

시멘트계 고화재에 의한 천층개량공법에 관한 연구

The Study on Surface Improvement Method by Ground Stiffening Agent

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 임해식²⁾, Hai-Sik Lim, 전진규³⁾, Jin-Gyu Jeon

¹⁾한양대학교 공과대학 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

²⁾대한주택공사 주택연구소 연구원, Researcher, National Housing Corp., Research Institute.

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

SYNOPSIS : This study has made researches in the applicability of the surface improvement method in the country and dealt with matters of the selection of a stiffening agent, the peculiarity of a applicable ground, the combination ratio and the decision of the improvement efficiency, which are the basic design data necessary for when this method is applied now. The combination test measured by the unconsolidated undrained test along the triaxial compression test. Used stiffening materials selected the A, B, C stiffening agent as domestic productions and analyzed components and went into the improvement principles and anticipated the applicability of the target grounds. The target ground presumed a general and soft ground using a field soil classified as SM in the Type I and a high hydrated ground mixing a soil in Type I and Bentonite classified as CH in the Type II at the ratio of 3 to 5. The objects of this method are to give proof stiffening agent applicable to a target ground and show the objective data for the improvement effects.

KEYWORDS : stiffening agent, improvement efficiency, combination test

1. 서론

1980년대 중반이후 절대적으로 부족한 택지자원으로 인해 연약지반의 개발이 불가피해지고 있으며 이로 인해 기초지반의 선택 및 개량이 과거에 비해 다양해짐으로써 시공상 문제점(트래커빌리티 저하, 경제적인 개량법의 부족(중·소규모 공사시), 공비의 고비용화, 공기의 장기화, 주변환경의 훼손, 등)이 많이 발생하게 되었다. 이에 대한 대처방안으로 국내에서도 시멘트계 고화재에 의한 천층 개량공법의 시행이 매립지, 농로의 개량에 적용되어 왔다.

그러나, 여전히 고화재에 의한 개량공법은 설계에 필요한 기초시험자료부터 설계법, 시방서 등에 이르기까지 미비한 실정으로 설계와 시공이 경제적으로 이루어지는데 많은 어려움이 있다. 본 연구는 시멘트계 고화재에 의한 고화 안정처리토의 삼축압축시험(비압밀 비배수 전단시험)을 실시하였으며, 습윤단위중량, 함수비, 고화재첨가량이 지반개량에 미치는 영향, 즉 역학적 특성(수직압축강도, 축변형율, 탄성계수)에 대한 분석을 통해 적용대상토에 적합한 고화재를 선정하고 토질구조물개량에 맞는 배합비와 다짐도를 제시함으로써 경제적이고 신뢰성 있는 공사수행이 되도록 하는데 그 목적이 있다고 하겠다.

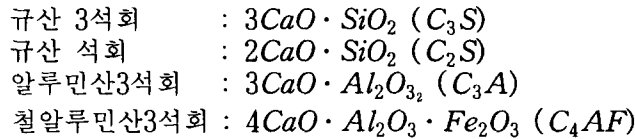
2. 천층개량공법

시멘트계 고화재에 의한 천층개량공법은 지반의 표층부분(1~2m정도의 범위내)을 대상으로 안정재를 첨가혼합하고 그 화학적 고결작용을 이용해서 지반의 안정성(강도와 변형특성, 내구성 등)을 개선하는 지반개량공법을 말한다. 이는 주로 건설기계류의 주행과 작업에 필요한 트래커빌리티나 지반 지지력을 확보하는 등의 가설적인 성토 또는

