

비닐스트립-시멘트로 보강된 느슨한 중간 모래의 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비 곡선 산정식 제안

Proposal of Predictive Equations of Normalized Shear Modulus and Damping Ratio Curves for Loose Medium Sand Reinforced by Vinyl Strip-cement

김 종 민¹ Kim, Jong-Min

Abstract

In this study, predictive equations of the normalized shear modulus and the damping ratio curves for loose medium sands reinforced by vinyl strip-cement are proposed. Based on the results of a series of resonant-column tests (Yu, et al., 2018) conducted under the confining stresses of 15, 30, 60 kPa on sand specimens prepared with 40% relative density and reinforced by various contents of vinyl strip (0.0, 0.1, 0.3, 0.4%) and cement (0, 1, 2%), the equations estimating the normalized shear modulus and the damping ratio are proposed as functions of reinforcing conditions and confining stresses. The comparison between predicted and measured values of shear modulus and damping ratio shows a good agreement and the reliability of proposed predictive equations are validated by high R²-value greater than 0.9. Therefore, it is expected that the time and the cost required for constructing the normalized shear modulus and the damping ratio curves will be much reduced by using proposed equations in this study since those can easily be estimated without conducting resonant-column test.

요 지

본 연구에서는 비닐스트립-시멘트로 보강된 느슨한 중간 모래의 정규화 전단탄성계수 및 감쇠비 산정식을 제안하였다. 상대밀도 40%의 모래시편을 다양한 비닐스트립 혼합비(0.0, 0.1, 0.3, 0.4%)와 시멘트 혼합비(0, 1, 2%)로 보강한 후 15, 30, 60kPa의 구속압조건에서 수행한 공진주시험 자료(Yu, et al., 2018)를 분석하여 정규화 전단탄성계수와 감쇠비 산정식을 보강조건과 구속압조건에 함수로 제안하였다. 제안된 산정식을 적용한 결과와 시험결과를 비교한 결과 결정계수 0.9 이상의 높은 신뢰도를 보여주었다. 본 연구에서 제안된 산정식을 이용하면 비닐스트립-시멘트로 보강된 느슨한 중간모래의 전단탄성계수와 감쇠비를 공진주시험 수행없이 간단히 산정할 수 있어 시간과 비용이 절감될 것으로 기대한다.

Keywords : Damping ratio curve, Loose medium sand, Normalized shear modulus reduction curve, Resonant-column test, Vinyl strip-cement reinforcement

¹ 정회원, 세종대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ., Tel: +82-2-3408-3293, Fax: +82-2-3408-4332, Jongmin@sejong.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

비닐은 플라스틱과 함께 일상생활에서 늘 만나게 되는 필수적인 물질로 각종 포장재, 방수재, 농업용 하우스 등에 이용되어 인류 삶의 질을 높여왔다. 이러한 유용성에도 불구하고 비닐의 사용 후 처리문제는 전 세계적인 환경문제가 되고 있다. 폐비닐의 경우, 500년 이상으로 추정되는 긴 부패시간으로 매립처분은 효과가 없으며 소각처리 시에는 심각한 대기오염 문제가 발생한다. 따라서 폐비닐을 재활용하는 연구와 기술개발이 다양한 분야에서 이루어지고 있으며, 지반공학 분야에서는 주로 지반보강재료의 적용성을 연구하고 있다. 관련된 기존 연구로는 폴리에틸렌수지의 비닐하우스용 필름(Kim et al., 2000) 혹은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 비닐(Chebet et al., 2014)을 스트립 형태로 잘라 지반보강재료로 적용하여 투수성, 강도특성, 하중지지력을 분석한 연구가 대표적이다. 또한 Kim(2017)은 하우스용 폐비닐로 만든 골재를 아스콘에 적용한 연구를 수행하였다. 최근에는 농촌에서 하우스용 필름으로 많이 사용되는 저밀도 폴리에틸렌(LDPE) 비닐을 스트립 형태로 잘라 상대밀도 40%와 60%인 중간 모래(medium sand)의 보강재료로 적용하여 정적 및 동적거동을 분석한 연구가 수행된 바 있다(Yu et al., 2018). 이렇듯 저밀도, 저중량, 고인장력 등의 특성을 지닌 폴리에틸렌 비닐은 지반의 강도증가를 위한 보강재료로서의 적용성이 기존연구를 통해 입증되었으나, 제작비용이 저렴한 스트립 형태로 적용된 사례는 상대적으로 드문 실정이다(Phanikumar, 2011). 반면 유사한 성상의 HDPE 플라스틱을 스트립 형태의 지반보강재료로 적용한 연구는 상대적으로 활발히 진행되어 왔으며 기초지반 및 노상토의 지지력을 향상시킨 활용사례가 있다(Consoli et al., 2003; Venkatappa et al., 2004). 폴리에틸렌 비닐은 저비용이며 재활용 비닐의 적용도 가능하여 시멘트와 혼용할 경우 적은 비용으로 보강효과를 더욱 개선시킬 수 있다(Ahmed, 2012). 본 연구에서는 전술한 Yu et al.(2018)의 연구결과 중 동적거동 분석에 이용된 공진주시험 결과에 대한 분석을 통해 비닐스트립-시멘트로 보강된 모래시편의 전단탄성계수와 감쇠비를 추정할 수 있는 함수식을 제안하고자 한다. 중간~느슨한 양입도의 모래를 대상으로 한 Yu et al.(2018)의 연구에서 비닐스트립-시멘트의 혼합 보강으로 인한 일축압축강도 증가율은 무보강 대비 2.2~2.8이었고 비닐스트립만의 영향으로도 1.2~1.3배 증가하는 보

강효과를 확인하였으며, 본 연구에서는 동적보강효과에 대해 분석하고자 한다.

정규화 전단탄성계수 감소곡선은 쌍곡선(hyperbolic) 함수를 기본형으로 하며, 함수식 제안에 관한 기존 연구는 다음과 같다. Rollins et al.(1998)은 자갈의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 산정식을 제안하였다. 정규화 전단탄성계수 감소곡선 산정식이 전단탄성계수 뿐만 아니라 전단변형률도 기준변형률(γ_r , reference strain)로 정규화한 형태인데 반해 Rollins는 정규화하지 않은 전단변형률의 함수로 전단탄성계수비를 산정하는 식을 제안하였다. Oztoprak et al.(2013)은 광범위한 기존 실험 결과들을 수집한 데이터베이스 분석을 통해 수정 쌍곡선(modified hyperbolic) 산정식을 제안하였다. Zhou et al.(2017)은 사력(rockfill)재에 대해 power-power 함수 형태의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 산정식을 제안하였으나, 산정식의 계수값에 따라 쌍곡선 형상을 벗어날 수 있는 한계점이 있다. Araei et al.(2017)은 하중주파수를 고려한 산정식을, Wang et al.(2019)은 재활용 고로슬래그의 정규화 전단탄성계수 감소곡선 산정식을 제안하였다. 반면 감쇠비 곡선은 역쌍곡선 함수를 기본형으로 하는데, 정규화 전단탄성계수 감소곡선에 비해 산정식 제안에 관한 기존 연구가 상대적으로 부족한 편이다. 전술한 전단탄성계수 감소곡선 산정식의 기존연구에서 언급한 Rollins et al.(1998), Araei et al.(2017) 등이 감쇠비곡선 산정식을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 비닐스트립-시멘트로 보강된 모래시편에 대한 Yu et al.(2018)의 공진주 시험 결과를 이용하여 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선 산정식을 보강조건(비닐스트립 혼합비와 시멘트 혼합비)과 구속압조건의 함수식으로 제안하였다. 제안된 식을 이용하면 공진주시험을 수행하지 않고도 비닐스트립-시멘트로 보강된 모래지반의 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선을 간단히 추정할 수 있으므로 시험에 요구되는 비용과 시간을 절감하는 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

2. 분석대상의 재료조건과 시험조건

본 연구에서 분석한 비닐스트립-시멘트 보강 모래시편의 재료조건과 공진주시험용 시편조건은 Yu et al.(2018)에 자세히 기술되어 있으며 본 논문에서는 기본적인 사항만을 정리하였다. Table 1은 보강대상인 흙과 보강재

Table 1. Material properties (Yu et al., 2018)

Soil	Type	Weathered granite soil
	Classification (USCS)	SW
	Specific gravity	2.66
Vinyl strip	Type	Low density polyethylene (LDPE)
	Density (g/cm ³)	0.917
	Tensile strength (N/cm ²)	1760
	Elongation (%)	350
	Size (thickness×width×length)	0.1mm×3mm×6mm
Cement	Type	Normal portland cement

Table 2. Conditions of resonant-column test (Yu et al., 2018)

Specimen	Relative density (%)	40
	Vinyl strip content (%)	0.0, 0.1, 0.3, 0.4
	Cement content (%)	0, 1, 2
	Curing time (day)	28
Test	Confining stress (kPa)	15, 30, 60
	Loading frequencies (Hz)	0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10

인 비닐스트립, 시멘트의 재료조건을 정리한 것이다.

