

연약점토의 함수비 변화가 고화처리토의 강도에 미치는 영향 Effect of Water Content Change of Soft Clay on Strength of Solidification Agent Treated Soil

김광빈¹⁾, Kwang-Bin Kim, 이용안²⁾, Yong-An Lee, 이광준³⁾, Kwang-Joon Lee,
김유성⁴⁾, You-Seong Kim

- ¹⁾ 전북대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University
²⁾ 전북대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University
³⁾ 서남대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Seonam University
⁴⁾ 전북대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University

SYNOPSIS : The improvement effect of soft ground is estimated by unconfined strength mainly. The unconfined strength of solidification agent treated soil is likely to vary with ununiformed mixing ratio and water content change of in-situ ground place by place. So, it is unreasonable to apply a solidification agent mixing ratio obtained from laboratory test results on all over the soft ground. In this study, it was analysed how the unconfined strength would be effected by the water content of soft ground. For this study, a series of unconfined compressive tests are performed on various water content soil samples. The test results showed that the strength was fallen to 30~80% by two times increase of water content approximately. This means that strength of solidification agent treated soil is influenced greatly by water content of raw soft ground and mixing ratio of solidification agent. It was suggested that the method how to decide the mixing ratio with soft ground water content.

Key words : improvement, solidification agent, stabilization, soft ground

1. 서 론

표층고화처리공법은 연약지반의 조기 처리와 시공장비의 트래피커빌리티를 확보하기 위하여 2m 내외의 깊이를 대상으로 고화재를 적정하게 혼합하여 지반의 강도를 확보하는 공법이다. 대상지반의 소요강도를 확보하기 위한 고화재의 투입량은 주로 대상 연약지반의 흙을 채취하여 고화재와 혼합하고 양생하여 일축압축시험을 수행함으로써 결정한다. 그러나 실내에서의 혼합은 비교적 균질한 반면, 실제 현장에서는 혼합이 균질하지 못하므로 강도손실을 고려하여 고화재의 투입량을 다소 증가시키게 된다.

또 다른 강도손실의 원인으로는 연약지반의 함수비 변화에 따른 것이다. 실제로 준설매립지와 같은 연약지반이 대규모로 넓게 형성되어 있는 경우, 연약지반 각각의 부분에서 함수비는 많은 차이를 나타내며 지반심도에 따라서도 함수비는 변화한다. 따라서 일부분의 시료채취에 의한 배합시험 결과로 얻어

진 고화재의 투입량을 일괄적으로 적용한다면 배합시험을 실시했을 때의 함수비보다 높은 부분에서는 고화효과를 기대하기 어려우며, 함수비가 낮은 부분에서는 소요강도를 초과하게 된다.

외와 같이 고화재 혼합에 따른 강도손실의 원인은 크게, 불균질 혼합과 원지반의 함수비 변화에 의한 것으로 볼 수 있다. 이 가운데, 본 연구에서는 연약지반의 함수비 변화가 고화처리토의 강도특성에 미치는 영향을 분석하고 이에 따라 원지반의 함수비 변화에 적절하게 고화층의 강도를 유지할 수 있는 고화재 혼합비의 변화를 검토하였다.

2. 고화재와 대상토질의 특성

2.1 플라이애쉬계 고화재의 특성

본 연구는 플라이애쉬계열의 고화재를 대상으로 하였다. 이것은 종이를 생산하는 과정에서 발생하는 제지 슬러지(sludge)의 수분 제거과정을 거치고 소각로에서 소각된 후 전기집진기에 의하여 포집되어진 플라이애쉬(paper fly ash:PFA)가 주재료이다. 플라이애쉬는 인공포졸란 재료로 시멘트의 수화열 방지, 건조수축의 감소, 강도증가 등의 효과로 시멘트, 콘크리트산업에서 주로 사용되어왔다.

