한국지반공학회논문집 제34권 10호 2018년 10월 pp. 5 ~ 16
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.34, No.10, October 2018 pp. 5 ~ 16

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2018.34.10.5

비닐스트립-시멘트 혼합 모래시편의 보강효과에 대한 실험연구

An Experimental Study on the Reinforcing Effects of Mixtures of Vinyl Strip and Cement on the Sand Specimens

유 정 민[1] Yu, Jeong-Min
김 종 민[2] Kim, Jong-Min

Abstract

The ever-increasing amount of waste vinyl is causing big environmental problems. In particular, those from farming industry are sometimes left on site or even illegally reclaimed due to the lack of environmental concerns and capacity for collection, which worsens the situation. It is, therefore, believed that the recycling of waste vinyl is the most ideal solution in the viewpoint of environmental preservation. In this context, the potential of vinyl strip as a ground reinforcing material is investigated to expand the application of waste vinyl recycling. In this study, a series of uniaxial compression tests and resonant column tests were performed for sand specimens reinforced with vinyl strips and cement to investigate their reinforcing effects on static and dynamic behaviors. The changes in the uniaxial compressive strength (UCS), the shear modulus and the damping ratio according to the mixing ratio of vinyl strips and cements were analysed for sand specimens, having 40% and 60% relative densities, under various mixing conditions. As a result, both the static and dynamic reinforcing effects of vinyl strip-cement mixture were confirmed and the optimum mixing ratio was proposed.

요 지

날로 늘어가는 폐비닐은 가장 큰 환경문제가 되어가고 있으며, 특히 농촌에서 발생하는 영농폐비닐은 수거인력 부족 및 재활용 인식부족 등으로 농경지에 방치 혹은 불법매립 되어, 이로 인한 문제점이 갈수록 심화되고 있다. 따라서 폐비닐은 재활용하는 것이 환경보전의 관점에서 가장 이상적이며, 본 연구에서는 폐비닐 재활용의 적용범위를 보다 확장시키기 위한 사전연구로 비닐스트립의 지반보강재로서의 적용성을 분석하였다. 본 연구에서는 비닐스트립과 시멘트로 보강된 모래시편에 대한 일축압축강도시험과 공진주/비틂전단시험을 수행하여 정적 및 동적 보강효과를 분석하였다. 상대밀도 40%와 60%의 모래질 흙에 다양한 보강조건의 시편을 제작하여 비닐스트립 혼합률과 시멘트 혼합률에 따른 일축압축강도와 전단탄성계수/감쇠비의 변화를 분석하였다. 시험결과 비닐스트립-시멘트 혼합 보강기법의 정적 및 동적 보강효과를 확인하였고, 비닐스트립 및 시멘트의 최적 혼합조건을 제시하였다.

Keywords : Vinyl strips, Cement, Reinforcement, Uniaxial compression test, Resonant column/Torsional shear test

1 비회원, 세종대학교 건설환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Sejong Univ.)
2 정회원, 세종대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Sejong Univ., Tel: +82-2-3408-3293, Fax: +82-2-3408-4332, jongmin@sejong.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2018 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

폐기물 재활용은 환경분야의 중요한 연구주제로 다양한 종류의 폐기물을 대상으로 활발한 연구개발이 진행되고 있다. 그중 대표적인 생활폐기물인 폐플라스틱과 폐비닐은 배출량이 증가일로에 있을 뿐 만 아니라 환경친화적인 처분이 곤란하여 재활용이 가장 필요한 폐기물이다. 건설분야에서도 폐기물을 재활용한 건설재료 및 공법에 대한 다양한 연구개발이 진행되어왔으며, 지반공학 분야에서는 폐플라스틱과 폐비닐을 이용한 환경친화적인 보강토 공법이 연구·개발되고 있다(Consoli et al., 2002; Sobhan et al., 2003; Babu et al., 2010).

특히 농촌에서 발생하는 영농폐비닐은 토양 및 수질오염 등 환경오염의 원인이 되며 이로 인한 문제점이 갈수록 심화되고 있다. 농업용 비닐은 사용성이 편리하여 축사, 하우스 바람막이, 다양한 온난식물과 농작물 재배 시 많이 사용된다. 각종 용도에 사용된 비닐은 농업인구의 감소와 고령화로 인한 수거인력 부족 및 재활용 인식부족 등으로 폐비닐의 증가 원인이 되고 있다. 현재 국내에서 배출되는 영농폐비닐의 양은 연간 32만여 톤에 달하고 있으며, 이 중 약 65% 정도인 21만여 톤이 재활용이 되고, 나머지 35% 정도는 재활용에 따른 수익성이 없어 수거되지 않고 농경지에 방치·매립 또는 소각되어 토양오염 및 환경훼손이 심화되고 있다(Korea Environment Corporation, 2016). 소각의 경우는 다이옥신 발생 등의 대기오염 문제를 유발하며, 매립처분의 경우는 폐비닐의 완전부패기간이 500년 이상임을 가정할 때 환경적으로 적절한 처리방법이라고 볼 수 없다. 따라서 폐비닐은 재활용하는 것이 환경보전의 관점에서 가장 이상적이며, 이를 위해서는 재활용 용처를 지속적으로 개발하여 폐비닐 재활용 제품의 시장을 확대할 필요가 있다.

폐비닐과 비슷한 폐플라스틱의 경우, 지반보강용 단섬유로 재성형하는 연구가 수행되어(Botero, E. et al., 2015) 기존 플라스틱 단섬유와 유사한 보강효과가 확인된 반면 폐비닐 경우에는 단섬유로 재성형하는 공정이 복잡하고 고비용이며, 품질이 떨어지는 등의 문제가 있어 보강재로 재활용한 보강토 연구는 국내외적으로 드문 현황이다. 따라서 단섬유 보다 재성형 공정이 훨씬 간단한 스트립형태 보강재로 폐플라스틱과 폐비닐을 재활용 연구도 진행되어 왔다.

Kato, T. et al.(1995)은 폐플라스틱 물통을 스트립으로 잘라 지반보강재로 사용하였으며, 시멘트를 첨가하여 흙의 강도증진을 확인하였다. Dutta, R.K.와 Sarda, V.K.(2006)는 폐플라스틱 스트립 혼합률(0.25～4%)과 길이를 달리하여 CBR 및 시컨트 계수에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 폐플라스틱 스트립 혼합률의 증가에 따라 CBR이 증가하였고, 혼합률 2% 이상에서는 폐플라스틱 스트립을 추가하더라도 CBR이 더 향상되지 않는 것으로 확인되었다. Choudhary, A.K. 등(2010)은 폐플라스틱을 재활용한 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 스트립을 지반보강재로 적용하여 CBR값을 측정하였고, HDPE 스트립 길이가 증가함에 따라 지반의 강도와 변형거동이 크게 개선됨을 확인했다. Babu, G.L.과 Chouksey, S.K.(2010)는 폐플라스틱 물통을 스트립으로 잘라 보강재로 사용하여 일축압축강도 시험과 삼축압축강도 시험을 시행하여 폐플라스틱 스트립과 흙 사이의 마찰과 인장 응력의 증가로 인해 강도가 증가하는 것을 확인하였다.

김태균 등(2000)은 사용 후 방치된 폴리에틸렌수지(비닐하우스용 필름)을 가로 3mm, 세로 50mm 규격의 직사각형으로 잘라 보강재로 사용하여 투수시험과 직접전단시험을 수행하였다. 또한 보강재의 크기와 혼합률을 달리하여 강도특성을 확인하였다. Chebet, F.C.와 Kalumba, D.(2014)는 일반적으로 사용되는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 재질의 비닐봉투를 스트립으로 잘라 보강재로 사용하여 모래의 전단강도와 하중 지지력이 증가함을 관찰했다. 또한 흙의 특성과 스트립의 특성(농도, 길이, 폭)이 보강효율에 영향을 미치는 것을 확인했다.