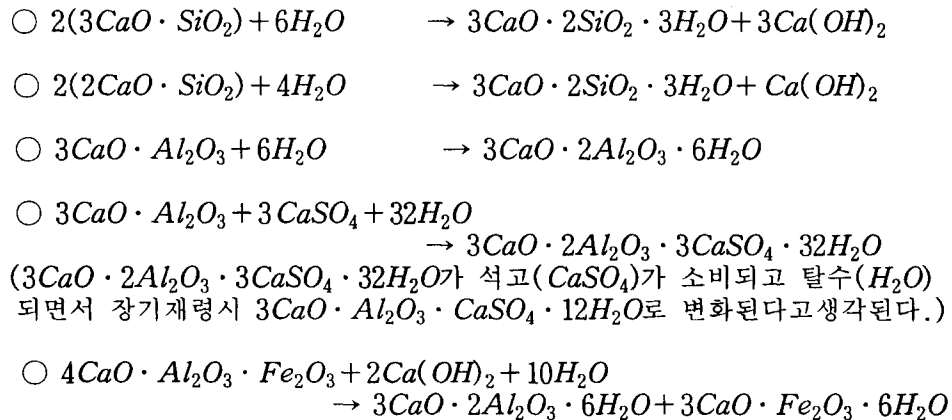
도로의 노체, 노상이나 노반 등의 변형성, 강도, 내구성의 향상, 구조물 기초지반의 지지력 증대를 위한 지반안정처리 등 영구적인 지반개량에도 이용되고 있다. 안정재의 첨가율을 조정하여 연약한 지반을 설계 및 시공조건에 따라 필요한 강도로 개량 할 수 있으며, 공기의 단축, 공비의 저렴화, 중·소규모의 공사에 효과적인 특징등이 장점으로 부각되고 있다. 또한 치환공법에 비해 불량한 굴착토가 발생하지 않으므로 사토에 따른 환경문제가 없으며 양호한 치환토의 입수가 곤란한 경우에도 적용할 수 있다.

3. 시멘트계 고화재에 의한 지반개량원리

연약한 흙 뿐만 아니라 초연약 해성 점성토, 고유기질토 및 산업폐기물 등을 고화시킬 경우 포틀랜드 시멘트를 사용하면 수화반응의 저해로 인해 개량효과를 얻기가 어렵다. 이러한 고화대상물의 첨가량을 보다 적게 사용하여 경제적으로 고화시키는 것을 목적으로 시멘트를 모재로 하는 재료로서 시멘트계 고화재가 개발되었는데 그 개량원리는 시멘트 및 석회와 비슷하다. 시멘트계 고화재는 이산화규소(SiO_2), 산화알루미늄(Al_2O_3) 및 산화칼슘(CaO)을 주원료로 하는 일반 포틀랜드 시멘트와 비교할 때 거의 흡사하며 따라서 시멘트의 소성과정에서 생기는 활성 구성광물과 같은 물질이 주구성광물이 된다.



(1)수화반응 : 시멘트계 고화재는 수화반응에 의해 규산석회수화물($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$), 알루미늄산 유산석회수화물(Ettringite : $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)의 생성이 활발하게 이루어지는 것이 그 화학성분의 특징이다. 에트린자이트는 시멘트의 산화, 석회 등의 결정의 간극을 보진하도록 결정화가 이루어지며 함수비의 저하를 가져온다. 따라서 팽창성이 생겨 고화체의 밀실화가 이루어지며, 그에 따라 차수성이 향상되고, 유해중금속류(에트린자이트와 이온 교환을 통해),유기물(팽창성에 의해) 등을 고착시킨다.(그러나 이는 유기물이 적은 토사에서는 에트린자이트의 팽창성이 토사와의 반응속도보다 빠르기 때문에 오히려 강도발현에 역현상을 일으킨다.)



(2)이온 교환반응 : 많은 수분을 함유한 점성토에 고화재가 섞이면 소석회성분($Ca(OH)_2$)의 자유칼슘이온(Ca^{2+})이 점토광물의 이온을 교환하게 된다. 이는 양이온 교환능이 $Na^+ < K^+ < Ca^{2+} < Mg^{2+}$ 의 순서대로 크기 때문에

점토광물의 이온과 교환반응이 일어나는 것이다. 이에 따라 지반내 수분의 PH값이 증가(알칼리성증가)하기에 이 반응은 더욱 가속화된다. 고화재 혼합후 입자간의 전기적 반발력, 흙입자의 양의 전기력으로 흙입자는 면모구조를 갖는 단위결합체를 형성한다. 이는 점토입자에 비해 큰 입자이며 내부적으로 대단히 느슨한 배열을 갖게 되어 물성이 변하고 따라서 성토작업의 작업성이 증진된다.