이러한 장점을 도입하여 플라이애쉬에 강도발현을 위한 시멘트와, 수화반응 및 포졸란반응에 유리한 인공적인 SO₃성분 등을 첨가하여 표층고화처리를 위한 고화재가 개발되었다. 플라이애쉬계 고화재는 SiO₂, Al₂O₃, CaO가 전체의 80% 이상으로 대부분을 구성하고 있으며, 그 외에 SO₃, Fe₂O₃, MgO, K₂O, Na₂O 등의 성분들로 구성되어 있다. 이러한 성분들은 흙 속의 간극수와 반응하여 칼슘실리케이트 수화물(CSH) 및 칼슘알루미늄에이트 수화물(CAH) 등의 새로운 수화물 및 포졸란물질을 장기적으로 서서히 생성하고, 반응과정에서 방출되는 Ca²⁺이온은 흙 속에 포함되어 있는 규산염(SiO₂)이나 알루미늄산염(Al₂O₃)과 반응하여 역시 다양한 수화물을 생성하게 되어 대상지반의 강도를 증가시키는 반응메카니즘을 갖는 등 시멘트계 고화재와 본질적으로 동일하다고 할 수 있다.

그러나 그림 1에서 나타낸 바와 같이 본 연구에 사용된 플라이애쉬계 고화재에는 SO₃ 성분이 시멘트계 고화재 및 생석회보다 비교적 다량 포함되어 있는데, 이것은 에트링자이트(ettringite) 수화물을 생성하는데 유리한 성분이다. 또한, 기존의 시멘트계 고화재에 비하여 위에서 언급한 바와 같이 건조수축을 최소화할 수 있어, 크랙의 발생으로 고화처리층 하부의 연약토가 분출하여 고화효과가 반감되는 것을 감소할 수 있어 연약지반 표층고화처리공법에 주로 사용되었던 시멘트계 고화재에 비하여 효과적인 처리가 기대된다.

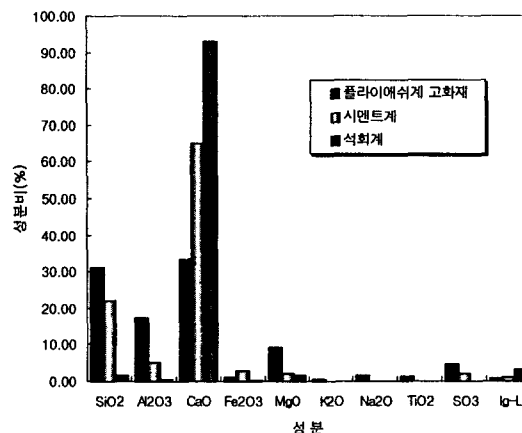


그림 1. 각종 고화재의 성분 비교

2.2 대상토질의 물리적 특성

표층고화처리 효과는 고화재의 성분과 더불어 대상토의 특성에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서는 광양만 콘테이너부두 조성을 위한 목적으로 준설풀·매립한 대규모 초연약지반에서 채취한 흙 시료를 대상으로 하였다. 이 매립지반은 해성점토로 이루어진 고탄수비의 세립토사로 구성되어 있어 전단강도를 거의 기대할 수 없는 초연약지반으로 자연함수비는 최소 73%에서 118% 정도로 채취한 장소에 따라 매우 큰 편차를 나타내고 있다. 채취한 시료에 대한 기본적 물리시험결과는 표 1과 같다.

표 1. 원지반토의 기본 물성시험 결과

Specific Gravity (G_s)	Grain Size D_{50} (mm)	Clay fraction (%)	Silt fraction (%)	Sand fraction (%)
2.675	0.03	40	58	2
Natural Water contents.(%)	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index (PI)	USCS
73~118	37.66	23.87	13.79	CL

3. 배합시험

플라이애쉬계 고화재 혼합토에 대한 일축압축시험을 수행하여 양생일 및 혼합비에 따른 강도변화를 관찰하였다. 양생은 7일 이내의 조기강도발현을 목적으로 하였으며, 시료의 함수비를 60%, 80%, 100%, 120%까지 변화시켜, 중량비를 7%, 9%, 12%의 고화재를 몰탈 믹서를 이용하여 2분간 균일하게 혼합한 후 지름 5cm의 강제몰드를 이용하여 시료를 성형하였다. 성형된 공시체는 대기노출에 의한 함수비 변화를 차단하기 위하여 랩(wrap)으로 밀봉한 후 평균온도 23℃를 유지하는 항온항습장치에서 습윤양생하였다.

