

시멘트 및 광물재료를 이용한 연약지반 점토의 고화실험

An Experimental Study for The Solidifying of Clay Sediments Consisting Soft Foundation By Using Cement and Mineral Admixtures

황진연 (Jin-Yeon Hwang)¹ · 강병주 (Byung-Joo Kang)¹ · 이효민 (Hyomin Lee)^{1,*}
엄정기 (Jeong-Gi Um)² · 조태진 (Tae-Jin Cho)²

¹부산대학교 지질학과

(Dept. of Geology, Pusan National University)

²부경대학교 탐사공학과

(Dept. of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University)

요약: 연약지반의 점토퇴적물을 시멘트와 함께 생석회, 소석회, 석고, 고령토, 제올라이트, 규조토 등의 광물재료를 혼합하여 고화 반응시킨 후 양생시간에 따른 물성변화와 반응생성물을 조사하였다. 그 결과, 시멘트로는 포틀랜드 시멘트보다는 슬래그시멘트가 점토의 고화반응에 따른 강도발현이 큰 것으로 나타났다. 그리고 슬래그시멘트와 함께 각종 광물재료와 고화 반응시킨 실험결과에서는, 석고가 가장 높은 강도발현을 나타냈다. 따라서 슬래그시멘트와 석고에 대해 이들의 혼합비를 달리하여 고화 실험을 수행하였다. 그 결과, 슬래그시멘트 70%, 석고 30%의 비율에서 가장 좋은 강도발현을 보이는 것으로 나타났다. 이 실험의 고화반응물에서는 에트링자이트 등의 반응생성물이 포함되었다. 이것은 석고가 슬래그시멘트의 효율적인 수화반응을 촉진시켜서 높은 강도 발현에 기여 한 것으로 생각된다. 이러한 실험 결과는 연약지반의 안정화 처리에 유용한 자료로 이용될 것으로 보인다.

주요어: 연약지반, 점토, 고화반응, 점토광물, 시멘트

ABSTRACT: The present study investigated the physical changes and reaction products with setting time after mixing of various mineral admixtures such as lime, hydrated lime, gypsum, kaolin, zeolite and diatomaceous earth with four types of cement (portland cement, slag cement, quick lime, hydrated lime) and clay rich sediments in soft foundation. As results, slag cement showed the greater compressive strength than normal portland cement. The mixing experiments with various mineral admixtures and slag cement resulted that gypsum showed the greatest compressive strength. Additionally, we conducted mixing experiments with various mixing ratios of gypsum and slag cement. The experiments showed that the mixing ratio of 30% gypsum and 70% slag cement has the greatest compressive strength. Ettringite was produced as a reaction product. This fact indicates that gypsum effectively promotes hydration reaction and contributed to the greater compressive strength. These experimental results can be used as fundamental data for the stabilization of soft clay foundation.

Key words: soft foundation, clay, solidifying, clay mineral, cement

*교신저자: hmlce61@hotmail.com

서 언

우리나라에서는 최근 들어 입해시설의 확충과 인공섬 등의 건설과 더불어 해안연안의 개발이 활발하게 이루어지고 있어, 연약지반에 대한 문제점이 대두되고 있다. 특히 남해안과 서해안을 중심으로 하는 해안지역은 토질 및 지반공학적 측면에서 시공에 불리한 연약 지반으로 되어 있는 경우가 많아, 건설공사에 앞서 지반개량이나 안정처리가 반드시 필요한 실정이다. 최근에는 긴급공사를 요하는 경우, 생석회나 시멘트계 고화재를 이용한 화학적인 안정처리공법이 시도되고 있다.

연약지반을 안정처리 하는데 사용되는 고화재는 1938년 서구에서 점토 그라우팅 공법이 출현되고부터 관심을 받기 시작하여 여러 방법이 도출되었다. 그러나 아직 만족할만한 개량공법이 제시되지 않고 있으며, 연약지반 점토와 고화재에 대한 화학적, 광물학적인 기초연구도 부족하다. 최근의 연약지반 고화재는 아크릴아미드계, 시멘트계, 석회계, 아스팔트계, 요소수지계, 우레탄계, 페놀계 등으로 크게 나눌 수 있으며 이 중에서 경제적, 환경적 측면에서 유리한 시멘트계 고화재가 가장 많이 사용되고 있다(紫崎光弘 외, 1985; 대한토질공학회, 1986; 도덕현 외, 1995).

우리나라에서도 1976~1979에 걸쳐 국립건설연구소에서 연약지반처리공법에 대한 연구 및 시험시공(국립건설연구소, 1976, 1977, 1979, 1980; 한국 토지 공사, 1999)이 적용된 이래, 주로 시멘트계 고화재 및 시공법을 국내의 지반상황을 고려하여 이용하고 있다(대한주택공사, 1989; 도덕현 등, 1995; 천병식 등, 1998; 송태학, 1995). 또한, 시멘트계 고화재와 함께 생석회를 이용한 연약지반 개량에 관한 지반공학적인 연구도 수행된 바 있다(천병식 등, 1995, 1996). 연약지반의 물성과 이를 구성하고 있는 점토광물의 특성 사이에는 밀접한 관련성이 있는 것으로 알려지고 있다(황진연 등, 1998; 김병규와 황진연, 1999; 이선갑, 1999; 김상규, 1998; 이정우, 2000).

고화재에 의한 연약지반의 안정처리는 첨가되는 고화재와 연약지반 내 점토광물이 직접 반응하여 개량되는 원리를 이용하므로 고화재-점토광물 반응관계의 규명은 기본적으로 매우 중요하다. 따라서 본 연구는 쉽게 공급될 수

Table 1. Geotechnical properties of clay rich sediments used in this study

Soil properties		Clay
Grain size proportion (%)	Gravel	0
	Sand	4
	Silt	50
	Clay	46
	No. 200	96
Water content (W_n)		55.2%
Liquid limit (W_L)		56.4%
Plastic limit (W_P)		22.4%
Plasticity index		34%
Specific gravity		2.65
Unconfined compression strength		0.17 kg/cm ²

있는 광물재료를 사용하여 연약 지반을 안정 처리할 수 있는 적합한 고화방법 및 고화재료를 개발하기 위하여 수행하였다. 이를 위해 김해지역에 분포하는 점토 퇴적물을 대상으로 각종 광물재료를 혼합하여 고화 반응시킨 후 양생시간에 따른 물성변화와 반응생성물을 조사하였다. 이를 통하여 점토의 고화반응에 따른 강도 발현의 원인을 규명하고 새롭고 효과적인 고화재 개발의 기초 자료로 이용하고자 한다.

