

합성섬유로 보강된 시멘트-점토-모래 혼합토의 휨성능 평가에 관한 연구

Flexural Performance of Cement Treated Clay-Sand Mixtures Reinforced with Synthetic Fibers

정두회¹, 조백순^{2*}, 이용윤³

Du-Hwoe Jung¹, Baik-Soon Cho^{2*}, Yong-Yun Lee³

¹Member, Professor, School of Civil Engineering, Pukyong Nation Univ., 45 Yongso-Ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

²Member, Professor, School of Civil Engineering, In-je Univ., 197 Inje-Ro, Gimhae-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

³CEO, Seoyul Construction Co., 48-6, Gimhae-daero 2492beon-gil, Gimhae-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

ABSTRACT

The effects of synthetic fibers, cement content, and sand content on the flexural performance of cement-clay-sand mixtures has been evaluated through a flexural performance test with a third-point loading. Beam specimens for the flexural performance test were fabricated with a various amount of cement, sand, and synthetic fibers. Two types of fibers, PVA (Polyvinyl alcohol) and PP (Polypropylene) fibers, were employed in the test. The test results have exhibited that the factors considered in the test have significant effects on the flexural performance of the mixtures in several aspects. The flexural performance of the mixtures has been improved if the mixtures were reinforced with synthetic fibers. The flexural strength and the flexural toughness of the mixtures has been increased as the fiber content was increased. A multiple linear regression analysis has been performed to evaluate the effect of fiber content, cement dosage, and sand content on the flexural performance of the mixtures in terms of flexural strength and flexural toughness. Cement content and sand content were estimated as important factors to have an influence on the first-crack strength and the peak strength whereas the fiber content has the most significant influence on the post-crack behavior. The first-crack strength and the ultimate strength were increased as the cement content and the sand content were increased. As the fiber content was increased, the flexural toughness was increased.

요 지

본 연구는 시멘트-점토-모래 혼합토에 합성 섬유(PP, PVA)를 보강하여 휨성능을 향상시키는 효과를 평가하기 위하여, 시멘트 함량(10%, 20%), 모래 함량(6mm, 12mm), 합성 섬유 함량(0.5%, 1.0%, 1.5%)을 달리하여 실험을 실시하였다. 실험 결과, 시멘트 함량과 모래 함량이 증가하면 첫 균열 강도와 최대 강도가 증가하였고, 합성 섬유 함량이 증가하면 균열 후 거동 특성이 개선되었다. 시멘트 함량과 모래 함량은 첫 균열 강도와 최대 강도에 영향을 미치는 주요 인자로 판단되었으며, 합성 섬유 함량은 균열 후 거동에 가장 큰 영향을 미친다. 첫 균열 강도와 최종 강도는 시멘트 함량과 모래 함량이 증가함에 따라 증가하였고, 합성 섬유 함량이 증가함에 따라 휨성능이 향상되었다.

Keywords : Flexural performance test, Synthetic fiber, Cement content, Sand content, Fiber content, PP fiber, PVA fiber

1. 서 론

연약한 점성토 지반에 심층혼합공법(DMM; deep mixing

method)에 의하여 조성된 개량체 기둥으로 지지된 성토제 방에 대한 기존의 설계법(BS 8006, 1995; EuroSoilStab, 2002; CDIT, 2002)에서는 개량체 기둥과 기둥 사이의 미 개량 지반이 합성거동을 한다는 것을 전제로 기둥이 설치된 지반을 복합지반으로 간주하고 면적치환비(area replacement ratio)를 고려해서 환산한 복합전단강도(composite shear

Received 21 Dec. 2016, Revised 23 Feb. 2017, Accepted 6 Mar. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-55-320-3555; Fax: +82-55-321-3410

E-mail address: civcho@inje.ac.kr (B. S. Cho)

strength) 또는 평균전단강도(average shear strength)를 이용하여 가상의 원호활동면에 대한 극한평형해석을 통해서 성토제방 사면의 안정성을 평가하고 있다. 그러나 원지반에 비해서 강성이 훨씬 크고 취성거동을 보이는 시멘트 개량체 기둥으로 지지된 성토제방의 안정해석에 이러한 극한평형해석법을 적용하는 경우 성토제방의 안정성을 과대평가하는 것으로 알려져 있다(Broms, 1999).

Kivelo and Broms(1999), Broms(2003), Terashi(2003) 등은 석회 개량체 기둥에 비해서 강성이 큰 시멘트/석회 또는 시멘트 개량체 기둥으로 지지된 성토제방의 붕괴사례에 대해서 분석한 결과에서 개량체 기둥이 휨 또는 전도에 의한 파괴가 발생한다는 사실을 확인한 바가 있다. 또한 Miyake et al.(1991), Kitazume et al.(1999, 2000), Kitazume and Maruyama(2007), Inagaki et al.(2002)은 원심모형시험과 유한요소해석을 통해서 성토제방을 지지하는 시멘트 개량체 기둥은 전단파괴 보다는 휨 또는 전도에 의한 파괴가 발생할 가능성이 더 크다는 사실을 확인하였다.

Han et al.(2005), Navin(2005)은 수치해석법을 이용해서 시멘트 또는 시멘트/석회 개량체 기둥으로 지지된 성토제방에 대한 안정성을 분석한 결과, 전단파괴만을 고려한 현재의 설계법은 전단파괴에 대한 안전율을 지나치게 과대평가할 수 있다는 사실을 확인하였다. Navin(2005)은 연약점토층에 설치한 시멘트 개량체 기둥(면적치환비 20%)으로 지지된 성토제방(높이 5.4m)에 대하여 개량지반을 복합지반으로 간주하고 전단파괴만 고려한 극한평형해석 결과와 개량체 기둥의 전도파괴와 휨파괴를 고려한 수치해석 결과에 대하여 신뢰성분석을 실시하였다. Navin의 해석결과에 의하면 전단파괴만 고려한 해석을 통해서 얻은 안전율에 비해서 개량체 기둥의 전도와 휨파괴를 고려한 수치해석 결과에 의한 안전율이 훨씬 낮게 평가되었으며, 파괴확률도 더 높은 것으로 평가되었으며, 전단파괴만을 고려한 극한평형해석은 시멘트 개량체 기둥으로 지지된 성토제방의 안전성을 지나치게 과대평가하는 결과를 초래한다고 언급하였다.