3.1 양생에 따른 일축압축강도 변화

고화재 혼합토는 수화반응 및 포졸란반응 생성물에 의한 고화효과로 양생에 따라 강도의 증가를 가져온다. 그림 2는 원시료의 함수비가 80%인 경우 양생에 따른 일축압축강도의 변화를 나타낸 것이다.

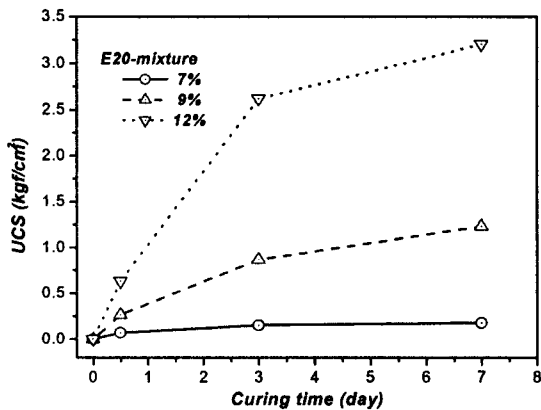


그림 2. 양생에 따른 일축압축강도의 변화

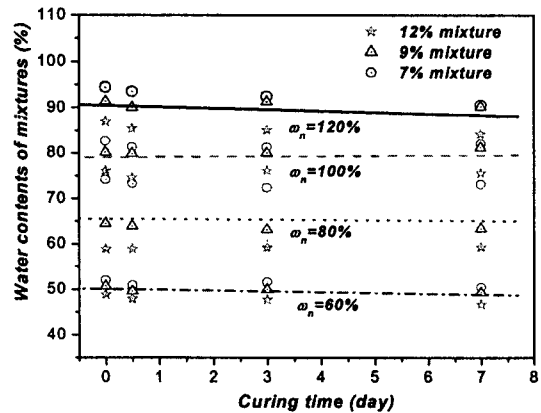


그림 3. 양생에 따른 함수비 변화

그림에서와 같이 고화재의 혼합비가 클수록 양생에 따라 일축압축강도의 증가경향은 크게 나타나며 혼합 후 3일 이내에 거의 대부분의 강도가 발현되어 양생 3일 이후로는 강도 증가경향이 매우 서서히 나타나고 있다. 즉, 양생 초기에는 플라이애쉬계 고화재의 혼합으로 인한 함수비 감소효과와 함께 활발한 수화반응으로 인하여 강도가 크게 발현되며, 그림 3에서와 같이 혼합에 의한 초기 함수비 감소 이후로는 양생일의 경과에 따른 함수비의 변화가 거의 없이 장기적인 포졸란 반응에 의하여 매우 서서히 강도가 증가하는 것으로 판단된다. 7일 양생시 혼합토의 일축압축강도를 기준으로 3일 양생시 일축압축강도는 75~88% 이상 발현됨을 알 수 있다.

3.2 원시료 함수비 및 혼합비와 일축압축강도 관계

함수비가 60, 80, 100, 120%인 원시료를 조제하여 각각의 시료에 플라이애쉬계 고화재를 각각 7, 9, 12%를 첨가하여 12시간, 3일, 7일 후의 일축압축강도를 측정하였다. 각각의 일축압축강도는 표 2에 나타낸 바와 같다. 그림 1은 양생 7일 공시체를 대상으로 원시료토의 함수비 증가에 따라서 혼합토의 강도가 저하되고 있는 것을 나타낸 것이다. 그러나 대상토와의 혼합비가 증가할수록 강도의 저하비율은 작아지게 된다. 즉, 원시료의 함수비가 2배 증가 할 경우 12% 혼합비인 경우에는 강도가 20~45% 저하되며 혼합비가 9% 및 7%일 경우에는 강도가 약 70~88%까지도 저하된다. 이와 같이 플라이애쉬계 고화재 혼합토의 강도는 원시료의 함수비 및 혼합비에 따라서 크게 좌우됨을 알 수 있다. 따라서, 일부 소구역에서 채취한 시료를 대상으로 배합시험을 실시하여 대규모로 넓게 분포되어 있는 연약지반에 적용할 경우, 고화효과를 기대하기 어려운 경우가 있을 것으로 판단된다.