시료 및 연구방법

연약지반의 점토시료

이번 연구에는 연약지반으로 잘 알려진 경남 김해시 화목동 일원에서 심도 15 m 지점의 점토질 퇴적물을 채취하여 사용하였다. 이 점토시료는 함수비가 높은 미고결층의 암회색 해성점성토로서 거의 균질하며, 일부 패각을 함유하고 있다. 이를 대상으로 기본적인 물리화학적 특성을 파악하고, X-선 회절분석에 의해 구성광물을 검토하였다. 점토시료의 일반적인 토질특성은 표 1에 나타내었다. 이 점토시료의 토질 시험 결과, 흙의 분류는 통일분류기호상 CH로 분류되었다. 점토시료에 대해서 우선 균질한 시료가 되도록 불순물과 패각 등을 제거하고 균질하게 혼합하여 다량의 시료를 준비하였다. 그리고 점토 중의 구성광물에 대해서는 건조시킨 분말의 비정방위시편에 대해 X-선 회절분석을 행하여 전체적인 구성광물을 조사하였다. 이 분석결과,

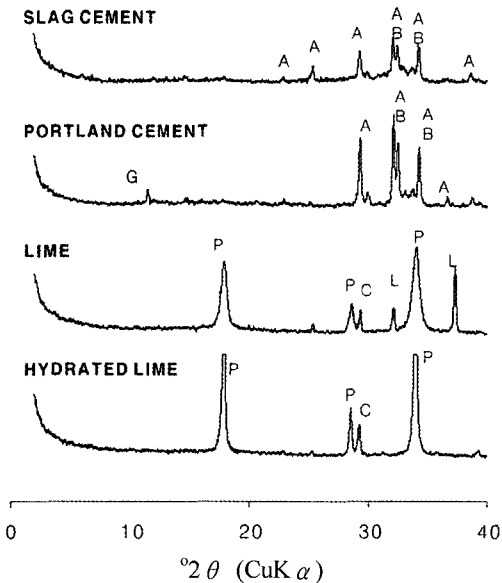


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of major cementing materials. C: calcite, G: gypsum, A: alite, B: belite, L: lime, P: portlandite.

점토시료에는 석영과 장석이 포함되고 그 이외에는 점토광물로 구성되어 있다(그림 2). 그리고 2 μm 이하의 입경으로 분리한 점토분에 대해 정방위시편을 만들고 약품처리 및 가열처리를 행하여 X-선 회절분석에 의해 점토광물을 식별하였다. 이러한 결과 점토시료에는 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 버미큘라이트, 스�멕타이트 등의 여러 점토광물이 식별되었다. 점토광물로는 일라이트와 카올리나이트가 가장 많고 스�멕타이트는 극히 소량 포함된다.

혼합재료

실험에 사용한 시멘트로는 일반 시중에서 구입한 일반 포틀랜드 시멘트는 쌍룡시멘트를 사용하였고, 슬래그 시멘트는 (주)한국시멘트의 제품을 사용하였다. 그 외에 고화재료로서 생석회와 소석회를 사용하였는데, 생석회는 (주)충무화학의 제품으로 분말도는 170 mesh 95% 이상, CaO 함량 90% 이상의 것을 사용하였다. 그리고 석고, 플라이애쉬, 규조토, 고령토, 제올라이트 등의 광물재료를 사용하였다. 플라이애쉬는 삼천포화력발전소의 비회를 사용하였고, 다른 것들은 시중에서 구입하여 사용하였다. 사용

한 모든 재료들은 X-선 회절분석을 통하여 구성광물을 분석하였다(그림 1, 3).

실험방법

실험은 3단계로 구분하여 실시하였다. 우선 1 단계로는 고화재의 주재료를 결정하기 위한 것으로 포틀랜드시멘트, 슬래그시멘트, 생석회, 소석회를 사용하여 점토퇴적물의 고화실험을 행하였다. 그리고 2단계로는 결정된 주재료에 첨가재로서 석고, 고령토, 제올라이트, 규조토, 플라이애쉬를 사용한 것이다. 다음 3단계로는 고화 강도에서 가장 좋은 결과를 보인 고로시멘트와 석고와의 조합에 대해 여러 혼합비로 고화실험을 행하여 최적 조합비를 산정한 것이다. 이러한 모든 고화실험은 점토시료에 대하여 시멘트와 각종 광물재료를 혼합하여 공시체를 제작하고 일정기간 고화반응 시킨 후 이들에 대한 압축강도측정 등의 물성시험과 X-선 회절분석에 의한 반응생성물을 조사하였다.

혼합방법을 살펴보면 우선 동일한 실험조건을 위해 증류수를 연약지반 시료에 첨가해서 함수비를 150%로 통일시켰다. 고화재 첨가량은 300 kg/m^3 를 기준으로 공시체의 체적으로 환산하여 그 양을 계산하였으며, 고화재 중의 각 첨가재의 비는 질량 백분율(%)을 기준으로 하였다. 함수비가 일정한 준비된 점토시료를 원통형 용기에 넣고 첨가재를 조금씩 가하면서 손비빔을 하였다. 충분히 혼합이 되게 함과 동시에 시료별로 동일한 조건을 위해서 5분 동안으로 혼합시간을 정하였다. 공시체는 직경 5.5 cm의 PVC관을 선반을 이용해서 최대한 위와 아래가 수평이 되게 높이 11 cm의 길이로 동일하게 잘라 제작했다(한국 산업규격; KS F 2329, 일본 시멘트협회). 충분히 혼합된 시료를 공시체에 1/3씩 투입하고 기포를 없애기 위해 시료 내부를 유리막대로 충분히 두드려 주었다. 그리고 투입이 끝난 공시체는 완전 밀봉을 원칙으로 했으며, 이를 위해 공시체의 아래와 위를 비닐과 테이프 등으로 여러 번 감싸 수분 증발을 차단하였다. 이러한 공시체를 조합 당 6개씩 제작하여 재령일별로 두개씩 물성시험을 수행하여 그 결과 값을 평균하였고, 나머지 두개는 밀봉 상태로 여분으로 보관하였다. 제작이 끝난 공시

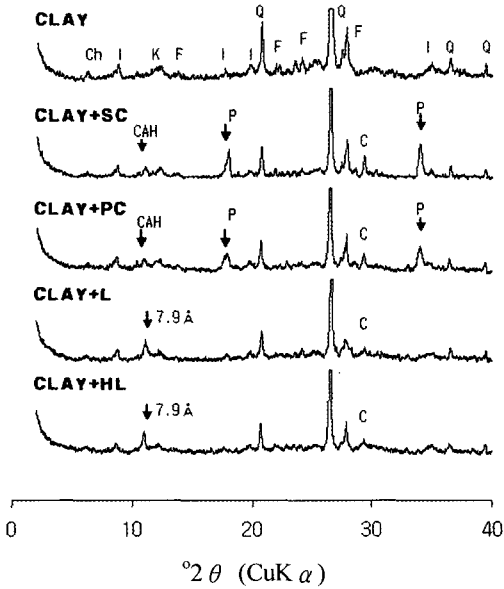


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of clay rich sediments mixed with major cementing materials. Q: quartz, F: feldspar, I: illite, K: kaolinite minerals, Ch: chlorite, C: calcite, P: portlandite, HC: hydrated cement, SC: slag cement, PC: portland cement, L: lime, HL: hydrated lime.