본 연구에서는 폐비닐 재활용의 적용범위를 보다 확장시키기 위한 일환으로 비닐스트립의 지반보강재로서의 적용성을 분석하고자 한다. 즉, 부직포와 같은 면형태가 아닌 단보강재 형태의 비닐스트립을 적용한 보강토를 개발하는 것이다. 보강 대상지반은 우리나라에 가장 많이 분포하는 화강풍화토를 대상으로 하였으며, 농촌에서 많이 사용되는 하우스용 필름인 저밀도 폴리에틸렌수지(LDPE)를 스트립 형태로 잘라 지반보강재로서의 적용성을 분석하였다. 또한 시멘트 첨가가 보강효과 개선에 미치는 영향을 분석하기 위해 시멘트 혼합률과 비닐스트립 혼합률을 달리하여 다양한 조건의 시편을 제작·시험하였다. 흙 시료의 밀도에 따른 비닐스트립-시멘트의 보강효과를 비교하기 위해 상대밀도 40%와 60%의 흙 시료로 다양한 보강조건의 시편을 제작하여 일축압축강도시험과 공진주/비틂전단시험을 수행하

였으며, 시험 결과로 얻어진 일축압축강도와 전단탄성계수로부터 비닐스트립-시멘트 보강시편의 정적 및 동적 보강효과를 분석하였다.

2. 시편제작 및 시험

2.1 재료조건

본 연구에 사용된 화강풍화토의 공학적 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 액·소성한계시험, 입도분석시험 등의 기초물성시험을 수행하였다. 최대 및 최소 간극비는 각각 최소 및 최대 건조단위중량시험(ASTM D-4253, 4254)에 근거하여 측정하였다. 다짐몰드에 고무망치로 진동을 주면서 시료를 채워 최소 간극비 상태를 구현하였으며, 깔때기를 사용하여 약 25mm 정도의 높이에서 흙을 자유낙하시켜 몰드를 채워 최대 간극비 상태를 구현하였다. 사용된 화강풍화토에 대한 입도분포곡선과 기본물성은 각각 Fig. 1과 Table 1과 같으며, 입도분석 결과 통일분류법상 SW로 분류되었다. Table 1에서 함수비(w%)는 흙시료의 최적함수비(11.5%)와 시편성형이 가능한 최소함수비 사이의 값 7%로 선정하였으며, 따라서 상대밀도 40%와 60% 시편의 포화도는 각각 22.7%와 24.8%로 산정되었다.

비닐스트립 보강토는 주로 성토 혹은 뒷채움재로 적용될 것이므로, 느슨한 상태 보다는 중간 밀도 상태의 지반에 대한 보강효과를 분석하는 것이 적합할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 중간 밀도 상태에 해당하는 상대밀도 40%와 60%의 시편을 준비하였다. 보강재로 사용된 비닐은 농어촌에서 비닐하우스용 필름으로 많이 사용되는 두께 0.1mm인 저밀도 폴리에틸렌수지(LDPE)이며, 비닐의 물리적·역학적 특성은 Table 2와 같다.

비닐스트립 보강토는 스트립의 종횡비(Aspect ratio, 길이:폭)에 따라 시공의 난이도와 보강효과가 달라지므로 최적의 종횡비를 파악할 필요가 있다. 종횡비가 커질수록 시편 성형 시 비닐스트립이 접히거나 서로 엉키는 현상이 발생하여 흙과의 혼합이 잘 이루어지지 않게 된다. 이러한 문제점을 보완하면서 동시에 최적의 보강효과를 얻기 위해 다양한 종횡비의 비닐스트립에 대한 혼합시험을 수행하였으며, 그 결과 Fig. 2와 같이 길이 6mm, 폭 3mm의 비닐스트립으로 결정하였다. 이는 최적종횡비를 2:1로 제안한 기존 연구결과(Choudhary, A.K. et al., 2010; Chebet, F.C. et al., 2014)와도 부합된다. 또한 비닐스트립의 정착능력 향상과 보강효과의 개선을 목적으로 시멘트를 2차 보강재로 추가하였으며, 본 연구에서는 국산 보통 포틀랜드 시멘트를 적용하였다.

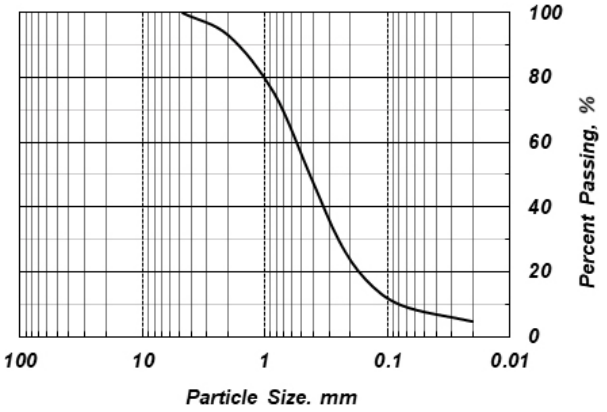


Fig. 1. Particle size distribution of soil sample

Fig. 2. Vinyl strips used in the study (3mm×6mm)

Table 1. Fundamental properties of the soil sample

Specific gravity	Liquid limit (%)	Plastic limit (%)	USCS	e_{max}	e_{min}	w (%)
2.66	17.42	11.64	SW	0.96	0.61	7

Table 2. Physical and mechanical properties of vinyl (Korea Federation of Plastic Industry Cooperatives, 2018)

Thickness (mm)	Density (g/cm^3)	Tensile strength (N/cm^2)	Elongation percentage (%)
0.1	0.917	1760	350

2.2 시편조건 및 성형

지반 및 보강조건에 따른 보강효과를 확인하기 위해 상대밀도, 비닐스트립 혼합률, 시멘트 혼합률, 양생기간을 달리하여 다양한 조건의 시편을 제작하였다. 본 연구에 적용한 시편조건은 Table 3과 같으며, Table 3의 비닐스트립 혼합률과 시멘트 혼합률은 시편 전체 중량에 대한 각각의 중량비이다. 시편의 크기는 Fig. 3과 같이 지름 50mm, 높이 100mm로 성형하였으며, 시편 내에 흙, 시멘트, 비닐스트립이 균등하게 섞이도록 3층으로 나누어서 각 층마다 개량하여 5~10분 정도 충분히 혼합하였다. 또한 균일한 밀도를 유지하기 위하여 시편의 하부를 느슨하게 하고 상층을 조밀하게 하여 최상층에서 다짐을 종결하는 under compaction 방법으로 3층 다짐하여 성형하였다. 이와같이 제작된 시편의 균등성은 동일조건의 3개 시편에 대한 일축압축강도(19.66kPa, 19.63kPa, 19.64kPa)를 비교하여 확인하였다. 시멘트가 혼합된 시편은 몰드 상부에 랩핑을 하여 7일 또는 28일 동안 건구온도 20°C, 습도 80%의 항온항습 조건으로 양생시켰다. 최대·최소 간극비를 이용하여 상대밀도 40%와 60%에 대한 간극비를 구하였으며, 몰드의 부피와 흙의 비중으로부터 목표 간극비에 맞는 흙 시료의 중량을 산정하여 상대밀도에 따른 시편을 제작하였다.

