

시멘트 혼합토의 강도 특성

Strength Characteristics of Cement-Mixed Soil

김 상 철* · 이 상 호**
Kim, Sang Chul · Lee, Sang Ho

Abstract

This study was conducted by the tests of materials engineering and soil mechanics to see the strength characteristics of the 'Cement-Mixed Soil'. To sum up my experiments, I would like to present the results which are the theoretical base and fundamental data to establish the standard design including the design of mixing proportions of the soil as a construction material.

In conclusion, in this study the optimum cement mixing ratio is 9% and in this ratio the optimum moisture content of compaction work is 19.3% from the analysis of the strength characteristics, as well as in consideration of the economic profits and nature familiar facts.

Keywords : Cement-Mixed Soil, optimum cement mixing ratio, optimum moisture content

I. 서 론

최근 친환경 재료에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데 전통적인 흙재료가 건축재료로서 각광을 받고 있다. 흙재료는 태고로부터 근대에 이르기까지 주거시설의 주된 재료로 다양하게 사용되어 왔으며 특히 최근에는 흙재료가 향온 및 항습효과와 인체에 유익한 물질의 방출, 천연적인 미적 욕구 충족 등 우수한 건축재료로서의 특성을 보유하고 있어

쾌적한 환경과 자연적인 미관이 요구되는 환경친화형 전원주택, 황토방, 업소건축물 등에 다양하게 이용되고 있다. 또한 온도 및 습도 조절이 요구되는 농산물 저장시설, 축사 등의 바닥이나 벽체 재료로 활용된다면 상당한 에너지 절감효과도 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 흙재료는 콘크리트재료에 비하여 시공이 다소 어렵고 강도가 현저하게 떨어지며 특히 건조수축에 의한 균열로 인하여 미관이 크게 손상될 수 있기 때문에 이러한 단점을 보완하기 위하여 오래전부터 짚이나 대나무 혹은 마와 같은 천연재료를 사용하여 보강해 왔으나 이는 시공성이 저하되고 인장강도를 증진시키는 데에 그 효과가 국한되어 왔다

* 경북대학교 대학원
** 경북대학교 농업생명과학대학
*** Corresponding author. Tel.: +82-53-950-5735
Fax: +82-53-950-6752
E-mail address: sahlee@knu.ac.kr

이에 따라, 흙의 강도를 증가시키기 위해서 석회, 플라이 애시 혹은 시멘트, 고분자 합성섬유 등이 이용될 수 있으며 이들 재료 중 일부가 현장에 적용된 사례를 볼 수 있다. 그러나 이들 재료에 대하여 건축공학적 특성을 고려한 체계적인 연구는 절대적으로 부족한 실정이기 때문에 이들 재료의 혼합비, 혼합토의 적정 시공조건 및 허용응력 등에 관한 이론적 근거의 부재로 혼합토의 배합설계 및 시공방법에 대한 지침서가 전무한 실정이다.

이에 본 연구는 건축재료로 이용 가능한 흙재료에 시멘트를 혼합하여 사용한 이른바 '시멘트 혼합토'를 건축물 바닥이나 벽체 등의 다짐시공에 이용하기 위해 강도 특성을 토질 및 재료공학적 방법의 시험을 통해 연구하여 건축재료로서 전통적 흙재료의 배합설계를 포함하는 설계기준 정립과 시공방법에 대한 기초자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

II. 재료 및 방법

1. 흙재료

Table 1 및 Fig. 1은 본 연구에 사용된 흙의 물리적 특성과 입도분포를 나타낸 것으로 흙 시료의 비중은 2.63, 소성지수는 21로서 통일분류법에 의

Table 1 Physical properties of soil

Specific gravity	LL (%)	IP (%)	V_{dmax} (tf/m ³)	OMC* (%)	USCS**
2.63	38.5	21	1.61	20.4	CL

*OMC: Optimum Moisture Content

**USCS: Unified Soil Classification System

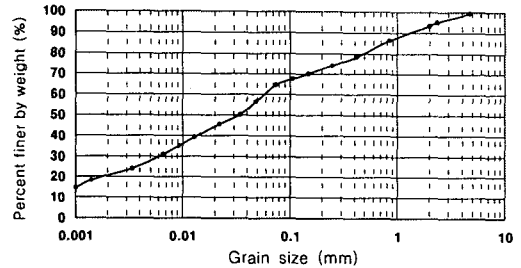


Fig. 1 Grain size distribution curve of soil

해 CL로 분류된다.