표 2. 원시료의 함수비에 따른 일축압축강도

고화재 혼합비		12%				9%				7%			
원시료 함수비		60%	80%	100%	120%	60%	80%	100%	120%	60%	80%	100%	120%
양 생 일	12hours	0.666	0.633	0.527	0.387	0.440	0.265	0.152	0.072	0.212	0.071	0.044	0.024
	3days	2.096	2.622	1.810	1.647	1.022	0.867	0.522	0.271	0.395	0.153	0.087	0.069
	7days	3.794	3.204	2.856	2.036	1.785	1.231	0.775	0.589	0.381	0.177	0.151	0.149

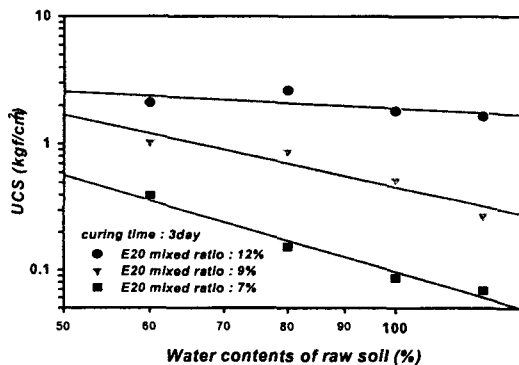


그림 4. 원지반의 함수비에 따른 혼합토의 강도저하 (3day)

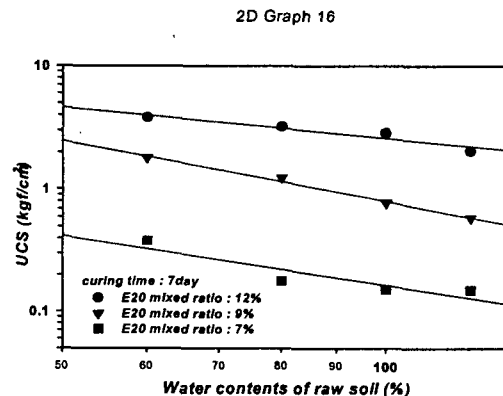


그림 5. 원지반의 함수비에 따른 혼합토의 강도저하 (7day)

4. 분석 및 고찰

이와 같이 원지반의 함수비와 고화재의 혼합비의 관계는 고화처리토의 강도발현에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서, 플라이애쉬계 고화재 혼합비와 원지반시료의 함수비, 일축압축강도의 상관관계를 도출하고, 함수비의 변화가 고화처리토의 강도에 미치는 영향을 분석하였다.

이를 위하여 3차원 좌표에서, 플라이애쉬계 고화재 혼합비와 원지반시료의 함수비를 변수로 하여 일축압축강도변화에 대한 다중회귀분석을 실시하였다. 그림 6과 그림 7은 양생 3일과 7일의 결과를 나타낸 것으로, 1차식으로 회귀분석시 P value는 0.0001이하로 나타나 유의수준 0.01에서 기울기는 유의한 것으로 분석된다.

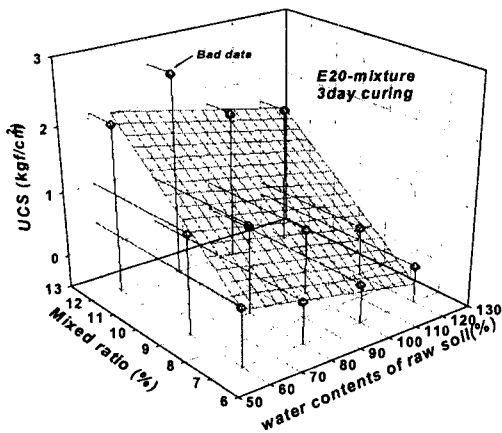


그림 6. 원지반 함수비 및 혼합비와 일축압축강도 관계(3일)