전단탄성계수와 감쇠비 측정을 위한 공진주시험의 시편조건과 시험조건은 Table 2와 같다. Table 2의 비닐스트립 혼합비(V_c , vinyl strip content)와 시멘트 혼합비(C_c , cement content)는 모두 중량비이다.

Table 2에서 보듯이 본 연구에서는 다양한 보강조건과 구속압조건에 대한 총 36개 공진주시험 자료를 분석하였다. 구속압을 가한 상태에서 진동주파수를 13단계로 증가시켜가며 각 주파수 단계마다 전단탄성계수와 감쇠비를 측정하고 구속압을 순차적으로 증가시키며 가진과정을 반복하는 다단계 시험방식으로 진행된 공진주시험 결과(Yu et al., 2018)를 본 연구에 적용하였다.

3. 전단탄성계수 감소곡선

3.1 정규화 전단탄성계수 감소곡선 산정식 제안

정규화 전단탄성계수 감소곡선을 모사하기 위해서는 Hardin et al.(1972)이 제안한 쌍곡선 모델(hyperbolic model)이 가장 널리 사용된다. 본 연구에서는 비닐스트립-시멘트로 보강된 모래시편의 전단탄성계수 감소곡선의 함수식을 제안하기 위해 조립토(Araci et al., 2017; Zhou et al., 2017)와 보강토(Liao et al., 2013)에 대한 전단탄성계수 감소곡선의 모사에 적합한 것으로 알려진 수정 쌍곡선 모델(Darendeli, 2001)을 적용하였으며,

기본식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^\alpha} \quad (1)$$

여기서 G =전단변형률에 따른 전단탄성계수, G_0 =최대전단탄성계수, γ =전단변형률, γ_r =기준 전단변형률(reference shear strain), α =곡선조정계수

식 (1)은 2계수 모델로 γ_r 은 $G/G_0=0.5$ 에 해당하는 전단변형률이고 α 는 시험결과에 곡선형상을 맞추기 위한 조정계수이다. 본 연구에서는 다양한 보강조건과 구속압조건으로 수행한 36개 시편에 대한 공진주시험 결과로 얻어진 전단탄성계수 측정값에 대해 식 (1)을 기반으로 회귀분석을 실시하여 γ_r 과 α 를 추정하였다. 전단탄성계수를 최대전단탄성계수로 정규화하면 구속압의 영향은 무시할 수 있을 만큼 미미해지며, 따라서 γ_r 과 α 는 보강조건의 영향만을 받게 된다. 보강조건에 따른 γ_r 과 α 추정값을 Table 3에 정리하였다. 추정값을 식 (1)에 적용하여 계산된 정규화 전단탄성계수를 36개 시험 측정값과 비교한 결과, 결정계수 (R²)의 평균값은 0.965, 최소값은 0.933으로 매우 높은 신뢰도를 보여주었다.

Table 3에서 보듯이 보강조건이 강화될수록, 즉 V_c 와 C_c 가 증가할수록 γ_r 은 증가하는 반면 α 는 반대의 경향

을 보임을 알 수 있다. 이러한 경향을 바탕으로 Table 3의 추정값에 대한 회귀분석을 수행하여 보강조건에 따른 γ_r 과 α 값의 산정식을 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$\gamma_r = 0.024(C_c)^{1.962} + 0.116(V_c)^{0.966} + 0.032 \quad (2a)$$

$$\alpha = 0.058(C_c - 3.149)(V_c - 1.006) + 0.549 \quad (2b)$$

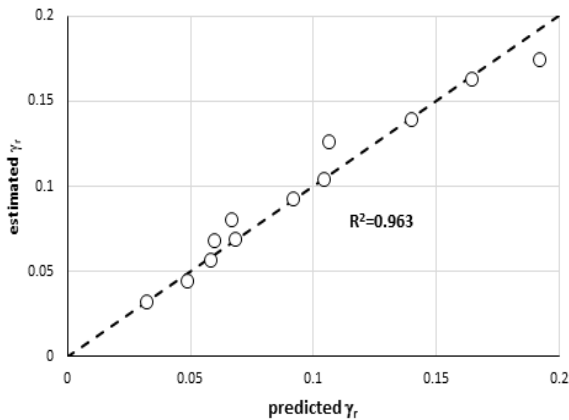
여기서 C_c , V_c , γ_r 의 단위는 모두 %

Fig. 1은 식 (2)에 의해 산정된 γ_r , α 값과 시험결과로부터 추정된 Table 3의 γ_r , α 값을 비교한 것으로 두 계수 모두 0.963과 0.937의 높은 결정계수를 보여주고 있다.

따라서 식 (2)를 식 (1)에 적용하면 보강조건에 따른

Table 3. Estimated values of coefficients γ_r and α

C_c (%)	V_c (%)	γ_r (%)	α
0	0.0	0.032	0.754
	0.1	0.049	0.686
	0.3	0.060	0.678
	0.4	0.067	0.665
1	0.0	0.058	0.684
	0.1	0.068	0.652
	0.3	0.092	0.640
	0.4	0.104	0.631
2	0.0	0.106	0.618
	0.1	0.140	0.606
	0.3	0.164	0.595
	0.4	0.191	0.589



(a) Reference shear strain, γ_r

정규화 전단탄성계수 감소곡선을 도출할 수 있다. 본 연구에서 분석한 공진주시험 조건(Table 2)에서의 정규화 전단탄성계수 시험결과와 제안 함수식을 적용하여 산정된 감소곡선을 $C_c=0\%$, 1% , 2% 인 경우로 분류하여 Fig. 2에 도시하였다.

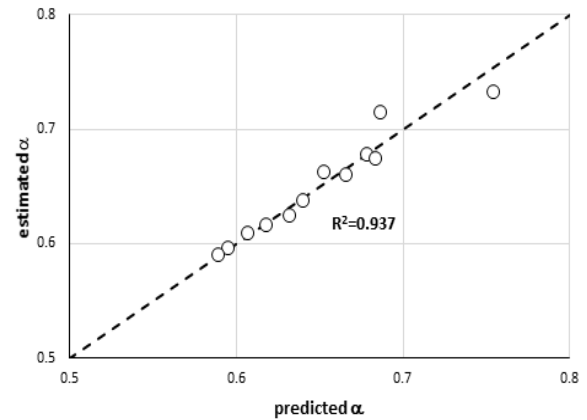
Fig. 2의 시험 측정값과 함수식 산정값을 비교·분석한 결과, 결정계수는 0.9 이상($R^2=0.908\sim 0.983$)으로 산정 함수식의 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

정규화 전단탄성계수 감소곡선 함수식 (1)에 최대전단탄성계수를 곱해주면 전단탄성계수(G)와 전단변형률(γ)의 관계를 나타내는 전단탄성계수 감소곡선을 얻게 된다. 최대전단탄성계수는 실내 혹은 현장시험을 통해 획득하거나 경험식을 이용하여 산정할 수 있다. 비닐스트립-시멘트 혼합 모래시편에 대한 최대전단탄성계수 산정식은 이미 제안된 바 있으며(Yu et al., 2018의 식 (2)), 해당 제안식에 본 연구에서 분석한 시험조건(상대 밀도=0.4, 간극비=0.96, 양생기간=28일)을 적용하면 식 (3)과 같은 비닐스트립-시멘트로 보강된 느슨한 중간 모래의 최대전단탄성계수 산정식을 도출할 수 있다.

$$G_0 = \frac{62(\sigma_c)^{0.104}}{0.007V_c + 2.378} + 17.379(C_c)^{0.736}; R^2=0.981 \quad (3)$$

여기서 σ_c =구속응력(kPa), G_0 는 MPa, C_c 와 V_c 는 %

따라서 식 (1), (2), (3)을 연계하면 실무에서 필요한 보강조건과 구속압조건에 따른 전단탄성계수 감소곡선을 산정할 수 있다.