2. 시멘트

본 연구에서 사용된 시멘트는 국내에서 생산되는 H시멘트공업 주식회사의 보통포틀랜드 시멘트로 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Physical properties of normal Portland cement

Physical properties				
Item	Property		Korean standards	Test result
	Specific gravity			3.15
Fineness	Blainess (cm ² /gf)		≥2,000	3,292
	Time of setting	Initial (min)	≥60	215
Final (h)		≤10	5:18	
Soundness			≤0.8	0.41
Strength (KN/m ²)	Compression ages	3 days	≥12,749	25,989
		7 days	≥19,614	31,480
		28 days	≥28,440	41,287

3. 혼합토 제조

본 연구에서 수행된 시험은 시멘트 혼합비 및 양생기간을 변화시키며 실시하였으며 시멘트 혼합비는 시멘트 혼합도 건조중량의 0, 3, 6, 9, 12, 15%로 변화를 주었다. 양생기간은 3, 7, 14, 28, 42일로 하였으며 양생기간 동안 동일한 환경조건에서 시험을 하기 위해 일정한 온도(20℃) 및 습도(60%)를 유지시켜주는 항온항습기 내(內)에서 양생하였다.

4. 다짐시험

시멘트 혼합토의 다짐시험은 손으로 뭉쳐 던지기, 흙손으로 떠서 바르기, 삽으로 떠서 치기, 흘러 붓기 등 건축용 흙재료의 여러 가지 시공법 중에서 환경친화형 전원주택, 황토방, 농산물 저장시설 등의 바닥이나 벽체에 사용되는 다짐시공의 경우 다짐시험으로 구한 최적함수비가 시공시의 최적함수비가 될 것으로 판단하여 KS F 2312에 의해 무게 2.5 kgf인 래머를 이용하여 내경 10 cm, 부피 1000 cm³인 몰드에 층당 25회로 3층 다짐을 하였으며 다짐시 허용 최대 입경이 19 mm인 표준 A다짐을 사용하였다.

5. 체적변화측정

흙이 가지는 단점 중의 하나인 수축에 의한 균열을 줄이고 흡수팽창에 의한 구조물의 약화를 방지하며 동결융해에 대한 저항성을 증대시키기 위해 시멘트를 3, 6, 9, 12, 15% 혼합하여 혼합비와 건조시간에 따른 체적변화를 측정하였다.

본 시험에서는 일축압축 강도 시험용 공시체를 제작한 직후 공시체의 길이 및 직경을 측정한 다음 각 재령에 따른 공시체 파괴전(前)에 다시 공시체의 길이 및 직경을 측정하였다. 공시체의 길이 및 직경은 버니어캘리퍼스로 실측하여 길이는 4회 측

정한 값을, 직경은 공시체의 상·중·하 세 곳을 측정하여 평균한 값을 사용하였다.

6. 일축압축강도 시험

본 연구에서는 다짐시공시의 적정함수비가 최적함수비가 되므로 압축강도 시험용 공시체 제작에 있어서의 함수비를 최적함수비 상태로 하여 시험을 실시하였고 공시체는 직경 5 cm, 높이 10~12.5 cm로 제작하여 20℃와 60%로 맞추어진 항온항습기 내(內)에서 양생을 하였으며 양생기간에 따른 강도의 변화를 알아보기 위해 재령을 3, 7, 14, 28, 42일로 변화를 주었다. 공시체는 표준 A-다짐에 의한 다짐에너지 공식에서 다짐충수를 5층으로 계산하여 층 당 8, 9, 8, 9, 9회로 총 43회 다짐하여 제작하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 시멘트 혼합토의 다짐특성

Fig. 2는 시멘트 혼합비에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화를 나타내고 있으며 Fig. 2에서와 같이 최대건조밀도는 일정한 비율은 아니나 시멘트 혼합비의 증가에 따라 증가하고 최적함수비는 감소하는 경향을 보이고 있다. 최대건조밀도가 증가하는 이유는 시멘트를 혼합하여 다지면 토립자 사이에 공극이 미세한 시멘트 입자로 채워지므로 밀도가 증가할 뿐 만 아니라 시멘트의 수화작용으로 인해 시멘트 입자가 흙의 결합재 역할을 하여 각각의 토립자가 결합해서 서로 분리 및 이동이 어려운 상태가 되기 때문인 것으로 판단된다. 최적함수비는 시멘트 혼합비가 증가함에 따라 18.4~20.4% 범위에서 감소하고 있으며 그 이유는 흙의 조립도 때문인 것으로 판단된다. 본 시험에 사용된 흙과 같이 0.075 mm체 통과량이 50% 이상인 세립토의 경우 시멘트 입자가 흙의 공극을 채우는 것보

