

고화재 혼합처리를 이용한 월드컵 주경기장 부지의 개량에 관한 연구 Study on the Improvement of world-cup stadium field using Stabilizer

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 권형석²⁾, Hyung-Seok Kwon, 전진규³⁾, Jin-Gyu Jeon,
양정호³⁾, Jung-Ho Yang

¹⁾한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ., Ph.D.

²⁾한양대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

³⁾한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : In country, for 2002 World-cup the peak is to construct soccer playground. the stabilizing method by additives is mainly applied of permanent improvement for bearing capacity of structure foundation and for strength, durability and transformation of road pavement layer except for construction machine's trafficability and bearing capacity. This study is on soft ground improvement of ○○ world-cup stadium field. construction field constitutes of very various layers and after construction the lawn grass should be planted on the surface of the earth and in addition, chemical effects should be limited from improved ground layer. Mixing soft clay in field with three domestic representative additives, it evaluated the unconfined compression strength. In the results, after curing during 28 days the objective strength has been obtained on about 5% combination ratio.

Key words : additives, unconfined compression strength, combination ratio.

1. 서 론

근래에 공사중 연약지반의 출현 및 개발 용지의 부족으로 인해 연약지반의 개발이 불가피해지고 있으며 이로 인해 기초지반의 선택 및 개량이 과거에 비해 다양해짐으로써 시공상 문제점(트래피커빌리티 저하, 경제적인 개량법의 부족(중·소규모 공사시), 공비의 고비용화, 공기의 장기화, 주변환경의 훼손, 등)이 많이 발생하게 되었다. 이에 대한 대처방안으로 국내에서도 고화재에 의한 천층 개량공법의 시행이 매립지, 도로지반의 개량에 적용되어 왔다.

근래에 축구분을 타고 우리나라에서도 2002년을 목표로 월드컵개최를 위해 전국적으로 축구장건설등 준비에 한창이다. 본 연구는 ○○ 월드컵 경기장의 주경기장 부지의 연약지반개량에 관한 연구이다. 공사장 부지는 하부지반의 구성이 매우 불규칙한 상황에 있으며, 향후 개량지반상부에 잔디 식재가 이루어져야 하고 잔디의 성장발육에 개량지반으로부터의 화학적 영향이 제한되어야 한다는 조건이 부가되고 있다. 부지내 연약한 점성토에 국내의 대표적인 3가지 고화재를 혼합하여, 일축압축강도 시험을 통한 개량안정성을 평가하였다.

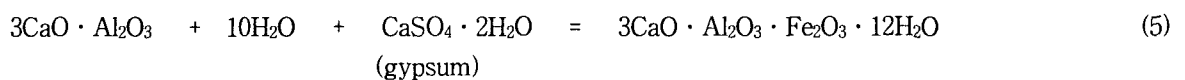
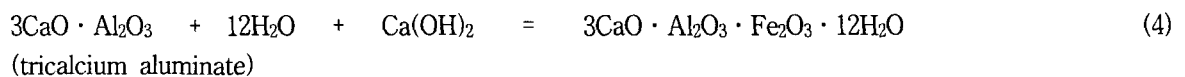
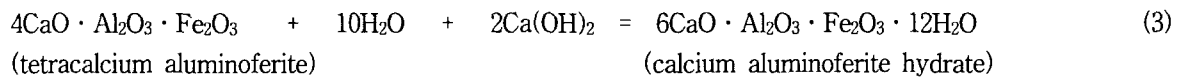
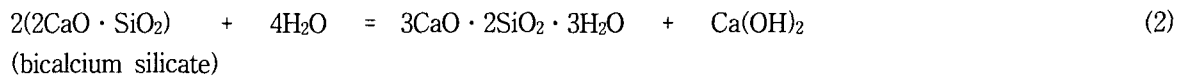
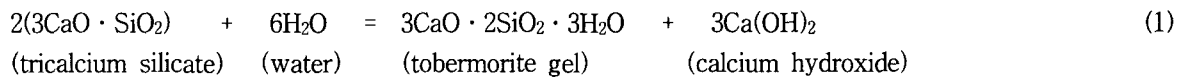
2. 천층혼합처리공법

