

적황색토와 프라이애쉬 안정처리토의 반응특성

A Study on Reaction Characteristics of Stabilized Red Yellow Soil with Flyash

정 두 영^{*1} Jeong, Doo-Young
이 병 석^{*2} Lee, Byung-Suk
이 광 준^{*3} Lee, Kwang-Joon

Abstract

According to the increase of mixing rate on the stabilized red yellow soil with flyash, dry density increases and optimum moisture contents decreases. And adding calcium hydroxide and portland cement like addition materials has an effect on increasing dry density, and has a result that the light weight area of flyash treated soils is 1:0.3 ~ 1:0.5. Although the mixing rate on the stabilized red yellow soil with flyash increases, if it has less proper calcium oxide, the free calcium oxide does not increase. But the free calcium oxide, by to adding second additive calcium oxide and portland cement, increases. Thus this study shows that stabilized red yellow soil with flyash has the Pozzolan reaction products which are aluminum calcium sulfate hydrations and aluminum sulfur lime hydrations. And it is confirmed that x-ray diffraction intensity of Ettringite gradually increases through hydration reaction by adding material like lime and cement. Besides, it is shown that the increase of x-ray diffraction intensity has substitutive relation with uniaxial strength and the addition material like lime and cement has an effect on contributing by the concretion of intensity.

요 지

적황색토(赤黄色土)와 프라이애쉬의 혼합비율에 증가에 따라 건조밀도도 증가하며 최적함수비는 감소하는 경향이고 2차 첨가재인 소석회 및 시멘트 첨가에 의한 건조밀도의 증가는 보이나 처리토의 경량화의 범위는 1:0.3~1:0.5 정도임을 확인할 수 있었다. 프라이애쉬의 혼합비율이 증가해도 프라이애쉬의 고유산화칼슘(CaO)의 함유량이 적으면 유리산화칼슘의 증가도 크지 않으나, 2차첨가재인 소석회 및 시멘트 첨가량의 증대에 따라 증가한다. 이는 첨가재에 의한 수화반응의 증가로 확인되며, 본 처리토는 Ion교환작용과 Pozzolan 반응 생성물인 규산칼슘석회수화물($5CaO \cdot 6SiO_2 \cdot 5H_2O$, Tobermorite)과 알민산유산석회수화물($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$, Ettringite)가 주된 반응생성물이며 확인된 알민산유산석회수화물(Ettringite)의 회절X-선강도는 2차 첨가재의 첨가에 따른 수화반응으로 수화물은 점차 증가하며 상대적으로 일축압축강도도 상응한 강도발현을 하여 고결화 효과에 기여하고 있음을 보여준다.

Keywords : Lateritic soil, Flyash, SEM, X- Ray diffraction, Addictive, Pozzolan

*1 정희원, 전북대학교 토목환경공학부 명예교수

*2 정희원, 익산대학 토목환경학과 부교수

*3 정희원, 서남대학교 토목공학과 조교수

1. 서론

산업폐기물인 프라이애쉬를 이용한 토질개량은 그 유효성이 다양하고 실용성도 확인되었으며, 서구 여러 나라에서는 오래 전부터 도로노상이나, 노반성토 또는 매립에 의한 지반조성 등 활용과 이용법이 정립되어 있다. 또한 근래에 와서는 프라이애쉬를 월드터널 공사에서 구조상 Segment와 지산(地山)사이의 빈틈에 뒤채움 주입재로 활용하고 있으며, 유동화처리로 경량화 성토재나 매설관의 되메움 재료로 모래대신 이용되고 있다. 우리나라에서도 프라이애쉬의 안정처리에 관한 실험적 연구나, 건설재료로서의 현장활용에 대한 내구성 또는 역학적 특성 등 실용화에 있어서 크게 진전시키고 있음을 확인할 수 있다(박은영 등, 1992, 천병식 등, 1995).

처리재로서의 프라이애쉬를 이용한 시멘트나 석회, 석고 등 혼합처리토는 종래 일반적으로 강도발현의 추정에 의해 지반개량의 평가를 하고 있다. 강도발현과 연관된 처리토의 물리화학적 반응기구는 Ion교환작용, 탄산화반응, 수화반응, Pozzolan 반응 등이 있으며 처리효과는 크게 진전되고 있다. 사질토나 점성토에 시멘트 또는 석회를 혼합하여 처리함에 있어서, 시멘트의 경우 수화반응생성물인 시멘트gel화가 토립자를 결합시키며, 석회의 경우는 C-S-H계의 포조란 반응생성물이 생성되어 고결화의 효과가 있다. 2차적으로 탄산화작용의 반응도 고결과 효과의 진전에 기여하고 있음은 이미 거론된 것이다. 또한 노상토 처리에 프라이애쉬와 Laterite성토의 혼합비증가에 따른 염기성의 증가를 초래한다(Chang 등, 1990). 프라이애쉬를 첨가한 화강풍화토(Masa토)의 다짐처리토의 강도발현의 증가에 대한 실험적 고찰이나 Kamon(1991) 등의 X-선 회절분석에서 산업폐기물인 프라이애쉬나 스래그 등에 롬-질토로 처리하여 시멘트나 석회를 첨가하였을 때의 결정구조에서 알민산유산석회수화물(Ettringite)의 수화생성물이 생겨 강도발현에 미치는 영향 등을 보고한 바 있다(松尾, 1979). 적황색토(일명 황토라 함)는 분류상 Laterite 성토와 유사하여 우리나라 서해 저지대의 단구형 지형에 많이 분포되어 있다(정두영 등, 1996).

본 실험에서는 적황색토화 한 사질토의 프라이애쉬 처리에 있어서, 물리화학적 변화와 처리토의 결정구조의 경화성의 반응생성물의 분석, 그리고 2차 첨가재로서 시멘트, 소석회를 첨가했을 때의 반응 생성물의 분석과 강도증대에 미치는 영향 등을 보고한 것이다.