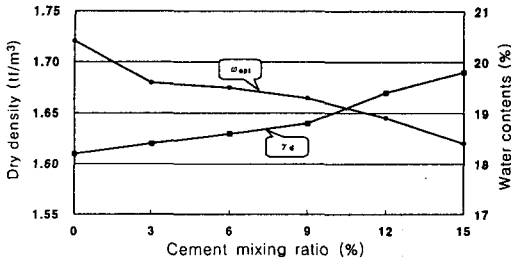


Fig. 2 Dry density and optimum moisture content by cement mixing ratio

다는 흙 입자 표면에 작용하여 시멘트 혼합토의 모성(母性)인 흙의 물에 대한 친화력을 저하시켜 수분함유 능력을 감소시켰기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같이 시멘트 혼합비가 증가하면 최적함수비가 감소하는 특성으로 인해 시멘트 혼합토는 혼합비가 증가할수록 흡수팽창에 의한 구조물의 약화를 방지하고 동결융해에 대한 저항성을 증대시키는 효과가 있을 것으로 판단된다.

2. 시멘트 혼합토의 체적변화

Fig. 3은 시멘트 혼합토의 재령에 따른 체적변화율을 나타낸 것으로 재령 3일일 때 흙의 체적변화율은 약 7.5%로 가장 높게 나타났고, 15% 시멘트 혼합토의 체적변화율은 약 2.5%로 가장 낮게 나타났다. 그리고 재령 3일까지 급격한 체적 변화가 일어난 후, 재령 7일까지 최대 1% 정도의 체적변화율의 증가를 보이다가 이후에는 그 변화가 경미한 것으로 나타났다. 따라서 이러한 흙과 시멘트 혼합토의 체적변화 양상을 통해 최대 체적변화의 추정 은 약 7일 정도의 양생으로도 가능할 것으로 판단 된다.

Fig. 4는 시멘트 혼합비에 따른 체적변화율을 나타낸 것으로 시멘트 혼합비가 증가함에 따라 재령에 관계없이 전체적으로 체적변화율이 약 2.5~7.5% 범위에서 감소하는 것으로 나타났다. 이는 혼합비가 증가할수록 최적함수비가 감소한다는 Fig. 2의 다짐시험 결과에 기인하며 수분보유가 적어져

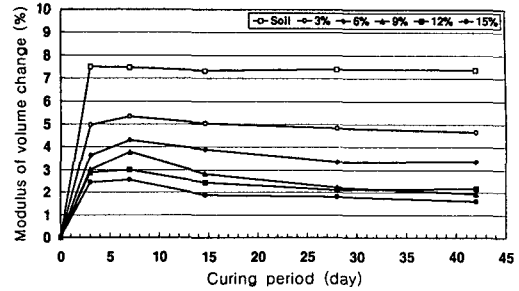


Fig. 3 Modulus of volume changes by curing period

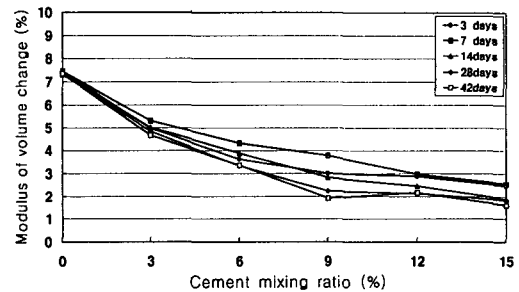


Fig. 4 Modulus of volume changes by cement mixing ratio

수분에 의한 건조수축이 적게 일어났기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 소정의 강도가 발현된 재령 28일과 42일의 경우에서는 9% 혼합비 이후 체적변화가 거의 일어나지 않는 경향을 보여 체적변화 억제 효과는 시멘트를 소량 혼합할수록 경제적이고 친환경성에 가깝다 라는 점을 고려하면 9%의 혼합비가 이상적일 것으로 판단된다.