고화재에 의한 천층혼합처리공법은 지반의 표층부분(1~2m정도의 범위내)을 대상으로 지반개량재를 첨가혼합하고 그 화학적 고결작용을 이용해서 지반의 안정성(강도와 변형특성,내구성 등)을 개선하는 지반개량공법을 말한다. 이는 주로 건설기계류의 주행과 작업에 필요한 트래피커빌리티나 지반 지지력을 확보하는 등의 가설적인 성토 또는 도로의 노체, 노상이나 노반 등의 변형성, 강도, 내구성의 향상, 구조물 기초지반의 지지력 증대를 위한 지반안정처리 등 영구적인 지반개량에도 이용되고 있다. 지반개량재의 배합비를 조정하여 연약한 지반을 설계시공조건에 따라

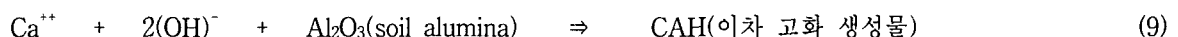
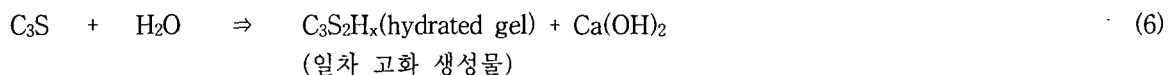
필요한 강도로 개량할 수 있으며, 공기의 단축, 공비의 저렴화, 중·소규모의 공사에 효과적인 특징등이 장점으로 부각되고 있다. 또한 치환공법에 비해 불량한 굴착토가 발생하지 않으므로 사토에 따른 환경문제가 없으며 양호한 치환토의 입수가 곤란한 경우에도 적용할 수 있다. (주택연구소, 1998)

3. 시멘트계 고화재에 의한 지반개량원리

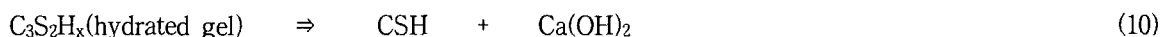
포틀랜드 시멘트 입자는 미세한 C_3S (tricalcium silicate), C_2S (dicalcium silicate), C_3A (tricalcium aluminate), C_4A (tetracalcium aluminoferrite)라는 4가지 주요 구성물질은 합성물질을 생성시키며 강도증진을 가져오는 주성분이다. 흙의 간극수가 시멘트와 섞이면, 시멘트는 즉시 수화작용을 일으키며, 주요 수화생성물질은 C_2SH_x , C_3SH_x (hydrated calcium silicates), C_3AH_x , C_4AH_x (hydrated calcium aluminates), $Ca(OH)_2$ (hydrated lime)와 같다. 수화생성물질 중 처음 두 물질은 시멘트 결합에 있어 주요한 생성물이며, 수화석회(hydrated lime)는 독립된 고체 결정으로 남게 된다. 이러한 시멘트 입자들은 경화하는 동안 주변의 시멘트 알갱이와 접합되면서 경화 골격구조(hardened skeleton matrix)를 이루는데 이는 변화되지 않은 흙을 에워싼다. silicate와 aluminate는 서로 혼합되어서 전혀 결정으로 보이지 않게 된다. 또한 $Ca(OH)_2$ 의 일부는 부분적으로 결정을 이루면서 다른 수화물질들과 섞이기도 한다. 더욱이 시멘트의 수화는 $Ca(OH)_2$ 의 분해로 인해 간극수의 pH값을 상승시킨다. 강염기는 약산과 강염기의 반응과 동일한 방식으로 점성토 광물과 점성토의 표면에 있는 비결정물질로부터 산성의 silicate와 alumina를 용해시킨다. 그후 흙을 안정화하기 위해 양생을 시킬 때 수화된 silica와 alumina는 고화된 불용성 복합물질(이차 고화생성물)을 구성하기 위해 점차로 시멘트의 가수분해로부터 떨어져 나온 calcium이온과 재반응한다. 이 이차반응이 pozzolan 반응이라고 한다. 포틀랜드 시멘트의 복합물질들은 다음과 같이 물의 첨가시 변화된다.