(3)포졸란반응 : 점토를 구성하는 석영, 장석, 운모 등의 광물들로부터 결정체 또는 비결정체의 실리카(SiO_2)와 알루미늄이온(Al_2O_3)이 분리되어 고화재수화물과 반응하여 이루어지는 것으로서 비교적 장기간에 걸쳐 다양한 접착성 물질을 생성한다. 이는 PH값에 큰 영향을 받는데 수화반응으로 수분내 PH값이 증가하여 실리카와 알루미늄이온의 분리 및 자유칼슘이온(Ca^{2+})과의 결합이 용이하게 된다. 이는 점토광물이 공급되는 한 계속된다.(농,1987)

4. 고화재 실내 배합시험

4.1 적용대상지반의 선정

본 연구의 대상토의 선정에는 울산, 목포, 비인, 진해, 군산 등 다섯 곳의 충적연약지반의 입도분포를 분석하여 그 중간정도의 분포값을 국내생산되는 Bentonite와 일반토를 7 : 3의 비율로 맞추어 얻었다. 그림 1.에서 Soil은 Type I의 대상토 입도분포이고 Ben : Soil = 7: 3은 Type II의 대상토 입도분포이다. 사용한 시료의 물성시험방법은 KS규정에 의거해서 시험하였고 분류는 통일분류법에 의해 행하였다.(표 1.참조) 사용된 흙은 실트질 모래(SM), 벤토나이트는 소성이 큰 무기질 점토(CH)로 분류되었다.(건,1979)

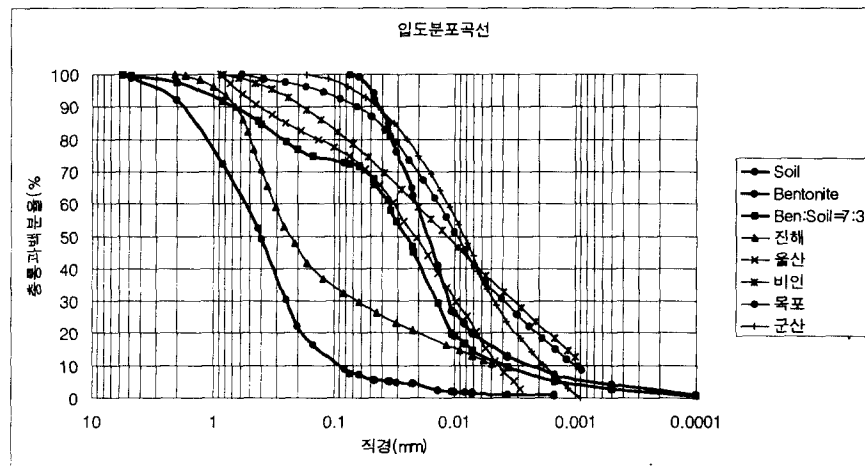


그림 1. 적용대상토의 입도분포

표 1. 적용 대상토의 물성치

구분	비중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	분류	최적함수비 (%)	최대건조단위중량 (g/cm^2)
흙	2.67	29.5	비소성	SM	17.0	1.752
벤토나이트	2.70	338.0	62.0	CH	-	-
혼합토 (Ben: Soil = 7: 3)	2.69	-	-	-	-	-

4.2 삼축압축시험

4.2.1 사용고화재

혼합재로 사용된 고화재는 국내생산되는 A고화재(일반연약토용), B고화재(고함수토, 유기질토용), C고화재(일반약토용)이며 그 성분분석은 다음과 같이 XRF(X-ray Fluorescence Spectrometer)분석기를 이용한 정량분석을 행하였다. 시편을 제작하기 위하여 고온에서 처리함으로 인해 아래 분석된 10가지 성분외의 물질(물(H_2O), 탄소성분(CO_2), 황성분(SO_3)등)은 증발 또는 소멸되어 강열 감량으로 처리되었다.

표 2. X선 형광분석기에 의한 성분분석

특성 및 성분 시료	특 성 비 중	성분구성(%)											
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnC	CaO	MgC	K_2O	Na_2O	P_2O_5	loss of ignition	Total
Ben-tonite	2.7	60.56	15.58	3.22	0.37	0.06	2.90	2.61	0.81	4.00	0.09	9.82	100.02
포틀랜드 시멘트	3.17	21.0~ 22.5	4.5~ 6.0	2.5~ 3.5	-	-	63.0~ 66.0	1.0~ 2.0	-	-	-	0.9~ 2.6	100.00
A 고화재	3.05	21.51	4.92	2.18	0.22	0.05	47.87	3.49	1.04	0.02	0.15	17.89	99.34
B 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
C 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

시료별 성분은 CaO 와 loss of ignition(SO_3)에서의 차이를 비교해 볼 수 있는데 일반토의 강도발현에 CaO 이, 고함수토 및 유기질토에는 SO_3 가 영향을 미친다. 따라서 CaO 의 성분이 상대적으로 많고 기타의 비율이 시멘트에 가까운 고화재 A, C가 일반토의 강도발현에 효과적일 것이며, SO_3 의 성분이 상대적으로 많고 CaO 의 성분이 적은 B고화재가 고함수 연약토에 적합하리라고 예상된다.