(b) Curve fitting parameter, α

Fig. 1. Comparison between predicted and test-estimated coefficients for Eq. (1)

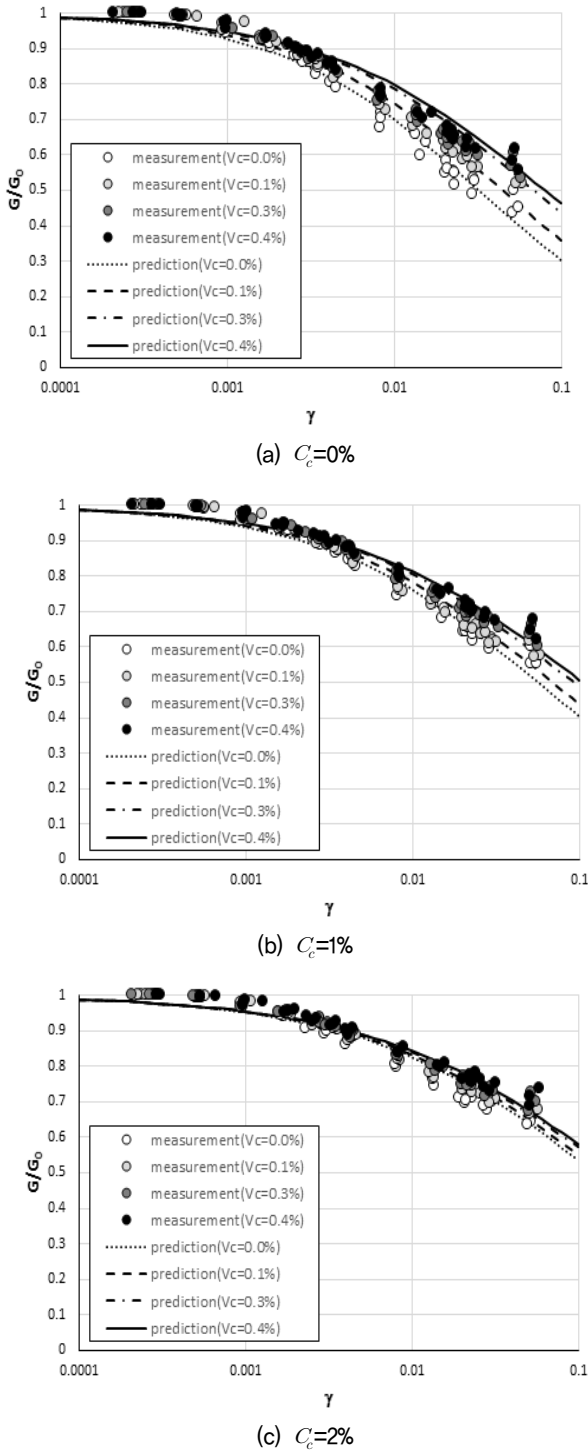


Fig. 2. Predicted normalized shear modulus reduction curve versus measurements

3.2 정규화 전단탄성계수 감소곡선 산정식에 의한 보강 효과 분석

Fig. 3은 제안된 정규화 전단탄성계수 감소곡선 함수식을 $C_c=0\%$, 1% , 2% 인 경우에 대해 전단변형률 $0.0001\% \sim 10\%$ 까지 확장·적용하여 도시한 것이다.

Fig. 3에서 좌측의 곡선은 $G/G_0 - \gamma$ 의 관계를 그리고 우측의 곡선은 전단변형률을 기준변형률로 정규화한 $G/G_0 - \gamma/\gamma_r$ 의 관계를 보여주고 있다. $G/G_0 - \gamma$ 곡선을 보면 C_c 가 동일한 경우, V_c 가 증가할수록 정규화 전단탄성계수가 증가하는 현상을 잘 반영하고 있다. 또한 같은 곡선에서 C_c 가 증가할수록 비닐스트립에 의한 보강효과가 감소하는 경향을 보여주는데 이는 C_c 가 증가할수록 시멘트에 의한 보강효과가 지배적이 되어 비닐스트립의 영향이 상대적으로 감소하여 발생하는 현상을 반영하는 것으로 판단된다. 반면 $G/G_0 - \gamma/\gamma_r$ 곡선은 V_c 와 무관하게 동일한 C_c 에서는 하나의 곡선으로 수렴하는 양상을 보인다. 이는 V_c 증가에 따른 기준변형률 (γ_r)의 증가가 주원인으로 판단된다. Table 3과 식 (2)에서 보듯이 V_c 가 증가할수록 기준변형률(γ_r)이 증가하고 따라서 정규화된 전단변형률 γ/γ_r 은 감소하여 곡선이 좌측으로 이동하게 되는 반면 곡선조정계수(α)는 감소하여 곡선이 완만해지나 그 영향은 Table 3에서 보듯이 상대적으로 미미한 편이다.

비닐스트립의 영향이 본 연구에서 제안한 정규화 전단탄성계수 산정식에 반영되는 양상을 살펴보기 위해, 동일한 C_c 조건에서 비닐스트립이 없는 경우에 대한 있는 경우의 정규화 전단탄성계수 변화비 $R_{G/G_0} (= \frac{(G/G_0)_{V_c \neq 0}}{(G/G_0)_{V_c = 0}})$ 를 분석하였다. Fig. 4는 전단변형률과 R_{G/G_0} 의 관계를 비닐스트립 혼합비 및 시멘트 혼합비에 따라 도시한 것이다.

Fig. 4에서 보듯이 산정식에 의한 정규화 전단탄성계수 변화비는 1 이상이며 전단변형이 진행될수록 증가하는 경향을 보여 전단저항에 의한 비닐스트립의 보강효과를 반영하고 있다. 전단변형률 10%에서 최대 2.7배 ($C_c=0\%$, $V_c=0.4\%$), 최소 1.09배 ($C_c=2\%$, $V_c=0.1\%$) 증가하는 것으로 산정되었으나, 이는 공진주시험의 변형률 범위를 훨씬 상회하는 대변형률에서의 증가율로서 파괴가 발생하지 않는다는 전제에서의 예측값이다. 공진주시험의 일반적인 최대 변형률인 0.1%에서의 R_{G/G_0} 를 살펴보면 최대 1.53 ($C_c=0\%$, $V_c=0.4\%$), 최소 1.03 ($C_c=2\%$, $V_c=0.1\%$)으로 나타났다. 제안된 산정식은 C_c 가 증가할수록 동일한 V_c 에 대한 R_{G/G_0} 의 감소를 보여주는데, 특히 $C_c=2\%$ 경우 $R_{G/G_0}=1.03 \sim 1.08$ 의 범위로 비닐스트립의 보강효과가 미미한 것으로 해석될 수 있다. 그러나