포틀랜드 시멘트의 75%를 구성하고 있는 물질인 첫 번째 두식은 두 calcium silicate형의 수화작용이 새로운 복합물질(석회와 tobermorite gel)을 생성시키는 것을 보여주고 있는데, 결합, 강도, 부피변화가 이 두 물질에 의해 지배되며, 강도에 관해서는 후자가 중요한 역할을 한다. 아래에 주어진 반응들은 단지 C_3S (tricalcium silicate)에 대한 것만 나타내었는데, 이 물질이 포틀랜드 시멘트의 가장 중요한 구성물질이기 때문이다.



pH<12.6일 때는 다음 반응이 일어난다.



시멘트-점성토 구조에서 발생된 추가 결합력을 갖기 위해서 미네랄 속의 silicates 와 aluminates는 용해되어야만

한다. 위의 식들에서 일차 고화생성물의 고화강도는 이차 고화생성물보다 더 강하다. 낮은 pH에서 위의 마지막 반응이 일어난다. 그렇지만, pH값이 포졸란 반응동안 떨어지고 이는 CSH를 생성하기 위해 $C_3S_2H_x$ 의 가수분해를 촉진하도록 영향을 미칠 것이다. CSH는 석회와 흡입자의 포졸란 반응에 의해 생성된다면 유익하겠지만, $C_3S_2H_x$ 의 증가시 CSH가 더 생성된다면, $C_3S_2H_x$ 의 강도특성이 CSH보다 우수하기 때문에 유해한 결과를 가져오게 된다. 시멘트 수화반응과 포졸란 반응은 혼합후 몇 달 또는 몇 년동안 지속적으로 일어날 수 있다. 그래서 시멘트 고화처리 점성토는 시간에 따라 강도가 증가될 것으로 기대된다. (D.T. Bergado, 1996)

4. 고화재·실내 배합시험

4.1 적용대상지반

본 연구의 대상토는 ○○월드컵 주경기장부지의 현장토로서 우리나라의 대표적 충적연약지반인 울산, 목포, 비인, 진해, 군산 등 다섯 곳의 입도분포와 비교분석하여 보면, 그림1과 같다. ○○월드컵 주경기장부지의 지층구조는 매우 다양하고 불규칙한 구성을 이루고 있어, 현장토 중 대표적인 연약 점성토를 선정하였다. 적용대상지반의 물성시험결과는 그림1, 표 1에 나타나 있으며, 주경기장부지의 단면도는 그림 2와 같고 고화재혼합처리 적용단면부는 콩자갈층아래로부터 약 1.5m이다.