4.2.2 시험개요

(1) 시험방법

삼축압축시험(UU시험법)을 행하였는데 전단파괴 속도는 0.5 mm/min 이며 축압(Cell pressure)은 0, 50, 100, 150 kPa 로 천층개량공법이 표층 1~2 m 의 개량범위를 가지기 때문에 그 깊이에 맞게 축압을 주어 시험을 행하였다.

(2) 시험체제작

Type I(고화재 + 흙)의 경우 흙의 다짐시험에 의하여 최대건조단위중량에 완전포화상태를 가정한 함수비로 습윤단위중량을 계산(그 값이 대략 $\gamma_i=2.1 \text{ t/m}^3$ 이었다)하여 그 값보다 작은 분포를 갖도록 하였는데 $\gamma_i=1.9 \text{ t/m}^3$ 이하에서는 완전포화상태로 함수비를 조정하였을 때 밀도분포가 작아서 시험체 제작이 불가 하였다. 따라서 $\gamma_i=1.9, 2.0, 2.1$ 에 대해 시험체를 제작하였다.

Type II(고화재 + 흙 + 벤토나이트)에서는 벤토나이트의 함수후 팽창특성상 $\gamma_i=2.1 \text{ t/m}^3$ 까지 다짐이 어려워 실제 시공중에도 이러한 다짐은 기대될 수 없다고 판단되어 $\gamma_i=1.9 \text{ t/m}^3$ 를 최대로 값을 분포시켰다. 따라서 $\gamma_i=1.5, 1.7, 1.9 \text{ t/m}^3$ 에 대해 시험체를 제작하였다.

고화재배합비는 각 습윤단위 중량에 대해 1, 3, 5, 7, 10 %로 분포시켰다. 배합비중량은 다음식에 의해 산정했다.

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

10%이상 배합시 너무 큰 강도와 경제성이 떨어질 것으로 판단되어 제한하였다. 그리고 Type I, II에서 고화재를 섞지 않은 경우에 대해서도 시험을 행하여 고화재 혼합시 강도 및 공학적 특성의 변화를 분석할 수 있도록 하였다.

함수비는 습윤단위중량당 완전포화로 가정하여 함수비를 계산하였다. 따라서 $\gamma_t=1.5 t/m^3$ 일 때 함수비=90%, $\gamma_t=1.7 t/m^3$ 일 때 함수비=54%, $\gamma_t=1.9 t/m^3$ 일 때 함수비=34%, $\gamma_t=2.0 t/m^3$ 일 때 함수비=26%, $\gamma_t=2.1 t/m^3$ 일 때 함수비=20%를 유지하였다.

시험체 크기는 $5 \times 10 \text{ cm}$ (직경 : 높이)로 제작되었으며, 양생일수는 28일이고 양생온도는 상온 20°C 로 습윤양생하였다. Type I은 일반토를, Type II는 연약점성토에 대한 경우를 모델링한 시험형태인데 벤토나이트를 사용한 이 유는 물성이 연약한 점성토를 나타내기 때문이다.

표 3. 삼축압축시험 개요

구분	Type I (고화재+흙)			Type II (고화재+흙+ 벤토나이트)		
	A고화재	B고화재	C고화재	A고화재	B고화재	C고화재
습윤단위중량	1.9, 2.0, 2.1 t/m^3			1.5, 1.7, 1.9 t/m^3		
축 압	0, 50, 100, 150 kPa					
고화재배합비	0, 1, 3, 5, 7, 10%					

5. 시험 결과 및 분석

5.1 고화재와 흙의 배합시험(Type I)