3. 시멘트 혼합토의 압축강도 특성

Table 3은 시멘트 혼합비에 따른 각 재령별 압축강도를 나타낸 것이다. Table 3에서 알 수 있듯이 혼합비와 재령이 증가할수록 압축강도는 약 1956~7796 KN/m² 범위에서 증가하였으며 9% 시멘트 혼합토는 각 재령별로 5059~6629 KN/m² 범위의 값으로 평균 5953 KN/m²의 강도를 나타내 가장 큰 폭의 강도증가를 나타내고 있다.

Fig. 5는 시멘트 혼합비에 따른 강도의 변화를

Table 3 Unconfined compressive strength of cement-mixed soil by curing period

Mixing ratio (%) \ Curing period (day)	0	3	6	9	12	15
3	19.94	20.80	30.56	51.59	55.79	58.00
7	20.50	23.66	31.86	57.70	60.88	64.41
14	21.00	24.20	37.39	61.72	63.99	69.00
28	21.80	26.58	43.98	64.85	74.20	75.50
42	22.10	28.20	46.20	67.60	76.20	79.50

나타낸 것으로 전체적으로 시멘트 혼합비의 증가에 따라 강도가 증가하는 경향을 보였으며 이는 시멘트의 수화작용과 점성토와 수화작용을 한 시멘트가 흙의 결합재 역할을 하기 때문에 결합력의 증가로 나타나는 현상이라 판단된다.

Fig. 5에서 흙자체의 압축강도는 재령에 따라 약 1961~2158 KN/m²에서 나타났고 3% 시멘트 혼합토는 흙자체의 압축강도에 비해 약 98.07~588.42 KN/m²가 증가하였다. 이는 다른 혼합비의 강도 증가폭에 비해 강도의 증가가 현저히 떨어지는 것으로 3% 시멘트 혼합토는 강도 보강측면에서 큰 효과가 없을 것으로 판단된다. 특히 6~9% 혼합비 범위에서 압축강도가 현격히 증가하는 경향을 보였다. 그리고 시멘트 혼합비 9% 이상의 경우에는는 혼합비가 증가함에 따라 지속적으로 강도의 증가는 일어나고 있으나 그 증가폭은 6~9% 범위의 시멘트 혼합토에 비해 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 강도 증가만을 목적으로 한다면 시멘

트의 양을 증가시키는 것이 효과적이겠으나 시공에 있어서의 경제성, 환경적인 측면, 작업성 등을 고려한다면 강도 보강 효과가 뛰어난 6~9% 혼합비의 시멘트 혼합토를 사용하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 재령에 따른 각 시멘트 혼합토의 압축강도의 변화를 나타낸 것으로서 재령에 따른 압축강도는 재령 3일까지 급격한 증가를 보이다가 재령 7일 이후에는 거의 증가하지 않는 것으로 나타났다. 그리고 6% 이상 혼합비의 경우 재령 7일까지 초기강도의 증가가 3% 이하 시멘트 혼합토의 증가량에 비해 크게 나타났다, 이는 시멘트 혼합비의 증가에 따라 토립자와 시멘트의 수화작용으로 인하여 시멘트 혼합토의 경화가 빨리 진행됐기 때문이라 판단된다. 또한 Fig. 6에서도 다른 혼합비에 비해 9% 시멘트 혼합토가 급격한 강도의 증가를 보인다는 것을 다시 확인 할 수 있다.