2. 프라이애쉬의 개요 및 활용범위

석탄회의 개요는 화력발전소에서 석탄의 연소회이며 석탄회에는 보일러의 로저(爐底)에서 회수되는 clinker ash(저회)와 전기집진기에 의해 회수되는 프라이애쉬(비회)로 구분할 수 있다. 일반적으로 석탄회는 후자를 말한다. 프라이애쉬는 미분탄회이며 입자는 구형(球形)의 초자상(硝子狀)의 미소립자로 그것이 특징이다. 프라이애쉬는 탄소분이 매우 적고, 무기질로서 주된 성분은 규산(SiO_2)와 다음으로 알루미늄(Al_2O_3)이 거의 80% 점유하고 있다. 그밖에 산화제2철(Fe_2O_3), 석회(CaO), 산화마그네슘(MgO), 알카리($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 등이며, 토질안정제로서 인공 Pozzolan재이다. ASTM의 정의에 의하면 Pozzolan은 프라이애쉬 자신은 경화성이 없으나 그 미분말이 물과 접하면 알카리 및 알카리 토금속의 수화물(水和物, $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)을 만드는 규산질 및 규산알루미늄($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$: 일명 Mullite)의 형태로 존재한다. 일반적으로 광물조성이 초자상질(硝子狀質)인 경우에는 결정(結晶) energy를 내부에 내재하고 있어, 물과 반응하여 응결경화하는 성질 즉 잠재수경성(潛在水硬性)을 지니고 있다. 이 응결반응은 시멘트와는 본질적으로 같다. 프라이애쉬와 모래, 사질토 등의 혼합재로서 토공재로 활용되고 있으며 건축재 또는 토공의 경량화나 이수(泥水)와의 고화 처리에도 적용되고 있다.

프라이애쉬의 활용범위를 용도, 효과별로 보면 댐공사의 수화열의 저하, 장기강도 증대 및 유동성의 양호를 들 수 있고, 도로 및 터널공사에서는 노상 노반의 개량, 주입재 등에서 팽창수축의 저하와 수밀성이 양호하다. 또한 항만, 하수공사에서는 호안 경량화 성토, 매설관의 뒤채움 등에 적용되고 화학적 저항성이 양호하다. 프리팩트 공사나 주입공정에서는 유동성이 양호하여 펌프 수송에 적합하고 수축량이 적으며 뒤채움 주입에 적합하다. 건축공사에서는 기둥이나 보 상판 등 구조물에 유동성이 좋은 콘크리트를 얻을 수 있고, 특히 경량화 콘크리트에 유효하며 그밖에 내산(耐酸), 내알카리성 등 화학적 저항성을 높일 수 있으며 방수성이 좋다(堀内, ほか, 1997).

3. 실험개요

3.1 시료토 및 안정처리재

본 실험에서 사용한 시료토는 화강암질 풍화잔적으로

표 1. 처리토의 혼합비

적황색토 프라이애쉬 혼합비	첨가재 석회 혼합비	첨가재 시멘트 혼합비	비고
1:0 (적황색토:0)	1:0.1+L ₅	1:0.1+C ₅	* 0.1, 0.3, 0.5 등은 프라이애쉬의 중량비 * L은 Lime(석회)혼합비, L ₅ , L ₁₅ 는 프라이애쉬 중량의 5%, 15% 첨가 임 * C는 cement 혼합비, C ₅ , C ₁₅ 는 프라이애쉬 중량의 5%, 15% 첨가 임
0:1 (0:프라이애쉬)	1:0.1+L ₁₅	1:0.1+C ₁₅	
1:0.1	1:0.3+L ₅	1:0.3+C ₅	
1:0.3	1:0.3+L ₁₅	1:0.3+C ₁₅	
1:0.5	1:0.5+L ₅	1:0.5+C ₅	
1:1.0	1:0.5+L ₁₅	1:0.5+C ₁₅	

서 적황색토화(赤黄色土化) 한 사질실트 또는 실트질 모래이다. 처리재로서는 프라이애쉬를 사용하였으며 시료토와 프라이애쉬의 입도분포는 표 2, 표 3과 같고, 시료토와 프라이애쉬의 혼합과 2차첨가재로서 소석회, 시멘트 등의 첨가비는 다음 표 1과 같이 처리하였으며 배합비는 중량비로 하였다. 또한 시료토와 프라이애쉬의 물리적 성질과 화학적 성분 조성은 각각 표 2, 표 3, 표 4, 표 5와 같다.

매의 처리재의 펼쳐지는 지름을 측정하여 유동성을 파악한다.

3.2 처리토의 다짐과 유동성의 측정법

3.2.1 다짐 방법

처리토의 다짐에서 다짐기구는 하-버드형 램머와 ϕ 3cm, h=10cm인 몰-드를 사용하였으며 3층 25회 다짐을 하였다.

3.2.2 유동성의 측정법

유동성(Flow)시험은 직경. 높이를 같게 한 8cm의 원통에 처리재를 넣어, 평탄한 평면상에서 원통을 들어 올렸을

3.3 CaO 측정법

ICP(Inductively Coupled Plasma)에 의한 분석으로 가스(액체알곤가스) 99.99%(V/VY), 플라즈마 발광부 높이는 Ca가 알카리 원소이므로 25mm(20~25mm)에서 측정하였다.

사용된 기구는 Labtam 710(GBC) 이다.