따라서 시멘트 개량체 기둥으로 지지된 성토제방의 안정성에 대한 신뢰성과 경제성을 확보하기 위해서는 심층혼합공법으로 조성된 시멘트 개량체의 휨성능과 이를 개선시키기 위한 연구가 필요하다. 시멘트 또는 석회/시멘트를 안정제로 사용하는 심층혼합공법에 의한 개량토의 공학적 거동에 대해서는 주로 일축압축 또는 삼축압축 시험을 통한

연구가 활발하게 수행되었으며, 시멘트 개량체는 시멘트량이 증가할수록 강도는 커지지만, 균열제어 능력이 낮고 취성파괴가 발생하는 단점이 있다(Sugiyama et al., 1980; Terhashi et al., 1980; Tatsuoka and Kobayashi, 1983).

최근에는 시멘트, 석회, 또는 플라이 애쉬 등으로 안정처리한 점토의 역학적 거동을 개선하기 위하여 PET(Polyester), PP(Poly-Propylene), PVA(Polyvinyl alcohol), Nylon 등의 섬유로 보강한 시멘트/석회/플라이 애쉬-점토 혼합토에 관한 연구가 많이 진행되고 있다(Kumar et al., 2006; Jadhao and Nagarnaik, 2008; Rafalko et al., 2009; Yilmaz and Karatas, 2011; Chegenizadeh and Nikraz, 2012; Fatahi et al., 2012; Estabragh et al., 2012). 이들의 연구결과에 의하면 섬유의 보강으로 인하여 안정처리한 점토의 일축압축강도와 파괴변형률이 증가할 뿐만 아니라 균열이 발생한 후에도 잔류강도가 발현되면서 취성거동이 연성거동으로 개선되었으며, 또한 인장강도도 증가하였다고 보고하였다. 이와 같이 시멘트, 석회, 플라이 애쉬 등을 이용해서 안정처리한 점토를 다양한 종류의 섬유를 이용해서 보강한 혼합토에 대한 기존의 연구는 대부분 함수비가 낮은 점토를 대상으로 다짐특성, 지지력, 일축압축강도에 관한 것이 대부분이었고, 휨강도 및 휨인성에 관한 연구는 극히 제한적으로 수행되었다(Kim et al., 2012a, 2012b; Kim, 2013).

본 연구에서는 연약한 점토지반에 도로 또는 철도 건설을 위한 성토제방을 축조하는 경우 성토제방의 안정성 확보를 위하여 점토지반에 심층혼합공법으로 조성된 시멘트 개량체 기둥의 휨성능을 개선할 목적으로 PP 섬유와 PVA 섬유로 보강한 시멘트-점토 혼합토에 대한 휨성능 시험을 통해서 PP 섬유와 PVA 섬유 보강토의 시멘트 첨가량, PVA 섬유 혼입율 및 길이, 그리고 모래 함량에 따른 휨강도와 휨인성을 평가하였다. 또한 시험 결과에 대한 통계분석을 실시하여 섬유보강토의 휨성능(휨강도와 휨인성)과 시멘트량, 섬유 혼입율 및 길이, 그리고 모래 함량의 상관관계를 분석하였다.

2. 시험계획 및 방법

2.1 사용재료

2.1.1 벤토나이트

본 연구에서는 섬유와 모래가 시멘트와 점토 혼합토의 휨거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 점토광물 몬토

릴로라이트(montmorillonite)가 주성분인 벤토나이트를 점토 대용으로 사용하였다. 본 연구에 사용한 벤토나이트의 균질성 확인을 위하여 벤토나이트를 구입할 때 마다 시료를 2개씩 채취하여 총 6개의 시료에 대해서 X-선 회절분석(XRD; X-ray diffraction analysis)과 비중, 액소성한계 등의 실내토질시험을 실시하였다. X-선 회절분석 결과 본 연구에 사용한 벤토나이트의 주요 점토광물은 몬모릴로라이트와 illite계로 구성되어 있으며, 벤토나이트에 대한 실내토질시험 결과 #200체 통과량은 약 70% 정도이고, 비중은 평균 2.21, 소성지수는 평균 22.4% 정도이다.

2.1.2 섬유보강재

콘크리트 또는 흙의 역학적 특성을 개선할 목적으로 많이 사용되고 있는 PP(Poly-Propylene) 섬유와 PVA(Polyvinyl alcohol) 섬유를 보강재로 사용하였으며(Fig. 1 참조), 각 보강재의 물리적 특성과 역학적 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다.

2.1.3 모래

본 시험에 사용한 모래는 낙동강 하류 지역에서 채취하였으며, 조개껍질 등의 이물질을 제거하고 균등한 입도를 유지하기 위하여 채취한 모래를 체가름하여 #40체를 통과하고 #200체에 잔류한 부분을 사용하였다.

2.1.4 시멘트

본 시험에 사용한 안정제는 보통포틀랜드 시멘트이다.

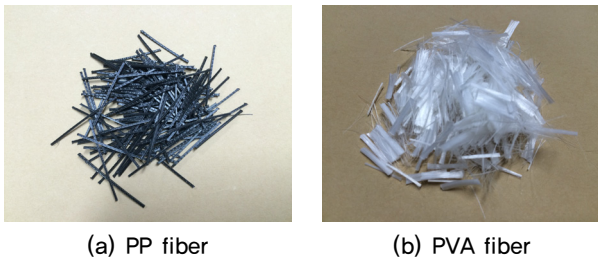


Fig. 1. Design Hydrograph of Sung-Ju Station

Table 1. Physical properties of synthetic fibers employed in the test

Behavior parameters	PVA fiber	PP fiber
Fiber type	Single type	Single type
Specific gravity	1.2	0.91
Average diameter	15~15 μm	0.85 mm x 0.95 mm
Average length	2~19 mm	60 mm
Breaking tensile strength	900 MPa	750 MPa
Modulus of elasticity	20 GPa	6 GPa

2.2 시험편 제작

2.2.1 시험편 제작조건

본 휨성능 시험용 시험편 제작에 사용한 시멘트량(A_w), 섬유혼입량(F_c), 모래함량(S_c)은 식 (1)~(3)과 같이 정의하였다.

$$A_w = \frac{W_c}{W_b} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$F_c = \frac{W_f}{G_f v_s} \times 100 (\%) \quad (2)$$

$$S_c = \frac{W_s}{W_b} \times 100 (\%) \quad (3)$$

여기서, W_c = 시멘트의 무게

W_b = 벤토나이트의 무게

W_f = 섬유의 무게

W_s = 모래의 무게

v_s = 벤토나이트의 부피

G_f = 섬유의 비중

본 연구에서는 섬유와 모래의 혼입이 시멘트-점토 혼합토의 휨성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Table 3과 같은 시험계획을 수립하였다. 시험편(75mm × 75mm × 285mm)은 시험결과의 신뢰성 향상을 위하여 각 배합조건에 대해서 8개씩 총 720개의 시험편을 제작하였다. 각 시험편의 시멘트량, 섬유의 종류, 섬유의 길이 및 혼입량, 그리고 모래함량은 Table 3에 나타난 바와 같다.

