s(A)}$	
	s_m^1 (kPa)	V_s (m/s)	s_m^1 (kPa)	V_s (m/s)		
RCT	400	360.5	249.1	285.1	0.79	(Average) 0.77
	200	317.0	124.5	240.0	0.76	
	100	271.2	62.3	208.2	0.77	
BET	400	357.9	249.1	316.8	0.89	(Average) 0.85
	200	315.8	124.5	264.0	0.84	
	100	270.8	62.3	228.4	0.84	

Table 4. Comparison of $V_{s(B)}/V_{s(A)}$ ratio between the results based on each assumption and test results

No. of scenario	Calculated $V_{s(B)}/V_{s(A)}$ based on each assumption	$V_{s(B)}/V_{s(A)}$ from test results	
		RCT	BET
1	1.13	(Average) 0.77	(Average) 0.85
2	1.00		
3	0.89		
4	0.84		
5	0.79		

수가 0.6~15kHz 범위이며 대부분 11kHz 이상의 고주파수 영역에서 전단파속도가 측정되므로 $f \gg f_c$ 조건이 되어 이론적으로는 흙입자와 물이 따로 거동하게 된다.

포화 상태 매질의 밀도를 포화 밀도로 고려한 경우에는 식 (6)에 의한 $V_{S(B)}/V_{S(A)}$ 비와 공진주 실험 결과에 의한 $V_{S(B)}/V_{S(A)}$ 비가 유사하게 산정되었고, 습윤밀도로 고려한 경우에는 식 (6)에 의한 $V_{S(B)}/V_{S(A)}$ 비가 벤더엘리먼트 실험 결과에 의한 $V_{S(B)}/V_{S(A)}$ 비와 유사하게 산정되었다. 따라서, 식 (6)에 의한 값을 공진주 실험과 벤더엘리먼트 실험 결과에 의한 값과 비교한 결과, 특성 주파수를 경계로 흙입자와 유체의 상호거동을 정의하는 Biot (1956a,b)의 이론은 합당한 것으로 판단된다.

지진하중의 경우, 일반적으로 고려하는 하중 주파수 범위는 0.1~100Hz 수준이므로 일반적인 모래 지반의 특성 주파수와 비교 할 때 $f < 0.1f_c$ 조건이 되어 흙입자와 물이 함께 거동하게 된다. 따라서, 1차원 전응력 등가선형 해석시, 포화 상태에서의 매질의 밀도는 포화 밀도로 적용하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 1차원 전응력 등가선형 지반응답해석의 입력변수인 심도별 최대 전단 탄성계수와 관련하여 현장실험에 의해 값이 결정되는 전단파속도와는 달리 흙입자와 유체의 상호 작용을 고려하여 연구자가 판단하고 결정해야 하는 매질의 밀도에 대해 본연구에서 고안된 평가식과 실내 실험결과에 근거하여 어떠한 값을 적용하는 것이 적절한지를 평가해 보았다. 매질의 밀도는 지수의 승수가 전단파속도에 비해 낮아 가속도 응답에 대한 영향이 상대적으로 작을 수 있지만, 평가에 앞서 이루어진 1차원 전응력 등가선형 지반응답해석 결과, 수중 밀도 적용시 지표면 최대 가속도 값은 포화 밀도를 적용하였을 때의 값에 비해 8~12% 높게 산정되었기 때문에 매질의 밀도는 신중하게 결정될 필요가 있는 것으로 나타났다. 건조 상태를 기준으로 포화 상태 매질의 밀도를 평가하기 위해 본 연구에서 고안된 평가식 식 (6)은 밀도와 전단파속도 제곱에 의한 최대 전단 탄성계수 산정식과 Hardin and Black(1968)에 의한 평균 유효구속압 기반 최대 전단탄성계수 산정식을 연립하여 구성하였다. 포화상태로 변화시 매질의 밀도는 포화 밀도, 습윤 밀도, 건조 밀도, 수중 밀도의 4가지 경우 중 하나인 것으로 가정하였다. 포화 지반에서 적합한 매