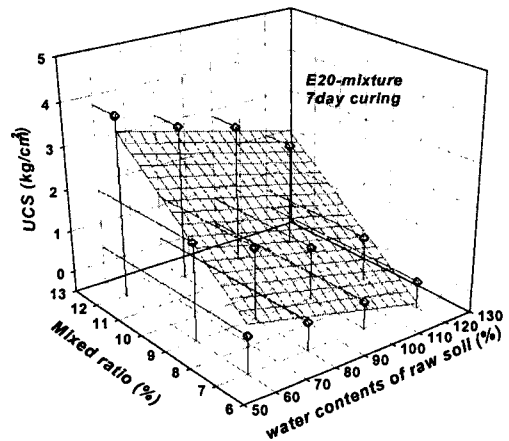


그림 7. 원지반 함수비 및 혼합비와 일축압축강도 관계 (7일)

이와 같이 원지반 시료의 함수비와 플라이애쉬계 고화재 혼합비라는 두 가지 인자를 고려한 일축압축강도는 식(1)과 같이 일반식으로 표현할 수 있다.

$$q_u = A + B \times \omega_n + C \times m \quad (1)$$

여기서 A , B , C 는 양생일에 따라서 변화하는 상수이며, ω_n 은 원시료의 함수비, m 은 고화재의 혼합비로써, 다중회귀분석을 실시한 결과는 다음의 표 3에 나타내었다.

표 3. 다중회귀분석 결과(회귀상수)

양생	상수 A	상수 B	상수 C	결정계수 R ²
12hours	-0.1754	-0.0046	0.0942	0.954
3days	-1.7149	-0.0097	0.3802	0.933
7days	-2.2174	-0.0173	0.5575	0.960

이와 같은 결과에서 A , B , C 는 양생일의 경과에 따라서 일정하게 증가하거나 혹은 감소하는 경향

을 나타낸다. 상수 A 는 양생의 진행에 따라서 비교적 큰 폭으로 감소되며, 원지반 시료의 함수비 변화를 나타내는 상수 B 는 감소하나, 그 비율은 매우 작으며 플라이애쉬계 고화재 혼합비를 나타내는 상수 C 는 증가되고 있다.

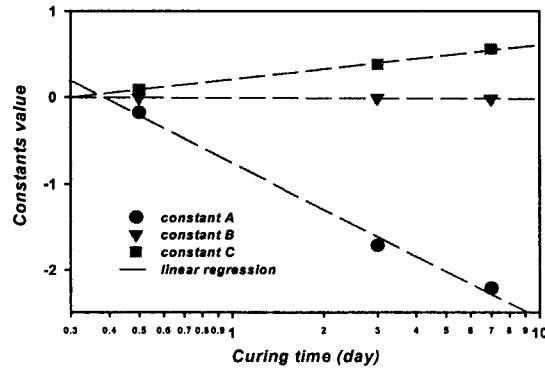


그림 8. 양생일의 경과에 따른 회귀상수의 변화

이러한 경향을 그림 8에 나타내었다. 이와 같은 결과로, 플라이애쉬계 고화재의 혼합량이 일정하다면, 원지반의 함수비 상태가 혼합토의 일축압축강도에 미치는 영향은 비교적 작은 것으로 판단되며, 혼합토의 강도발현은 플라이애쉬계 고화재의 혼합비에 따라서 결정되는 것이라고 할 수 있다. 그림 8에 의한 상수 A , B , C 는 다음과 같이 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A &= -0.75356 - 1.813116 \cdot \log D \\
 B &= -0.007 - 0.0104 \cdot \log D \\
 C &= 0.2083 + 0.3985 \cdot \log D
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

각 식에서 D 는 양생일이며, 결정계수 R^2 은 각각 0.993, 0.903, 0.995이다. 각각의 식을 이용하여 소정의 목표강도를 원하는 시간에 대하여 각각의 상수를 구하고 이를 식 (1)에 대입하여 원지반의 함수비 조건에 따라 목표강도를 얻을 수 있는 플라이애쉬계 고화재의 혼합비를 결정할 수 있을 것으로 판단된다.