2.2.2 시험편 제작과정

본 연구에서는 “실험실에서 흙-시멘트의 압축 및 휨 강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법(KS F 2329)”과 “Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory(ASTM D 1632-07)”에 의거하여 시험편을 제작하였다. 시험편의 제작과정은 1) 계량된 벤토나이트와 물을 별도로 혼합하여 시멘트 슬러리(함수비 100%) 제작, 2) 보강재의 분산효과를 높이기 위해서 섬유혼입량에 따라 계량된 섬유를 시멘트 슬러리에 바로 첨가하여 골고루 혼합, 3) 섬유가 분산된 콘크리트 교반기에 투입하고 4분

Table 2. Experiment design

Cement dosage (%)	Sand content (%)	Fiber types	Fiber content (%)
15, 20, 25	0	PP	0.5, 1.0, 1.5
		PVA 12 mm	0.5, 1.0, 1.5
		PVA 6 mm	0.5, 1.0, 1.5
		None	0
15, 20, 25	10	PP	0.5, 1.0, 1.5
		PVA 12 mm	0.5, 1.0, 1.5
		PVA 6 mm	0.5, 1.0, 1.5
		None	0
15, 20, 25	20	PP	0.5, 1.0, 1.5
		PVA 12 mm	0.5, 1.0, 1.5
		PVA 6 mm	0.5, 1.0, 1.5
		None	0

간 교반 후, 섬유가 분산된 시멘트 슬러리를 2회로 나누어서 투입하면서 각각 2분씩 총 10분 동안 교반(회전속도 60rpm)하였다. 4) 공시체 내의 기포를 제거하기 위하여 교반이 완료된 시료를 몰드에 3층으로 나누어 넣으면서 층격다짐과 진동판을 이용하여 진동다짐을 실시하였다. 5)

다짐이 완료된 시험편은 플라스틱 랩으로 밀봉한 채로 24 시간 동안 기증양생 시킨 후 몰드를 제거하고 시험편을 양생수조(20±2°C)에서 28일간 수증양생을 실시하였다.

2.3 휨성능 시험방법

보강섬유의 종류, 길이, 혼입량 및 모래함량이 혼합토의 휨인성(Flexural toughness)과 휨강도(Flexural strength)에 미치는 영향을 평가하기 위하여 “강섬유 보강 콘크리트의 휨성능 시험 방법(KS F 2566)”과 “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (ASTM C 1609/C 1609M-12)”에 따라 재령 28일의 시험편에 대해서 Fig. 2와 같이 휨성능 시험을 수행하였다.

휨성능 시험은 시험기에 부착된 변위계를 일정한 속도로 제어하면서 시험편이 파괴될 때까지하중을 가하였다. 하중 증가에 따라 발생하는시험편 중립면 중앙에서의 순처짐량을 측정하기 위하여 LVDT 고정 장치를 제작하여 사용하였으며, 시험편의 전면과 후면에 2개의 LVDT를 설치하여 측정된 처짐량의 평균값을 순처짐량으로 하였다.

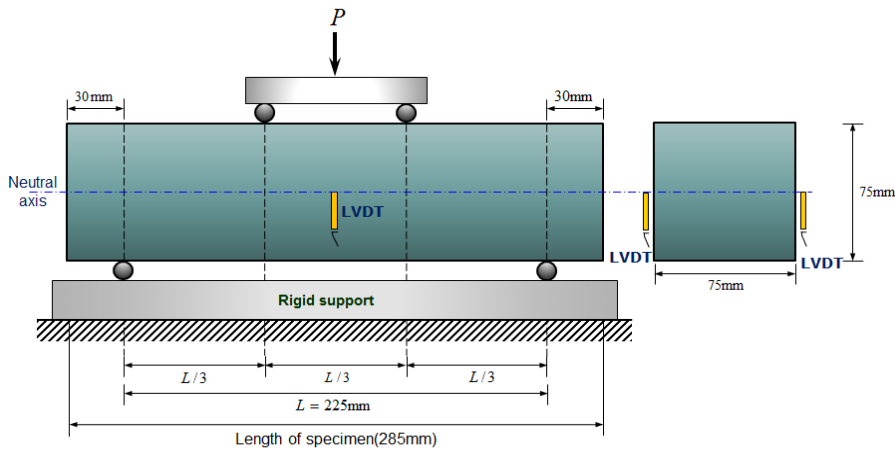


Fig. 2. Flexural performance test (after ASTM C1609/C1609M-10)

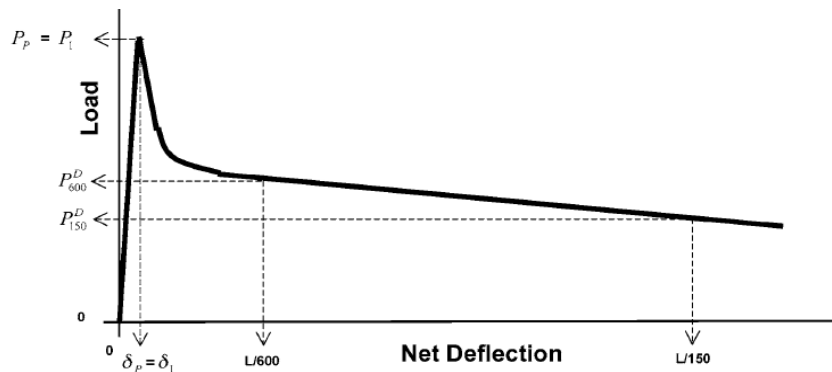


Fig. 3. Load-net deflection curve for first-peak load equal to peak load (after ASTM C1609M-10)

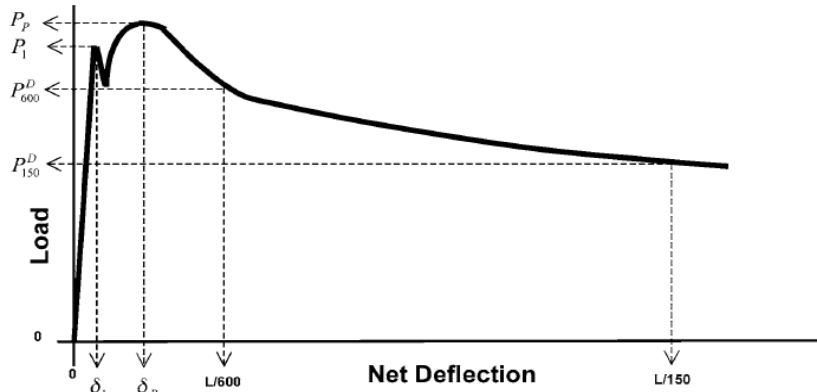


Fig. 4. Load-net deflection curve when peak load is greater than first-peak load (after ASTM C1609M-10)

Table 3. Explanation of terms in Figs. 3 and 4

Symbols	Descriptions
L	Span length
P_1	First-Peak Load
P_p	Peak Load
δ_1	Net deflection at First-peak load
δ_p	Net deflection at Peak load
f_1	First-peak strength
f_p	Peak strength
P_{600}^D	Residual load at net deflection of L/600
P_{150}^D	Residual load at net deflection of L/150
T_{150}^D	Area under the load vs. net deflection curve 0 to L/150

Fig. 3과 Fig. 4는 휨성능 시험으로 얻을 수 있는 대표적인 하중-순처짐 곡선이다.