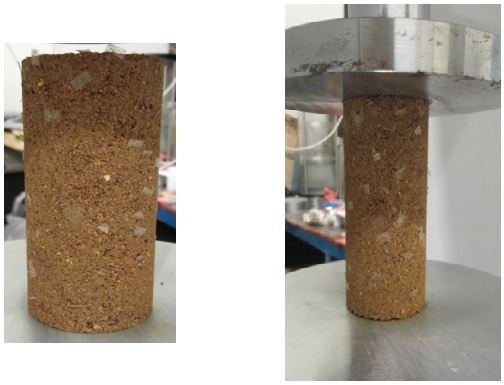


Fig. 3. Molded specimen (50mm×100mm)

Table 3. Specimen conditions used in the test

	Condition
Relative density (D_r)	40%, 60%
Vinyl strips mixing ratio (V_c)	0%, 0.1%, 0.3%, 0.4%
Cement mixing ratio (C_c)	0%, 1%, 2%
Curing period (t)	7day, 28day

2.3 시험

흙 시료의 조밀도에 따른 비닐스트립 보강효과와 시멘트 첨가에 따른 보강효과의 변화를 확인하기 위해 Table 3의 조건에 따라 제작한 총 40개 시편에 대해 일축압축강도시험과 공진주/비틂전단시험을 수행하여 정적 및 동적 보강효과를 각각 분석하였다.

2.3.1 일축압축강도시험

비닐스트립-시멘트 보강토 시편의 정적 보강효과를 확인하기 위해 일축압축강도시험을 실시하였다. 일축압축시험은 Table 3의 조건으로 성형된 50mm×100mm 크기의 시편들에 대해 최대변형률 15%까지 재하속도 1mm/min의 변위제어방식으로 수행하였다. Fig. 4는 상대밀도 40%, 시멘트 혼합률 1%, 양생기간 7일인 시편의 비닐스트립 혼합률에 따른 응력-변형률 곡선을 도시한 것이다.

2.3.2 공진주/비틂전단시험

비닐스트립-시멘트 보강토 시편의 동적 보강효과를 분석하기 위하여 공진주/비틂전단시험을 실시하였다. 시험에 사용한 시편은 일축압축강도시험 시편과 동일한 조건으로 성형하였다. 본 연구에서는 구속응력을 순차적으로 증가시켜가며 압밀-비틂전단을 반복하는 다단계 시험(multi-stage testing)방식을 적용하였다. 구속압은 15kPa, 30kPa, 60kPa의 3단계로 설정하였으며, 간극수압계를 이용하여 압밀완료를 확인하였다. 압밀이 완료된 시편의 비틂전단은 시편상부의 가진시스템을 통해 유도하였으며, 다양한 진동주파수에 따른 공진주파수를 측정하여 전단탄성계수와 전단변형률을 측정하였

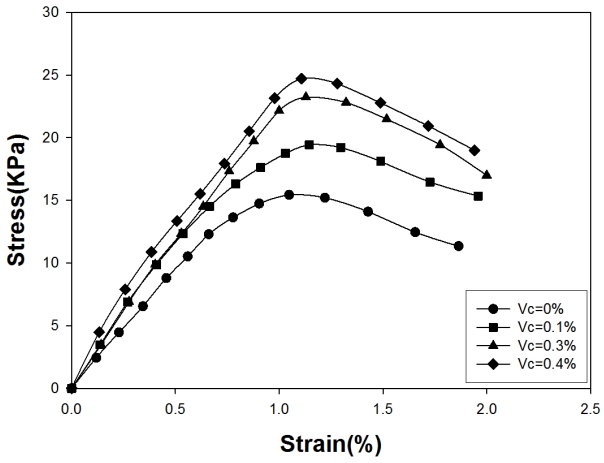
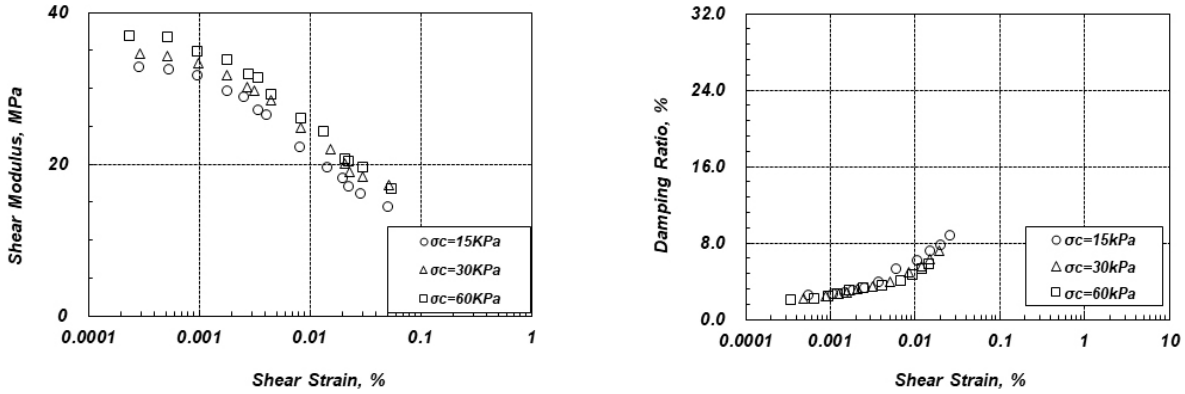


Fig. 4. Stress-strain curve according to vinyl strip contents (D_r= 40%, C_c=1%, t=7day)



(a) Shear modulus - shear strain curve (b) Damping ratio curve

Fig. 5. Shear modulus and damping ratio curves (D_r=40%, V_c=0.1%, C_c=1%, t=7day)

다. 본 연구에서는 0.05Hz, 0.1Hz, 0.2Hz, 0.4Hz, 0.6Hz, 0.8Hz, 1Hz, 2Hz, 3Hz, 4Hz, 6Hz, 8Hz, 10Hz의 총 13단계로 진동주파수를 증가시켜 10^{-5}%~10^{-1}%사이의 전단변형률 범위에서의 동적거동을 관찰하였다. Fig. 5는 상대밀도 40%, 비닐스트립 혼합률 0.1%, 시멘트 혼합률 1%, 양생기간 7일인 시편의 전단변형률과 전단탄성계수 및 감쇠비의 관계를 구속응력에 따라 도시한 것이다.

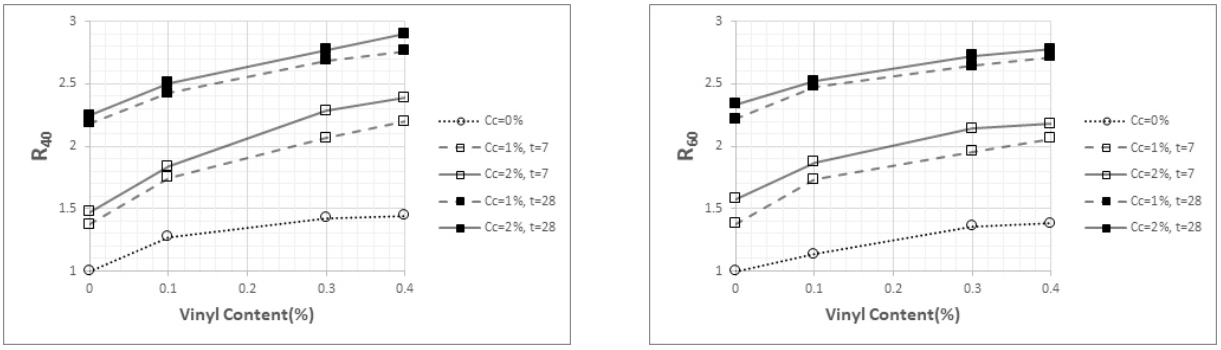
3. 시험결과 및 분석

본 절에서는 비닐스트립 보강토 시편에 대한 일축압축시험과 공진주/비틂전단시험 결과인 일축압축강도, 전단탄성계수 및 감쇠 특성을 시편조건에 따라 비교하여 비닐스트립 보강토 시편의 정적 및 동적 보강효과를 분석하였다.