(1) 강도특성: 사용된 흙은 실트질 모래(SM)이며 표 2에서 C, A고화재는 성분에 차이는 있으나 시멘트에 접근해 있음을 알 수 있다. 이는 시멘트가 사질토와 혼합시 그 발현강도가 최대가 된다는 사실을 통해서 이해할 수 있다. 즉 시멘트의 성분에 비교적 비슷한 C, A고화재(CaO 이 많고, SO_3 가 적으면 일반토에 적합)가 이론적으로 Type I의 대상토에 있어서 그 강도가 큰 값이 나올 것으로 예상되었는데 압축강도에 뚜렷한 차이는 없으나 일반토용인 C, A고화재 혼합처리토의 압축강도값이 그림 3에서 B고화재 혼합처리토에 비해 대체로 높은 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

습윤단위중량의 증가시 강도값은 비례하여 증가하고 있으며 고화재배합비 증가시 강도추이는 그에 따른 비례증가 이상의 높은 증가율을 보이고 있다. 강도값의 대략적인 값은 배합비와 습윤단위중량의 세분에 따라 표 4로 나타난다. 이에 따라 소요강도를 만족할 수 있는 고화재배합비와 습윤단위중량을 구할 수 있다.

표 4. C, A 고화재혼합처리토의 강도분포

습윤단위중량	0%	압축강도(축압=0kPa)					비고
		1%	3%	5%	7%	10%	
1.9 kg/cm^2	0.5	0.8	2-3	6-7	12-14	20-25	단위 (kg/cm^2)
2.0 kg/cm^2	0.7	1.4	3-4	7-10	14-16	22-26	
2.1 kg/cm^2	1.5	2.5	5-6	8-13	16-19	25-28	

(2) 변형을 특성 : 축변형율은 고화재배합비 3%대에서 그 축변형율이 크게 떨어짐을 알 수 있으며 3%이상에서는 완만한 감소를 보이고 있다. 배합비 3%에서 축변형율은 대략 2%를 나타내는데 천층개량심도를 2m로 할 때 그 변형값은 4cm가 된다. 축변형율의 대략적인 값은 표 5에 나타내었다.

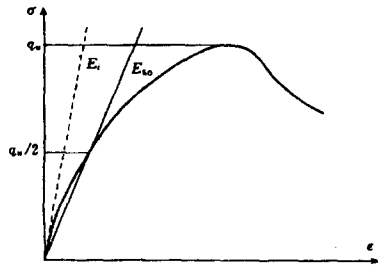


그림 2. 탄성계수 E_{50} , E_i

표 5. C, A 고화재혼합처리토의 변형률분포

습윤단위중량	0%	변형율(측압=0kPa)					비고
		1%	3%	5%	7%	10%	
1.9 kg/cm ²	15	2.3	2.5	1.2	0.8	1	단위(%)
2.0 kg/cm ²	15	3.0	1.7	1.1	1.6	0.7	
2.1 kg/cm ²	12	6.5	1.2	1.9	1.3	1.2	

(3) 탄성계수특성 : 탄성계수는 그림 2.에 나타난 것과 같이 E_{50} 을 구한 것이다. 이는 흙은 탄·소성거동에서 탄성 범위의 기울기를 말한다. 탄성계수는 강도를 구하기 위한 한 인자로 그 값의 분포는 강도값과 비슷한 경향을 보이고 있다.