3.4 주사형 전자현미경 관찰용 시료제작 및 관찰 방법

본 연구에 이용한 주사형 전자현미경 관찰용 시편의 제작은 처리토의 혼합별, 양생별 다짐도를 3×3×3mm 정도로 관찰면을 제외한 나머지 부분을 정방체로 절삭하고 시편의 수분을 제거하기 위하여 동결건조법을 적용한다. 이 방법은 시료대에 시편을 접착시키기 위하여 접착테이프

표 2. 시료토의 물리적 성질

비 중	자연 함수비 (%)	습윤단위 중량(g/cm ³)	흙의 연경도 (%)			입도 분포 (%)			통일분류	비 고
			W _L	W _P	I _P	모래	실트	점토		
2.67	16.0	1.76	36.90	27.40	9.50	58.0	29.0	13.0	SM	

표 3. 프라이애쉬의 물리적 성질

비 중	입도조성(%)		습윤단위중량(g/cm ³)	Flow치(mm)	균등계수	lg loss (%)
	사분	실트분이하				
2.17	18.0	82.0	1.125	230<(최대값)	8.46	10.0

표 4. 시료토의 화학 조성(함유량, %)

심도(m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	pH	Igloss
5.0	58.60	20.50	6.70	0.32	0.22	0.30	1.80	1.62	0.06	0.75	5.7	7.0

표 5. 프라이애쉬의 화학적 성분조성

성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	TiO ₂	기타	PH
함유량(%)	55.99	21.36	5.92	5.55	1.57	0.13	0.24	5.25	0.91	3.08	8.60

인 도전성 접착재를 붙여서 시료를 금증착(높은 진공상태)시킨다. 관찰면에서의 2차 전자의 발생효율을 높이기 위한 것으로 제작한다. 주사형 전자현미경의 기기는 JSM-6400형, 측정조건은 20KV, 11mA, 배율 1000~3000범위이다.

3.5 X-Ray 회절분석법

처리토의 혼합비, 양생별 결정구조와 반응생성물을 추적하기 위한 X-선회절의 정성분석으로서 시료의 제작은 시료의 분말입자의 크기, 300mesh(45 μ)이하의 분말법으로 처리하였으며 분석기기는 X-Ray 회절분석기(Rigaku D/max-III A형)이고 측정조건은 target: CuK α Filter: Monochrometer, scan speed: 2deg/Min, voltage/current: 40 KV, 200 mA 이다.

3.6 처리토의 강도 측정법

일축압축강도 측정용 공시체는 h=10cm, d=5cm의 원주형으로 하버드형 다짐기로 다짐하고 랩으로 밀봉하여 양생온도 21 $^{\circ}$ C로 처리토 별, 재령별로 기건양생 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 처리토와 프라이애쉬의 물리적 및 화학적 성질

적황색토화(赤黄色土化)한 사질실트는 우리지역에 넓게 산재한 잔적토이며 화강암질 풍화토(일명:황토)로 아열대의 Laterite성토에 비하여 규산(SiO $_2$)이 더 많이 잔류

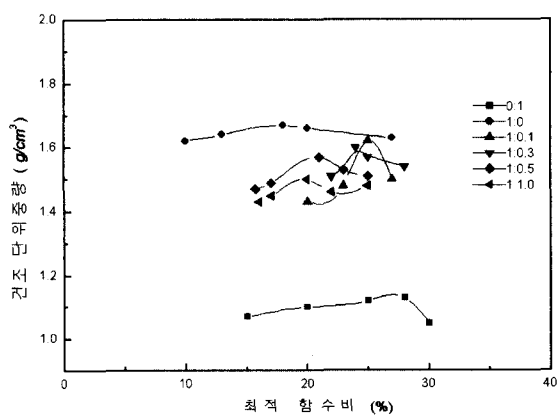
하는 특징이고, 산화철(Fe $_2$ O $_3$)은 토양을 적황색토화 하나 고결화 효과는 열대의 Laterite 성토에 비해 좀 적으며 점성 또는 가소성을 지니고 있다(정두영 등,1996). 표 2는 시료토의 물리적 성질이다. 시료토의 조립분을 적게 하기 위하여 표준체 #10(2.0mm)를 통과한 것을 이용하였으며, 이는 시료토가 점성이나 가소성을 지니고 있기 때문이다. 프라이애쉬는 표 3과 같이 물리적 성질이 거의 실트질과 같다. 또한 유동성도 혼화와 첨가에 따른 최대값을 나타낸다. 표 4는 화학성분조성과 함유량을 나타내고, 처리토의 고결화 효과를 높이기 위하여는 입도조정도 필요할 것이다. 松尾(1979)등도 세립분의 시료토와 프라이애쉬 혼화량의 증가에 따라 Pozzolan 반응을 촉진시켜 강도증가를 도모한 것으로 보고하고 있다.

4.2 처리토의 다짐 특성

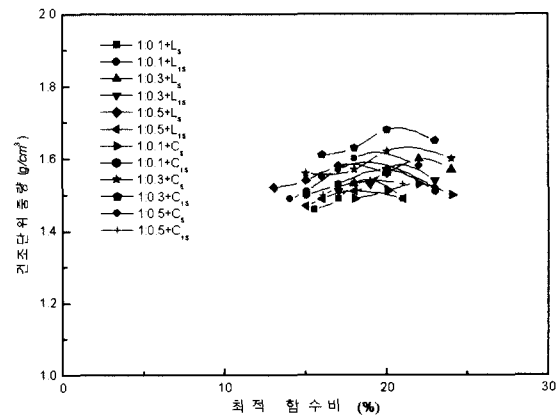
다짐 처리는 시료토, 프라이애쉬 혼화와 2차 첨가제인 소석회 및 시멘트첨가로 인한 밀도의 변화 그리고 수화 및 포조란반응 생성물의 실험적 고찰을 위한 것이다.

그림 1은 처리토의 다짐곡선으로 그림 1(A)는 시료토와 프라이애쉬의 혼합비에 따른 다짐토이다. 그림과 같이 프라이애쉬만의 최대건조밀도는 1.14g/cm 3 정도로 가장 낮은 값이며 최적함수비는 28%정도이고 적황색토는 최대건조밀도가 1.67g/cm 3 정도의 범위이고, 최적함수비 18%내외의 범위이다. 적황색토:프라이애쉬의 혼합비가 1:0.5일 때의 최대건조밀도는 1.52g/cm 3 , 최적함수비 21.0% 정도이며 플라워애쉬 혼합비 증가에 따라 점차 경량화하는 경향이다.