3.1 일축압축강도

전술한 40개 시편에 대한 일축압축강도시험 결과를 정리하면 Table 4와 같다.

비닐스트립과 시멘트의 정적 보강효과를 분석하기 위해 보강시편과 무보강시편의 일축압축강도비, R(=q_u/q_{u0})



(a) D_r=40% (b) D_r=60%

Fig. 6. Uniaxial compression strength ratio of reinforced and non-reinforced specimens

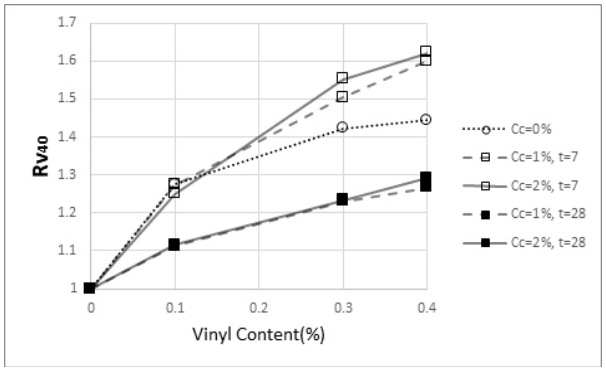
Table 4. Uniaxial compressive strength for various specimen conditions (kPa)

C_c	t	D_r	40%				60%			
		V_c	0%	0.1%	0.3%	0.4%	0%	0.1%	0.3%	0.4%
0%	–		11.23	14.31	15.98	16.22	12.44	14.12	16.88	17.22
1%	7day		15.43	19.64	23.21	24.7	17.12	21.56	24.31	25.63
	28day		24.51	27.24	30.16	31.03	27.57	30.85	32.89	33.76
2%	7day		16.53	20.66	25.66	26.81	19.64	23.27	26.62	27.13
	28day		25.23	28.13	31.13	32.57	29.06	31.37	33.89	34.55

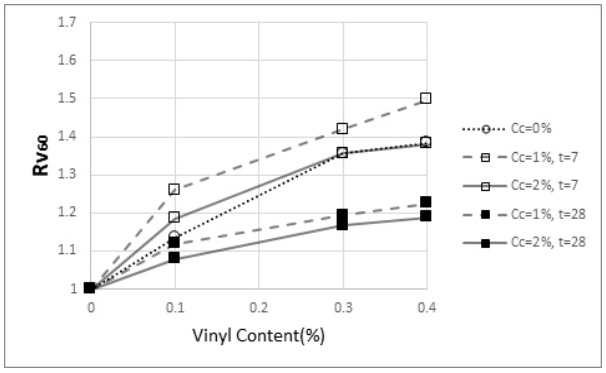
을 상대밀도 40%(R_{40})와 60%(R_{60})로 구분하여 Fig. 6과 같이 도시하였다. Fig. 5에서 보듯이, 모든 시멘트 혼합률 조건(C_c=0%, 1%, 2%)에서 비닐스트립 보강재는 뚜렷한 보강효과를 보여주고 있으며, 일축압축강도비 증가율은 비닐스트립 보강재를 적용하지 않은 시편(V_c=0%)과 최소 혼합률을 적용한 시편(V_c=0.1%) 사이에서 최대값을 보이고 이후 비닐스트립 혼합률이 증가할수록 다소 둔화되는 경향을 보인다. 특히 시멘트 혼합이 없는 경우(C_c=0%), 비닐스트립 최대혼합률(V_c=0.4%)에서 상대밀도 40%와 60% 시편에 대한 일축압축강도비는 각각 1.43과 1.39로 비닐스트립만으로도 뚜렷한 보강효과를 확인할 수 있다. 또한 상대밀도 이외의 모든 조건이 일정한 경우, 상대밀도 40%인 시편이 더 큰 일축압축강도비를 보이며, 따라서 보다 느슨한 지반조건에서 더 뚜렷한 보강효과가 발현됨을 알 수 있다.

비닐스트립만의 보강효과를 분석하기 위해 시멘트 혼합률과 양생기간이 일정한 경우의 비닐스트립 혼합률에 따른 일축압축강도비, Rv($q_u/q_{u(V_c=0)}$)를 40%(Rv_{40})과 60%(Rv_{60})로 구분하여 Fig. 6에 도시하였다. q_u와 $q_{u(V_c=0)}$은 일정한 시멘트 혼합률과 양생기간 조건에서의 비닐스트립 보강시편과 무보강시편 각각의 일축압축강도를 의미한다. Fig. 7에서 보듯이, 일축압축강도비는 본 연구에서의 최대 비닐스트립 혼합률 0.4% 이상에서도 계속 증가할 것으로 판단되며, 따라서 보강효과는 더욱 커질 것으로 예상된다. 또한 상대밀도에 따른 일축압축강도비의 최대값을 비교해보면 상대밀도 40%(Rv_{40})과 60%(Rv_{60})시편 각각 1.62와 1.50으로서, 비닐스트립의 보강효과는 상대적으로 느슨한 시편에서 더 뚜렷하게 발현됨을 알 수 있다. Fig. 7(c)는 시편의 상대밀도에 따른 비닐스트립만의 보강효과를 비교하기 위해 상대밀도를 제외한 모든 조건이 동일한 경우의 Rv_{40}과 Rv_{60}의 비를 나타낸 것으로, 대부분 Rv_{40}/Rv_{60}이 1 보다 크므로 비닐스트립의 보강효과는 상대밀도 40% 시편에서 더 크게 발현됨을 재확인할 수 있다.

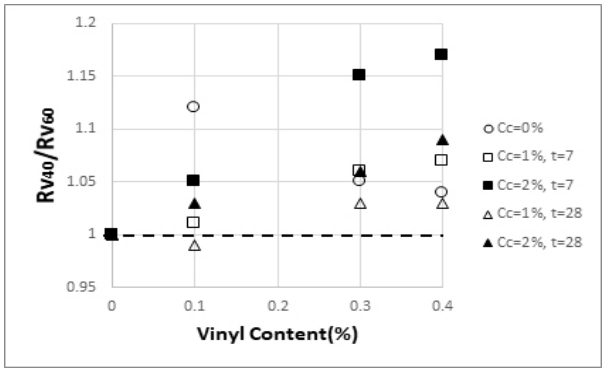
시멘트만의 보강효과를 분석하기 위해 비닐스트립 혼합률과 양생기간이 일정한 경우의 시멘트 혼합률에 따른 일축압축강도비, Rc($q_u/q_{u(C_c=0)}$)를 40%(Rc_{40})와 60%(Rc_{60})로 구분하여 Fig. 8에 도시하였다. q_u와 $q_{u(C_c=0)}$은 일정한 비닐스트립 혼합률과 양생기간 조건에서의 시멘트 보강시편과 무보강시편 각각의 일축압축강도를 의미한다. 시멘트 혼합률을 1%에서 2%로 증가시키더라도 일정한 비닐스트립 혼합률에서의 일축압축강도는 크게 증가하지 않으며, 이러한 현상은 양생기간이 길어질수록 뚜렷해짐을 알 수 있다. 따라서 시멘트 혼합률 1%일 때 최적의 보강효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한 Fig. 8(c)는 시편의 상대밀도에 따른 시멘트만의 보강효과를 분석하기 위해 상대밀도를 제외한 모든 조건이 동일한 경우의 Rc_{40}과 Rc_{60}의 비를 나타낸 것으로, 대부분 Rc_{40}/Rc_{60}이 1 보다 작으므로 시멘트의 보강효과는 상대밀도 60% 시편에서 더 크게 발현됨을 확인할 수 있다.