하중-순처짐 곡선으로부터 초기균열 발생 시의 하중 (first-peak load), P_1 과 최대하중(peak load), P_p 를 구하여 각각 식 (4), 식 (5)를 이용해서 균열강도(first-peak strength), f_1 과 최대강도(peak strength), f_p 를 계산하였다.

$$f_1 = \frac{P_1 L}{b d^2} \quad (4)$$

$$f_p = \frac{P_p L}{b d^2} \quad (5)$$

여기서, b = 시험편의 폭
 d = 시험편의 높이

Fig. 4와 Fig. 5의 하중-순처짐 곡선에서 시험편의 순처짐량이 각각 $L/600(=0.375\text{mm})$, $L/150(=1.5\text{mm})$ 일 때에

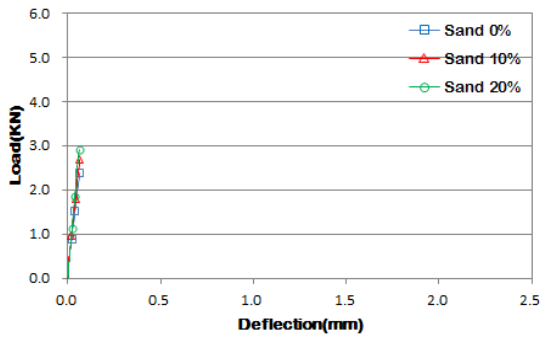
해당하는 하중-순처짐 곡선의 면적을 계산하여 휨인성 T_{600}^D , T_{150}^D 을 구하였다.

3. 휨성능 시험 결과

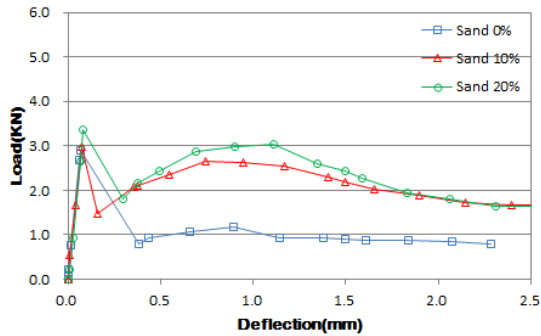
3.1 하중-순처짐 곡선

Fig. 5(a)는 무보강 혼합토(섬유혼입량 0%)의 시멘트량 25%일 때 모래함량의 변화에 따른 하중-순처짐 곡선을 나타낸 것으로 하중이 증가함에 따라 처짐량도 비례하여 증가하다가 하중이 최초 균열하중(P_1)에 도달함과 동시에 파괴가 발생하는 취성파괴의 형태로 나타났다. 모래함량이 증가함에 따라 최초 균열하중(P_1)도 증가하는 것을 알 수 있다. 무보강 혼합토의 경우 균열 발생 직후 파괴로 이어지기 때문에 최초 균열하중(P_1)과 최대하중(P_p)은 동일한 값을 갖는다.

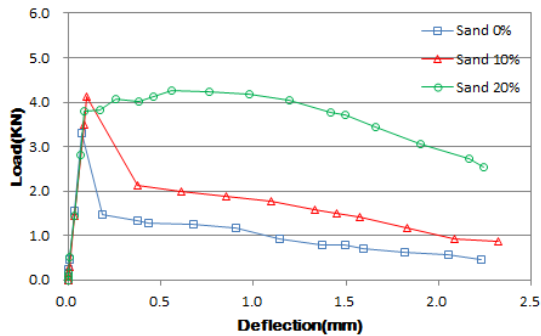
Fig. 5 (b), (c), (d)는 각각 시멘트량 25%, PP, 6mm PVA, 12mm PVA 섬유혼입량 1.5%일 때 모래함량의 변화에 따른 하중-처짐 곡선을 비교한 그래프이다. 섬유보강토의 경우 하중이 증가함에 따라 처짐량도 비례하여 증가하다가 시험편 하부에서 균열이 발생하는 시점에서 하중이 P_1 에 도달한 이후에 섬유의 bridging 효과로 인하여 잔류강도가 발견되어 급격한 파괴에는 도달하지 않고 균열의 폭과 길이가 점차적으로 증가하면서 파괴가 지연되는 연성거동을 보이는 것으로 나타났다. 모래함량이 증가할수록 최초 균열하중이 커지는 경향을 보이고 있으며, 무보강 혼합토의 경우와 유사하게 시멘트량이 증가할수록 최초 균열하중도 커지는 경향을 보이고 있다. 최초 균열발생 후 잔류강도의 발견에는 시멘트량, 모래함량, 섬유혼입량이 모두 영향을 미치는 것으로 나타났다.