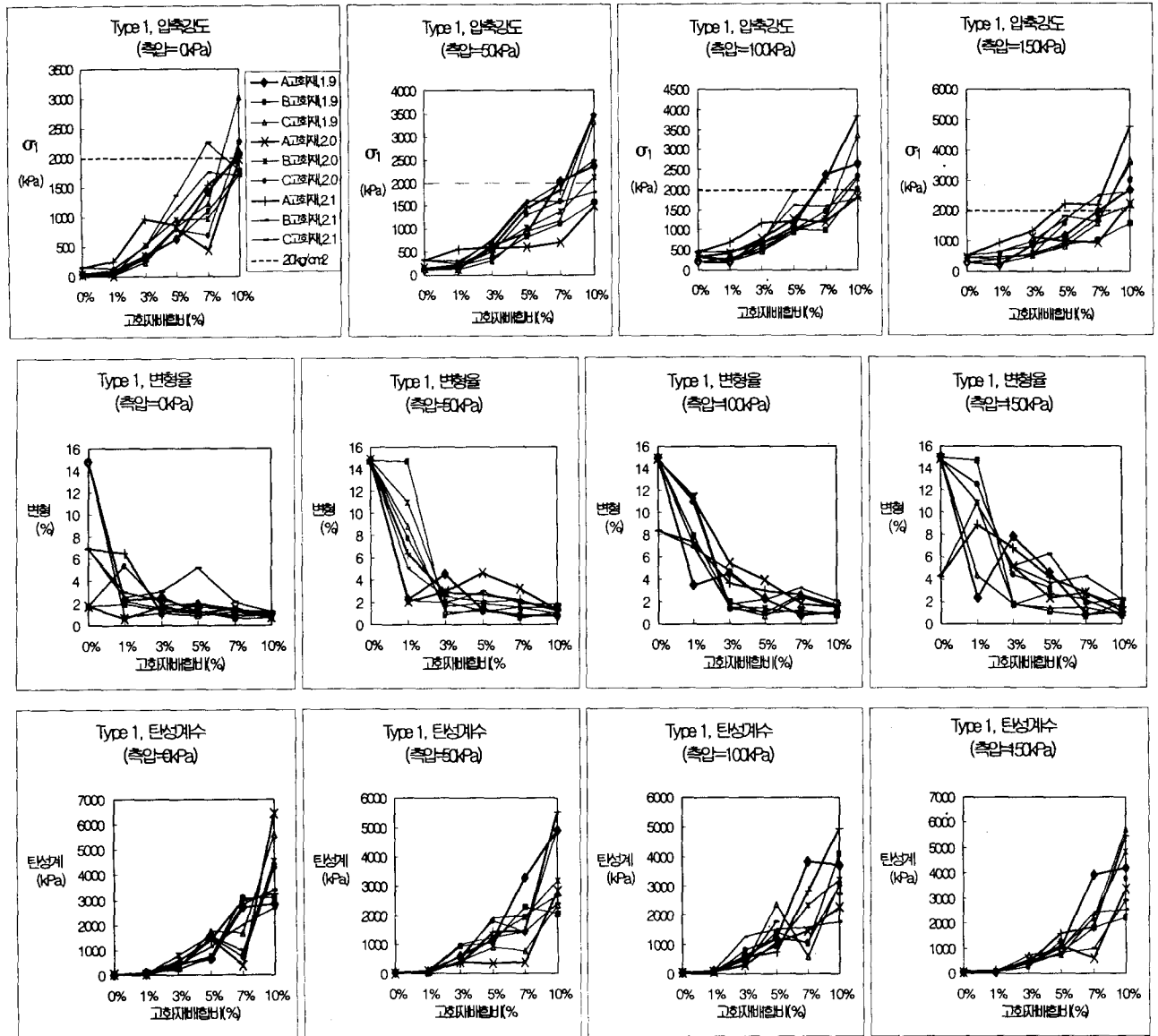


그림 3. Type I의 압축강도, 변형율, 탄성계수 분포

5.2 고화재와 흙, 벤토나이트의 배합시험(Type II)

(1) 강도특성: 사용된 흙은 벤토나이트(70%)에 실트질의 모래(30%)를 혼합토이다. 고탍수토, 유기질토용인 B고화재 (CaO 이 적고, SO_3 가 많으면 고탍수토, 유기질토에 적합)가 이론적으로 그 강도발현에 있어서 큰 값이 예상되었는데 그림 4에서의 강도추이에서 나타나듯 B고화재 혼합처리토의 강도가 대체로 높은 경향을 보였다.

습윤단위중량의 증가시 강도값은 Type I 과 달리 습윤단위중량 $1.9 > 1.5 > 1.7$ 의 순으로 증가됨을 보이고 있다. 고화재배합비 증가시 강도증가추이는 배합비 10%에서 Type I 보다 작은 15 kg/cm^2 대의 강도를 보이는데 이는 고탍수 연약토를 개량하는 경우이기에 습윤단위중량이 작은데 그 원인이 있다고 판단된다.

압축강도의 대략적인 값을 배합비와 습윤단위중량의 세분에 따라 나타내면 표 6의 값으로 나타난다. 따라서 소요강도에 맞는 고화재배합비와 습윤단위중량을 구할 수 있다.