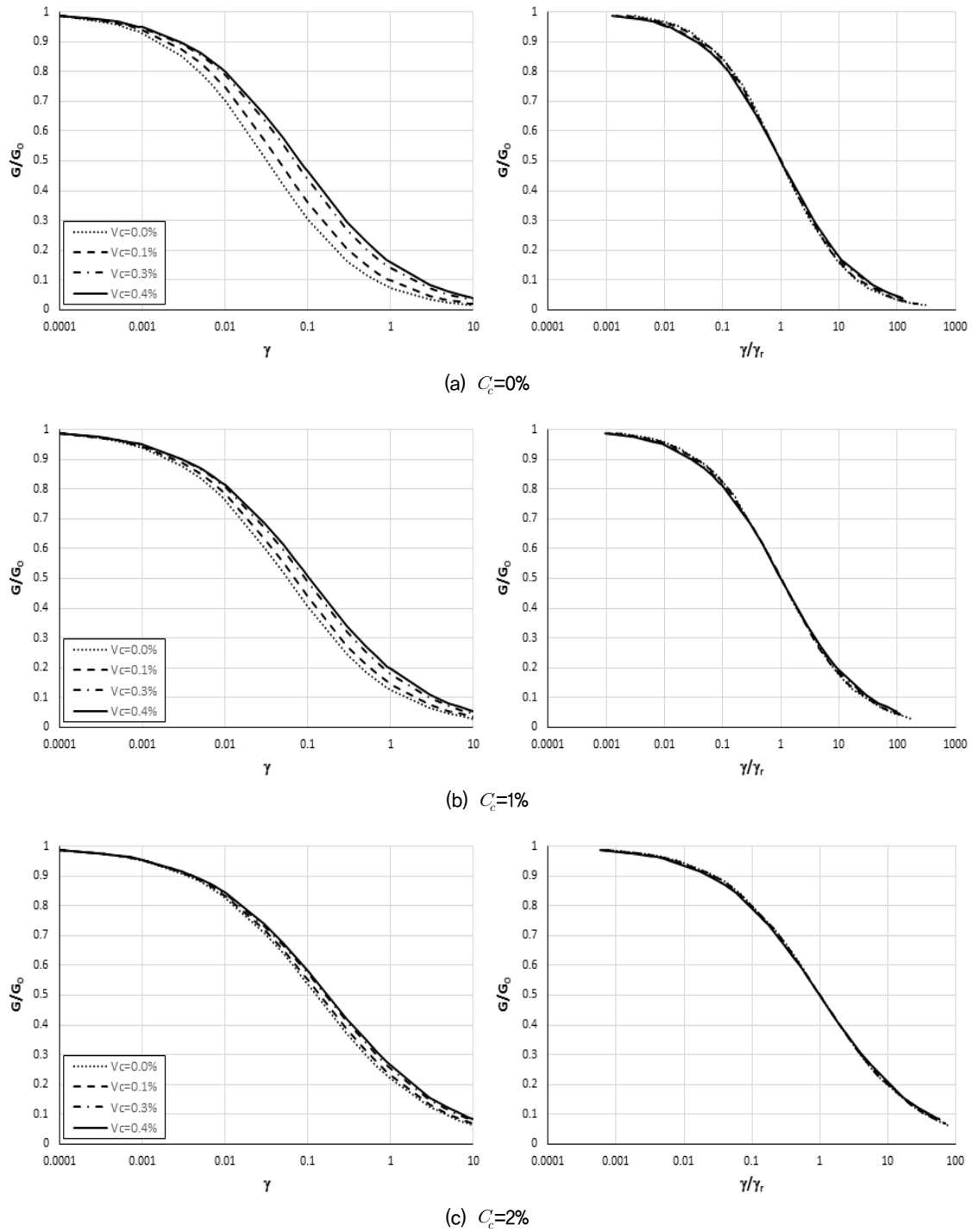


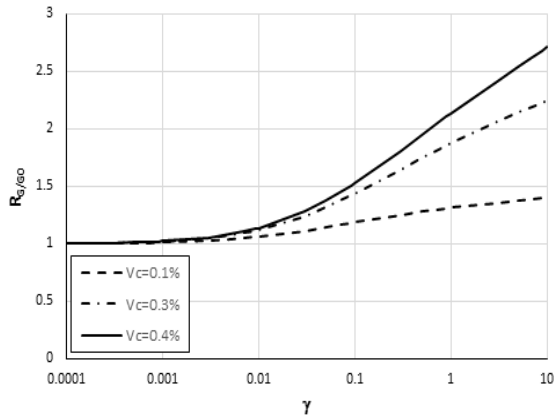
Fig. 3. Normalized shear modulus reduction curves by predictive equation

이는 정규화된 전단탄성계수의 증가율이 미미한 것으로, 실제 동적해석에 필요한 전단탄성계수의 증가율을 분석할 필요가 있다.

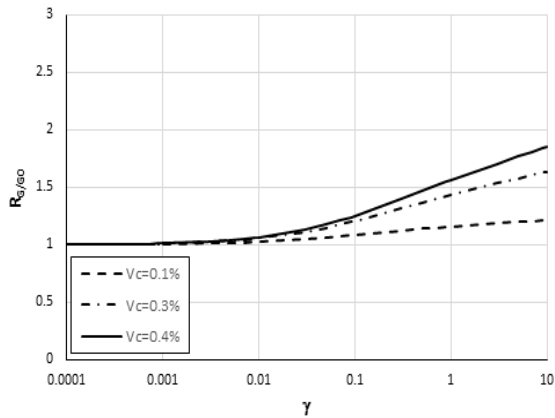
Fig. 5는 동일한 C_c 조건에서 비닐스트립이 없는 경우에 대한 있는 경우의 전단탄성계수 평균변화비, $R_{G_{avg}}$

$$\left(= \frac{(G)_{V_c \neq 0} \text{의 평균}}{(G)_{V_c = 0} \text{의 평균}} \right) \text{과 비닐스트립 혼합비의 관계를 구}$$

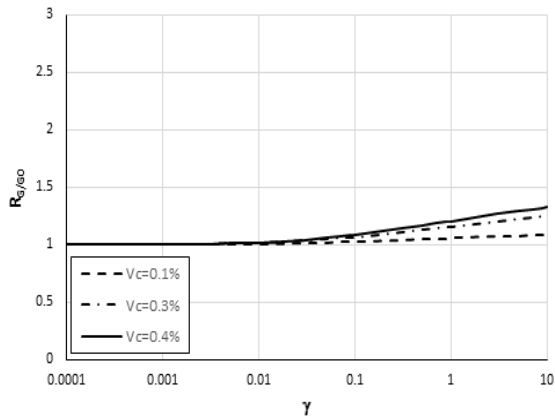
속압 및 시멘트 혼합비에 따라 측정값과 제안식 산정값으로부터 계산된 $R_{G_{avg}}$ 값을 비교하여 도시한 것이다. 전단탄성계수는 보강조건과 전단변형률 뿐 만 아니라 구속압의 영향을 받으므로 모든 영향인자에 대한 전단탄성계수 변화비를 도시하기에는 어려움이 있다. 따라서 비닐스트립에 의한 전단탄성계수의 변화가 본 연구의 산정식에 반영되는 평균적인 양상을 살펴보기 위해 Yu



(a) $C_c=0\%$

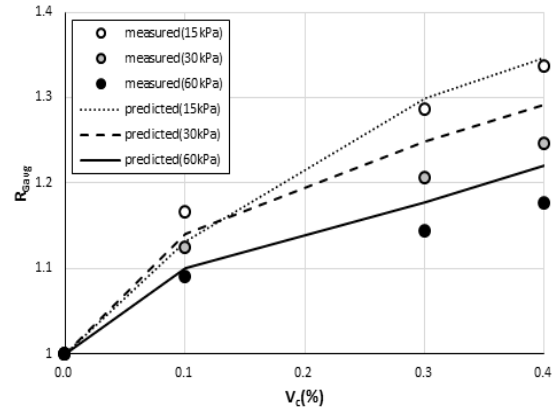


(b) $C_c=1\%$

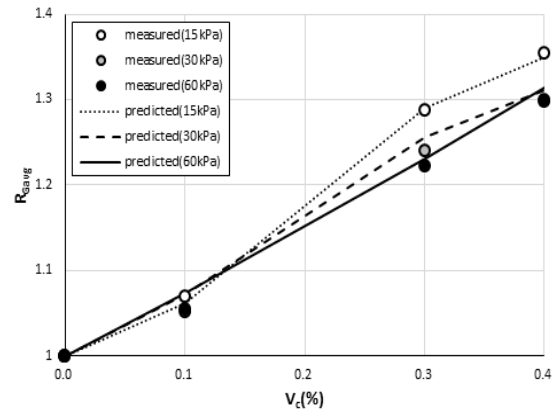


(c) $C_c=2\%$

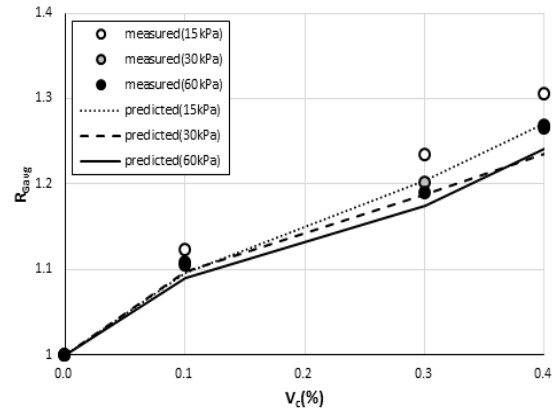
Fig. 4. Change ratio of normalized shear modulus versus shear strain



(a) $C_c=0\%$



(b) $C_c=1\%$



(c) $C_c=2\%$

Fig. 5. Change ratio of average shear modulus versus vinyl strip content

et al.(2018)이 수행한 공진주시험의 전단변형률 범위 (0.0001~0.1%) 내 전단탄성계수의 평균값을 이용하였다.