체는 지정된 재령일까지 실내 상온 하에서 보관하였다. 재령일은 대부분 시방서의 규정대로 14일과 42일을 기준으로 하였으며, 일정시간 양생 후 각 시료의 몰드를 잘라 내고 그 즉시 밀봉이 가능한 비닐 용기에 보관하여 이동 중의 수분 손실을 방지하였다. 즉시 이 시료에 대해 일축압축강도시험을 수행하고 그 즉시 함수비 측정과 pH 측정 그리고 X-선 회절분석을 실시하였다. 토질시험은 주식회사 동아지질의 토질 실험실에서 수행하였으며, 함수량시험은 KS F 2306에 따라 실시하였다. 그리고 액성한계시험과 소성한계시험은 각각 KS F 2303과 KS F 2304에 따라 이루어 졌으며, 입도 시험은 KS F 2302에 따라 실시하였다. 일축압축강도는 주식회사 동아지질의 토질실험실에서 KS F 2314에 따라 직접 측정하였으며(링 150 kg, 링 계수 1.1101, 측정 속도 224 mm/min), 함수비는 110°C의 건조기에서 하루 정도 건조 후 질량 변화량으로 계산하였고, pH측정은 Oakton사의 pH 측정기로 25 mL의 증류수에 5 g의 시료를 넣고 1시간 가량 충분히 반응 시킨 후 2번 씩 측정하여 그

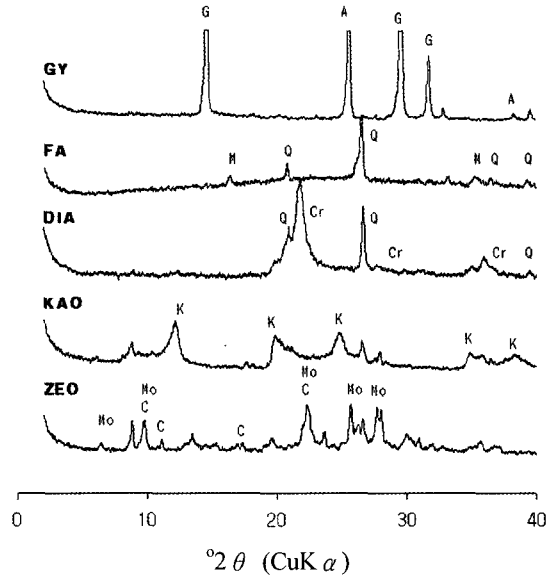


Fig. 3. X-ray diffraction patterns of variable mineral admixtures used as hardening agents. G: gypsum, Q: quartz, K: kaolinite, Cr: cristobalite, M: mullite, Mo: mordenite, C: clinoptilolite, GY: gypsum, FA: fly-ash, DIA: diatomaceous earth, KAO: kaolinite, ZEO: zeolite.

값을 평균하였다.

밀도측정은 Micromeritics 사제 AccuPyc 1330 Pycnometer를 사용하였다. 그리고 X-선 회절분석기기는 Rigaku사제 Geigerflex 2301을 사용하여 CuKα 선으로 Ni-filter를 사용하였다. 통상의 특정조건은 전압 30 kv, 15 mA, scan speed는 2° ~ 1°2θ/min, 시정수 1sec, slit 1° (diverging slit) ~ 0.3 mm (receiving slit) ~ 1° (scatter slit)로 측정하였다. 그리고 전자현미경에 의한 관찰과 EDAX (energy dispersive analytical X-ray)분석은 미국 아이오와주립대학의 Material Analysis Lab에서 Hitachi S-2460 저 진공 전자현미경 (reduced-vacuum SEM)을 사용하여 실시하였다.

연구결과 및 고찰

주 시멘트물질 선정을 위한 고화실험

물성시험 결과

고화제의 주원료를 선정하기 위하여 포틀랜드시멘트, 슬래그시멘트, 생석회, 소석회를 사용

Table 2. Physicochemical properties of clay rich sediments mixed with major cementing materials

	Cementing material	Total unit weight (γ_t , g/cm ³)	pH	Water content (ω , %)	UCS** (Q, kg/cm ²)
After 14 days	Slag cement	1.45	10.9	91.32	4.52
	Portland cement	1.47	11.2	95.18	3.77
	Quick lime	nd	12.08	91.01	nd
	Hydrated lime	nd	12.2	102.43	nd
After 42 days	Slag cement	1.56	9.52	89.40	8.83
	Portland cement	1.50	10.89	91.57	5.40
	Quick lime	nd*	12.15	84.19	nd
	Hydrated lime	nd	12.2	99.60	nd

* nd: not determined due to weakness

** UCS: unconfined compressional strength

한 점토의 고화실험에 대한 물리적 특성과 토질시험의 결과를 표 2에 나타내었다. 특히하게 생석회와 소석회의 경우 두 재령일 모두 성형이 되지 못하여 압축강도의 측정이 이루어지지 못했다. 그리고 일축압축강도 결과에서 보면 슬래그시멘트와 포틀랜드시멘트 중 슬래그시멘트의 14일 재령의 일축압축 강도가 좀 더 크게 나왔다. 그리고 42일 재령일로 가면 그 차이가 더 커짐을 볼 수 있다. 함수비에 있어서도 포틀랜드시멘트보다 슬래그시멘트가 약간 더 큰 변화를 나타내었다. 함수비에서 가장 큰 변화를 보인 것은 생석회였다. pH의 변화는 전체적으로 크지 않지만 슬래그시멘트가 그 중 많이 감소되는 경향을 보여준다. 일축압축강도는 14일까지의 초기 강도 증가율이 42일까지의 강도 증가율 보다 크게 나타났으며 이것은 수화반응이 양생 초기에 활발하게 이루어 졌기 때문으로 보이며, 이를 뒷받침하는 것이 함수비의 변화로 초기 14일 동안에 함수량이 많이 감소되었음을 보여준다.

반응 생성물 검토

각 재령일별로 실험이 끝난 시료는 즉시 건조시킨 후 각 분말에 대한 X-선 회절분석을 실시하였다. 그리고 재령일별 시료의 생성광물을 유추하기 위해, 본 실험에 사용된 고화재료 자체에 대해서도 X-선 회절분석을 실시하여 그림 1에 나타냈다. 결과에서 보면 슬래그시멘트와 포틀랜드시멘트는 alite, belite, calcite 등을 공

통적으로 가지고 있고, 포틀랜드시멘트에서만 석고가 소량 검출되었다. 생석회는 lime 이외에 소석회와 동일하게 portlandite를 함유하고 있다. 고화실험의 재령 42일후 각 조합에 대한 X-선 회절분석 결과를 그림 2에 나타내었다. 여기서 모든 시료에서 공통적으로 소량의 방해석이 나타났다. 그리고 예상했던 ettringite 등의 2차 수화광물은 점토 중 광물의 높은 피크에 가려 식별하기가 어려웠다. 다만 시멘트계 고화재에서 공통적으로 수화된 시멘트의 특징으로 CSH (calcium silicate hydrate)계 광물이 식별되었고, 슬래그 시멘트에서 다소 더 큰 강도를 보였다. 포트랜다이트의 감소와 CSH의 증가는 슬래그 시멘트에 첨가된 슬래그와 포트랜다이트의 포졸란반응의 결과이며, 이것이 전술한 pH와 압축강도의 결과에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 생석회와 소석회의 경우 7.9 Å 부근에서 공통적인 피크가 나타났는데 2차 수화 광물의 일종인 것으로 보이나 정확한 광물의 감정은 이루어지지 못했다.