따라서, 강도 증진이 완만하게 되는 재령 7일까

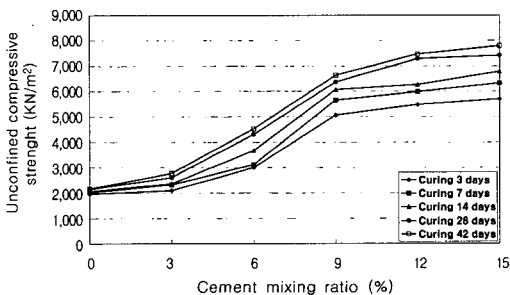


Fig. 5 Unconfined compressive strength by cement mixing ratio

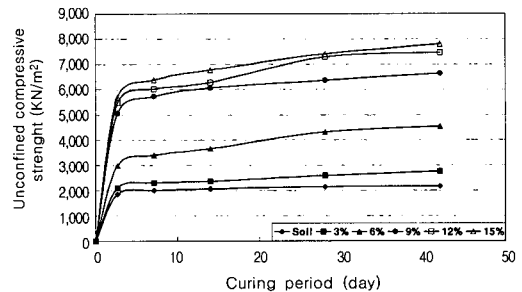
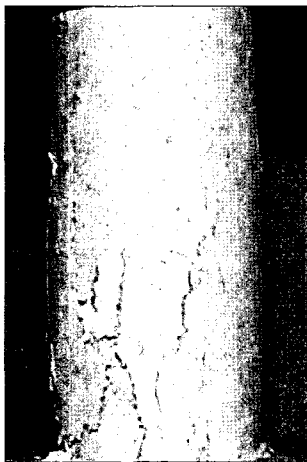


Fig. 6 Unconfined compressive strength by curing period

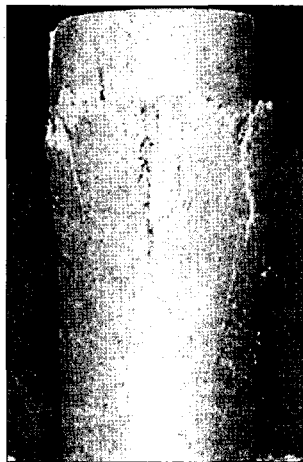
지의 초기강도를 분석함으로써 재령 7일 이후의 압축강도를 추정할 수 있을 것으로 생각된다. 이를 통해 재료의 자중에 의한 벽체 붕괴 등의 이유로 벽체 계획고까지 일체적인 시공이 불가능한 거푸집에 의한 벽체의 현장 다짐 시공 등에서는 시멘트 혼합토 타설 후, 공기(工期) 등을 고려하여 양생기간 7일이 경과한 이후 다음 공사를 진행하는 것이 적합할 것으로 판단되며 시멘트 혼합토의 최적 양생기간은 재령 7일 전·후 인 것으로 판단할 수 있다.

4. 공시체 파괴양상

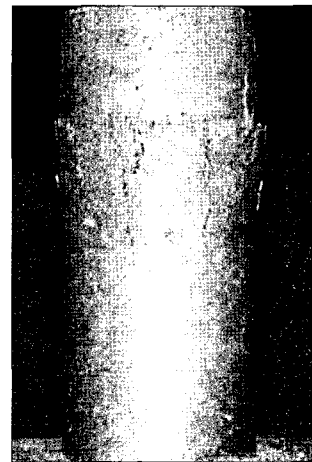
본 연구에서 압축강도용 공시체를 총 90개 파괴한 결과 시멘트 혼합비 및 재령에 따라 일정한 비율의 뚜렷한 파괴 양상은 나타나지 않았지만 전체적으로 공시체 상부에서 하부로의 종방향 균열로 인한 주상파괴(할열파괴)의 형태를 나타내었다. 그리고 혼합비가 증가할수록 명확한 주상파괴의 형태를 보여주고 있다.



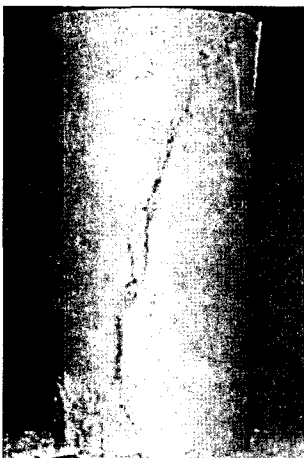
(a) Soil



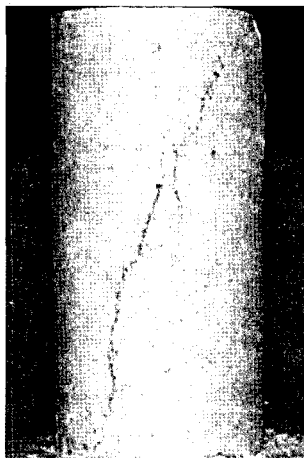
(b) 3%



(c) 6%



(a) 9%



(b) 12%



(c) 15%

Photo 1 Failure aspect of specimens

동일한 재령에서 시멘트 혼합비 증가에 따른 공시체의 파괴양상은 비교적 주상파괴로 뚜렷하게 변화하였다. 동일한 혼합비에서 재령의 증가에 따른 공시체의 파괴양상은 혼합비 증가에 따른 파괴양상에 비해 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 그러나 재령의 증가에 따라서도 공시체의 파괴가 주상파괴의 형태로 나타나고 있는 것을 시험과정에서 관찰과 공시체 파괴시 촬영한 각각의 사진들을 통해 확인할 수 있었다. 이러한 파괴양상은 시멘트 혼합비의 증가에 따라서 강도가 뚜렷한 증가의 증가 경향이 뚜렷하게 나타났지만 재령 7일 이후 강도의 증가가 크지 않는다는 것으로부터 기인한 것으로 판단된다.