전단탄성계수는 제안식에 의해 산정된 정규화 전단탄성계수와 공진주시험 결과(Yu et al., 2018)로 측정된 최대전단탄성계수의 곱으로 산정되었다. Fig. 5에서 보듯이 모든 조건에서 V_c 가 증가할수록 측정값과 산정값

의 R_{Gavg} 모두 증가함을 보이고 있어, 제안식은 비닐스트립에 의한 보강효과를 반영하고 있다. $C_c=2\%$ 조건에서도 $V_c=0.1\%$, 0.3% , 0.4% 에 대해 측정값과 산정식에 의한 R_{Gavg} 는 각각 1.11, 1.21, 1.28과 1.09, 1.19, 1.25로 제안된 산정식은 비닐스트립에 의한 전단탄성계수의 뚜렷한 증가를 반영하고 있다.

4. 감쇠비 곡선 산정식

4.1 감쇠비 곡선 산정식 제안

감쇠비는 전단변형률 증가에 따른 전단탄성계수 감소와 연계하여 산정되어야 하며, 무변형 상태에서의 최소감쇠비(D_{min})을 고려한 감쇠비 곡선식은 식 (4)와 같다(Yoshida, 2015).

$$D = (D_{max} - D_{min}) \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) + D_{min} \quad (4)$$

여기서 D_{max} =최대감쇠비, D_{min} =최소감쇠비

식 (4)의 D_{max} 와 D_{min} 은 감쇠비 곡선의 위치와 형상을 규정하는 계수로서 본 연구의 분석대상인 비닐스트립-시멘트로 보강된 느슨한 중간 모래의 감쇠비 산정식을 제안하기 위해서는 우선 보강조건 및 구속압조건에 따른 값을 추정해야 한다. 이를 위해 Yu et al.(2018)의 공진주시험 결과로 획득한 감쇠비 측정값에 대해 식 (4)를 기반으로 회귀분석을 실시하여 D_{max} 와 D_{min} 을 추정하였으며 그 결과를 Table 4에 정리하였다.

감쇠비는 최대 혹은 최소값으로 정규화된 값이 아니므로 구속압의 영향을 고려해야 한다. Table 4의 추정값들에 대해 C_c , V_c , σ_c 를 독립변수로 회귀분석을 수행하

여 D_{max} 와 D_{min} 의 산정식을 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$D_{max} = \frac{0.235}{-3.601(C_c)^{0.507} - 0.086(V_c)^{0.004} + 2.951\left(\frac{\sigma_c}{p_a}\right)^{0.482}} \quad (5a)$$

$$D_{min} = \frac{0.003}{-0.086(C_c)^{0.14} + 0.076(V_c)^{0.358} + 0.138\left(\frac{\sigma_c}{p_a}\right)^{-0.038}} \quad (5b)$$

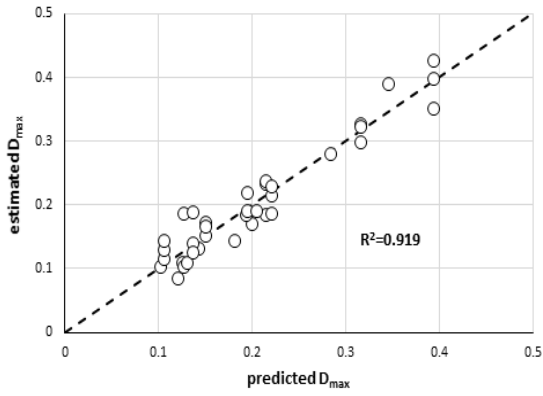
여기서 p_a =대기압=101.3kPa, C_c 와 V_c 는 무차원

식 (5)에는 구속압이 포함되어 모든 변수를 무차원화하는 것이 바람직하며 이를 위해 구속압은 대기압으로 정규화하였다. 식 (5)에 의해 산정된 D_{max} , D_{min} 과 시험 결과로부터 추정된 Table 4의 D_{max} , D_{min} 을 비교한 결과를 Fig. 6에 도시하였으며, 두 계수 각각 0.919와 0.685의 결정계수를 보여주었다.

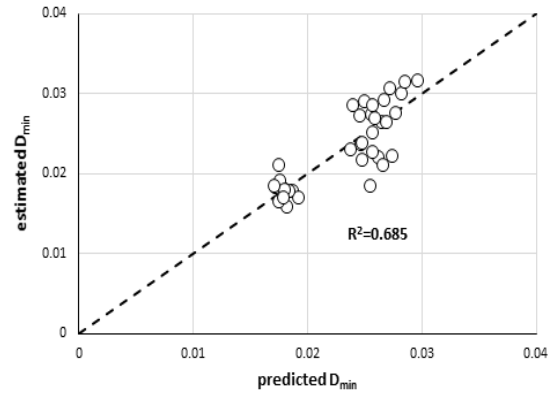
D_{min} 산정식 (5b)의 결정계수가 상당히 낮으나 최소감쇠비는 매우 작은 값으로 감쇠비 곡선 산정에 있어 큰 영향요소는 아닌 것으로 판단된다. 식 (1), (2), (5)를 식 (4)에 적용하면 보강조건과 구속압조건에 따른 감쇠비 곡선을 도출할 수 있다. 일례로 Fig. 7은 시멘트 없이 비닐스트립으로만 보강된 경우($C_c=0\%$)에 대한 감쇠비

Table 4. Estimated values of D_{max} and D_{min}

C_c (%)	V_c (%)	σ_c (kPa)	D_{max}	D_{min}	C_c (%)	V_c (%)	σ_c (kPa)	D_{max}	D_{min}
0	0.0	15	0.169	0.016	1	0.3	15	0.298	0.029
		30	0.130	0.018			30	0.220	0.024
		60	0.103	0.017			60	0.104	0.025
	0.1	15	0.184	0.016		0.4	15	0.323	0.023
		30	0.152	0.018			30	0.190	0.027
		60	0.116	0.018			60	0.186	0.019
	0.3	15	0.232	0.018	2	0.0	15	0.390	0.022
		30	0.173	0.019			30	0.190	0.032
		60	0.130	0.018			60	0.108	0.032
	0.4	15	0.236	0.018		0.1	15	0.426	0.023
		30	0.166	0.021			30	0.215	0.029
		60	0.144	0.017			60	0.139	0.028
1	0.0	15	0.280	0.022	0.3	15	0.352	0.029	
		30	0.144	0.031		30	0.230	0.027	
		60	0.086	0.030		60	0.126	0.026	
	0.1	15	0.326	0.024		0.4	15	0.397	0.022
		30	0.185	0.027			30	0.187	0.029
		60	0.108	0.026			60	0.189	0.021