질의 밀도로 포화 밀도를 가정한 경우에는 평가식으로 계산한 전단파속도 비가 공진주 실험 결과에 의한 값과 일치하였고, 습윤 밀도를 가정한 경우에는 평가식으로 계산한 전단파속도 비가 벤더엘리먼트 실험 결과에 의한 값과 일치하였다. 이는 특성 주파수를 경계로 하중 주파수가 큰 경우에는 흙입자와 유체가 따로 거동하고, 하중 주파수가 작은 경우에는 함께 거동한다는 Biot(1956a)의 이론과 일치하는 결과이다. 일반적인 자연 모래지반과 지진에서 고려하는 주파수 범위가 $f < 0.1f_c$ 조건임을 고려할 때, 흙과 물은 함께 거동할 것이므로 포화 지반 전응력 등가선형 지반응답해석시 포화 밀도를 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 단, 이는 흙입자와 유체의 상호 거동 특성만을 고려한 것이며, 과잉간극수압 발생과 소산의 영향을 고려한 것은 아니기 때문에 지반응답해석시 상대밀도가 낮아 외력에 의해 급격한 체적 변화가 예상되는 경우에는 과잉간극수압의 발생과 소산 양상을 고려할 수 있는 유효응력해석을 수행해야 할 것이다.

참고문헌 (References)

1. Albert R. Kottke, Ellen M. Rathje, Technical Manual for Strata, 2008.
2. Arefi, M. (2014), "Ground Response Evaluation for Seismic Hazard Assessment", Ph.D. Thesis, Dipt. Civil and Natural resources engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
3. Berryman, J. G. (1981), "Elastic Wave Propagation in Fluid-saturated Porous Media", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.69, pp.416-424.
4. Biot. M. (1956a), "Theory of Propagation of Elastic Waves in Fluid-saturated Porous Solid. I. Low Frequency Range", *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, pp.168-178.
5. Biot. M. (1956b), "Theory of Propagation of Elastic Waves in Fluid-saturated Porous solid. II. High Frequency Range", *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, pp.179-191.
6. Choo, Y. (2005), "Dynamic Deformation Characteristics of Sands under Various Drainage Conditions", *Journal of KGS*, Vol.21, No.3, pp.27-42.
7. Destegul, Umut. (2004), Sensitivity analysis of soil site response modeling in seismic microzonation for Lalitpur, Nepal. International Institute for Geo-Information science and earth observation enschede, The Netherlands.
8. Hardin, Bobby and Black, WI. (1968), "Vibration Modulus of Normally Consolidated Caly", *J. Soil Mech. Found. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 94.10.1061/JSFEAQ.0001100.
9. Iwasaki, T. and Tatsuoaka, F. (1977), "Effect of Grain Size and Grading on Dynamic Shear Moduli of Sands", *Soils and Foundations*, Vol.17, No.3, pp.19-35.
10. Kim, D.S., Yun, J.U., Lee, S.H., and Choo, Y.W. (2005), "Measurement of Gmax of Sands using Bender Element in Resonant Column

- and Torsional Shear Equipment”, *Journal of KGS*, Vol.21, No.10, pp.17-25.
11. Kokusho, T. (1980), “Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range”, *Soils and Foundations*, Vol.20, No.2, pp.45-60.
 12. Park, D. (2002), “A Suggestion of an Empirical Equation for Shear Modulus Reduction Curve Estimation of Sandy Soils”, *Journal of KGS*, Vol.18, No.3, pp.127-138.
 13. Proshake User’s Manual (1996), Ground response analysis program, Version 2.0. Edupro Civil systems, Inc. Sammamish, Washington.
 14. Rathje, E., Abrahamson, N., and Bray, J. (1998), “Simplified Frequency Content Estimates of Earthquake Ground Motions”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124, pp.150-159.
 15. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves*. John Wiley & Sons, LTD, pp.238-282.

Received : August 23rd, 2022

Revised : September 13th, 2022

Accepted : September 13th, 2022