(a) Specimens with D_r=40% (Rv_{40})



(b) Specimens with D_r=60% (Rv_{60})



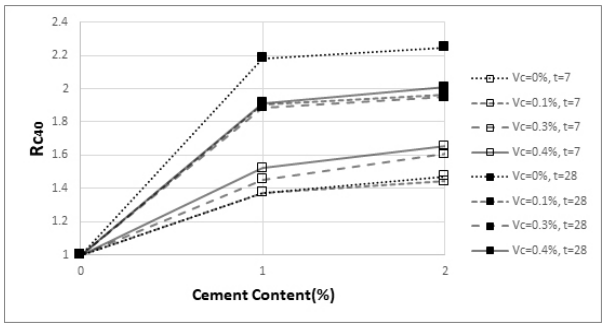
(c) Comparison between D_r=40% and 60% (Rv_{40}/Rv_{60})

Fig. 7. Comparison of uniaxial strength ratio between D_r=40% and 60% with respect to the vinyl strip contents

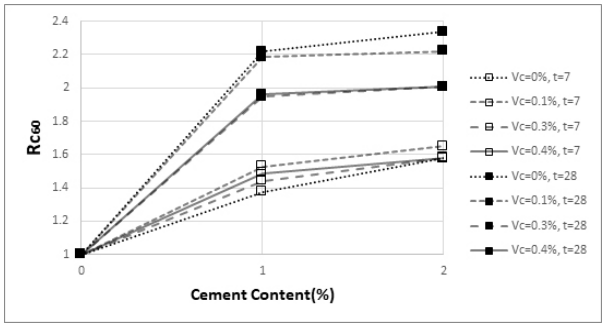
또한, 실무에서 중요한 28일 양생시편의 일축압축강도(q_{u28})를 7일 양생시편의 일축압축강도(q_{u7})로부터 추정하기 위해 비닐스트립 혼합률, 시멘트 혼합률, 상대밀도를 독립변수로하여 28일 및 7일 양생시편의 강도비(q_{u28}/q_{u7})에 대한 다변수 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석 결과, q_{u7}로부터 q_{u28}을 추정할 수 있는 추정식을 식 (1)과 같이 제안하였고, 강도비의 추정값과 실험값을 회귀분석 결정계수(R^2=0.97)와 함께 Fig. 9에 비교·도시하였다.

$$\frac{q_{u28}}{q_{u7}} = 1.261(V_c + 0.026)^{-0.073} C_c^{-0.074} D_r^{0.05} \qquad (1)$$

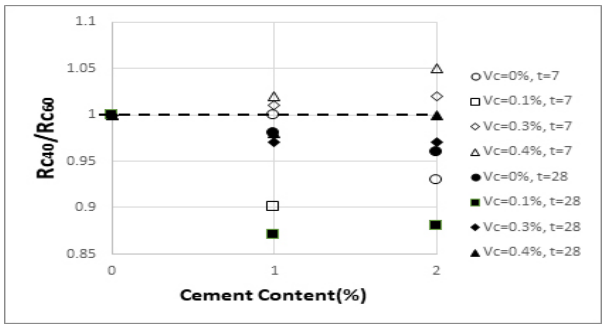
여기서, V_c=비닐스트립 혼합률(0～0.004), C_c=시멘트 혼합률(0～0.02), D_r=상대밀도(0.4～0.6) 이다.



(a) Specimens with D_r=40% (Rc_{40})



(b) Specimens with D_r=60% (Rc_{60})



(c) Comparison between D_r=40% and 60% (Rc_{40}/Rc_{60})

Fig. 8. Comparison of uniaxial strength ratio between D_r=40% and 60% with respect to the cement contents

3.2 전단탄성계수 및 감쇠 특성

본 절에서는 비닐스트립의 동적 보강효과를 살펴보기 위해 수행한 공진주/비틂전단시험 결과를 분석하였다. Fig. 10은 비닐스트립만으로 보강된 시편의 정규화

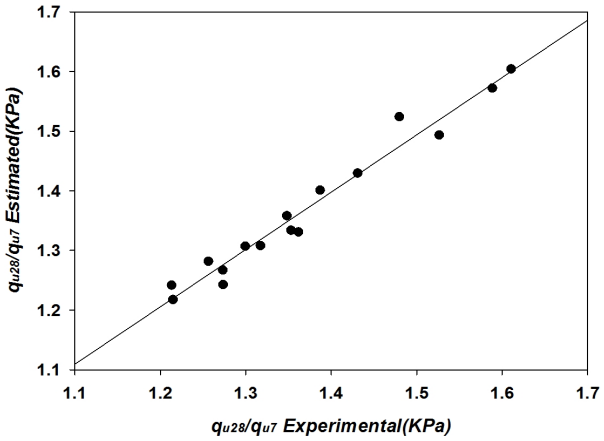
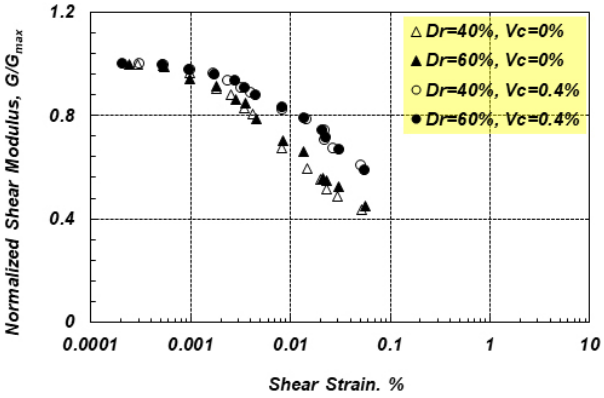
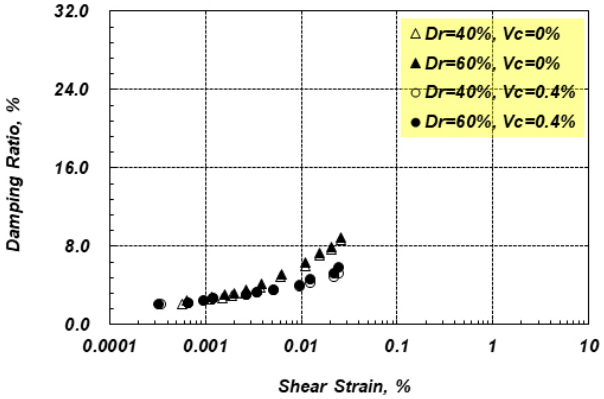


Fig. 9. Relationship between estimated and experimental values of ratio of 28-day curing strength (q_{u28}) to 7-day curing strength (q_{u7})