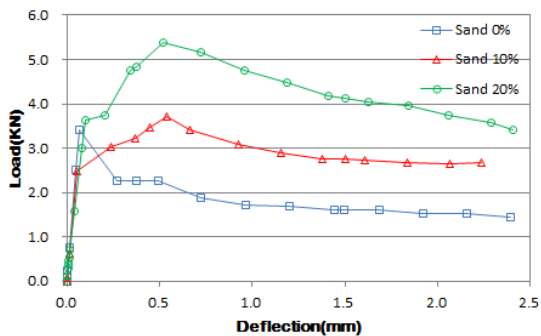
(a) Fiber content 0%



(b) PP fiber content 1.5%



(c) 6 mm PVA fiber content 1.5%



(d) 12 mm PVA fiber content 1.5%

Fig. 5. Design Hydrograph of Sung-Ju Station

3.2 휨강도

무보강 혼합토의 시멘트량과 모래함량에 따른 최초 균

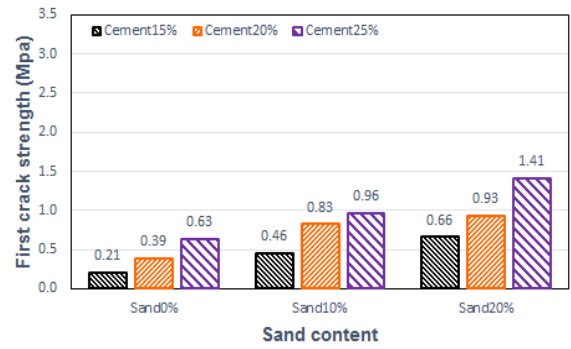
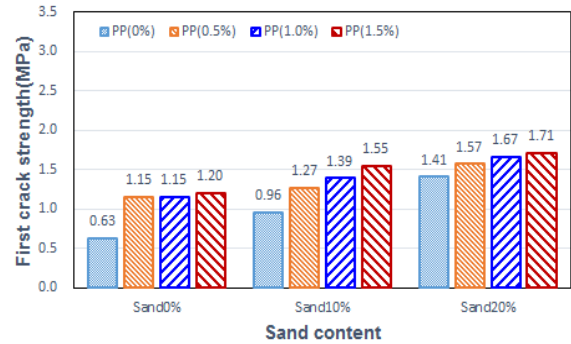
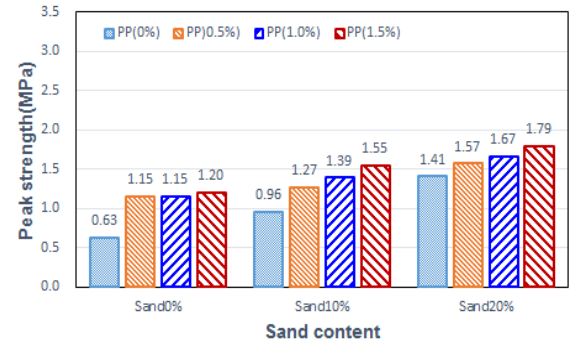


Fig. 6. Flexural strengths of cement-clay-sand mixtures



(a) First crack strength

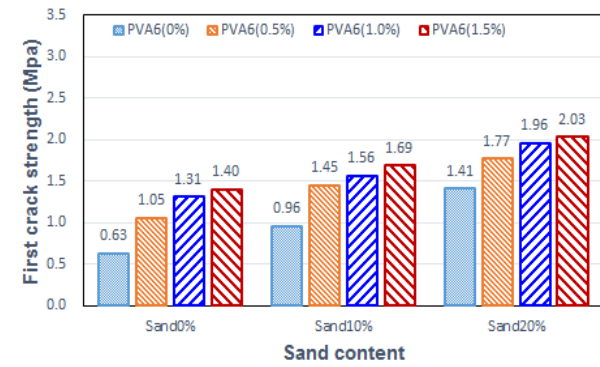


(b) Peak strength

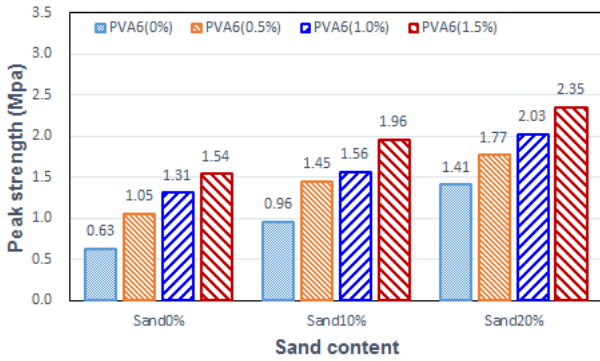
Fig. 7. Flexural strengths of mixtures reinforced with PP fiber ($A_w=25\%$)

열강도의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 무보강 혼합토의 경우 균열 발생 후 잔류강도가 발현되지 않는 거동을 보이기 때문에 최초 균열강도와 최대강도는 동일한 값을 갖는다. 시멘트량이 증가할수록 휨강도가 증가하고, 또한 시멘트량이 동일한 경우 모래함량이 많을수록 휨강도가 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7~9는 각각 PP 섬유보강토, 6mm PVA 섬유보강토, 그리고 12mm PVA 섬유보강토의 시멘트량이 25%일 때 모래함량과 섬유혼입량이 균열강도와 최대강도에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 시멘트량이 동일할 때 모래함량과 섬유혼입량이 증가함에 따라 최초 균열강도와 최

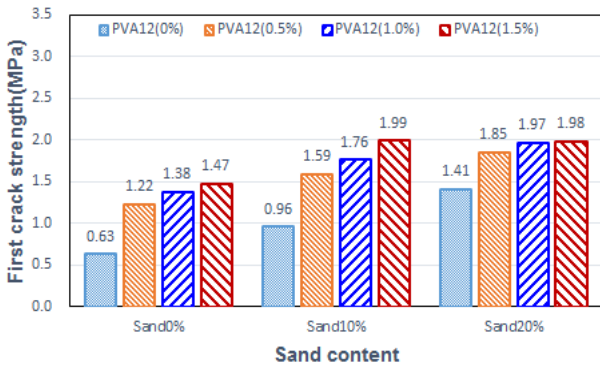


(a) First crack strength

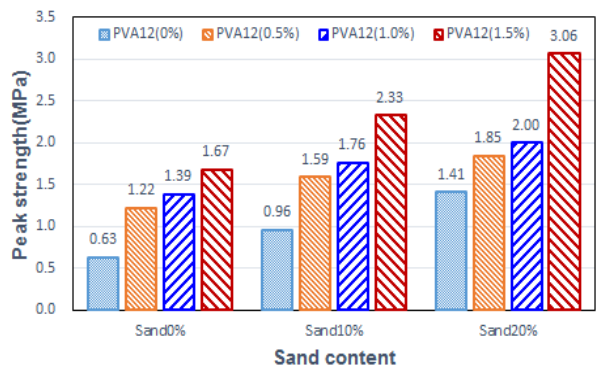


(b) Peak strength

Fig. 8. Flexural strengths of mixtures reinforced with 6mm PVA fiber ($A_w=25\%$)



(a) First crack strength



(b) Peak strength

Fig. 9. Flexural strengths of mixtures reinforced with 12mm PVA fiber ($A_w=25\%$)

대강도가 증가하는 경향을 보이고 있다. PP 섬유보강토의 경우 대체적으로 균열강도와 최대강도의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 PVA 섬유보강토의 경우 섬유혼입량이 1.5%일 때 균열강도에 비해서 최대강도가 더 크게 발현되는 경향을 보이고 있다.