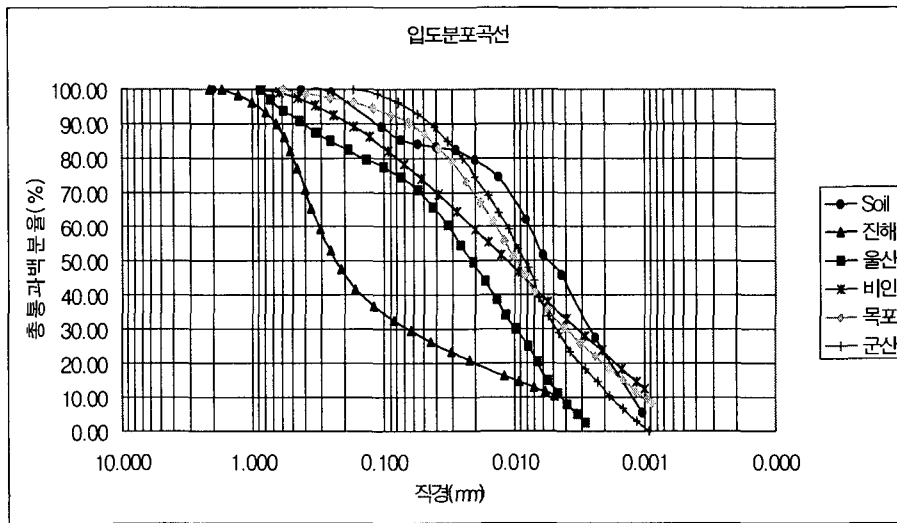


그림 1. 적용대상토의 입도분포

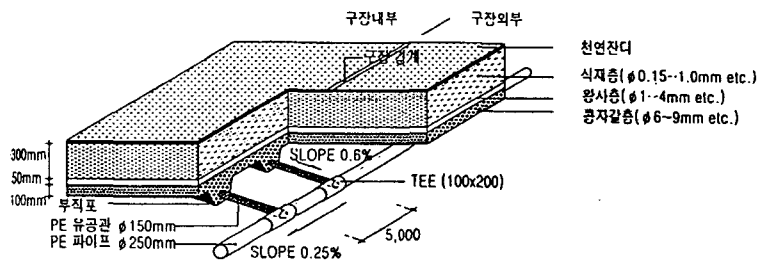


그림 2. 월드컵 주경기장부지의 단면도

표 1. 적용 대상토의 물성치

구 분	비 중	자연함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	분 류
흙(Soil)	2.663	23.92	34.40	26.10	CL

4.2 사용고화재

혼합재로 사용된 고화재는 국내생산되는 A고화재, B고화재, C고화재이며 그 성분분석은 다음과 같이 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer)분석기를 이용한 정량분석을 행하였다. 시편을 제작하기 위하여 고온에서 처리함으로 인해 아래 분석된 10가지 성분 이외의 물질(물(H₂O),탄소성분(CO₂),황성분(SO₃)등)은 증발 또는 소멸되어 감열 감량으로 처리되었다. 시료별 성분은 CaO와 loss of ignition (SO₃)에서의 차이를 비교해 볼 수 있는데 일반토의 강도발현에 CaO이, 고함수토 및 유기질토에는 SO₃가 영향을 미친다.(Herzog, 1962)

표 2. X선 형광분석기에 의한 성분분석

특성 및 성분 시료	특 성 비 중	성분구성(%)											
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	loss of ignition	Total Sum
A 고화재	3.06	20.72	4.75	2.09	0.21	0.05	46.74	3.36	0.98	0.02	0.19	20.71	99.82
B 고화재	2.94	21.38	5.79	2.15	0.30	0.10	49.87	3.90	0.97	0.57	0.16	14.46	99.65
C 고화재	3.01	31.60	10.50	4.30	-	-	44.20	1.90	0.80	0.10	-	6.50	99.90

4.3 일축압축시험

(1) 시험체제작

건조한 고화재와 현장교란시료에 포화도를 100%로 가정하여, 습윤단위중량이 $\gamma_t=1.7 \text{ t/m}^3$, 1.9 t/m^3 에 대해 시험체를 제작하였다.

여기서, 고화재와 대상토는 자연함수비를 포함하지 않는 건조한 상태의 중량이다.

$$\gamma_t = \frac{(\text{고화재} + \text{물} + \text{대상토의 중량})}{\text{몰드의 체적}} \quad (11)$$

여기서, γ_t : 습윤단위중량 (t/m^3)

몰드의 체적 : 몰드 크기가 $5 \times 10 \text{ cm}$ 이므로 체적 = 196.349 cm^3

고화재는 A고화재, B고화재, C고화재를 사용하였으며, 배합비는 0, 3, 5, 7, 10, 15, 20 %로 분포시켰다. 배합비에 따른 고화재중량은 다음식에 의해 산정했다.

$$\text{배합비}(\%) = \frac{(\text{고화재중량})}{(\text{고화재중량} + \text{물중량} + \text{흙중량})} \times 100 \quad (12)$$

각 경우에서 고화재를 섞지 않은 경우에 대해서 시험을 행하여 고화재 혼합강도 및 공학적 특성의 변화를 분석할 수 있도록 하였다.