그림 1(B)은 시료토와 프라이애쉬 그리고 2차 첨가제로 소석회와 시멘트를 각각의 혼화재에 첨가한 다짐곡선이



(A)



(B)

그림 1. 처리토의 다짐곡선

다. 그림과 같이 소석회 첨가의 경우 1:0.3+L₁₅의 최대건조 밀도는 1.67g/cm³, 최적함수비 20.0% 정도이고, 시멘트 첨가의 경우는 1:0.3+C₁₅ 최대건조밀도가 1.68g/cm³, 최적함수비 22.0%정도이다. 프라이애쉬는 비중이 비교적 낮고 경량이며 실트질 입경분포를 지니고 있으며 본 처리토의 경우는 흙 입자 사이를 세립의 프라이애쉬의 점착결합으로 밀도는 증대하는 경향이나 혼화재가 증가하면 경량화로 오히려 최대건조밀도가 감소하는 경향이다. Chang (1987) 등은 소각폐기 프라이애쉬 다짐처리토의 CBR, 전단강도 증가 등의 유효성을 확인한 바 있다. 프라이애쉬의 최대건조밀도는 입도조정에 의한 균등계수 증가에 따르며, 다른 토질재료와 비교할 때 최적함수비가 비교적 낮다. 비중이 낮은 처리토의 다짐 성상은 입도의 균등계수가 적을 때 경량화 하는 특성이 있음을 생각할 수 있다. 프라이애쉬와 같은 인공Pozzolan재료를 연약지반에서 함수비와 경량화의 조절로 성토 매립재료로 적용할 때 밀도나 투수성에 영향을 주는 다짐의 유효성도 거론되었으며 사질토와의 프라이애쉬 첨가에서는 세립분과 석회량 증가 또는 함수비의 조절 등 다짐에 따른 강도증대를 확인한 바 있다 (Carros, 1994, Edil 등,1987, Gray 등,1972).

4.3 처리토의 CaO의 변화

그림 2와 같이 적황색토와 프라이애쉬의 혼합비가 적으면 비교적 CaO변화도 적다. 프라이애쉬의 혼화비율의 증가에 따라 약간 증대하나 이는 프라이애쉬 고유의 CaO 함유량이 적으므로 pH값 변화도 적다는 것을 예상할 수 있다. 그러나 시료토와 프라이애쉬의 증가에 따라 약간 상회하고 소석회와 시멘트의 첨가에 의하여 pH값이 점차 증

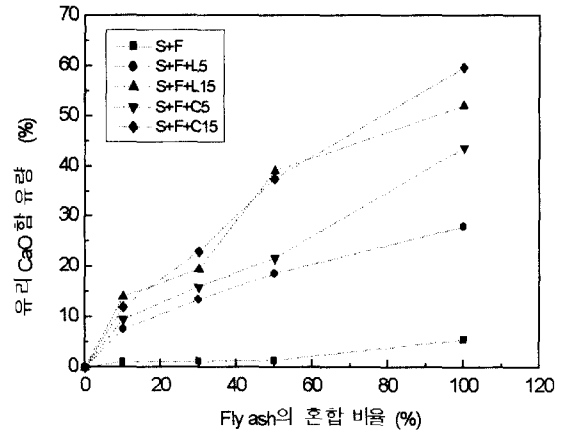
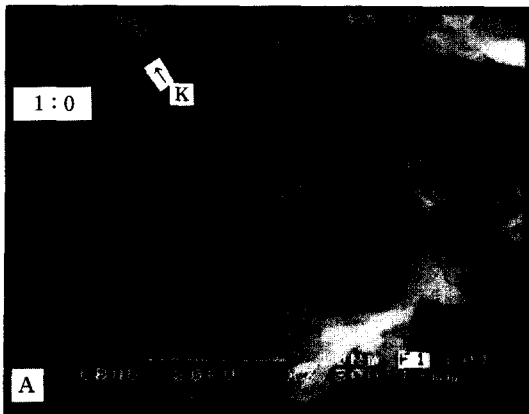


그림 2. 프라이애쉬 첨가에 따라 유리 CaO의 변화

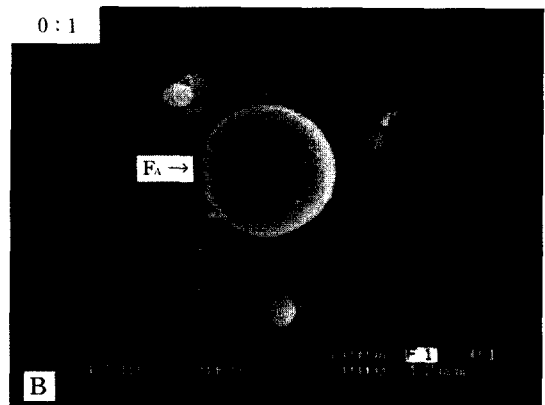
가하여 그 값도 12.0 범위에 있다.

2차 첨가재인 소석회와 시멘트를 첨가했을 때는 급진적으로 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 프라이애쉬의 혼합비 증가와 더불어 2차 첨가재의 첨가량 증가에 따라 유리산화칼슘(CaO) 함유량이 증가하고, 소석회 첨가에 비해 시멘트의 첨가쪽이 약간 상회하는 경향이다. 이는 시멘트의 주성분이 CaO, SiO₂ 등으로 Ca²⁺가 이온 교환작용을 일으켜 유리석회와 점토사이의 반응이 가해진 결과라고 사려된다.