3.3 휨인성

Fig. 10은 시멘트-점토-모래 혼합토의 최초 균열발생 시까지의 에너지 흡수능력을 의미하는 초기균열 인성과 시멘트량 및 모래함량의 관계를 나타낸 그래프이다. 시멘트량이 증가함에 따라 초기균열 인성이 증가하는 경향을 보이고 있으며, 모래함량의 증가도 초기균열 인성의 증가에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 시멘트-점토-모래 혼합토의 균열제어 능력은 매우 경미한 것으로 나타났다.

Fig. 11~13은 각각 PP 섬유, 6mm PVA 섬유, 그리고 12mm PVA 섬유로 보강한 시멘트-점토-모래 혼합토의 시멘트량이 25%일 때 모래함량과 섬유혼입량이 휨인성(T_{150})에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다. 모래함량과 섬유혼입량이 증가할수록 휨인성이 커지는 경향을 보이고 있으며, 모래함량과 섬유혼입량의 증가에 따른 T_{150} 의 변화가 뚜렷하게 나타나고 있다.

PP 섬유보강토의 경우 6mm, 12mm PVA 섬유보강토에 비해서 상대적으로 휨인성이 더 작은 것으로 나타났으며, 섬유혼입량의 증가에 따른 휨인성 증가율도 상대적으로 더 작게 나타났다. PVA 섬유보강토의 경우 모래함량과 섬유혼입량의 증가에 따른 T_{150} 의 증가는 PP 섬유보강토에 비해서 상대적으로 더 크게 나타났다.

4. 다중선형회귀분석

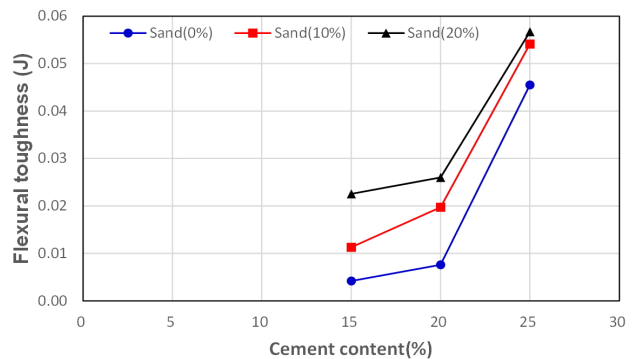


Fig. 10. First-crack toughness of cement-clay-sand mixtures

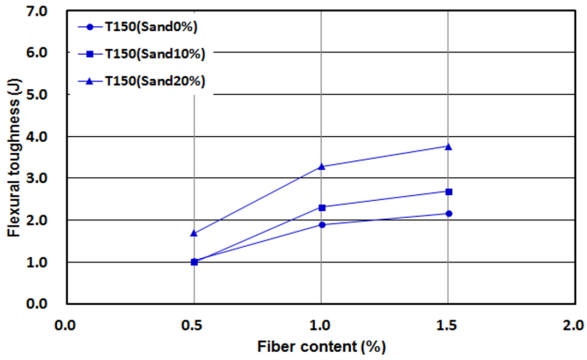


Fig. 11. Flexural toughness of mixtures reinforced with PP fiber ($A_w=25\%$)

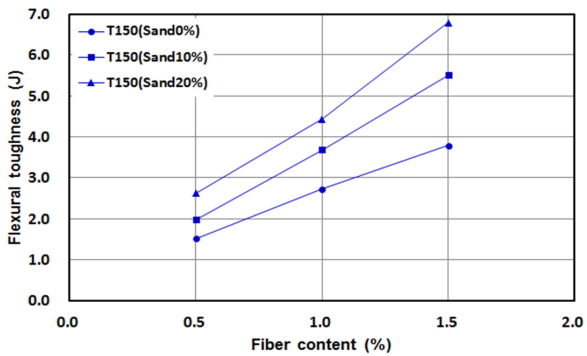


Fig. 12. Flexural toughness of mixtures reinforced with 6 mm PVA fiber ($A_w=25\%$)

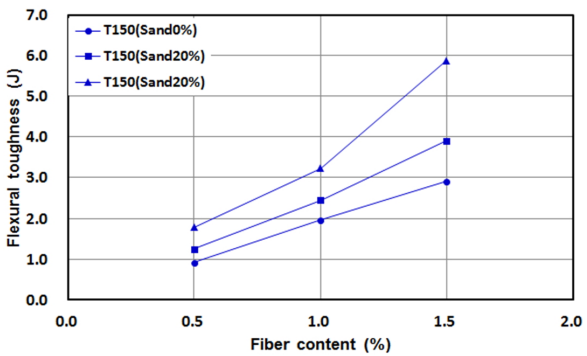


Fig. 13. Flexural toughness of mixtures reinforced with 12 mm PVA fiber ($A_w=25\%$)

본 연구의 휨성능 시험에서 설정한 시험인자인 시멘트량, 모래함량, 그리고 섬유혼입량이 보강토의 휨거동(휨강도, 휨인성)에 미치는 상대적인 영향을 분석하기 위하여 시험 결과에 대한 다중선형회귀분석(Multiple linear regression analysis)을 실시하였다. 본 연구의 다중선형회귀분석은 통계분석용 프로그램인 SPSS Statics (Statistical Package for the Social Sciences)를 이용해서 수행하였다.

본 연구의 다중선형회귀분석에서는 휨강도(f_1, f_p)와 휨인성(T_{600}, T_{150})을 종속변수로 하고 이들 종속변수에 영향을 미치는 시멘트량, 모래함량과 섬유혼입량을 독립변수로 하였으며, 표준화 회귀계수(standardized beta coefficient)를 이용해서 독립변수들의 상대적 영향력을 비교하였다. PP 섬유보강토, 6mm PVA 섬유보강토, 12mm PVA 섬유보강토에 대한 다중선형회귀분석 결과에 의하면 독립변수인 시멘트량, 모래함량, 섬유혼입량에 대한 분산팽창요인(VIF) 값이 모두 10보다 작은 것으로 나타났으므로 변수들 사이의 다중공선성(multi-collinearity)의 문제는 없는 것으로 분석되었으며, F 검정 결과 $R^2 = 0$ 또는 기울기가 0이라는 귀무가설이 기각되고 유의수준 5%에서 유의확률(Sig.)이 0.05 이하로 나타났으므로 모든 독립변수는 유의미한 관계가 있는 것으로 분석되었다. 섬유보강토의 휨성능 시험에 대한 다중선형회귀분석 결과인 다중선형회귀모델을 Table 4~6 나타내었으며, Table 4~6에서 ()의 값은 표준화계수 베타(standardized coefficient, β)로서 독립변수들의 상대적 중요도를 나타낸다.