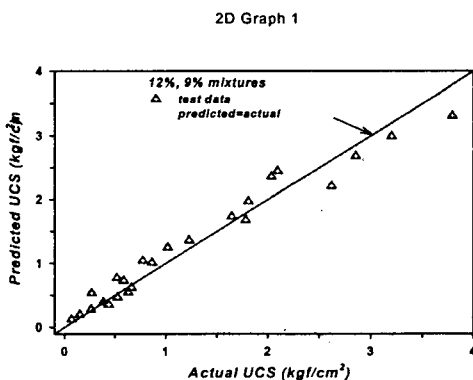


그림 9. 실제 측정치와 추정치의 비교(12%, 9%)

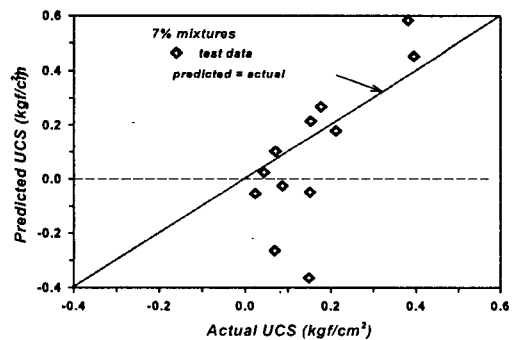


그림 10. 실제 측정치와 추정치의 비교(7%)

이를 검증하기 위하여 추정식 (1)에 의한 강도변화와 표 2에서 나타난 실제 측정치를 비교함으로써 피드백(feed back)을 실시하였다. 그림 9는 플라이애쉬계 고화재를 12%와 9% 혼합했을 경우 실제 일축 압축강도와 추정 일축압축강도를 비교하여 나타난 것이며, 그림 10은 플라이애쉬계 고화재를 7% 혼합했을 경우를 비교한 것이다.

두 그림에서 나타나듯이 혼합비가 9% 이상일 경우의 관계식에 의한 추정 일축압축강도는 실제 일축 압축강도에 비교적 잘 일치하고 있으나, 혼합비가 7%인 경우에는 추정 일축압축강도는 실제 일축압축강도에 근접하지 못하고, 또한 일부는 추정 일축압축강도가 (-)음수로 나타나기도 한다. 그 이유는, 위에서 도출한 관계식에서 혼합비가 7%~12%일 때의 실제 일축압축강도의 범위가 최소 0.024kgf/cm²에서 최대 3.794kgf/cm²로 매우 넓어, 회귀분석시, 매우 작은 범위의 일축압축강도를 표현하는데는 한계가 있는 것으로 판단된다.

실제로 플라이애쉬계 고화재를 7% 혼합했을 경우에 나타나는 실제 일축압축강도의 범위는, 대상 지반의 함수비가 60%~120% 변화하는 경우에 최대 0.381kgf/cm²으로, 고화효과를 기대하기란 불가능하다. 이 결과는 제시한 일반식이 플라이애쉬계 고화재 혼합비가 9% 이상의 경우에 적용이 가능하며, 이 때의 추정 일축압축강도는 실제 일축압축강도에 매우 근접하고 있으므로, 원지반의 함수비 변화에 효과적으로 대응하여 목표강도를 만족할 수 있는 플라이애쉬계 고화재의 혼합비를 적절히 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

원지반의 함수비 변화에 따른 플라이애쉬계 고화재의 혼합비와 일축압축강도 관계에 대한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 원시료의 함수비가 2배 증가할 경우 12% 혼합비인 경우에는 강도가 20~45% 저하되며 혼합비가 9% 및 7%일 경우에는 강도가 약 70~88%까지 저하되듯이 플라이애쉬계 고화재 혼합토의 강도는 원시료의 함수비 및 혼합비에 따라서 크게 좌우된다.
- 2.) $qu=A+B \times \omega_n+C \times m$ 과 같은 일반식으로 원지반 시료의 함수비와 플라이애쉬계 고화재 혼합비라는 두 가지 인자를 고려한 일축압축강도를 표현할 수 있다. 이는 혼합비가 9% 이상의 경우에 적용이 가능하며, 이 때의 추정 일축압축강도는 실제 일축압축강도에 매우 근접하고 있으므로, 원지반의 함수비 변화에 효과적으로 대응하여 목표강도를 만족할 수 있는 혼합비를 적절히 산정할 수 있을 것이다.
- 3) 혼합비가 7%인 경우, 추정치는 실제측정치에 근접하지 못하는데, 실제 일축압축강도의 범위는 최대 0.381kgf/cm²으로, 이는 고함수비 상태에서 상대적으로 혼합비가 소량이 되어, 고화효과를 기대하기란 불가능하기 때문이다.
- 4) 혼합토의 강도발현은 주로 플라이애쉬계 고화재의 혼합비에 의하여 결정되며, 동일한 함수비 상태에서 원지반의 함수비가 혼합토의 일축압축강도에 미치는 영향은 상대적으로 작다.