이번 실험에서 거의 고화되지 않은 생석회나 소석회의 경우, 석회 중의 칼슘성분은 오랫동안 점토에서 반응할 경우 Al₂O₃, SiO₂ 등과 반응하여 CaO · SiO₂ · H₂O의 반응물을 생성시키는 포졸란반응을 일으키고, 이는 결합재로써 강도 면에서 좋은 결과를 보이게 되는 걸로 알려져 있다(Bell, 1996). 그러나 이번 실험을 통해 소량의 석회 자체만으로는 초기 강도증가에 큰 역할을 하지 못하는 것으로 판단된다. 반면에 시

Table 3. The mixing ratios of slag cement and mineral admixtures used in the experiments

Samples		Mixing ratio
1	Sc	slag cement 100%
2	Sc+gy	slag cement 70% + gypsum 30%
3	Sc+fl	slag cement 70% + fly ash 30%
4	Sc+di	slag cement 70% + diatom earth 30%
5	Sc+ka	slag cement 70% + kaolinite 30%
6	Sc+fl+di	slag cement 70% + fly ash 15% + diatom earth 15%
7	Sc+ze+ka	slag cement 70% + zeolite 15% + kaolinite 15%
8	Sc+di+ka	slag cement 70% + diatom earth 15% + kaolinite 15%

멘트는 주성분이 CaO, SiO₂, Al₂O₃ 및 Fe₂O₃의 혼합물들을 소성한 것으로 이들은 C₃S (3CaO · SiO₂)라는 화합물을 형성하게 되는데 이것이 대부분 시멘트의 수화 특성을 좌우하게 된다(천병식, 1998; Taylor, 1990). CS계 화합물들은 물과 접촉하면 급격하게 수화반응이 일어나서 용액내로 Ca²⁺이온을 용출시키고 이 Ca²⁺이온의 계속적인 용해 반응으로 CSH (calcium silicate hydrate)의 초기수화물을 생성시킨다. 이때 또 다른 수화반응 산물로서 Ca(OH)₂의 결정을 생성시키고, 이 수화생성물이 계속 성장하여 미세구조를 만드는 단계를 거친다. 이것은 석회에서의 Ca²⁺만으로 이루어지는 반응보다 더 복잡하다. 이를 뒷받침 하는 것으로 시멘트계 고화재를 사용한 시료에서 X-선 회절분석의 결과 이들의 수화반응 산물들이 잘 나타난다(그림 2). 슬래그 시멘트는 포틀랜드 시멘트의 반제품인 클링커와 고로 슬래그 및 석고를 각각 조합하여 분쇄하고 일정한 비율로 혼합한 것으로 고로 슬래그의 포조란 반응성과 함께 첨가재인 석고의 역할에 의해 아마도 포틀랜드 시멘트보다 일축압축강도 면에서 좋은 결과를 가져왔을 것으로 생각된다. 또한 포틀랜드 시멘트는 점토에서 용출되는 알칼리에 의한 강도 저하가 초래되나, 슬래그 시멘트는 적은 포틀랜드이트 함량과 다량의 CSH계열 물질의 존재로 알칼리에 의한 수화 장애 효과가 감소되기 때문으로 생각된다.

최적 첨가광물재료의 선정을 위한 고화실험

첨가재료

전술한 1단계의 고화실험 결과, 슬래그시멘트가 가장 좋은 강도 발현을 보이는 것으로 나타

났다. 따라서 슬래그시멘트를 기본 물질로 하고, 다른 광물재료를 첨가한 2단계 고화실험을 수행하였다. 우리 주변에서 흔히 구할 수 있는 석고, 플라이애쉬, 규조토, 고령토, 제올라이트 등을 사용하였다. 이상의 재료들을 동일 조건의 실험을 위해 최대한 균질한 입도로 분말화시켰으며 완전 건조를 원칙으로 하였다. 시료는 그 함수비를 구하고 계산된 증류수를 첨가하여 함수비 150%로 만들었고, 고화재 첨가량도 300 kg/m³ (대상 토 건조 중량의 약 20%)로 계산하여 첨가하였다. 고화재는 또한 중량비로 슬래그 시멘트 70%에 첨가 재료 30%의 비율이 되도록 하였다. 그리고 2종 이상의 광물첨가재가 포함되는 고화재 조합의 경우에는 같은 비율이 되도록 설정하였다. 이번 실험의 고화재조합과 구성비를 표 3에 나타내었다. 앞에서 설명한 방법과 같이 공시체를 제작하고 각각 14일과 42일 동안 재령 후 그 시료에 대한 물리화학적 실험을 수행하였다.

물성시험 결과

각종 첨가재료를 혼합하여 재령이 끝난 시료에 대해 일축압축강도, pH, 함수비 등을 측정할 결과를 표 4에 나타내었다. 일축압축강도로만 비교해 본다면 슬래그시멘트와 석고를 섞은 시료가 가장 좋은 강도발현의 결과를 보였고, 그 다음으로 슬래그시멘트만의 조합, 그리고 슬래그시멘트와 규조토를 섞은 조합이 그 뒤를 이었다. 초기 강도에서 슬래그시멘트와 석고의 조합이 다른 조합에 비해 탁월한 효과를 보였고, 재령 42일까지의 강도에서도 조금 둔화된 양상을 보이지만 전술한 시험의 포틀랜드시멘트보다 더 좋은 강도결과를 보였다. 이로써 석고가 초기강도 발현에 좋은 효과를 보임을 알 수 있

Table 4. Physicochemical properties of clay rich sediments mixed with slag cement and various mineral admixtures

	Samples	Total unit weight (γ_t , g/cm ³)	pH	Water content (w , %)	*UCS (Q , kg/cm ²)
After 14 days	1	1.39	10.8	91.94	4.52
	2	1.39	9.93	98.98	6.52
	3	1.39	9.97	99.92	1.18
	4	1.39	10.20	100.08	2.04
	5	1.38	9.81	100.07	1.87
	6	1.40	11.14	97.58	1.76
	7	1.40	11.00	96.96	1.78
	8	1.42	10.97	98.65	1.62
After 42 days	1	1.40	9.35	91.71	8.83
	2	1.38	8.60	98.74	10.08
	3	1.39	8.57	99.14	1.72
	4	1.40	8.87	100.17	3.24
	5	1.38	8.67	99.90	2.54
	6	1.40	8.47	97.18	2.25
	7	1.40	8.56	96.52	2.13
	8	1.39	8.59	96.50	2.61

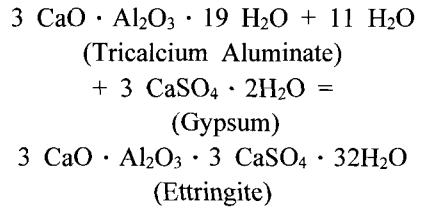
*UCS: unconfined compressional strength

다. 함수비는 슬래그시멘트만 첨가한 조합을 제외하고는 거의 비슷한 양상을 보였다. pH 측정에서도 조금씩 차이는 있지만 모든 조합이 비슷한 양상을 보였다.

반응 생성물 검토

우선 고화실험에 사용한 첨가 재료 자체의 X-선 회절분석 결과를 그림 3에 나타냈다. 여기서 석고시료에서는 석고와 함께 경석고가 포함되었으며, 플라이애쉬에서는 특징적으로 mullite가 석영과 함께 관찰되었다. 규조토에서는 석영과 cristobalite가 나타났으며, 카올리나이트는 대부분 카올린 광물들로 구성되어 있다. 그리고 제올라이트에서는 clinoptilolite와 mordenite의 불석광물들이 주로 포함된다. 고화실험 후 재령일별로 일축압축 시험이 끝난 시료에 대해서 앞선 시험과 마찬가지로 건조 후 X-선 회절분석을 실시하여, 그 결과를 그림 4와 그림 5에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 슬래그시멘트가 주원료이기 때문에 시료별로 방해석 등의 2차광물이 슬래그시멘트만으로 고화시킨 시료와 동일하게 포함된다. 슬래그시멘트와 석고를 섞은 시료는 석고와 ettringite의 피크가 다른 시료에 비해서 잘 나타나는 편이다. 따라서 ettringite

의 생성과 강도발현의 관계가 연관성이 있음을 알 수 있다. 이것은 석고 안의 SO₄²⁻ 성분이 아래와 같은 반응으로 ettringite와 같은 2차 생성물 형성에 도움을 주었기 때문인 것으로 판단된다.