4.1 PP 섬유보강토

PP 섬유보강토의 휨성능 시험에 대한 다중선형회귀분석 결과인 Table 4의 표준화계수 베타 값에 의하면 최초 균열강도(f_1)에 영향을 미치는 가장 중요한 인자는 시멘트

Table 4. Multiple linear regression models for mixtures reinforced with PP fiber

Dependent Variables / Independent Variables	Constant	Cement	Sand	Fiber	R^2
f_1	-0.758	0.064 (0.641)	0.027 (0.547)	0.311 (0.427)	0.944
f_p	-0.746	0.062 (0.464)	0.029 (0.565)	0.348 (0.604)	0.949
T_{600}	-0.435	0.020 (0.270)	0.013 (0.353)	0.403 (0.760)	0.881
T_{150}	-1.644	0.062 (0.218)	0.049 (0.348)	1.756 (0.849)	0.944

Table 5. Multiple linear regression models for mixtures reinforced with 6 mm PVA fiber

Independent Variables / Dependent Variables	Constant	Cement	Sand	Fiber	R ²
f ₁	-0.683	0.059 (0.516)	0.034 (0.596)	0.453 (0.546)	0.959
f _p	-0.841	0.065 (0.533)	0.035 (0.571)	0.510 (0.573)	0.968
T ₆₀₀	-0.690	0.032 (0.350)	0.012 (0.273)	0.551 (0.827)	0.938
T ₁₅₀	-2.731	0.118 (0.374)	0.036 (0.229)	1.859 (0.801)	0.913

Table 6. Multiple linear regression models for mixtures reinforced with 12 mm PVA fiber

Independent Variables / Dependent Variables	Constant	Cement	Sand	Fiber	R ²
f ₁	-0.790	0.064 (0.540)	0.035 (0.584)	0.461 (0.531)	0.956
f _p	-1.119	0.074 (0.486)	0.041 (0.539)	0.694 (0.625)	0.958
T ₆₀₀	-0.677	0.032 (0.310)	0.015 (0.289)	0.620 (0.834)	0.936
T ₁₅₀	-3.455	0.143 (0.328)	0.065 (0.300)	2.633 (0.830)	0.942

량이고, 균열발생 후 최대강도의 발현에는 섬유혼입량이 가장 중요한 인자인 것으로 나타났지만, 이들 독립변수들의 표준화계수 베타값의 차이가 그다지 크지 않으므로 휨강도의 발현에는 시멘트량, 모래함량, 그리고 섬유혼입량이 복합적인 기여하는 것으로 평가된다. PP 섬유보강토의 휨인성(T_{600} , T_{150})에 영향을 미치는 인자들 중에서 섬유혼입량에 대한 표준화계수 베타값이 월등하게 큰 것으로 나타났으므로 섬유보강토의 균열제어 능력에는 섬유혼입량이 가장 중요한 역할을 하는 것으로 평가된다.

4.2 6mm PVA 섬유보강토

Table 5에 나타낸 6mm PVA 섬유보강토에 대한 선형 회귀분석 결과에 의하면 독립변수들에 대한 표준화계수 베타값의 차이가 크지 않은 것으로 나타나므로 최초 균열강도(f_1)와 최대강도의 발현에는 시멘트량, 모래함량, 그리고 섬유혼입량이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 평가된다. 6mm PVA 섬유보강토의 휨인성(T_{600} , T_{150})의 경우 PP 섬유보강토와 유사하게 섬유혼입량에 대한 표준화계수 베타값이 월등하게 큰 것으로 나타났으므로 6mm PVA 섬유보강토의 균열제어 능력에는 섬유혼입량이 가장 중요

한 역할을 하는 것으로 평가된다.

4.3 12mm PVA 섬유 보강토

Table 6에 제시한 12mm PVA 섬유보강토의 휨성능 시험에 대한 다중선형회귀분석 결과에 의하면 6mm PVA 섬유보강토와 유사하게 최초 균열강도(f_1)와 최대강도(f_p)에 대한 독립변수들의 표준화계수 베타값의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 12mm PVA 섬유보강토의 최초 균열강도(f_1)와 최대강도의 발현에는 시멘트량, 모래함량, 그리고 섬유혼입량이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 평가된다. 12mm PVA 섬유보강토의 휨인성(T_{600} , T_{150})의 경우도 섬유혼입량에 대한 표준화계수 베타값이 월등하게 큰 것으로 나타났으므로 12 mm PVA 섬유보강토의 균열제어 능력에는 섬유혼입량이 가장 중요한 역할을 하는 것으로 평가된다.

5. 결론

본 연구에서는 시멘트 개량토의 휨성능 개선을 위하여 PP 섬유와 PVA 섬유로 보강한 섬유보강토에 대한 휨성능 시험을 실시하고, 시험결과에 대한 다중선형회귀분석을

실시하여 섬유보강토의 휨성능에 시멘트량, 모래함량, 그리고 섬유의 종류와 길이, 섬유혼입량이 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구의 결과에 의하면 시멘트-점토-모래 혼합토를 섬유를 이용해서 보강하면 휨강도와 휨인성이 개선되는 효과를 확인할 수 있었으며, 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 무보강 혼합토의 경우 최초 균열이 발생하는 시점까지 하중-처짐 곡선이 선형적으로 나타나지만, 하중이 최대치에 도달한 이후 즉시 파괴가 발생하는 취성거동을 보이는 것으로 나타났다. 또한 무보강 혼합토의 경우 시멘트량과 모래함량이 증가할수록 균열강도도 증가하는 것으로 나타났으나, 균열제어 능력은 매우 작은 것으로 나타났다.
- (2) PP 섬유보강토와 PVA 섬유보강토의 경우 균열 발생 후 잔류강도가 발현되어 파괴가 지연되는 연성거동을 보이는 것으로 나타났으며, 섬유의 종류와 길이, 그리고 혼입량에 따라 균열발생 이후의 거동이 다소 상이하게 나타나는 경향을 보인다.
- (3) 섬유보강토의 경우 시멘트량, 모래함량, 그리고 섬유 혼입량이 휨성능에 영향을 미치는 주요인자인 것으로 나타났다. 최초 균열강도(f_1)와 최대강도(f_p)의 경우 시멘트량과 모래함량이 많을수록, 그리고 섬유혼입량이 많을수록 휨강도와 휨인성이 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.
- (4) 다중선형회귀분석 결과에 의하면 독립변수인 시멘트량, 모래함량, 그리고 섬유혼입량은 모두 종속변수인 휨강도(f_1 , f_p)와 휨인성(T_{600} , T_{150})에 영향을 미치는 주요 인자인 것으로 나타났다.
- (5) 최초 균열강도(f_1)와 최대강도(f_p)의 경우 3개의 독립변수인 시멘트량, 모래함량, 섬유혼입량에 대한 표준화계수 베타 값의 차이가 없는 것으로 나타났으므로 이들이 미치는 영향은 유사한 것으로 평가된다.
- (6) 휨인성(T_{600} , T_{150})의 경우 3개의 독립변수 중에서 섬유혼입량에 대한 표준화계수 베타 값이 월등하게 큰 것으로 나타났으므로 섬유보강토의 균열제어 능력에는 섬유혼입량의 영향이 가장 큰 것으로 평가된다.