함수비는 습윤단위중량 당 포화도를 100%로 가정하여 함수비를 계산하였다. 따라서 $\gamma_t=1.7 \text{ t/m}^3$ 일 때 함수비=51%, $\gamma_t=1.9 \text{ t/m}^3$ 일 때 함수비=31%를 유지하였다.

$$\text{함수비}(\%) = \frac{(\text{물중량})}{(\text{고화재 중량} + \text{흙중량})} \times 100 \quad (13)$$

시험체 크기는 $5 \times 10 \text{ cm}$ (직경 \times 높이)로 제작되었으며, 양생일수는 3일, 7일, 28일이고 양생온도는 상온 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 향한 수조에서 습윤양생하였다.

(2) 시험방법

시험방법으로는 일축압축강도시험법(Unconfined compression test : KS F 2314)으로 전단파괴 속도는 1.0 mm/min 이다.

5. 시험 결과 및 분석

일축압축강도로부터 얻은 결과를 고화재별, 양생일수별, 함수비별로 나누어 강도에 미치는 영향을 평가하였다.

5.1 일축압축시험결과

위의 일축압축강도시험으로부터 각각의 경우에 대하여 다음과 같은 시험 결과를 얻었다.

표 3. 고화재 적용토의 일축압축강도 (단위 : kg/cm^2)

구 분			배합비							비고
함수비	고화재	양생 일수	0%	3%	5%	7%	10%	15%	20%	
w=51%	A 고화재	3일	0.09	1.63	5.11	5.60	7.06	10.47	17.60	$\gamma_t = 1.7$ t/m^3
		7일		1.43	5.46	5.91	9.93	23.37	26.89	
		28일		2.92	7.41	7.84	12.10	30.84	50.93	
	B 고화재	3일	0.06	0.53	0.78	1.31	1.68	2.77	4.36	
		7일		1.65	3.23	3.69	6.10	12.96	21.98	
		28일		1.50	3.32	5.56	11.08	26.74	37.99	
	C 고화재	3일	0.08	0.62	3.62	7.67	15.45	22.32	33.94	
		7일		4.68	10.04	19.10	23.67	40.45	72.90	
		28일		1.39	10.46	24.05	35.48	47.77	73.95	
w=31%	A 고화재	3일	0.92	4.25	11.12	11.61	21.20	21.22	18.65	$\gamma_t = 1.9$ t/m^3
		7일		4.56	11.43	13.35	22.29	24.82	19.36	
		28일		4.99	10.60	18.06	31.07	35.53	42.50	
	B 고화재	3일	0.76	3.23	5.94	11.68	19.14	21.04	23.12	
		7일		2.28	6.55	11.99	19.80	14.53	27.57	
		28일		1.48	7.98	10.36	25.97	27.57	44.49	
	C 고화재	3일	0.71	1.70	3.78	8.13	16.61	15.13	29.03	
		7일		1.41	3.36	9.63	17.29	21.47	38.63	
		28일		2.78	5.54	10.39	20.78	33.71	37.11	

5.2 일축압축강도결과분석

5.2.1 고화재별 비교분석

7일 양생후의 각 경우에 대한 일축압축강도의 결과는 그림 3, 4와 같다. 그림 3(함수비=51%)을 보면, C고화재의 값이 다른 고화재에 비해 우수한 특성을 보이며, 그림 4(함수비=31%)에서는 A고화재가 다소 우수한 특성을 보인다. 주경기장의 목표개량강도는 장기허용지력으로 현장/실내 강도저하비=0.5, 안전율=2을 고려하여 계산할 때 약 10 kg/cm²의 값을 요구하고 있다. 함수비 51%일 때 C고화재가, 함수비 31%일 때 A고화재가 고화재 배합비 5%에서 목표개량강도를 만족하고 있다.