또한 본 연구에 사용된 공시체의 파괴양상은 압축하중으로 인해 공시체 내부에 균열이 발생하고 점차 하중이 증가하여 파괴하중에 이르게 되면 공시체가 급격한 파괴를 일으키는 취성파괴의 형태를 나타내고 있다. 이는 흙이 시멘트와의 수화작용으로 인해 응결, 경화되어 공시체의 강도가 크게 증가되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 시멘트 혼합비가 증가함에 따라 취성이 증가하는 것을 줄이기 위해서 인장강도를 증대시킬 수 있는 토목섬유 등의 보강재를 병용하는 것도 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

Photo 1은 압축강도 시험시 공시체의 파괴양상을 나타낸 것이다.

IV. 결 론

건축재료로 이용 가능한 흙재료에 시멘트를 혼합하여 사용한 '시멘트 혼합토'의 강도 특성을 토질 및 재료공학적인 시험을 통해 구명하여 전통적 흙재료의 배합설계를 포함하는 설계기준 정립과 시공방법에 대한 기초자료를 제시할 목적으로 수행한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 시멘트 혼합비가 증가함에 따라 시멘트 혼합토의 최대건조밀도는 증가하였으나 최적함수비는 감소하였다.

2. 시멘트 혼합비가 증가할수록 시멘트 혼합토의 체적변화는 감소하는 것으로 나타났고 재령 7일 이후에는 체적변화율이 증가하지 않아 약 7일간의 양생으로도 최대 체적변화율의 추정은 가능할 것으로 판단된다.

3. 시멘트 혼합비가 증가함에 따라 시멘트 혼합토의 압축강도는 증가하는 것으로 나타났고, 특히 9% 시멘트 혼합토에서는 재령 28일의 압축강도가 약 65 kgf/cm^2 로 15% 시멘트 혼합토 최대강도의 85% 이상을 나타내었다.

4. 압축강도 시험시 공시체의 파괴양상은 시멘트 혼합비 증가에 따라 취성파괴의 형태가 뚜렷하게 나타났다. 따라서 이러한 취성파괴의 위험을 감소시키기 위해 인장강도를 증대시킬 수 있는 토목섬유 등의 보강재를 병용하는 것도 좋은 보강 효과를 나타낼 것이라 판단된다.

5. 본 연구에서 분석한 강도 특성을 고려하여 좀더 경제적이고 친환경성에 가깝게 하기 위한 시멘트 혼합토에서 최적의 시멘트 혼합비는 9%이며 이 혼합비에서 다짐시공시의 최적함수비는 19.3%인 것으로 판단된다.

References

1. Chun Byung Sik, Park Heung Gyu, 1989, Deformation Characteristics of Soil-Cement mixtures under repeated load, Journal of the KSCE 9(3), 125-131. (in Korean)
2. Circeo, L.T., 1962, Strength Maturity relations of soil-cement Mixtures, Highway Research Board Bulletin 353, 84-96.
3. Felt, E.J., 1955, Factors Influencing some of the physical properties of soil cement mixtures, Highway Research Board Bulletin 108, 138-162.
4. Herzog, A. 1963, Reaction accompanying stabilization of clay with cement, Highway Research Record Bulletin 36, 146-150.

5. Kim Jae Young, Kang Yea Mook, 1975, A study on the effects of molding water content and cement content on unconfined compressive strength of soil cement mixtures, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 17(1), 59-75. (in Korean)
6. Kim Jae Young, 1976, The effect of grain size distribution of soils on unconfined compressive strength of soil cement and lime soil mixtures, Journal of the KSCE 24(4), 93-99. (in Korean)
7. Yur Jae Ho, Kwon Moo Nam, Goo Jung Min, Kim Hyun Ki, 2000, Strength Properties of lime-clay mixtures, Agricultural Research Bulletin of Kyungpook National University 18, 61-69. (in Korean)