(a) Normalized shear modulus curve

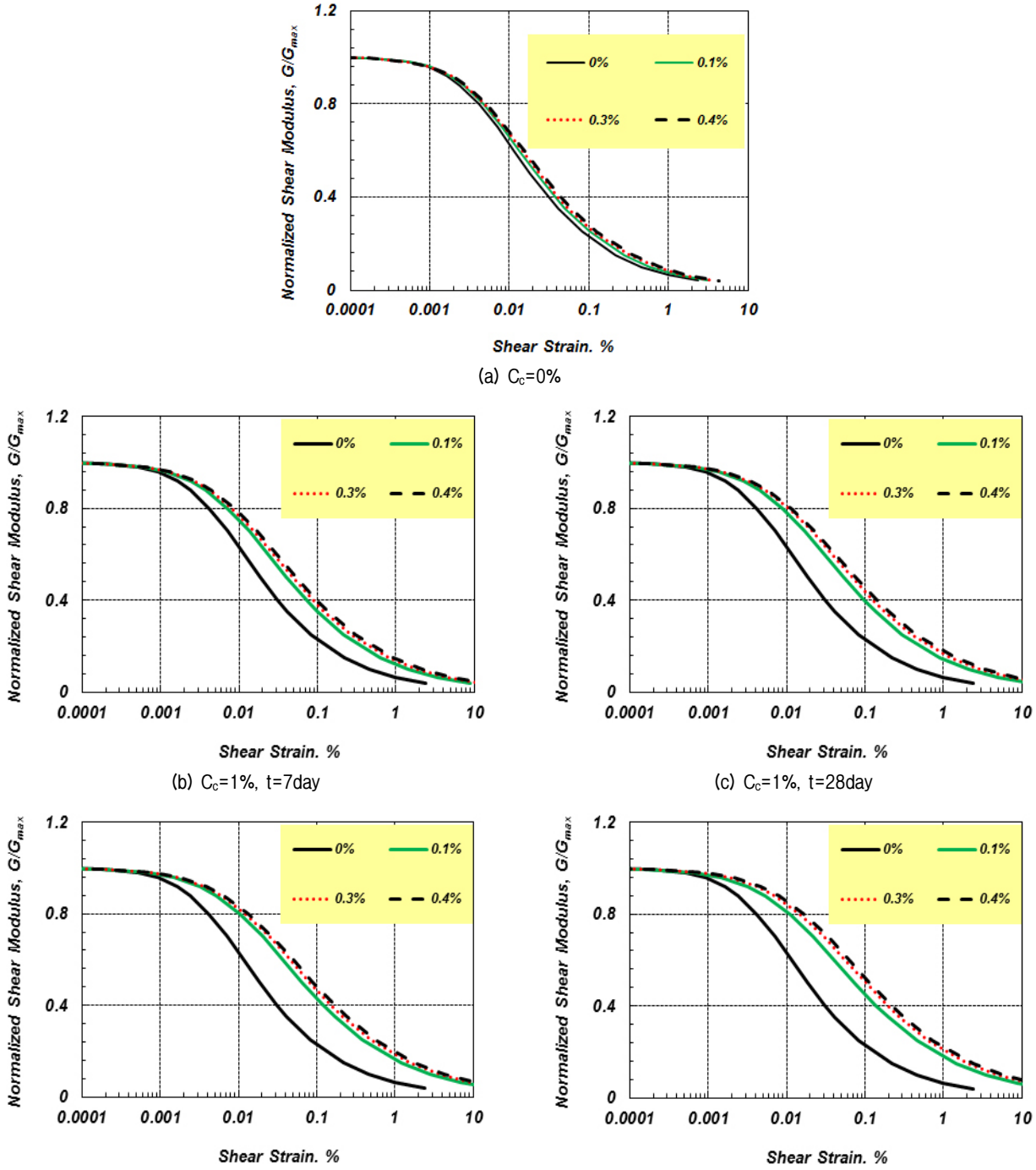


(b) Damping ratio curve

Fig. 10. Normalized shear modulus curves and damping ratio curves for specimens reinforced with vinyl strips only

전단탄성계수(G/G_{max})감소곡선과 감쇠비곡선을 도시한 것으로, 그림에서 보듯이 상대밀도의 영향이 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 공진주/비틂전단시험에 대한 기존 연구결과(추연옥, 2005; 허경한, 2005; 김유성, 2012)와도 일치하며, 따라서 본 연구에서도 정규화 전단탄성계수 감소특성과 감쇠비에 대한 분석은 상대밀도 구분 없이 수행하였다.

Fig. 11은 비닐스트립 혼합률, 시멘트 혼합률과 양생기간에 따른 시편의 정규화전단탄성계수 감소곡선을 도시한 것이다. Fig. 11(a)에서 보듯이 비닐스트립만으로 보강된 경우 비닐스트립 혼합에 따른 전단탄성계수 증가는 매우 미미하게 발현됨을 알 수 있다. 반면 Fig. 11(b)~(e)에서 볼 수 있듯이, 시멘트를 혼합한 시편들은 비닐스트립 혼합에 따른 전단탄성계수의 뚜렷한 증



(a) C_c=0%

(b) C_c=1%, t=7day

(c) C_c=1%, t=28day

(d) C_c=2%, t=7day

(e) C_c=2%, t=28day

Fig. 11. Normalized shear modulus curves under various conditions

가가 관측된다. 특히, 비닐스트립 보강재를 적용하지 않은 경우(V_c=0%)과 최소 혼합률을 적용한 경우(V_c=0.1%) 사이에서 최대전단탄성계수 증가율이 관측되었으며 이후 비닐스트립 혼합률이 증가할수록 다소 둔화되는 경향을 보인다. 또한, 시멘트 혼합률이 증가할수록(Fig. 11(b)→(d)와 (c)→(e)) 시멘트 혼합이 없는 경우(C_c=0%) 보다 비닐스트립에 의한 보강효과가 더욱 뚜렷하게 나타나며, 양생기간이 길어질수록(Fig. 11(b)→(c)와 (d)→(e)) 비닐스트립에 의한 전단탄성계수 증가가 더욱 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있다. 이는 시멘트의 경화에 따른 비닐스트립의 정착력 증가로 보강효과가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 판단된다.

정규화전단탄성계수 감소곡선을 사용하기 위해서는 각 보강조건 및 시편조건에 따른 최대전단탄성계수(G_{max}) 값을 알아야하며, 이를 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 보듯이 구속압, 비닐스트립 혼합률, 시멘트 혼합률, 양생기간 그리고 상대밀도가 증가할수록 최대전단탄성계수 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

보강조건 및 시편조건에 따른 최대전단탄성계수를 분석한 결과, 상대밀도 40%와 60%인 시편 모두 구속압 15kPa 상태에서 최대증가율을 보였으며, 따라서 구속조건이 느슨할수록 동적보강효과가 증가함을 알 수 있다. 이는 느슨한 흙에서 보다 뚜렷한 보강효과가 나타난 일축압축시험 결과(4.1절)와도 일치한다. 또한 상대밀도 40%와 60%인 시편 모두 비닐스트립 혼합률이 0.3%일 때 최대전단탄성계수의 증가율이 가장 컸으며, 28일 양생시편이 7일 양생시편 보다 더 큰 최대전단탄성계수 증가를 보였다.

정규화전단탄성계수 감소곡선의 적용에 필요한 최대전단탄성계수 추정식을 제안하기 위해 Table 5의 상대밀도, 구속압, 간극비, 비닐스트립 혼합률, 시멘트 혼합률, 양생기간을 독립변수로 최대전단탄성계수에 대한 다변수 회귀분석을 수행하였으며, 식 (2)와 같은 최대전단탄성계수 추정식을 제안하였다. Fig. 12는 회귀분석 결과를 도시한 것으로 식 (2)는 0.96의 높은 결정계수 값을 보임을 알 수 있다.

$$G_{\max} = \frac{72.587 \cdot \sigma^{0.088} \cdot Dr^{0.253}}{e^{-5.195 \cdot V_c} + 2.073} + 6.136 \cdot C_c^{0.832} \cdot t^{0.305} \qquad (2)$$

여기서, σ=구속압(15～60kPa), D_r=상대밀도(0.4～0.6), e=간극비(0.61～0.96), V_c=비닐스트립 혼합률(0～0.004),