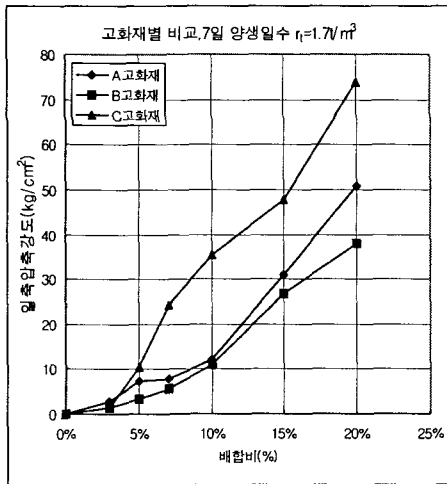


그림 3. 일축강도의 고화재별 비교($r_t=1.7t/m^3$)

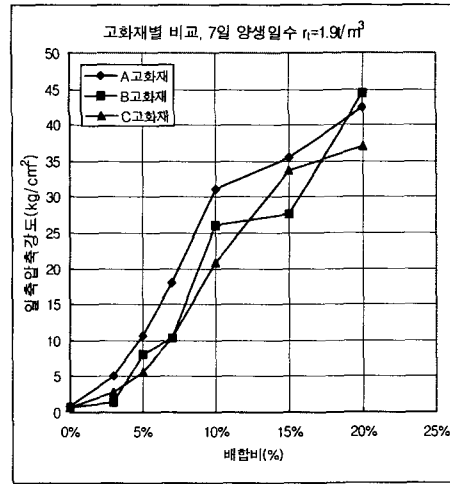


그림 4. 일축강도의 고화재별 비교($r_t=1.9t/m^3$)

5.2.2 양생일수에 의한 영향

고화재별 강도특성에서 각각의 경우에 우수한 특성을 보인 C, A고화재에 대해서 양생일수에 의한 영향을 보면, A,C고화재 모두 양생일수가 증가할수록 강도는 증가하나, 7일과 28일양생일수일 때를 비교해 보면, C고화재 경우의 증가폭(그림 6, 8)이 A고화재 경우(그림 5, 7)보다 다소 작은 것으로 나타났다.

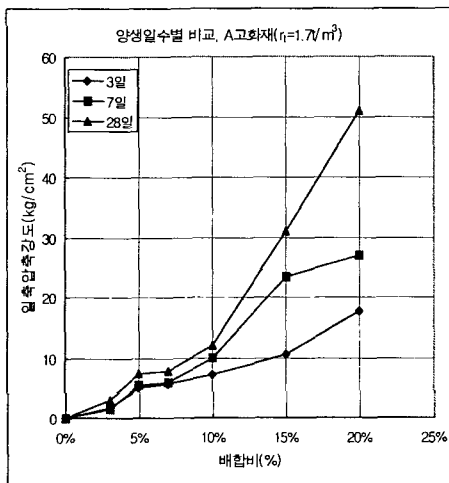


그림 5. 일축강도의 양생일수별 비교(A고화재, $r_t=1.7t/m^3$)

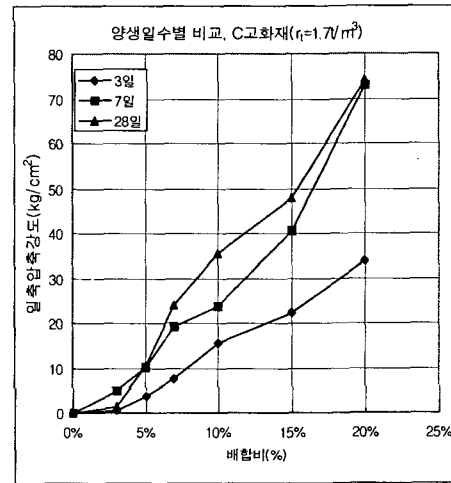


그림 6. 일축강도의 양생일수별 비교(C고화재, $r_t=1.7t/m^3$)