방해석의 경우 슬래그시멘트만 첨가한 시료에서 가장 많이 나타났으며, 석고를 섞은 시료에서는 그 피크의 상대적 크기가 낮게 나타났다. 그러나 전술한 것과 같이 점토 및 재료 중의 광물 회절선에 의해 소량의 2차 생성물들을 구분하기가 어려웠다.

석고의 최적 배합비 산정을 위한 고화실험

물성 시험 결과

전술한 2단계 고화실험에서 슬래그시멘트와

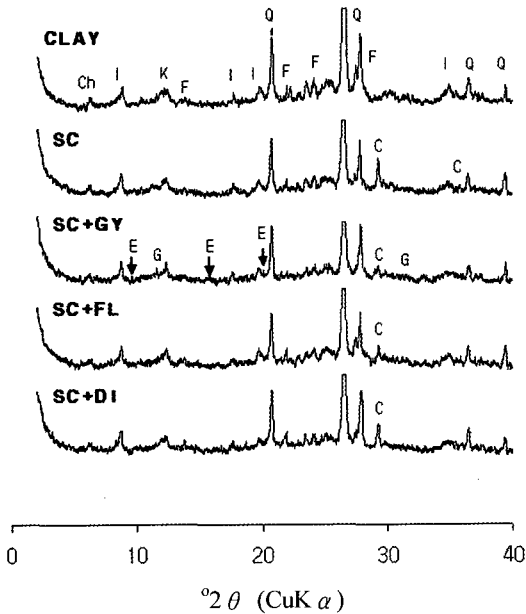


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of clay rich sediments mixed with slag cement and various mineral admixtures. G: gypsum Q: quartz, K: kaolinite, I: illite, F: feldspar, C: calcite, E: ettringite, G: gypsum, SC: slag cement, GY: gypsum, FL: fly-ash, DI: diatomaceous earth.

석고를 첨가한 조합이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 석고와 슬래그시멘트와의 최적 배합비를 산정하기 위한 3단계 실험을 수행하였다. 대상토의 함수비는 전 시험과 동일하게 150%로 설정하였고, 고화재의 첨가량은 300 kg/m³ (대상토의 건조중량에 대해 약 28%)로 하였다. 조합은 슬래그 시멘트와 석고의 비율 100:0에서 0:100까지 각기 달리 하는 8가지로 선정하였다(표 5).

이들에 대한 고화실험 후 14일, 42일의 양생 일수에 대해 수행한 토질시험 결과는 표 5와 같다. 실험결과, 석고만 사용한 경우는 일축압축 강도를 측정할 수 없을 정도로 고화가 진행되지 않았다. 모든 양생 기간 중 석고 30%, 시멘트 70%의 배합에서 가장 큰 압축강도를 나타내었다. 석고 함량이 30% 이상으로 증가되면 다시 압축강도가 감소함으로 석고 약 30%가 최적의 배합비인 것으로 나타났다. 단위 체적 당 중량은 모든 조합에서 큰 차이가 없으며, 함수비는 슬래그 시멘트의 비율이 높아질수록 감소하

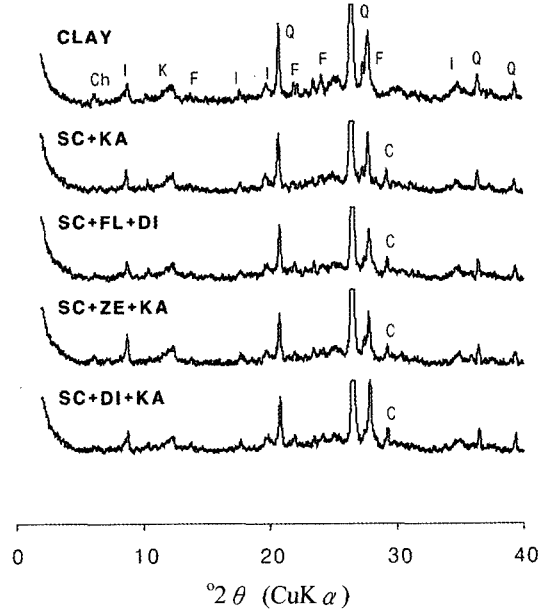


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of clay rich sediments mixed with slag cement and various mineral admixtures. Q: quartz, K: kaolinite, I: illite, F: feldspar, C: calcite, E: ettringite, SC: slag cement, FL: fly-ash, DI: diatomaceous earth, KA: kaolinite, ZE: zeolite.

는 경향을 보인다. 14일 양생에 비하여 42일의 양생에서 모두 압축강도가 크게 증가하는 것으로 나타난다. 이들 증가량도 시멘트의 배합비율이 커질수록 증가하는 경향을 보인다. 함수비의 변화를 살펴보면, 100:0의 조합에서 함수비의 감소가 가장 크게 나타났다. 이 실험에서는 함수비의 감소와 강도증가와의 관계가 비례하지는 않았다. pH의 변화에서는 석고의 함량과 재령일의 증가에 따라 대체적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 함수비도 유사한 경향을 나타낸다.

압축강도의 증가는 보다 복잡한 내부 광물들의 생성과 그 응집력이 중요한 요인이라는 것을 알 수 있다.

반응 생성물 검토

3단계 실험 후 반응 생성물에 대한 X-선 회절분석 패턴을 그림 6에 나타내었다. 그 결과, 본래 점토의 구성 광물성분과 함께 석고, 방해석과 2차 생성물로 보이는 회절선들이 일부 나타났다. 석고 60% 이상의 혼합 시료에서는 석고

Table 4. Physicochemical properties of clay rich sediments mixed with slag cement and various mineral admixtures

	Samples	Total unit weight (γ_t , g/cm ³)	pH	Water content (w , %)	*UCS (Q , kg/cm ²)
After 14 days	1	1.39	10.8	91.94	4.52
	2	1.39	9.93	98.98	6.52
	3	1.39	9.97	99.92	1.18
	4	1.39	10.20	100.08	2.04
	5	1.38	9.81	100.07	1.87
	6	1.40	11.14	97.58	1.76
	7	1.40	11.00	96.96	1.78
	8	1.42	10.97	98.65	1.62
After 42 days	1	1.40	9.35	91.71	8.83
	2	1.38	8.60	98.74	10.08
	3	1.39	8.57	99.14	1.72
	4	1.40	8.87	100.17	3.24
	5	1.38	8.67	99.90	2.54
	6	1.40	8.47	97.18	2.25
	7	1.40	8.56	96.52	2.13
	8	1.39	8.59	96.50	2.61

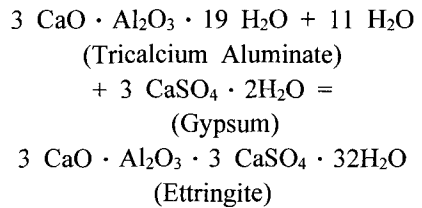
*UCS: unconfined compressional strength

다. 함수비는 슬래그시멘트만 첨가한 조합을 제외하고는 거의 비슷한 양상을 보였다. pH 측정에서도 조금씩 차이는 있지만 모든 조합이 비슷한 양상을 보였다.