Table 5. Maximum shear modulus under various conditions of specimens

C_c (%) & t (day)	V_c (%)	$\sigma = 15kPa$		$\sigma = 30kPa$		$\sigma = 60kPa$	
		G_{max} (MPa)		G_{max} (MPa)		G_{max} (MPa)	
		D_r=40%	D_r=60%	D_r=40%	D_r=60%	D_r=40%	D_r=60%
0%	0	26.16	29.41	28.01	30.67	33.30	36.65
	0.1	28.59	31.90	30.00	33.12	34.54	37.93
	0.3	30.36	33.78	31.25	33.44	35.41	38.22
	0.4	31.22	34.03	32.00	34.59	35.96	38.33
1% & 7day	0	32.69	35.24	34.54	37.41	36.83	38.85
	0.1	38.28	40.56	39.68	42.66	42.23	44.61
	0.3	42.73	45.09	43.42	46.26	45.78	48.33
	0.4	44.25	47.18	45.03	47.95	47.99	50.42
1% & 28day	0	41.23	45.30	43.07	46.62	45.36	50.19
	0.1	43.41	46.70	44.81	49.59	47.36	50.98
	0.3	50.28	54.85	51.18	55.65	53.34	56.79
	0.4	52.37	56.93	53.15	57.07	56.11	60.76
2% & 7day	0	39.23	43.11	41.07	44.24	43.36	47.74
	0.1	47.97	50.44	49.37	51.91	51.92	55.95
	0.3	55.10	57.99	55.99	60.43	58.15	60.76
	0.4	57.28	60.39	58.05	61.96	61.01	64.22
2% & 28day	0	51.70	55.14	53.55	57.68	55.83	59.41
	0.1	56.86	61.54	58.23	63.09	60.81	64.71
	0.3	61.61	65.19	62.50	65.63	64.66	69.06
	0.4	64.60	68.88	65.38	70.33	68.34	71.96

C_c=시멘트 혼합률(0～0.02), t=양생기간(7～28일)이다.

또한 7일 양생시편의 최대전단탄성계수로부터 28일 양생시편의 최대전단탄성계수를 추정할 수 있는 추정식을 식 (3)과 같이 제안하였으며, Fig. 13은 회귀분석 결과를 결정계수(R^2=0.94)와 함께 도시한 것이다.

$$G_{\max(28)} = G_{\max(7)} + 1.238\sqrt{G_{\max(7)}} \quad (3)$$

여기서, $G_{max(28)}$=28일 양생 시편의 최대전단탄성계수(MPa), $G_{max(7)}$=7일 양생 시편의 최대전단탄성계수(MPa)이다.

Fig. 14는 비닐스트립 혼합률, 시멘트 혼합률, 양생기간에 따른 시편의 감쇠비곡선을 도시한 것이다. 그림에서 시멘트 혼합률, 양생기간, 그리고 시편의 상대밀도와 관계없이 모든 조건에서 비닐스트립 혼합률이 증가할수록 감쇠비가 감소함을 알 수 있다. Fig. 14(a)에서 보듯이 비닐스트립만으로 보강된 경우 비닐스트립 혼합에 따른 감쇠비 곡선의 변화가 매우 미미하게 발현됨을 알 수 있다. 또한 시멘트 혼합률 증가에 따른 감쇠비 곡선의 변화는 크게 차이가 나지 않았지만(Fig. 14(b)→(d)와 (c)→(e)), 동일한 시멘트 혼합률인 경우 7일 양생기간 시편 보다 28일 양생기간 시편이 전단변형률에 따른 감쇠비 변화가 더 크게 나타났다(Fig. 14(b)→(c)와 (d)→(e)).

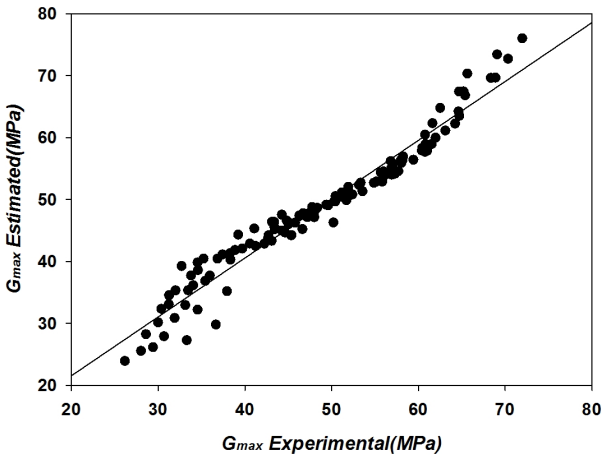


Fig. 12. Relationship between estimated and experimental values of maximum shear modulus (G_{max})

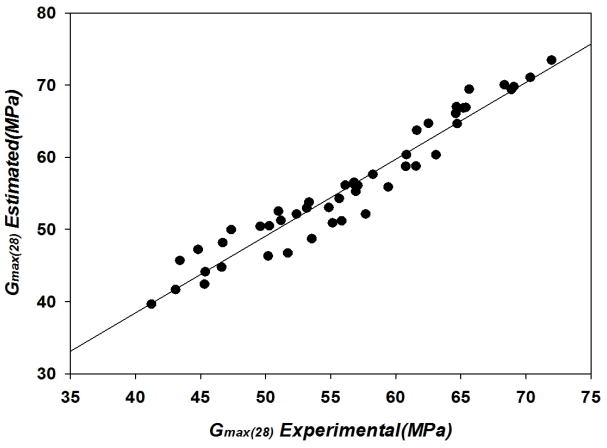


Fig. 13. Relationship between estimated and experimental values of maximum shear modulus for 28-day cured specimens ($G_{max(28)}$)

4. 결 론

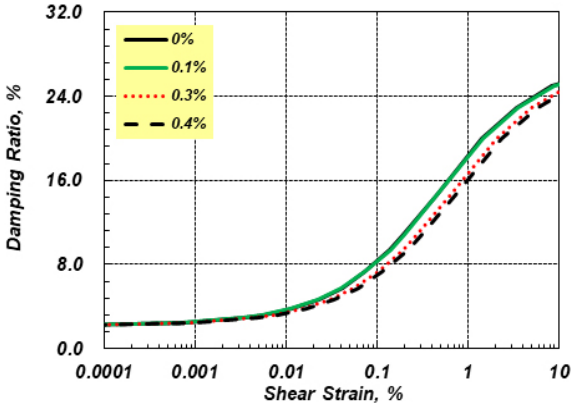
본 연구에서는 모래질 흙에 대한 비닐스트립과 시멘트의 보강효과를 상대밀도에 따라 확인하기 위하여 다양한 보강조건의 시편에 대한 일축압축시험과 공진주/비틂전단시험을 수행하였으며, 시험결과 분석을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 보강시편과 무보강시편의 일축압축강도비, R(=q_u/q_{u0})의 증가율은 비닐스트립 보강재를 적용하지 않은 시편(V_c=0%)과 최소 혼합률을 적용한 시편(V_c=0.1%) 사이에서 최대값을 보이고 이후 비닐스트립 혼합률이 증가할수록 다소 둔화되는 경향을 보였다.

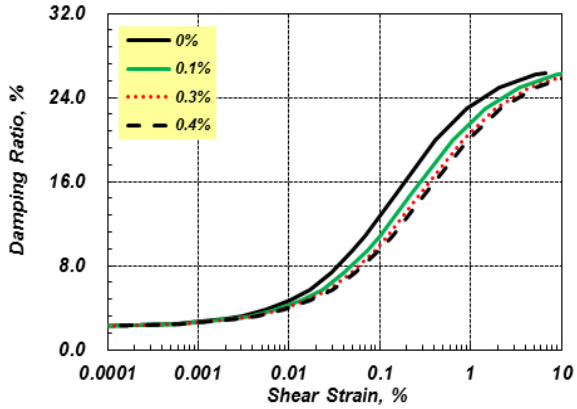
(2) 비닐스트립 혼합률에 따른 일축압축강도비, Rv($q_u/q_{u(V_c=0)}$)는 본 연구의 최대 비닐스트립 혼합률 0.4% 이상에서도 계속 증가할 것으로 판단된다. 또한 Rv_{40}/Rv_{60}는 대부분 1 보다 크므로 비닐스트립의 보강효과는 상대밀도 40% 시편에서 더 크게 발현됨을 확인할 수 있었다.