소석회의 첨가량 증가에 따라 수중의 용해성 규산이나 알루미늄이 증가하여 Ca²⁺와 이온교환의 반응으로 새로이 유리석회의 증대가 있으며 또한 시멘트의 첨가량 증가에 따라 흙 중에 점토가 존재하면 시멘트에서 용해한 Ca²⁺가 이온교환작용이 생겨 화학적작용으로 수화반응에 의한 유리석회가 증대한다고 하며, 다짐 처리토의 일축압축 강도는 유리석회의 함유량이 증가함에 따라 강도발현의 증가로 고결화 효과와 밀접한 관계가 있음을 언급하고 있



(A) 적황색토



(B) 프라이애쉬

사진 1. 적황색토와 프라이애쉬의 영상

다(片岡哲之,1997, Edil 등 1987).

4.4 처리토의 미세적 구조의 관찰

다짐처리토의 주사형 전자현미경(走査型 電子顯微鏡 :scanning electron microscope, SEM)의 관찰은 재령 28일 기건양생의 처리토로 사진 1과 같다. 사진 A는 적황색토이고, 사진 B는 프라이애쉬이다. 사진 A(사진기호 K:Kaolinite, FA:플라이애쉬)와 같이 적황색토의 점토광물인 Kaolinite의 특징인 육각판상(六角板狀)이고, 사진 B와같이 프라이

애쉬 입자는 구조적으로 구상(球狀)이 특징으로 관찰되었다. 사진 2의 A와 B는 각각 적황색토:프라이애쉬의 혼합비율을 1:0.1 ~ 1:0.5로 처리한 것이다. 다짐처리 한 사진 A(사진기호 To:Tobermorite, Ett:Ettringite)의 입자표면은 비교적 불규칙하고 중공상(中空狀)이며, 점상결정(点狀結晶)의 C-S-H계인 규산석회수화물($3CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$: 일명 Tobermorite 라 함)의 Pozzolan 반응물의 생성과 미미한 Ettringite인 알루미늄산유산석회수화물($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 32H_2O$)의 침상결정(針狀結晶)인 수화생성물의 고결화현상으로 혼화재와 물이 접촉하여 gel화로 생성된 수화반

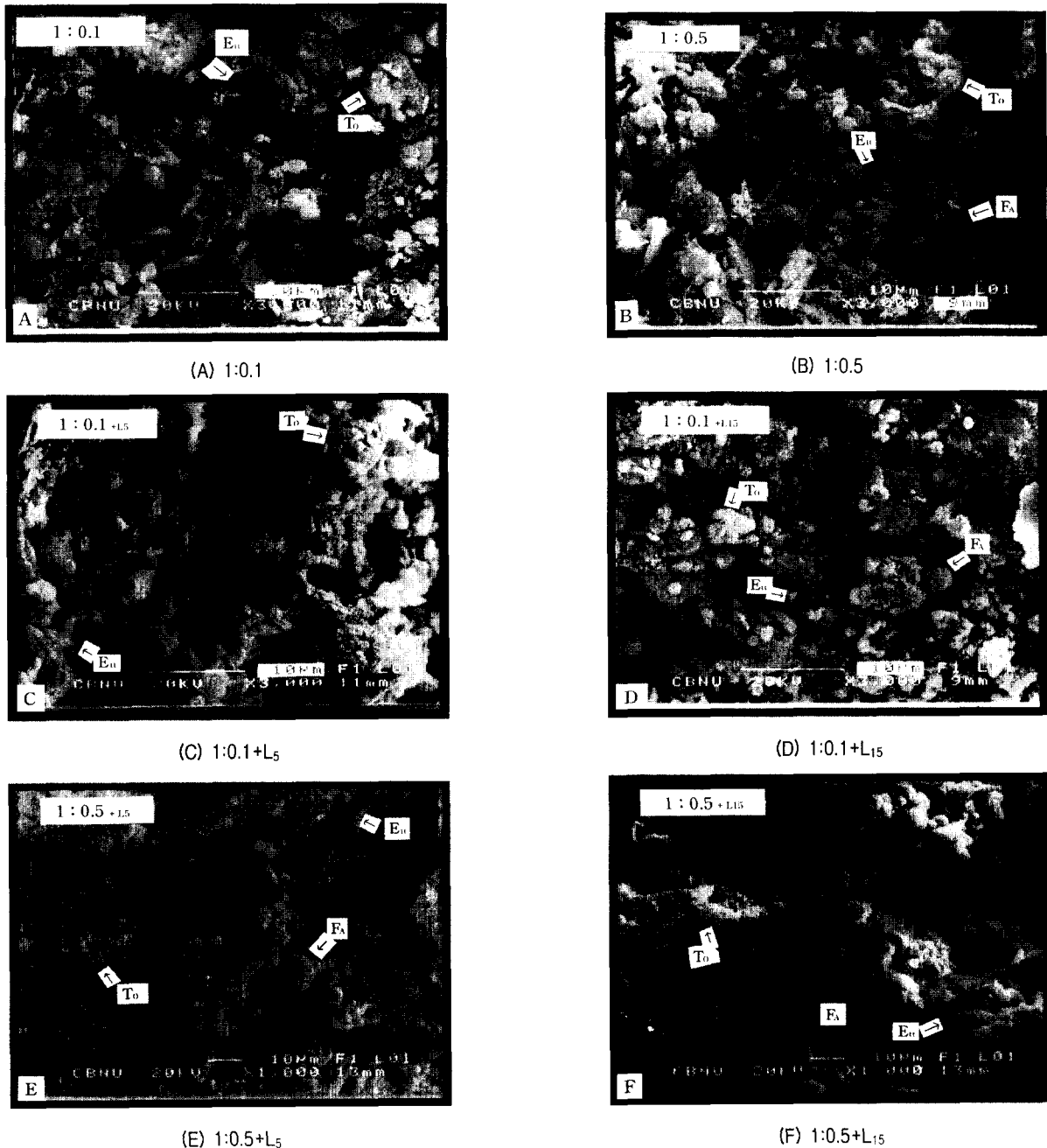
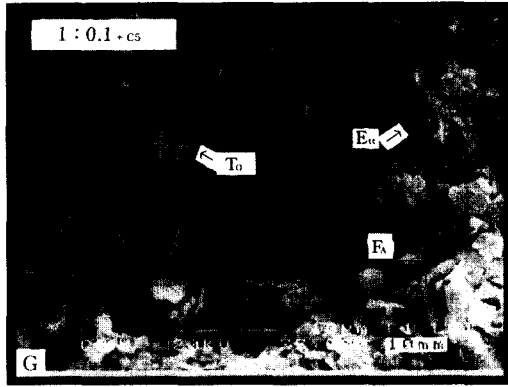
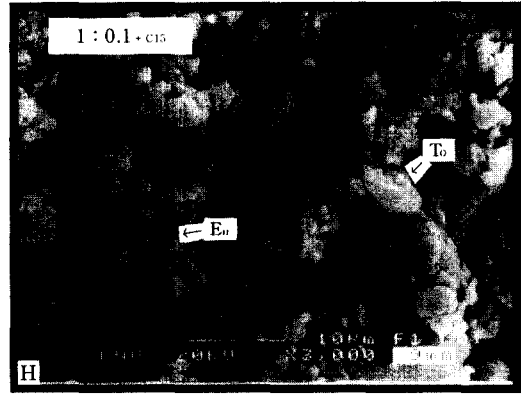