반응 생성물 검토

우선 고화실험에 사용한 첨가 재료 자체의 X-선 회절분석 결과를 그림 3에 나타냈다. 여기서 석고시료에서는 석고와 함께 경석고가 포함되었으며, 플라이애쉬에서는 특징적으로 mullite가 석영과 함께 관찰되었다. 규조토에서는 석영과 cristobalite가 나타났으며, 카올리나이트는 대부분 카올린 광물들로 구성되어 있다. 그리고 제올라이트에서는 clinoptilolite와 mordenite의 불석광물들이 주로 포함된다. 고화실험 후 재령일 별로 일축압축 시험이 끝난 시료에 대해서 앞선 시험과 마찬가지로 건조 후 X-선 회절분석을 실시하여, 그 결과를 그림 4와 그림 5에 나타냈다. 그림에서 볼 수 있듯이 슬래그시멘트가 주원료이기 때문에 시료별로 방해석 등의 2차광물이 슬래그시멘트만으로 고화시킨 시료와 동일하게 포함된다. 슬래그시멘트와 석고를 섞은 시료는 석고와 ettringite의 피크가 다른 시료에 비해서 잘 나타나는 편이다. 따라서 ettringite

의 생성과 강도발현의 관계가 연관성이 있음을 알 수 있다. 이것은 석고 안의 SO₄²⁻ 성분이 아래와 같은 반응으로 ettringite와 같은 2차 생성물 형성에 도움을 주었기 때문인 것으로 판단된다.



방해석의 경우 슬래그시멘트만 첨가한 시료에서 가장 많이 나타났으며, 석고를 섞은 시료에서는 그 피크의 상대적 크기가 낮게 나타났다. 그러나 전술한 것과 같이 점토 및 재료 중의 광물 회절선에 의해 소량의 2차 생성물들을 구분하기가 어려웠다.

석고의 최적 배합비 산정을 위한 고화실험

물성 시험 결과

전술한 2단계 고화실험에서 슬래그시멘트와

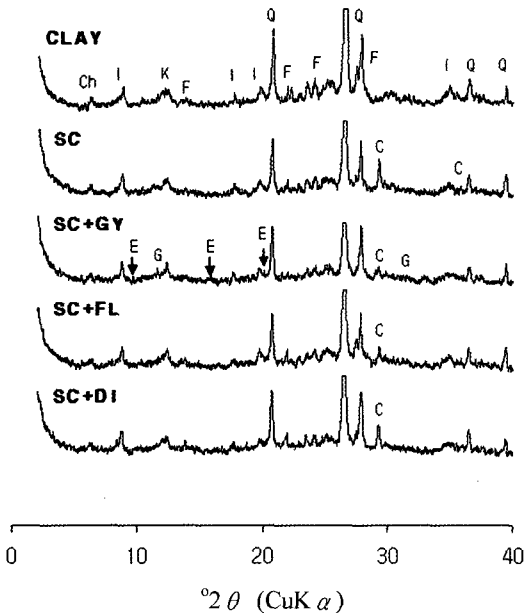


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of clay rich sediments mixed with slag cement and various mineral admixtures. G: gypsum Q: quartz, K: kaolinite, I: illite, F: feldspar, C: calcite, E: ettringite, G: gypsum, SC: slag cement, GY: gypsum, FL: fly-ash, DI: diatomaceous earth.

석고를 첨가한 조합이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 석고와 슬래그시멘트와의 최적 배합비를 산정하기 위한 3단계 실험을 수행하였다. 대상토의 함수비는 전 시험과 동일하게 150%로 설정하였고, 고화제의 첨가량은 300 kg/m³ (대상토의 건조중량에 대해 약 28%)로 하였다. 조합은 슬래그 시멘트와 석고의 비율 100:0에서 0:100까지 각기 달리 하는 8가지로 선정하였다(표 5).

이들에 대한 고화실험 후 14일, 42일의 양생 일수에 대해 수행한 토질시험 결과는 표 5와 같다. 실험결과, 석고만 사용한 경우는 일축압축 강도를 측정할 수 없을 정도로 고화가 진행되지 않았다. 모든 양생 기간 중 석고 30%, 시멘트 70%의 배합에서 가장 큰 압축강도를 나타내었다. 석고 함량이 30% 이상으로 증가되면 다시 압축강도가 감소함으로 석고 약 30%가 최적의 배합비인 것으로 나타났다. 단위 체적 당 중량은 모든 조합에서 큰 차이가 없으며, 함수비는 슬래그 시멘트의 비율이 높아질수록 감소하

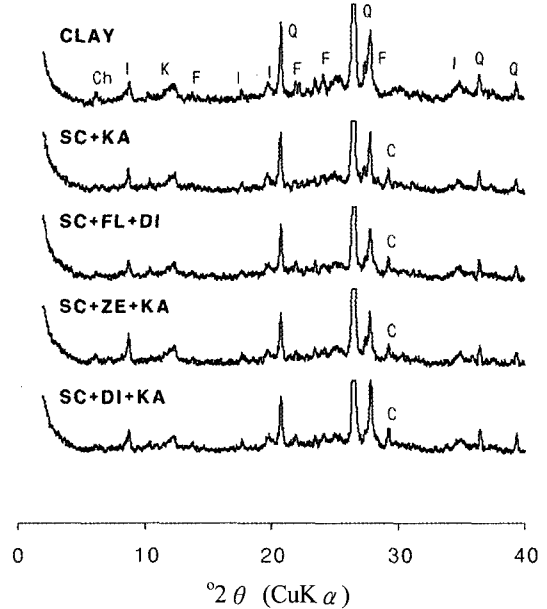


Fig. 5. X-ray diffraction patterns of clay rich sediments mixed with slag cement and various mineral admixtures. Q: quartz, K: kaolinite, I: illite, F: feldspar, C: calcite, E: ettringite, SC: slag cement, FL: fly-ash, DI: diatomaceous earth, KA: kaolinite, ZE: zeolite.

는 경향을 보인다. 14일 양생에 비하여 42일의 양생에서 모두 압축강도가 크게 증가하는 것으로 나타난다. 이들 증가량도 시멘트의 배합비율이 커질수록 증가하는 경향을 보인다. 함수비의 변화를 살펴보면, 100:0의 조합에서 함수비의 감소가 가장 크게 나타났다. 이 실험에서는 함수비의 감소와 강도증가와의 관계가 비례하지는 않았다. pH의 변화에서는 석고의 함량과 재령일의 증가에 따라 대체적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 함수비도 유사한 경향을 나타낸다.

압축강도의 증가는 보다 복잡한 내부 광물들의 생성과 그 응집력이 중요한 요인이라는 것을 알 수 있다.

반응 생성물 검토

3단계 실험 후 반응 생성물에 대한 X-선 회절분석 패턴을 그림 6에 나타내었다. 그 결과, 본래 점토의 구성 광물성분과 함께 석고, 방해석과 2차 생성물로 보이는 회절선들이 일부 나타났다. 석고 60% 이상의 혼합 시료에서는 석고

Table 5. Physicochemical properties of clay rich sediments mixed with slag cement and gypsum in various mixing ratios

	Mixing ratio	Total unit weight (γ_t , g/cm ³)	pH	Water content (ω , %)	*UCS (Q , kg/cm ²)
After 14 days	S0 G100*	nd	8.16	105.43	nd
	S20 G20	1.45	10.36	104.54	0.55
	S40 G60	1.43	10.86	100.85	3.29
	S60 G40	1.45	11.15	100.60	5.34
	S70 G30	1.45	10.74	98.27	9.84
	S80 G20	1.46	11.12	97.50	7.89
	S90 G10	1.43	10.84	99.45	5.05
	S100 G0	1.45	10.96	91.32	4.52
After 42 days	S0 G100	nd	8.26	106.17	nd
	S20 G20	1.46	10.07	100.14	0.62
	S40 G60	1.48	10.20	100.88	3.61
	S60 G40	1.47	10.64	98.44	7.06
	S70 G30	1.48	10.23	96.25	13.01
	S80 G20	1.48	10.70	94.77	10.20
	S90 G10	1.51	9.75	92.67	9.87
	S100 G0	1.56	9.53	89.40	8.83