(3) 시멘트 혼합률에 따른 일축압축강도비, Rc($q_u/q_{u(C_c=0)}$)는 상대밀도 60% 시편에서 더 뚜렷하게 발현되었다. 또한 일축압축강도 증가는 시멘트 혼합률이 1%를 초과할 경우 둔화되었으며, 양생기간이 길어질수록 뚜렷해짐을 알 수 있다.

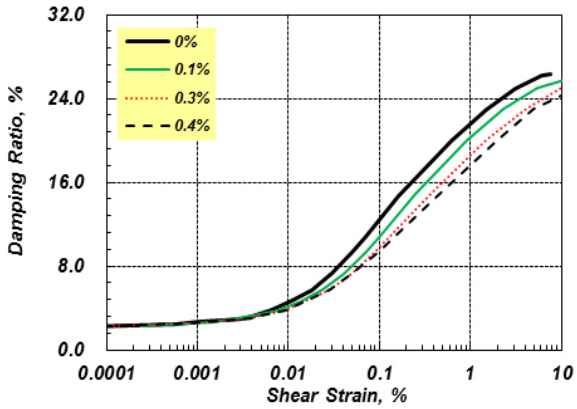
(4) 비닐스트립만으로 보강된 시편의 경우 전단탄성계수 증가는 거의 없었으며, 시멘트를 혼합한 경우에 비닐스트립 보강재를 적용하지 않은 경우(V_c=0%)와 최소혼합률을 적용한 경우(V_c=0.1%) 사이에서 최대 전단탄성계수 증가가 발생하였고, 이후 비닐스트립 혼합에 따른 전단탄성계수의 증가는 급격히 둔화되는 경향을 보였다.



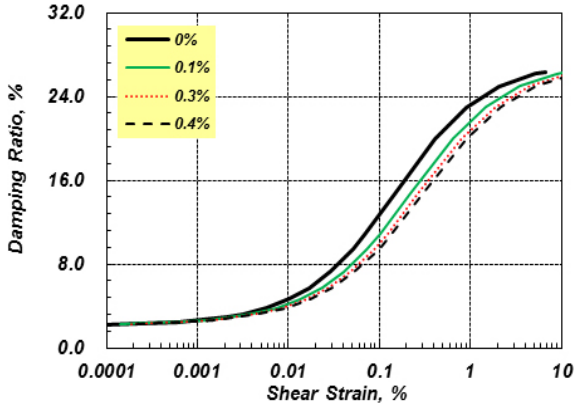
(a) C_c=0%



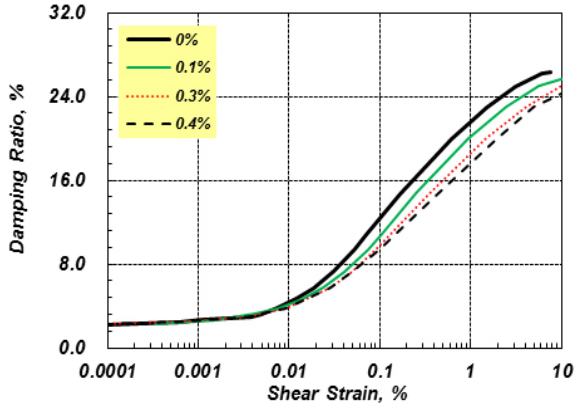
(b) C_c=1%, t=7day



(c) C_c=1%, t=28day



(d) C_c=2%, t=7day



(e) C_c=2%, t=28day

Fig. 14. Damping ratio curves under various conditions

(5) 시멘트 혼합률과 양생기간이 증가할수록 비닐스트립에 의한 동적 보강효과가 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 시멘트의 경화로 인해 비닐스트립 정착효과가 더 뚜렷해지는 데에서 기인하는 것으로 판단된다.

(6) 최대전단탄성계수(G_{max})의 증가율은 구속압 15kPa 상태와 비닐스트립 혼합률 0.3%에서 가장 컸으며, 양생기간이 길수록 더 큰 증가율을 보였다.

(7) 비닐스트립 혼합률 증가에 따른 감쇠비의 감소효과는 비닐스트립만으로 보강된 시편 보다는 시멘트를 혼합한 시편에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 반면 시멘트 혼합률에 따른 감쇠비의 변화는 미미하게 발생하였고, 양생기간이 길수록 감쇠비에 대한 비닐스트립 혼합률의 영향이 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/교통물류연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 18TLRP-C099510-04)과 2013년 한국연구재단의 기본연구지원사업의 지원(NRF-2010-0013408)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Korea environment corporation (2016), *Research of agriculture waste in 2015(in korean)*, KECO2016-RE02-17.
2. Korea federation of plastic industry cooperatives (2018), *Polyethylene films for agriculture*, SPS-KPS M 1001-0806:2018.
3. Babu, G.L.S. and Chouksey, S.K. (2011), "Stress-strain Response of Plastic Waste Mixed Soil", *Waste Management*, Vol.31, pp. 481-488.
4. Botero, E., Ossa, A., Sherwell, G., and Ovando-Shelley, E. (2015), "Stressestrain behavior of a Silty Soil Reinforced with Polyethylene Terephthalate (PET)", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.43, pp. 363-369.
5. 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 (CiVEJ)*, Vol.1, No.1.
6. Cho, Y.W. and Kim, D.S. (2005), "Dynamic Deformation Characteristics of Sands under Various Drainage Conditions", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.3, pp.27-42.
7. Choudhary, A.K., Jha, J.N., and Gill, K.S. (2010), "A Study on cbr behavior of Waste Plastic Strip Reinforced Soil", *Emirates Journal for Engineering Research*, 15(1), pp.51-57.
8. Consoli, N.C., Montardo, J.P., Prietto, P.D.M., and Pasa, G.S. (2002), "Engineering behavior of a Sand Reinforced with Plastic Waste", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, pp.462-472.
9. Dutta, R.K. and Sarda, V.K. (2007), "CBR behaviour of Waste Plastic Strip-reinforced Stone Dust/fly ash Overlying Saturated Clay", *Turkish J. Eng. Env. Sci. 31*, pp.171-182.
10. Huh, K.H. and Baek, J.Y. (2005), "Dynamic behavior of Unsaturated Decomposed Granite Soils under Low Shear Strain Amplitude", *J. of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.5, No.2, pp.57-63.
11. Kato, T., Ochiai, H., Yasufuku, N., Omine, K., and Ohno, S. (1995), "Effects of Improvement of Cement-treated Soils Mixed with Plastic Pieces", *Technology Reports of Kyushu University*, Vol.68, No.6 (in Japanese).
12. Kim, Y.S., Ko, H.W., Kim, J.H., and Lee, J.G. (2012), "Dynamic Deformation Characteristics of Joomunjin Standard Sand Using Cyclic Triaxial Test", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.28, No.12, pp.53-64.
13. Sobhan, K. and Mashnad, M. (2003), "Mechanical Stabilization of Cemented Soil-fly Ash Mixtures with Recycled Plastic Strips", *Journal of Environmental Engineering*, Vol.129, No.10, pp.943-947.

Received : July 26th, 2018
Revised : September 21st, 2018
Accepted : September 27th, 2018