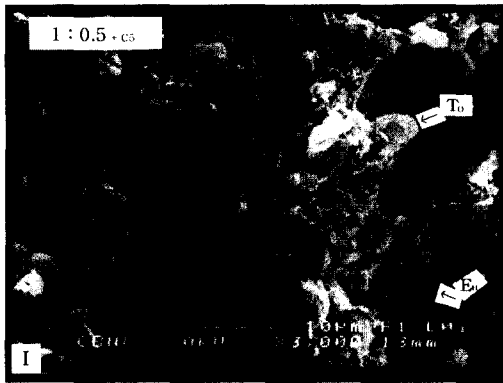
사진 2. 처리토의 재령 28일의 영상(A~F)



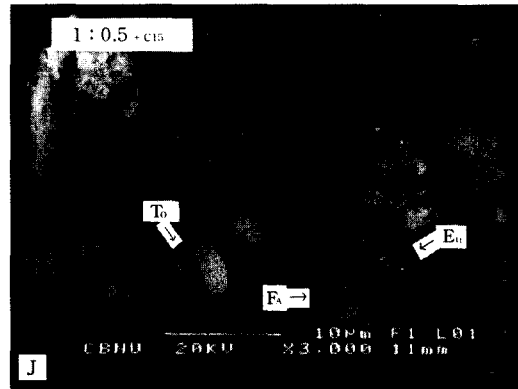
(G) 1:0.1+C₅



(H) 1:0.1+C₁₅



(I) 1:0.5+C₅



(J) 1:0.5+C₁₅

사진 2. 처리토의 제령 28일의 영상(G~J)

응으로 사려된다. 사진 B는 프라이애쉬 첨가량이 증대함으로서 Ball bearing을 삽입한 양상이고 또한 사진 A와 같이 C-S-H계의 Pozzolan 반응생성물은 증대하는 경향이고, 약간의 Ettringite의 침상결정구조도 확인되어 Pozzolan 반응의 특징을 관찰할 수 있었다.

사진 C와 D는 2차첨가재인 소석회를 각각 5%, 15% 첨가한 것으로 관찰결과 사진 C는 점상결정의 C-S-H 계의 수화생성물과 Ettringite의 침상결정의 구조도 미미하게 확인되어 Pozzolan 반응의 생성이라 할 수 있다. 사진 D는 2차 첨가량 증대함에 따라 입자표면은 더욱 조밀하게 밀집되는 경향이고, C-S-H 계의 수화생성물과 Ettringite의 침상결정 구조도 확인되어 강도발현의 유효성을 기대한다. 또한 사진 E, F는 혼화재인 프라이애쉬를 50%로 증가시키고, 2차 첨가재인 소석회첨가로 입자표면은 더욱 조밀해지며 큰 Ped화를 형성하고, C-S-H 계의 점상결정 구조와 미미한 Ettringite의 침상결정 구조를 보인다. 따라서 수화반응의 생성물은 석회계의 Pozzolan 반응의 특징으로 확인됨을 알 수 있다. 또한 X-선 회절도에서와 같이 부차적 작용으로 탄산화작용도 고결화에 기여하고 있음을

알 수 있다.

사진 G, H는 혼화재인 프라이애쉬와 2차 첨가재인 시멘트를 각각 5%, 15% 첨가한 것으로 사진 G는 입자표면에 얇게 입자사이를 엮기게 한 Ettringite(C₃A)의 침상결정의 수화반응과 점상결정의 규산석회수화물 즉 Tobermorite인 수화생성물도 확인할 수 있었다. 사진 H도 입자표면에 얇게 알민산석회(C₃A)의 침상결정이 엮기어 있으며, 이는 시멘트 첨가량 증대로 수화반응의 형성이 증대함을 알 수 있을 것이다. 점상결정의 규산석회수화물도 선명하게 확인되었다.

사진 I는 혼화재인 프라이애쉬 50%와 첨가재인 시멘트를 각각 5%, 15% 증가함에 따라 입자표면은 Ettringite의 침상결정이 더욱 발달하여 넓게 퍼져있으며, C-S-H 계의 반응생성물도 얇게 펼쳐있음을 확인된다. Ettringite의 침상결정의 발달은 석고(二水石膏 : CaSO₄ · 2H₂O)의 함유량이 프라이애쉬 증가와 더불어 증가하는 것으로 사려된다.