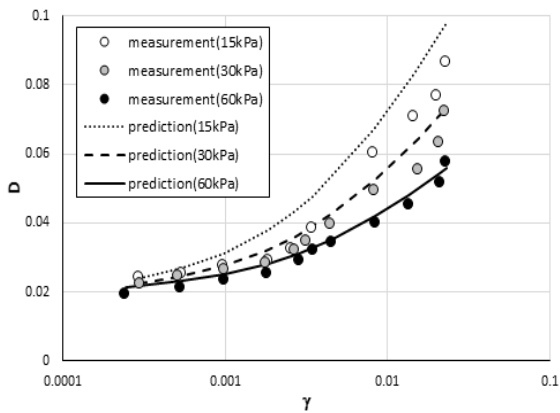


(a) Maximum damping ratio, D_{max}

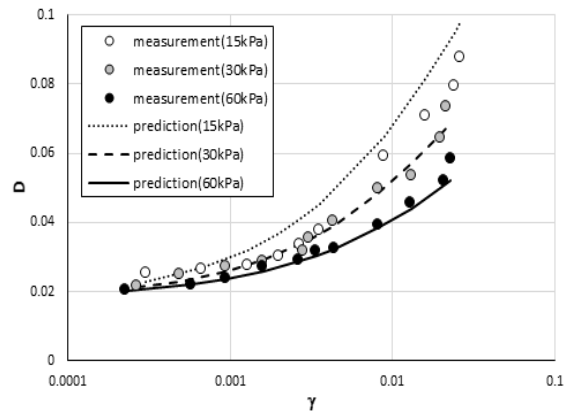


(b) Minimum damping ratio, D_{min}

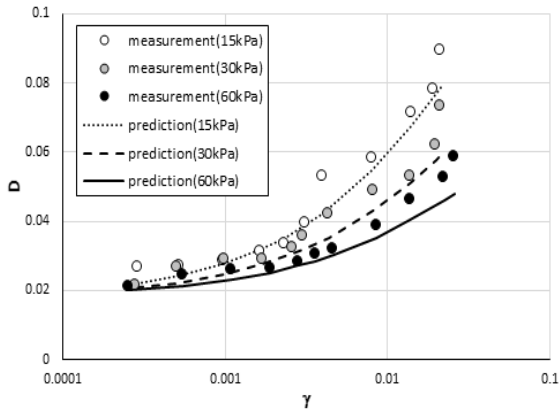
Fig. 6. Comparison between predicted and test-estimated coefficients for Eq. (5)



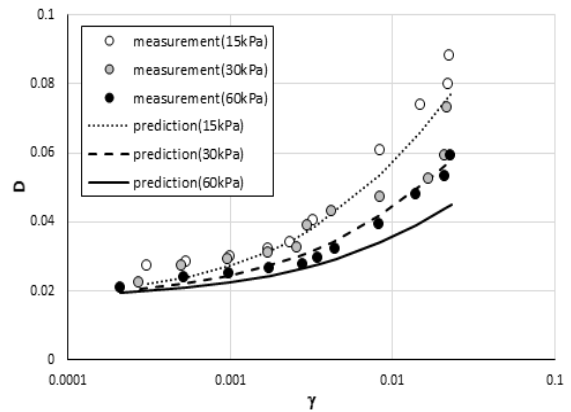
(a) $V_c=0.0\%$



(b) $V_c=0.1\%$



(c) $V_c=0.3\%$



(d) $V_c=0.4\%$

Fig. 7. Predicted damping ratio curve versus measurements (for $C_c=0\%$)

측정값과 제안된 식을 통해 산정된 감쇠비 곡선을 본 연구에서 분석한 공진주시험 범위에서 비교한 것이다.

Fig. 7에서 보듯이 구속압이 증가할수록 감쇠비는 감소함을 알 수 있다. 이는 구속압으로 인해 시편의 변형이 제어되어 내부에너지 소산이 감소하여 발생하는 현상이며, 구속압 증가에 따른 전단탄성계수의 증가도 같

은 이유로 설명된다. 반면 Fig. 7로부터 비닐스트립이 감쇠비에 미치는 영향을 살펴보면 측정값은 뚜렷한 차이가 관찰되지 않으나 산정식에 의한 감쇠비 곡선은 V_c 증가에 따라 감쇠비의 미미한 감소가 관측되어 비닐스트립의 보강효과가 제안된 산정식에 반영된 것으로 보인다. 그러나 Table 4의 $C_c=0\%$ 에 대한 D_{max} 추정값의

변화를 보면 구속압이 동일한 경우 최대감쇠비는 V_c 가 증가함에 따라 함께 증가하는 경향을 보이고 산정식에 의한 D_{max} 값도 동일한 경향을 보인다. 이는 D_{max} 에 해당하는 변형률에서는 비닐스트립과 흙입자 사이에 활동이 발생하여 내부에너지 소산이 증가하고 감쇠비가 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 비닐스트립만으로 보강된($C_c=0\%$) 시편의 경우, 변형률이 작은 구간에서는 비닐스트립이 감쇠비를 미미하게 감소시키는 역할을 하

지만 비닐스트립과 흙입자 사이의 활동이 발생하는 변형률을 넘어서면 비닐스트립이 감쇠비를 증가시키는 역할을 하게 되는 것으로 판단되며 제안된 산정식은 이러한 현상을 반영하고 있다.

4.2 감쇠비 곡선 산정식에 의한 보강효과 분석

Fig. 8은 제안된 감쇠비곡선 산정식을 $C_c=0\%$, 1%, 2%

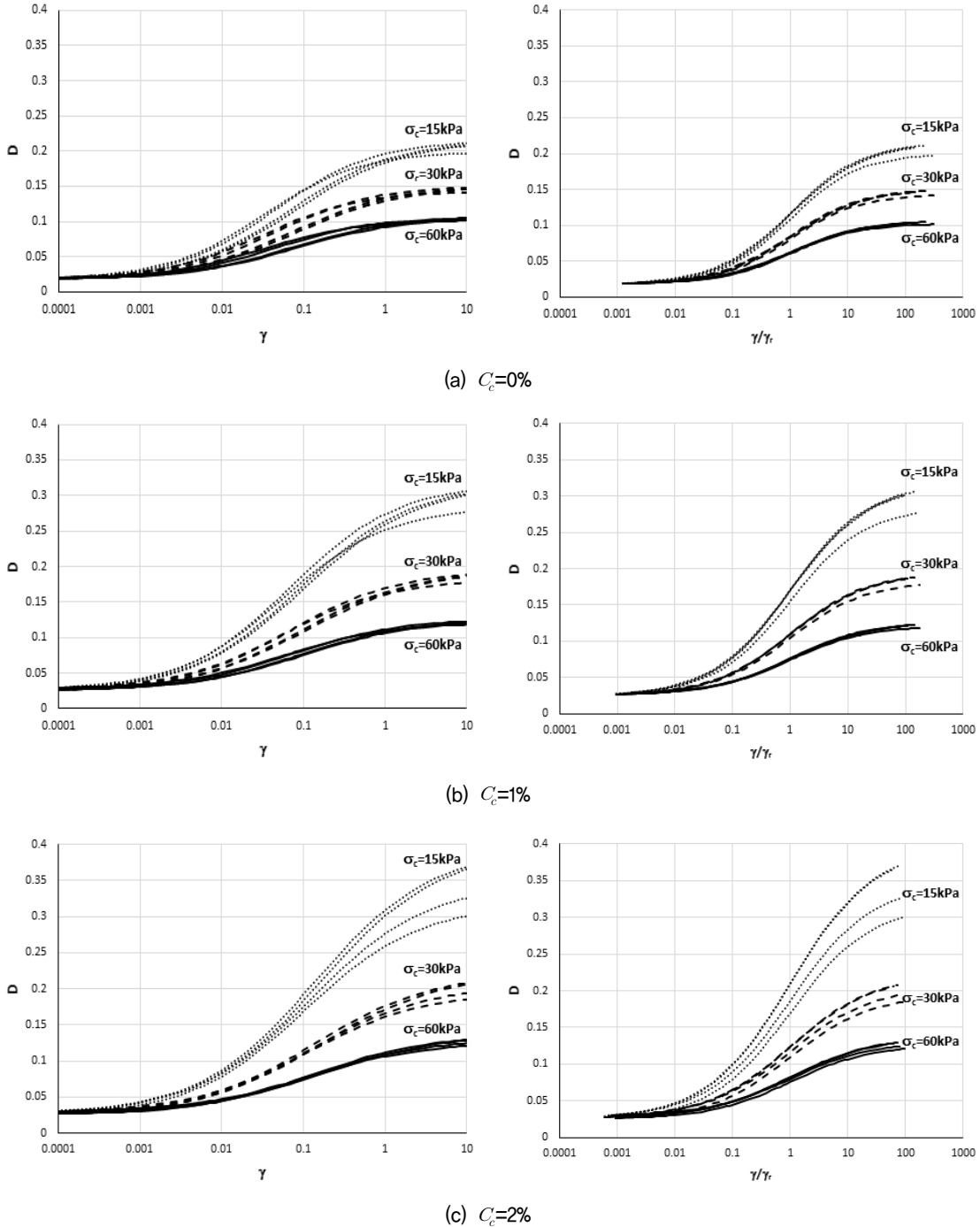


Fig. 8. Damping ratio curves by predictive equation

인 경우에 대해 전단변형률 0.0001%~10%까지 확장·적용하여 도시한 것이다.