* UCS: unconfined compression strength

* S0 G100: slag cement 0% + Gypsum 100%

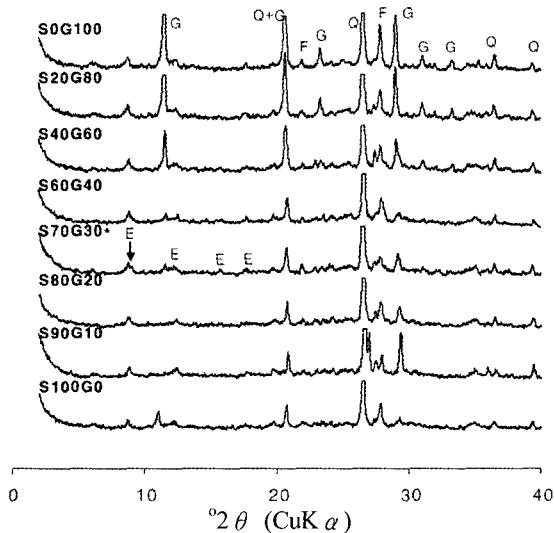


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of clay rich sediments mixed with slag cement and gypsum in various mixing ratios. Q: quartz, F: feldspar, calcite, G: gypsum. S70G30: slag cement 70% + gypsum 30%.

의 X-선 회절선이 크게 나타나며, 석고의 함량이 40% 이하에서는 석고의 회절선이 아주 급격

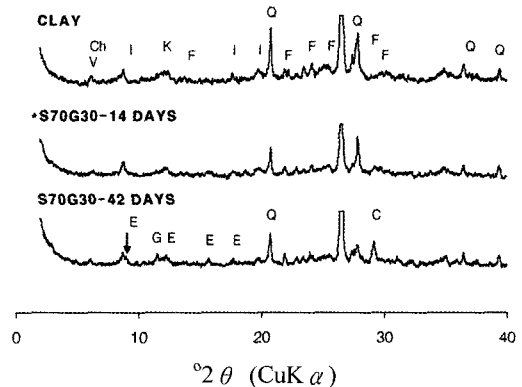
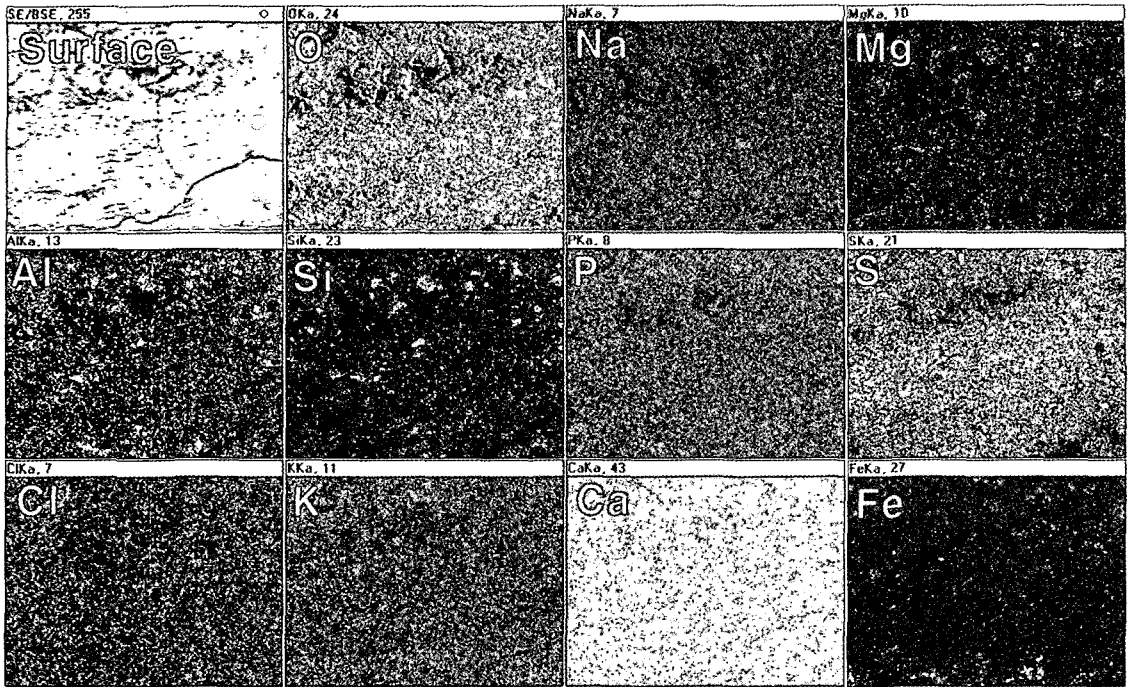
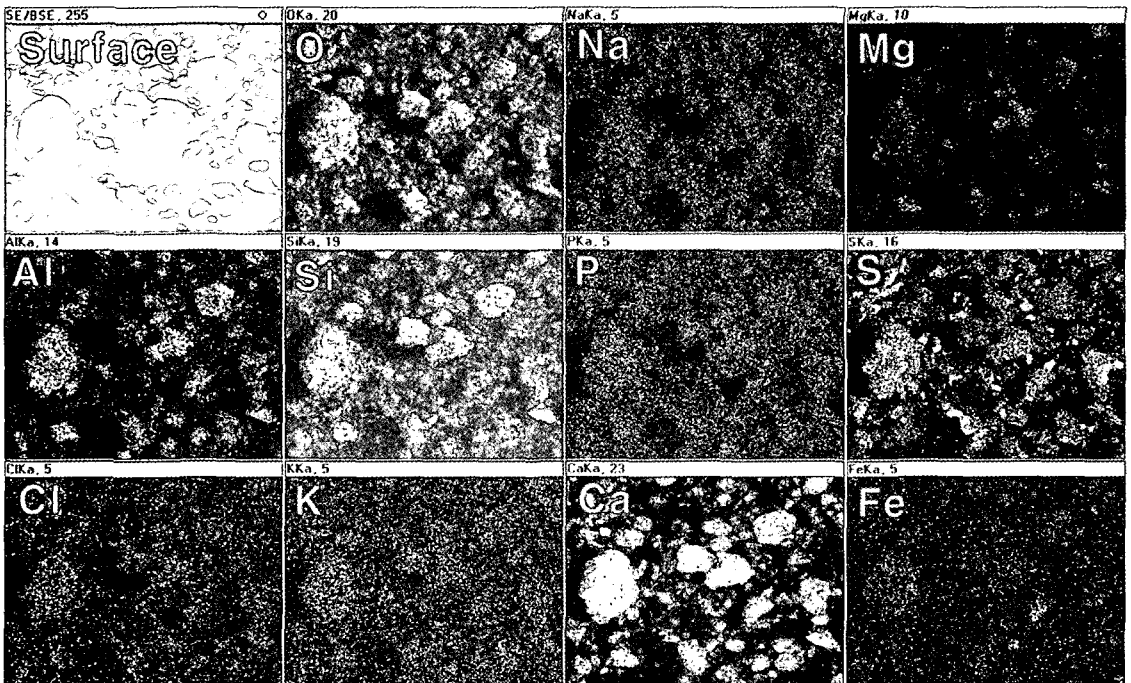


Fig. 7. Variations with aging days in X-ray diffraction patterns of clay rich sediments mixed with 70% slag cement and 30% gypsum. quartz, F: feldspar, Ch: chlorite, V: vermiculite, I: illite, C: calcite, G: gypsum.