사진 J는 혼화재인 프라이애쉬 50% 함량과 2차첨가재인 시멘트를 각각 5%, 15% 첨가하여 전자와 같이 Ettringite계

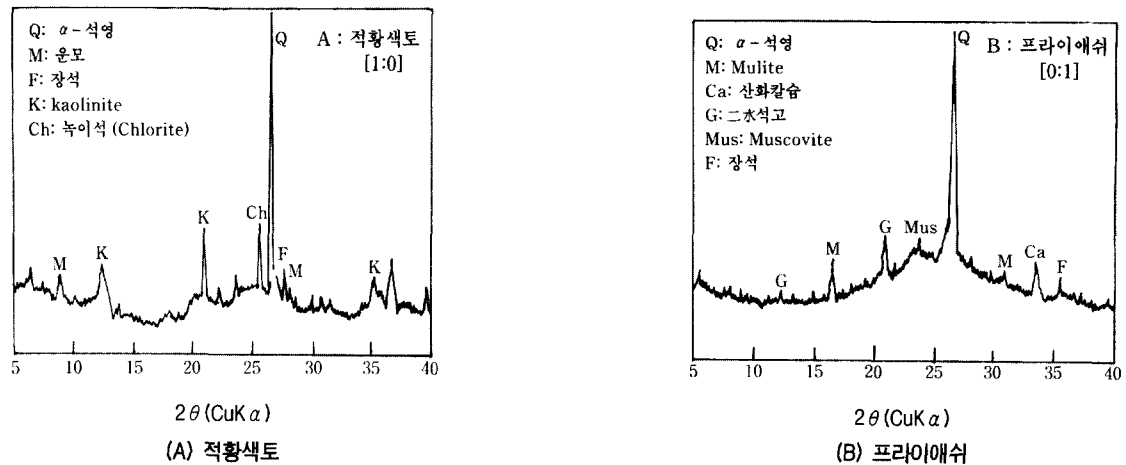


그림 3. 적황색토와 플라이애쉬의 회절도

의 침상결정의 수화반응과 C-S-H계의 Pozzolan 반응의 생성물이 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 이상과 같이 적황색토와 플라이애쉬는 광물조성에서 육각판상의 Kaolinite와 구상입상의 특징적 구조를 나타내고, 적황색토:플라이애쉬의 안정처리는 SEM의 관찰 결과 알민산석회수화물인 Ettringite의 침상결정과 규산석회수화물인 C-S-H계의 결정구조는 각각 수화반응과 Pozzolan 반응의 구조이고, 다짐처리토의 강도발현은 흙과 플라이애쉬 입자 사이에서 밀착 고결화가 반응의 진행에 따라 강화되지만 Pozzolan 반응 생성물이 비교적 적기 때문에 큰 결합력은 얻어지지 않는 것으로 양생일수에 따른 일축압축강도는 그다지 크지 않다. 적황색토와 플라이애쉬 혼합재에 2차 첨가재로서 소석회를 첨가 할 때 C-S-H계 생성의 Pozzolan 반응생성물과 알민산석회수화물의 수화반응과 부차적인 탄산화작용 등이 강도 발현의 요인으로 거론되고 있다(鳥居和之 등, 1986; Kamon, 1991) 등은 사질토와 플라이애쉬(또는 스톨그, 화산회 등) 혼합처리토와 2차 첨가재인 시멘트를 첨가할 때의 Ettringite의 침상결정과 C-S-H계의 반응생성물의 형성도 확인하였으며, 소석회 첨가재에 비해 시멘트 첨가 때의 Ettringite의 침상결정의 구조가 입자표면에 더 많이 형성되어 고결화 효과가 석회첨가에 비해 증대하여 강도 발현에 크게 기여하고 있다고 하였다. 시멘트 화합물 조성이 수화 작용을 하면 그중 알민산석회(C₃A)는 석고(二水石膏)와 결합하여 높은 유산염 형의 알민산유산석회수화물(Ettringite)을 형성한다고 한다. 이것은 자연에 존재하는 Ettringite라 하며 결정형태는 침상결정 구조가 된다(鳥居和之, 1986; Diamind, 1984).

4.5 처리토의 X-선 회절 분석

처리토는 적황색토와 플라이애쉬 그리고 2차 첨가재로서 소석회와 시멘트이며 다짐처리하여 재령 7일과 28일 양생 후의 X-선 회절분석을 한 것이다.

그림 3의 A와 B는 각각 적황색토와 플라이애쉬이다. 적황색토(A)의 주요한 광물질은 α -석영($d\text{\AA}$ 3.34), 운모($d\text{\AA}$ 9.98), 장석($d\text{\AA}$ 4.02) 등이며, 2차 광물인 점토광물은 Kaolinite($d\text{\AA}$ 7.15)와 녹이석[chlorite($d\text{\AA}$ 2.52)] 등이다. 플라이애쉬(B)는 α -석영, 알민산규소[($d\text{\AA}$ 3.38, $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), 일명 Mullite]와 플라이애쉬 중의 산화칼슘($d\text{\AA}$ 2.40, CaO), 二水석고($d\text{\AA}$ 7.56, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Gypsum) 등이 함유되어 있다.

그림 4의 a, b, c, d는 적황색토와 플라이애쉬의 혼합비 1:01 ~ 1:0.5로 재령 7일의 것으로 X선 회절도에서 반응구조는 규산칼슘석회수화물($d\text{\AA}$ 2.37, $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)인 Tobermorite의 회절 봉우리(peak)가 출현하고 있으며, 또한 알민산유산석회수화물($d\text{\AA}$ 3.88, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)인 Ettringite, 유리석회(CaO), 二水석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 등도 출현하여, 플라이애쉬의 혼합비가 증가함에 따라 규산칼슘석회수화물(Pozzolan반응 생성물)의 C-S-H계의 봉우리도 증가하고 있다. 또한 알민산유산석회수화물의 수화반응도 증대하고 있으나, 초기 재령에 있어서는 반응 생성물의 결정성 봉우리도 비교적 낮으나 재령의 진행에 따라 커지고 있다. 二水석고(Gypsum)의 봉우리도 확인되어 이들 결정성 반응구조는 처리토의 강도발현에 영향을 미치고 있으며, 고결화 효과에 있어서는 회절봉우리가 낮은 모양으로 재령증대에 따라 증가하나 비교적 느린