Acknowledgement

This work was supported by a Research Grant of

Pukyong National University (2015 year).

Reference

1. ASTM D 1632 (2007). "Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory", ASTM International.
2. ASTM C 1609 (2012). "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)", ASTM International.
3. Broms, B. B. (1999). "Keynote Lecture: Design of lime, lime/cement and cement columns." International Conference on Dry Mix Methods: Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization, Rotterdam, Netherlands, pp.125-153.
4. Broms, B.B. (2003). "Deep Soil Stabilization: Design and Construction of Lime and Lime/Cement Columns", Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
5. BS 8006 (1995). "Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.", British Standards Institution CDIT (Coastal Development Institute of Technology) (2002). "The Deep Mixing Method: Principle, Design and Construction.", A.A. Balkema: The Netherlands.
6. Chegenizadeh, A. and Nikraz, H. (2012). "Performance of fiber reinforced clayey sand composite." Frontiers of Structural and Civil Engineering, Vol.6, Issue2, pp.147-152.
7. Estabragh, A. R., Namdar, P., and Javadi, A. A. (2012). "Behavior of cement-stabilized clay reinforced with nylon fiber." Geosynthetics International, Vol. 9, Issue No. 1, pp. 85-92.
8. EuroSoilStab (2002). "Development of design and construction methods to stabilise soft organic soils." *Design Guide Soft Soil Stabilization*, CT97-0351 Project No.: BE 96-3177.
9. Fatahi, B., Khabbaz, H., and Fatahi, B. (2012). "Mechanical characteristics of soft clay treated with fiber and cement." Geosynthetics International, Vol.19, No.3, pp.252-262.
10. Han, J., Parsons, R. L., & Huang, J. and Sheth, A. R. (2005). "Factors of Safety against Deep-Seated Failure of Embankments over Deep Mixed Columns." Proc. of the Int. Conf. on Deep Mixing, Stockholm, pp.231-236.
11. Inagaki, M., Abe, T., Yamamoto, M., Nozu, M., Yanagawa, Y., and Li, L. (2002). "Behavior of Cement Deep Mixing Columns under Road Embankment." Physical Modelling in Geotechnics, pp.967-972.
12. Jadhao, P. D. and Nagarnaik, P. B. (2008). "Performance Evaluation of Fiber Reinforced Soil-Fly Ash Mixtures." Proc. of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, Goa, India.
13. Kim, W. S., Jung, D. H., and Cho, I. M. (2012a). "Compressive Strength Characteristics of PVA Fiber Reinforced Soil-Cement Mixture." Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.12, No.3, pp.147-156.

14. Kim, W. S., Jung, D. H., and Cho, I. M. (2012b). "Flexural Strength Characteristics of PVA Fiber Reinforced Clayey Soil-Cement Mixture." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.12, No.5, pp.101-111.
15. Kim, W. S. (2013). "Laboratory Tests on the Strength Behavior of PVA Fiber Reinforced Cement-Clay Mixtures." Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Graduate School, Pukyong National University.
16. Kitazume, M., Yamamoto, M. and Udaka, Y. (1999). "Vertical bearing capacity of column type DMM ground with low improvement ratio." *Proc. of the Int. Conf. on the Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, pp.245-250.
17. Kitazume, M., Okano, K., and Miyajima, S. (2000). "Centrifuge model tests on failure envelope of column type deep mixing method improved ground." *Soils and Foundations*, Vol.40, No.4, pp.43-55.
18. Kitazume, M. and Maruyama, K. (2007). "Centrifuge Model Tests on Failure Pattern of Group Column Type Deep Mixing Improved Ground", *Proceedings of the 7th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Lisbon, Portugal.
19. Kivelo, M. and Broms, B. B. (1999) "Mechanical behaviour and shear resistance of lime/cement columns." *International Conference on Dry Mix Methods: Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization*, pp.193-200.
20. KS F 2329 (2007). "Testing method for making curing of soil-cement compression and flexure test specimens in the laboratory.", Korea Standards Association.
21. KS F 2566 (2014). "Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete.", Korea Standards Association.
22. Kumar, A., Walia, B. S., and Mohan, J. (2006). "Compressive Strength of fiber reinforced highly compressible clay." *Construction and Building materials*, Vol.20, pp.1063-1068.
23. Miyake, M., Wanda, M., and Satoh, T. (1991). "Deformation and Strength of Ground Improved by Cement Treated Soil Column." *Geo-Coast 91*, Yokohama, pp.369-372.
24. Navin, M. P. (2005). "Stability of Embankments Founded on Soft Soil Improved with Deep-Mixing-Method Columns.", Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
25. Rafalko, S. D., Brandon, T. L., Filz, G. M., and Mitchell, J. K. (2007). "Fiber reinforcement for rapid stabilization of soft clay soils." *Journal of the transportation Research Board*, No. 2026, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.21-29.
26. Sugiyama, K., Kitawaki, T., Morimoto, T. (1980). "Soil Improvement Method of Marine Soft Soil by Cement Stabilizer.", *Dohoku Sekou*, 21(5), pp.65-74 (in Japanese).
27. Tatsuoka, F. and Kobayashi, A. (1983). "Triaxial strength characteristics of cement-treated soft clay." *Proceedings of the 8th European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.421-26.
28. Terashi, M., Tanaka, H., Mitsumoto, T., Niidome, Y., and Honma, S. (1980). "Fundamental Properties of lime and cement treated soils (2nd report)." *Report of the Port and Harbour Research Institute*, 19(1):33-62 (in Japanese).
29. Terashi, M. (2003). "The State of Practice in Deep Mixing Methods. Grouting and Ground Treatment." *Proceedings of the 3rd International Conference*, ASCE, Geotechnical Special Publication, No.120, pp.25-49.
30. Yilmaz, Y. and Karatas, K. (2011). "Effect of Polypropylene Fibre on the Strength Characteristics of Lightly Cemented Clayey Soil Mixtures." *Proceedings of Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, GSP 211, Dallas, Texas, USA, pp.707-716.