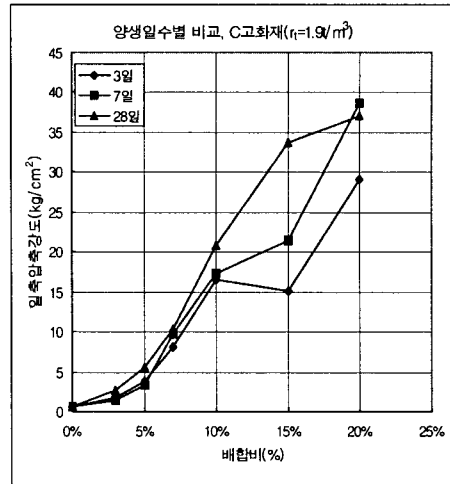
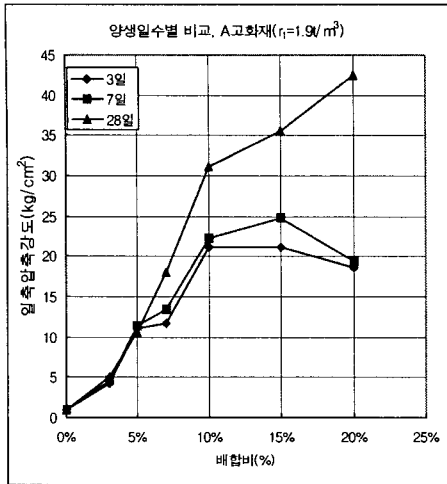


그림 7. 일축강도의 양생일수별 비교(A고화재, $r_t=1.9t/m^3$) 그림 8. 일축강도의 양생일수별 비교(C고화재, $r_t=1.9t/m^3$)

5.2.3 함수비에 의한 영향

고화재별 강도특성에서 각각의 경우에 우수한 특성을 보인 C, A고화재에 대해서 함수비에 의한 영향을 보면, A고화재는 함수비가 51%인 경우보다 함수비가 31%인 경우에서 높은 강도를 보이고 있으며 고화재 배합비가 15~20% 범위에서 강도분포가 반대경향을 보인다. C고화재는 A고화재와는 반대의 경향을 보이고 있는데 함수비가 31%인 경우보다 함수비가 51%인 경우에 높은 강도분포를 갖고 있는 것으로 나타났다.

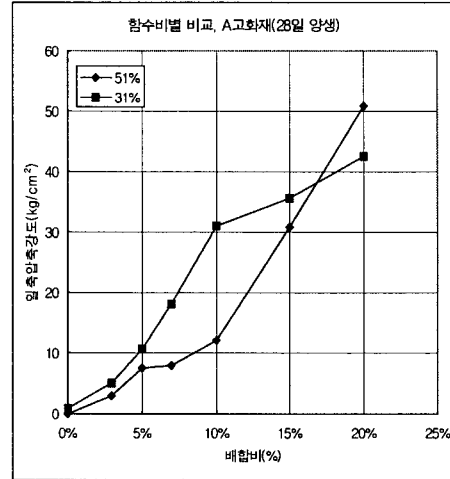
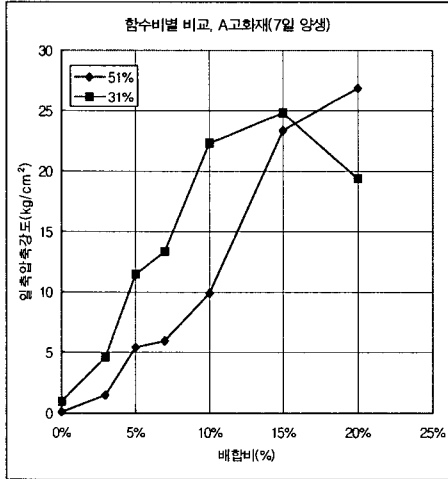


그림 9. 일축강도의 함수비별 비교(A고화재,7일양생)

그림 10. 일축강도의 함수비별 비교(A고화재,28일양생)

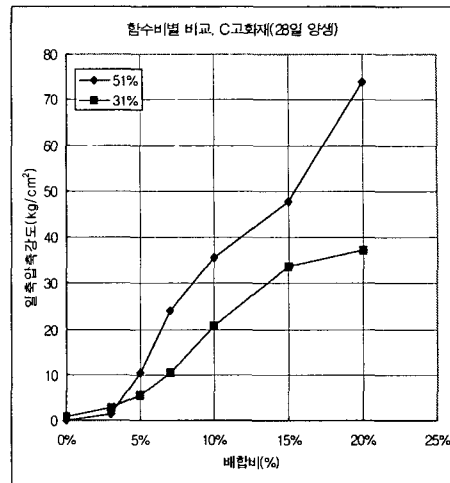
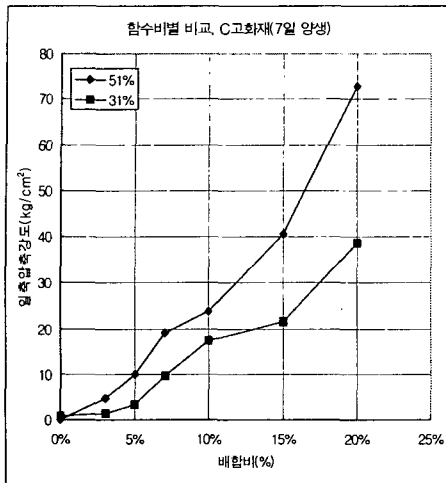