표 6. B 고화재혼합처리토의 강도분포

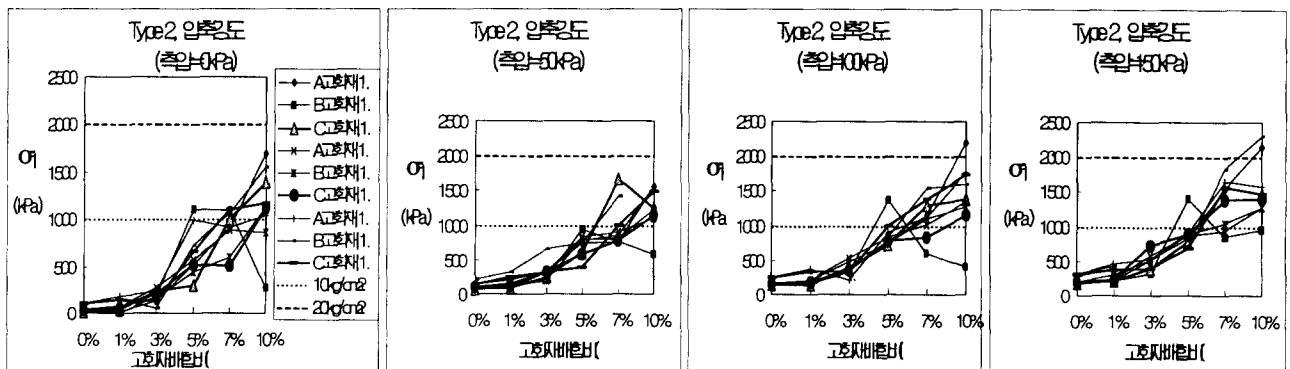
습윤단위중량	0%	압축강도(측압=0kPa)					비고
		1%	3%	5%	7%	10%	
1.5 kg/cm^2	0.2	0.6	1.8	8.0	10.0	14.6	단위 (kg/cm^2)
1.7 kg/cm^2	0.4	0.8	1.6	5.6	6.5	11.2	
1.9 kg/cm^2	0.9	1.4	2.4	8.5	10.5	15.5	

(2) 변형율 특성: 축변형율은 고화재배합비 3%대에서 그 변형율이 크게 떨어짐을 알 수 있으며 3%이상에서는 완만한 감소를 보이고 있다. 배합비 3%에서 축변형율은 대략 1%를 나타내는데 천층개량심도를 2 m로 할 때 그 변형값은 2 cm가 된다. 축변형율의 대략적인 값은 표 7에 나타내었다.

표 7. B 고화재혼합처리토의 변형율분포

습윤단위중량	0%	변형율(측압=0kPa)					비고
		1%	3%	5%	7%	10%	
1.5 kg/cm^2	2.7	0.8	0.6	0.5	0.6	1.2	단위(%)
1.7 kg/cm^2	5.5	2.7	0.9	0.8	0.9	0.8	
1.9 kg/cm^2	6.0	2.8	1.6	0.7	0.7	0.8	

(3) 탄성계수특성: 탄성계수는 Type I 과 같이 E_{50} 을 구한 것이며 그 값의 분포는 비슷한 경향을 보이고 있다.