Fig. 8에서 좌측의 곡선은 $D-\gamma$ 의 관계를 그리고 우측의 곡선은 전단변형률을 기준변형률로 정규화한 $D-\gamma/\gamma_r$ 의 관계를 보여주고 있다. 동일한 구속압에 대해 4개씩의 곡선이 도시되어 있는데 이는 V_c 에 따른 차이이다. V_c 에 따른 감쇠비의 차이는 C_c 가 증가할수록 뚜렷해지는 것을 볼 수 있는데, 이는 비닐스트립과 시멘트 간의 상호작용으로 인한 내부에너지 소산양상이 변화된 것으로 판단된다. 또한 Fig. 8에서 C_c 의 증가에 따른 감쇠비의 뚜렷한 증가를 볼 수 있는데, 이는 본 연구에 적용된 시멘트 혼합비로 설명될 수 있다. 본 연구의 C_c 는 최대 2%로 흡입자와 비닐스트립을 부착시켜 강성을 증가시키기에는 부족한 양으로 최대 C_c 인 2%를 적용하더라도 시멘트 입자가 흡입자와 비닐스트립의 표면을 코팅하는 정도의 양으로 판단된다. 따라서 시멘트가 시편의 강성을 증가시키고 감쇠비를 감소시키는 역할을 하는 것이 아니고 흡입자와 비닐스트립의 표면을 거칠게 만들어 내부에너지 소산을 촉진시키는, 즉 감쇠비를 증가시키는 역할을 하는 것으로 판단된다. 이는 시멘트 보강토의 감쇠비 특성에 관한 기존 연구결과와도 일치한다 (Chiang et al., 1972; Saxena et al., 1987; Pantazopoulos et al., 2012; Thomas et al., 2020). 또한 Fig. 3의 정규화 전단탄성계수 감소곡선에서와 같이 전단변형률을 기준변형률로 정규화한 $D-\gamma/\gamma_r$ 곡선이 $D-\gamma$ 보다 하나의 곡선으로 수렴하는, 즉 V_c 의 영향이 약하게 나타나는 것이 관측되지만 그 차이는 미미하며 감쇠비 곡선에서는 구속압의 영향이 고려되기 때문인 것으로 판단된다.

비닐스트립이 감쇠비에 미치는 영향을 살펴보기 위해 동일한 시멘트 혼합비 조건에서 비닐스트립이 없는 경우에 대한 있는 경우의 감쇠비 평균변화비, R_{Davg} ($= \frac{(D)_{V_c \neq 0} \text{의 평균}}{(D)_{V_c = 0} \text{의 평균}}$)과 비닐스트립 혼합비의 관계를 구속압 및 시멘트 혼합비에 따라 측정값과 제안식 산정값으로부터 계산된 R_{Davg} 값을 비교하여 Fig. 9에 도시하였다.

3.2절의 R_{Gavg} 에서와 같이 비닐스트립에 의한 감쇠비의 변화가 본 연구의 산정식에 반영되는 평균적인 양상을 살펴보기 위해 공진주시험의 전단변형률 범위(0.0001~0.1%) 내 감쇠비의 평균값을 이용하였다. 비닐스트립에 의한 전단탄성계수의 증가는 감쇠비의 감소로 나타나는 것이 일반적이며, Fig. 9에서 보듯이 산정식에 의한

R_{Davg} 의 값은 1 이하로 V_c 증가에 따른 감쇠비의 감소현상을 반영하고 있다. 그러나 시멘트가 함유된 시편이 15kPa의 구속압을 받는 경우 $V_c=0\% \sim 0.1\%$ 구간에서는 R_{Davg} 가 증가하는데, 이는 낮은 구속압에 의한 감쇠비 증가경향이 비닐스트립에 의한 감쇠비 감소경향 보다 크게 발현되어 발생하는 현상으로 판단된다. 이러한 현상은 C_c 가 증가할수록 더 뚜렷해지는데 전술한 시멘트

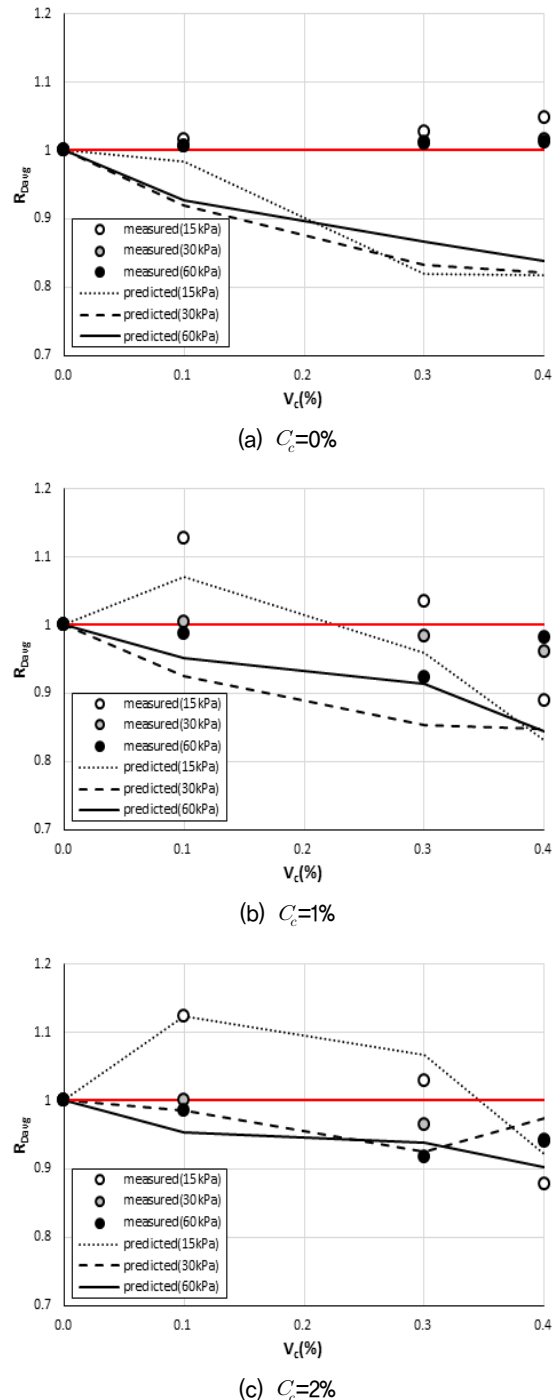
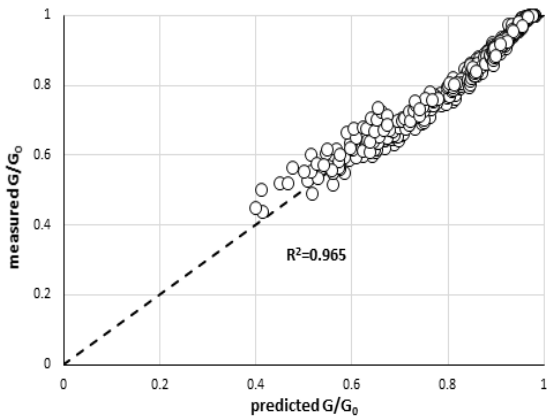
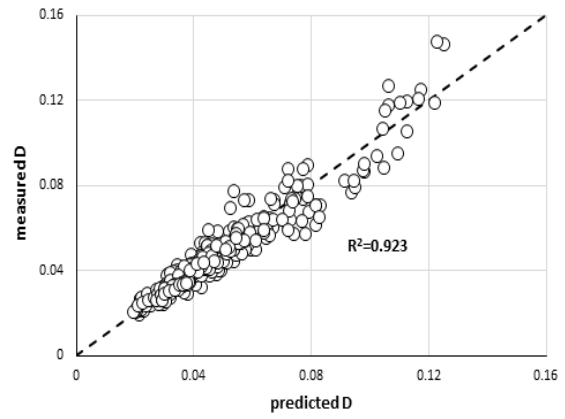