그림 11. 일축강도의 함수비별 비교(C고화재,7일 양생)

그림 12. 일축강도의 함수비별 비교(C고화재,28일 양생)

6. 결론

본 연구에서 얻은 결과를 요약정리하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 그림 3(함수비=51%)을 보면, C고화재의 값이 다른 고화재에 비해 우수한 특성을 보이며, 그림 4(함수비=31%)에서는 A고화재가 다소 우수한 특성을 보인다. 주경기장의 목표개량강도는 장기허용지치력으로 계산할 때 약 10 kg/cm²의 값을 요구하고 있다. 양생일수 7일, 고화재 배합비 5%에서, 함수비 51%일 때 C고화재가 10.04kg/cm², 함수비 31%일 때 A고화재가 11.43 kg/cm²의 강도를 보이고 있다. 따라서 이는 목표개량강도(10.0kg/cm²)를 만족하고 있다.
- 2) 양생일수에 의한 영향을 보면, A,C고화재 모두 양생일수가 증가할수록 강도는 증가하나, 7일과 28일양생일수일 때를 비교해 보면, C고화재 경우의 증가폭(그림 6, 8)이 A고화재 경우(그림 5, 7)보다 다소 작은 것으로 나타났다.
- 3) 함수비에 의한 영향을 보면, A고화재는 함수비가 51%인 경우보다 함수비가 31%인 경우에서 높은 강도를 보이고 있으며 고화재 배합비가 15~20%범위에서 강도분포가 반대경향을 보인다. C고화재는 A고화재와는 반대의 경향을 보이고 있는데 함수비가 31%인 경우보다 함수비가 51%인 경우에 높은 강도분포를 갖고 있는 것으로 나타났다.
- 4) 고화재별 강도경향이 함수비 51%조건에서 함수비 31%조건으로 바뀔 때 C>A>B순에서 A>C≒B의 강도경향을 보이는데 그 원인으로는 C고화재가 액상으로 시공할 경우에는 충분한 반응성을 보여 강도발현이 우수해지지만, 본 실험에서 r_i=1.9 t/m³의 조건은 함수비가 31%로 낮은 상태에서 분말상태로 혼합함으로써 그 반응이 제대로 이루어지지 못하여 강도 발현이 r_i=1.7 t/m³의 조건에서 만큼 나타나지 못했던 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설부(1979), “軟弱한 地盤改良工事 웰포인트 및 샌드드레인 工法(건설지도서 17·26)”, 건설진흥(서울), pp.5-10
2. 주택공사 주택연구소(1998), “연약지반 개량공법 적용기준에 관한 연구”, pp.3-142
3. 한국건설기술연구원(1988), “軟弱地盤 淺層 安定處理 研究”, pp.33-65
4. 세멘트協會(1994), “セメント系 固化材による 地盤改良マニュアル”, pp.1-87, 381-395
5. Herzog, A. and Mitchell, J. K.(1962), “X-ray Evidence for Cement-Clay Interaction”, Nature 195, pp.989-990
6. Noble, D. F.(1968), “Reactions and Strength Development in Portland Cement-Clay Mixtures”, H.R.R NO.198, pp.39-56
7. F.G.Bell(1993), “Engineering Treatment of Soils”, E&FN SPON, pp.240-267
8. D.T.BERGADO et.al.(1996), “Soft Ground Improvement in lowland and other environments”, ASCE Press, pp.234-269