참 고 문 헌

1. 이용안, 김유성(2001), " PFA 지반안정재 혼합토의 공학적 특성" 대한토목학회, 2001 학술발표회 CD 논문집
2. 이용안, 이흥주, 김유성(2002), "지반개량재로서 제지회의 활용에 관한 연구", 한국지반환경공학회 논문집 제3권 제2호, pp23~33.
3. 이흥주, 이용안, 김유성(2001), "PFA 지반안정재 혼합토의 물리·화학적 반응특성에 관한 기초적 연구", 한국지반환경공학회, 2001 학술발표회 논문집, pp173~178.

4. 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터(2002), “초연약지반의 표층고화처리공법에 관한 연구”, 연구보고서, pp.58~86.
5. A. Poletini, R. Pomi, P. Sirini, F. Testa(2001) "Properties of Portland Cement - Stabilized MSWI Fly Ashes" Journal of Hazardous Materials B 88, pp. 123~128.
6. D.T. Bergado, L.R. Anderson, N. Miura, A.S. Balasubramaniam(1996), "Soft Ground Improvement" ASCE PRESS New York, pp. 234~304.
7. Glen Ferguson(1993) "Use of Self-Cementing Fly Ashes as a Soil Stabilization Agent" ASCE Geotechnical Special Publication, No. 36, pp.1~14.
8. Jean-Pierre Bardet(1997) "Experimental Soil Mechanics" Prentice Hall, pp. 8~234.
9. Masashi Kamon, Huanda Gu, Takeshi Katsumi(1999) "Engineering Properties of Soil Stabilized by Ferrum Lime and Used for the Application of Road Base" Soils and Foundations, Vol. 39, No. 1, pp. 31~41.
10. Masashi Kamon, Takeshi Katsumi, Youichi Sano(2000), "MSW fly ash stabilized with coal ash for geotechnical application" Journal of Hazardous Materials 76, pp. 265~283.
11. M. Saleh Keshawarz and Utpal Dutta "Stabilization of Soil and Fly Ash" ASCE Geotechnical Special Publication, No. 36, 30~43.
12. N. O. Attoh-Okine(1995) "Lime Treatment of Laterite Soils and Gravels-revisited" Construction and Building Materials, Vol. 9, N. 5, pp. 283~287.
13. Peter G. Nicholson, Vinai Kashyap(1993) "Fly Ash Stabilization of Tropical Hawaiian Soils" ASCE Geotechnical Special Publication, No. 36, 15~29.
14. Shenbaga R. Kaniraj, Vasant G. Havanagi(1999) "Compressive Strength of Cement Stabilized Fly ash-Soil Mixtures" Cement and Concrete Research 29, pp. 673~677.
15. Yorimichi Kuboi, Kazuhiko Nishida(1996) "Effect of Water Content on Cement Stabilization of Soft Clay" Environmental Geotechnics, Kamon(ed.), pp. 785~790.
16. 松尾 稔(1985), “最新土質實驗 その背景 と役割”, 森北出版株式會社, pp. 28~34.
17. セメント系固化材研究會(1994), “セメント系固化材による 地盤改良マニュアル” 第二版 社團法人 セメント協會, pp. 17~190.
18. 地盤工學會(2000), “地盤改良の トラブルの とその 対策” 社團法人 地盤工學會, pp. 19~91.