히 감소되고 20% 이하에서는 회절선인 거의 식별되지 않고 있다. 그리고, 30% 이상의 혼합시료에서 에트린자이트의 X-선 회절선들이 아주 뚜렷하게 식별된다. 이는 첨가된 석고가 40% 이상이 되면 석고가 수화반응으로 다 소모되지 않고 시료에 상당량이 잔류하게 되며, 30~40%



(A)



(B)

Fig. 8. EDAX element maps showing clay rich sediments mixed with 70% slag cement and 30% (A: X40, B: X800).

정도의 석고가 혼합될 시 혼합된 석고가 수화반응시 소모되어 에트린자이트 및 기타 2차 수화반응물 등의 생성에 충분하게 기여하는 것을 지지한다. 따라서 이상의 결과와 압축강도를 고려한 본 연구 조건하의 최적 혼합비는 석고 30%와 슬래그시멘트 70% 정도가 되는 것으로 나타났다.

석고 30%와 슬래그시멘트 70%의 조합에서 양생 기간에 따른 최종 반응물질에 대한 X-선 회절선을 그림 7에 나타냈다. 전술한 바와 같이 재령 14일에서는 혼합된 석고는 용해되거나 수화반응으로 소모되어 회절선을 나타내지 못하고 있으며, 2차반응 생성물인 에트린자이트의 회절선은 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나, 재령 42일에서는 에트린자이트의 회절선이 더욱 뚜렷해지는 반면, 석고의 회절선이 다시 나타난다. 이는 혼합된 석고가 수화반응의 후기 단계에 재 침전됨을 보여준다. 재 침전된 석고가 교결물질로 작용하여 압축강도 증가에 기여하는 것으로 추론되나, 현재로서는 그에 대한 정확한 메커니즘, 재 침전된 석고의 거동 및 시멘트계 수화반응 산물에 대한 영향은 알 수 없다.

그리고 처리 전의 점토 시료에 비하여 버미클라이트와 카올린광물에 해당되는 회절선이 다소 감소하는 것으로 나타난다. 이는 미립의 점토광물들이 첨가재료들과 반응에 의한 결과로도 볼 수 있다.

그림 8에서는 가장 좋은 강도결과를 보인 점토와 슬래그시멘트, 석고의 조합에 대한 전자현미경에 의한 EDAX mapping의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 Ca, S성분이 시료에 잘 분산되어 나타나는 걸로 보아 석고 성분이 잘 혼재되어 있는 것으로 판단된다. 그리고 800배로 확대한 표면의 결과를 보면 여러 형태의 입자들이 관찰되고 있는데, 이들은 Ca, Si, Al, O, S의 성분이 잘 나타나고 있다. 이것으로 보아, 석고가 적절한 수화반응 단계를 거치면서 CAH (calcium alumino hydrate), CSH (calcium silicate hydrate) 및 알루미늄규산 3석회(calcium alumino-silicates hydrate) 화합물과 반응한 2차 수화반응 생성물을 형성하는 것으로 생각된다.

결 론

1) 연약지반의 점토에 포틀랜드시멘트, 슬래그시멘트, 생석회-소석회의 고화재를 혼합하여 반응시킨 1단계 고화실험의 결과, 슬래그시멘트가 가장 좋은 일축압축 강도를 보였으며, 이에 따른 반응생성물도 다르게 나타났다.

2) 슬래그시멘트를 주 고화재료로 하여 석고, 고령토, 제올라이트, 규조토, 플라이애쉬의 광물재료와 고화 반응시킨 2단계 실험의 결과에서는, 석고가 가장 높은 강도발현을 나타냈다. 이 결과는 석고 성분이 슬래그시멘트의 C₃A와 결합하여, ettringite와 같은 2차 수화광물을 점토속에서 생성하여 높은 강도 발현에 기여한 것으로 생각된다.

3) 석고와 슬래그 시멘트의 최적 조합비 산정을 위한 3단계 고화실험의 결과, 슬래그 시멘트 70%, 석고 30%의 조합에서 가장 좋은 강도발현을 보였다.

4) 이상의 실험 결과, 고화 반응 후의 물성과 반응생성물은 대체로 잘 일치하여 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 즉, 점토와 고화재의 반응에 의한 반응생성물에 의해 압축강도와 같은 물성이 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 이번의 연구 결과는 연약지반의 고화안정 처리에 유용한 자료로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 2005년 소방방재청의 자연재해방재기술사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사한다.

참 고 문 헌

- 건설부 국립건설연구소 (1976) 연약지반처리공법보고서(약액주입시험시공). p. 317.
- 건설부 국립건설연구소 (1977) 연약지반처리공법보고서(약액주입시험시공). p. 328.
- 건설부 국립건설연구소 (1979) 연약지반처리공법보고서(약액주입시험시공). p. 385.
- 건설부 국립건설연구소 (1980) 화학약액에 의한 연약지반고결공법의 개발 연구. 대한토목학회지, 28(5), 121-129.
- 김병규, 황진연 (1999) 점토와 석회의 혼합에 의한 반응생성물과 물성변화. 한국지반공학회 '99 봄학술 발표회 논문집, 505-512.

- 김상규, 임희대, 문성권 (1998) 한국 해안에 퇴적된 연약지반의 점토광물의 종류와 분포. 한국지반공학회 논문집, 14(6), 73-80.
- 대한주택공사 (1989) 고화안정처리에 의한 지반개량 공법 연구, 103p.
- 대한토질공학회 (1986) 건설부 제정 구조물기초설계 기준 해설. 408-411.
- 도덕현, 공길용, 오창목, 유찬 (1995) 고화재를 이용한 천층 및 심층혼합처리공법의 현지 적용성에 관한 연구. 대한토목학술논문집, 15(4), 1003-1013.
- 송태학 (1995) ECE 공법에 대하여. 95년도 한국지반공학회 연약지반처리위원회 연약지반안정처리시공관리 세미나, 117-132.
- 이선갑 (1999) 낙동강 하구 녹산공단지역 점토 퇴적물의 광물조성과 토질 공학적 특성. 부산대학교 석사학위논문, p. 92.
- 이정우 (2000) 남해안 연약점토의 광물 및 지반공학 적 연구. 부산대학교 박사학위논문, p. 159.
- 천병식, 임해식, 전진규 (1998) 시멘트계 고화재에 의한 천층개량공법에 관한 연구. 98년도 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 381-388.
- 천병식, 김수삼, 고경환, 오민열, 임해식 (1995) 생석회에 의한 연약지반개량에 관한 기초적 연구. 95년도 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 21-26.
- 천병식, 김수삼, 강부건, 고경환, 김준섭 (1996) 생석회공법에 의한 지반개량효과에 관한 연구. 96년도 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, 275-292.
- 황진연, 이선갑, 이정우 (1998) 부산지역 연약지반 점토의 광물성분과 물성. 한국지반공학회 '98 가을학술발표회 논문집, 57-64.
- 한국 토지 공사 (1999) 연약지반의 압밀특성에 관한 연구 I. 연약지반의 압밀 특성에 관한 연구의 최종 보고서, 211-358.
- 紫崎光弘 外 (1985) 最新藥液注入工法の設計と施工. 山海堂, 70-80.
- Bell, F.G. (1996) Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42, 223-237.
- Taylor, H.F.W. (1990) *Cement Chemistry*. London, Academic Press Ltd. p. 475.

2005년 11월 21일 원고접수, 2005년 12월 20일 게재승인.