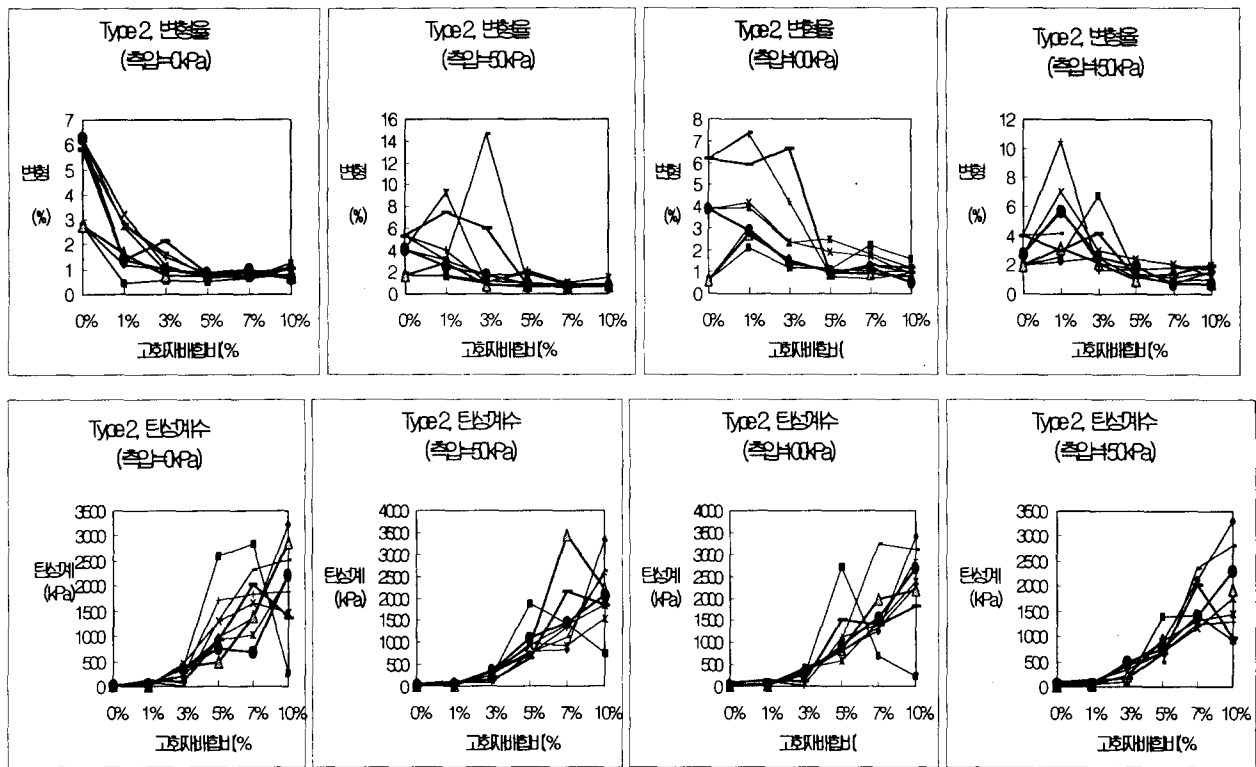


그림 4. Type II의 압축강도, 변형율, 탄성계수 분포

6. 결론

본 연구는 시멘트계 고화제에 의한 일반토와 고탍수연약토의 개량에 대한 실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 적용대상토의 종류에 따른 고화제 선정은 사용고화제의 성분과 개량원리를 통해서 제시된 고화제의 용도를 예상 (A고화제(일반연약토용), B고화제(고합수토, 유기질토용), C고화제(일반약토용))하였는데 각각의 고화제가 예상된 용도에 따라 사용하는 것이 강도발현에 유리한 것으로 나타났다.
- 2) 고화제 혼합처리토의 강도발현은 Type I (대상토: 실트질 모래, 습윤단위중량 $\gamma_t = 1.9, 2.0, 2.1 \text{ kg/cm}^2$)에서 고화제 배합비 10%에서 압축강도가 25 kg/cm^2 정도의 값을 보이고, Type II (대상토: 벤토나이트(70%) + 실트질 모래(30%), 습윤단위중량 $\gamma_t = 1.5, 1.7, 1.9 \text{ kg/cm}^2$)에서는 고화제 배합비 10%에서 15 kg/cm^2 을 전후하는 값을 나타내고 있다. 이는 고화제를 섞지 않은 경우 즉, Type I ($0.5 \sim 1.5 \text{ kg/cm}^2$)에서 20~40배, Type II ($0.2 \sim 0.9 \text{ kg/cm}^2$)에서 20~70배 정도의 개량효과를 보이고 있다.
- 3) 연약지반개량 설계시 소요강도를 얻기 위한 고화제배합비와 습윤단위중량은 그 상관관계를 나타내는 표 4와 표 6.을 통해서 추정치가 제시될 수 있다.

참고문헌

1. 건설부(1979), "軟弱한 地盤改良工事 유포인트 및 샌드드레인 工法(건설지도서 17·26)", 건설진흥(서울), pp.5-10
2. 농업진흥공사, 농업토목시험연구소(1987), "農村道路와 軟弱地盤處理를 위한 土壤固化材 試驗施工 報告書", pp.25-120
3. 홍원표(1996), "초연약지반 표층고화처리공법의 실용화 연구(II)최종보고서", 중앙대학교, pp.5-174
4. 한국건설기술연구원(1988), "軟弱地盤 淺層 安定處理 研究", pp.33-65
5. 松尾新一(1972), "土質安定工法便覽", 日刊工業新聞社, pp.1-13, 175-197, 215-242
6. Herzog, A. and Mitchell, J. K.(1962), "X-ray Evidence for Cement-Clay Interaction", Nature 195, pp.989-990