Fig. 9. Change ratio of average damping ratio versus vinyl strip content



(a) Normalized shear modulus



(b) Damping ratio

Fig. 10. Comparison between predictions and measurements

에 의한 감쇠비 증가효과에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 비닐스트립만으로 보강된 시편($C_c=0\%$)의 경우, 측정값에 의한 R_{Davg} 은 V_c 의 증가와 함께 미세하게 증가하는 경향을 보일 뿐 만 아니라 1 이상으로 비닐스트립이 평균감쇠비를 증가시키는 것으로 측정되어 산정값에 의한 R_{Davg} 와는 반대의 경향을 보인다. 이는 시멘트가 없는 경우, 산정식에는 반영되지 않는 비닐스트립의 꼬임, 접힘, 혹은 구겨짐 현상의 발생으로 인한 내부에너지 소산의 증가에서 기인하는 것으로 판단된다. 스트립 혹은 단섬유와 같은 단보강재가 지반 감쇠비에 미치는 영향에 대한 기존 연구결과를 살펴보면 전단탄성계수와는 달리 통일된 경향성이 없으며 감쇠비에 미치는 영향이 없다는 연구(Zhao et al., 2021)도 있어, 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

5. 결론

- (1) 비닐스트립-시멘트로 보강된 느슨한 모래시편(상대 밀도 40%)에 대한 공진주시험 결과를 이용하여 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선의 산정식을 제안하였다. 제안된 산정식은 보강조건(비닐스트립 및 시멘트 혼합비)과 구속압조건에 대한 함수이며, 비닐스트립 혼합비 0~0.4%, 시멘트 혼합비 0~2%, 구속압 60kPa 이하의 범위에서 결정계수 0.9 이상의 높은 신뢰도를 보여주었다. 정규화 전단탄성계수 산정식과 감쇠비 산정식의 측정값과 산정값의 관계는 아래의 Fig. 10과 같다.
- (2) 본 연구에서 제안한 정규화 전단탄성계수 산정식은 비닐스트립 및 시멘트 혼합비 증가에 따른 전단탄

성계수의 증가현상과 시멘트 혼합비가 높은 경우 정규화 전단탄성계수에 대한 비닐스트립의 영향 감소 현상을 잘 반영하고 있다. 또한 최대전단탄성계수 추정식을 제안하여 보강조건 및 구속압조건에 따른 전단탄성계수 변형률 관계곡선을 손쉽게 산정할 수 있게 되었다.

- (3) 본 연구에서 제안한 감쇠비 산정식은 구속압 및 비닐스트립 혼합비 증가에 따른 감쇠비 감소현상과 시멘트 혼합비 증가에 따른 감쇠비 증가현상을 잘 반영하고 있으며, 시멘트 혼합비가 높은 경우 감쇠현상에 대한 비닐스트립의 영향이 뚜렷해지는 것을 보여주고 있다. 또한 제안된 감쇠비 산정식은 비닐스트립과 흙입자 사이의 활동 발생 전후의 감쇠비 변화에 비닐스트립 혼합비가 미치는 영향도 고려하고 있다.
- (4) 본 연구에서 제안된 산정식을 이용하면 공진주시험을 수행하지 않고도 비닐스트립-시멘트로 보강된 느슨한 중간 모래지반의 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 감쇠비 곡선을 간단히 추정할 수 있어 시험에 요구되는 비용과 시간을 절감하는 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다. 또한 제안한 산정식을 이용하여 비닐스트립-시멘트 보강 지반의 지반응답해석, 내진안정해석, 지반-구조물 동적상호작용 분석 등 실무적용성을 제고할 수 있는 추후 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기본연구지원사업(NRF-2010-0013408)의 지원에 의해 수행되었으며, 시험자료를 제공해 준 유정민 박사께 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Ahmed, A. (2012), "Simplified Regression Model to Predict the Strength of Reinforced Sand with Waste Polystyrene Plastic Type", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.30, pp.963-973.
2. Araei, A.A. and Ghodrati, A. (2017), "Predictive Models for Normalized Shear Modulus and Damping Ratio of Modeled Rockfill Materials", *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, Vol.14, No.1, pp.27-40.
3. Zhao, Y., Yang, Y., Ling, X., Gong, W., Li, G., and Su, L. (2021), "Dynamic behavior of Natural Sand Soils and Fiber Reinforced Soils in Heavy-haul Railway Embankments under Multistage Cyclic Loading", *Transportation Geotechnics*, Vol.28, pp.1-11.
4. Chebet, F.C. and Kalumba, D. (2014), "Laboratory Investigation on Re-using Polyethylene (Plastic) Bag Waste Material for Soil Reinforcement in Geotechnical Engineering", *Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal*, Vol.1, No.1, pp.67-82.
5. Chiang, Y.C. and Chae, Y.S. (1972), Dynamic properties of cement-treated soils, Highway Research Record, Vol.379, pp.39-51.
6. Consoli, N.C., Vendruscolo, and Prietto, P.D.M. (2003), "Behavior of Plate Load Tests on Soil Layers Improved with Cement and Fiber", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.1, pp.96-101.
7. Darendeli, B.M. (2001), Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, PhD Dissertation, University of Texas at Austin, USA.
8. Hardin, B.O. and Dmievich, V.P. (1972), "Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol.98, No.6, pp.603-624.
9. Kim, Y. (2017), "Characteristics of Asphalt Concrete Mixed with Polyethylene Aggregate", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.18, No.12, pp.5-11.
10. Kim, T.G., Park, Y.M., Jeon, H.Y., and Chung, Y.I. (2000), "An Experimental Study on the Reinforcing Effect of Soil Slope Mixed with Waste Vinyl", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2, pp.643-646.
11. Liao, T., Massoudi, N., McHood, M., Stokoe, K.H., Jung, M.J., and Menq, F.Y. (2013), "Normalized Shear Modulus of Compacted Gravel", *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, pp.1535-1538.
12. Oztoprak, S. and Bolton, M.D. (2013), "Stiffness of Sands through a Laboratory Test Database", *Geotechnique*, Vol.63, No.1, pp.54-70.
13. Pantazopoulos, I.A. and Atmatzidis, D.K. (2012), "Dynamic Properties of Microfine Cement Grouted Sands", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.42, pp.17-31.
14. Phanikumar, B.R. (2011), "Improving Strength behavior of a Silty Clay through Polymer Strips", *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, Kochi, pp.593-596.
15. Rollins, K.M., Evans, M.D., and Diehl, N.B. (1998), "Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.124, No.5, pp.396-405.
16. Saxena, S.K., Avramidis, A.S., and Reddy, K.R. (1987), "Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cemented Sands at Low Strains", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, No.2, pp.353-368.
17. Thomas G. and Rangaswamy, K. (2020), "Dynamic Soil Properties of Nanoparticles and Bioenzyme Treated Soft Clay", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.137, pp.1-10.
18. Venkatappa, R.G. and Dutta, R.K. (2004), "Ground Improvement with Waste Plastic", *Proceedings of 5th International Conference on Ground Improvement Techniques*, Kuala Lumpur, pp.321-328.
19. Yoshida, N. (2015), *Seismic Ground Response Analysis*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.
20. Yu, J.M. and Kim, J.M. (2018), "An Experimental Study on the Reinforcing Effects of Mixtures of Vinyl Strip and Cement on the Sand Specimens", *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.10, pp.5-16.
21. Zhou, W., Chen, Y., Ma, G., Yang, L., and Chang, X. (2017), "A Modified Dynamic Shear Modulus Model for Rockfill Materials under a Wide Range of Shear Strain Amplitudes", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.92, pp.229-238.

Received : November 16th, 2021

Revised : December 9th, 2021

Accepted : December 9th, 2021