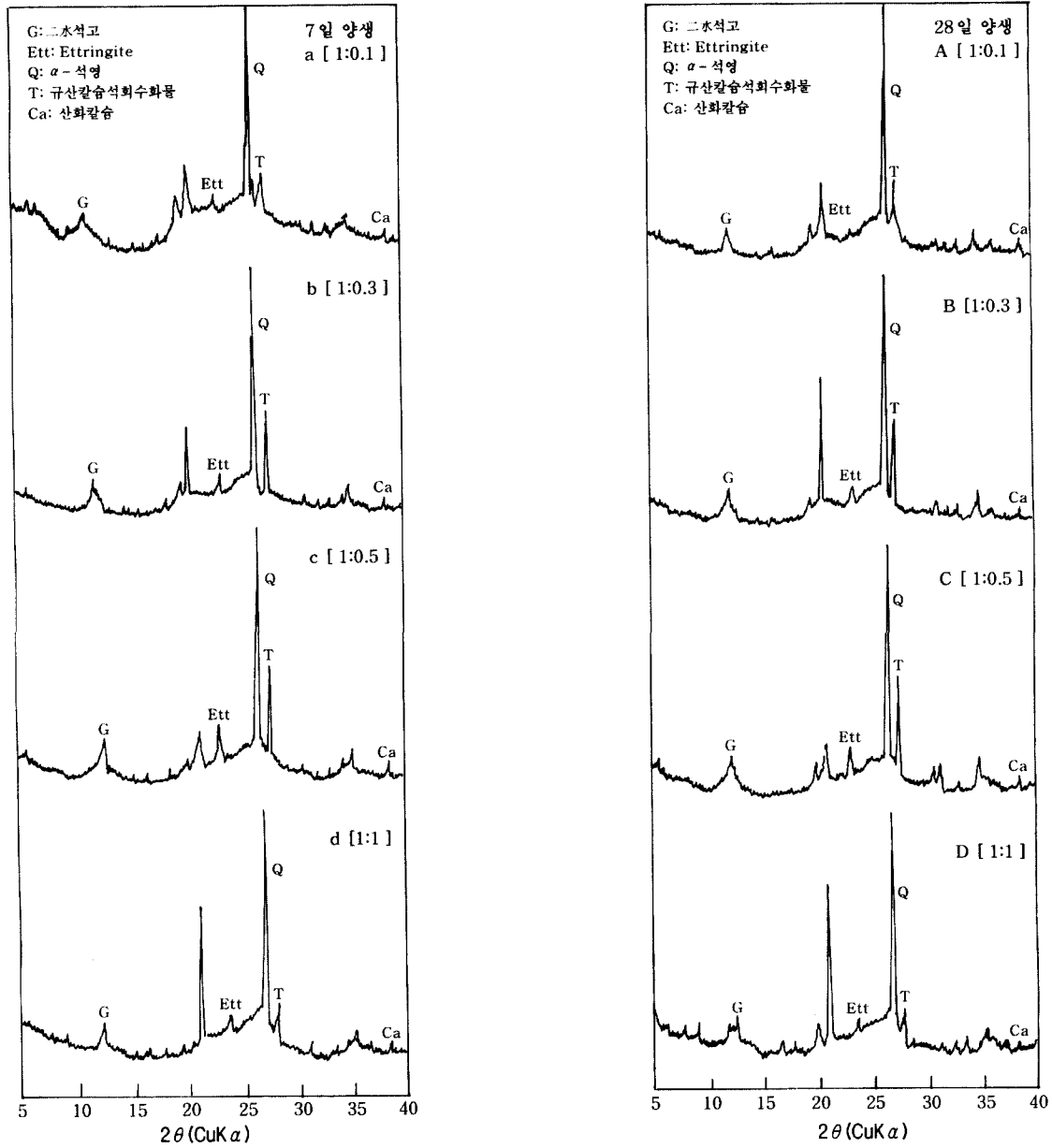


그림 4. 시료토와 프라이애쉬 처리토의 X-선 회절 관계

진행으로 확인되었다.

그림 4의 A, B, C, D는 전술한 처리토의 재령 28일의 것으로 반응구조는 재령증대에 따라 증대하는 경향이나 규산칼슘석회수화물은 프라이애쉬 50%첨가까지는 증가하고 있으며, 알민산유산석회수화물도 점진적으로 증대하고 있고 유리산화칼슘의 결정성 붕우리도 약간 증대하여 장기재령에 의한 강도발현도 증가하고 있음을 확인할 수 있었다. 다짐처리토의 강도발현의 고결화 효과는 C-S-H 계의 Pozzolan 반응생성물과 수화반응의 생성물의 역할이라 생각된다. 따라서, 프라이애쉬는 잠재적 수경성과 응결반응은 시멘트와 본질적으로 같으며, 시멘트 중의 무수

유산(SO₃)은 二水석고에 포함되어 시멘트의 화합물이 가수(加水)하면 알민산석회(C₃A)는 석고와 결합하여 높은 유산염의 알산유산석회수화물(3CaO · Al₂O₃ · 3CaSO₄ · 32H₂O)을 생성하여 침상결정으로 강도발현의 고결화 효과를 발휘한다고 하였다(赤井 등, 昭和62年).

그림 5의 a, b, c, d는 2차 첨가재인 소석회를 첨가한 재령 7일의 것으로 X-선회절도에서 혼화재인 프라이애쉬와 첨가재인 소석회를 각각 5%, 15% 첨가에 따라 규산칼슘석회수화물과 알민산유산석회수화물, 유리산화칼슘 등의 결정성 붕우리도 점차 커지고 있음을 확인할 수 있으며, 소석회 첨가에 따라 탄산칼슘(CaCO₃)의 붕우리도 출현하여

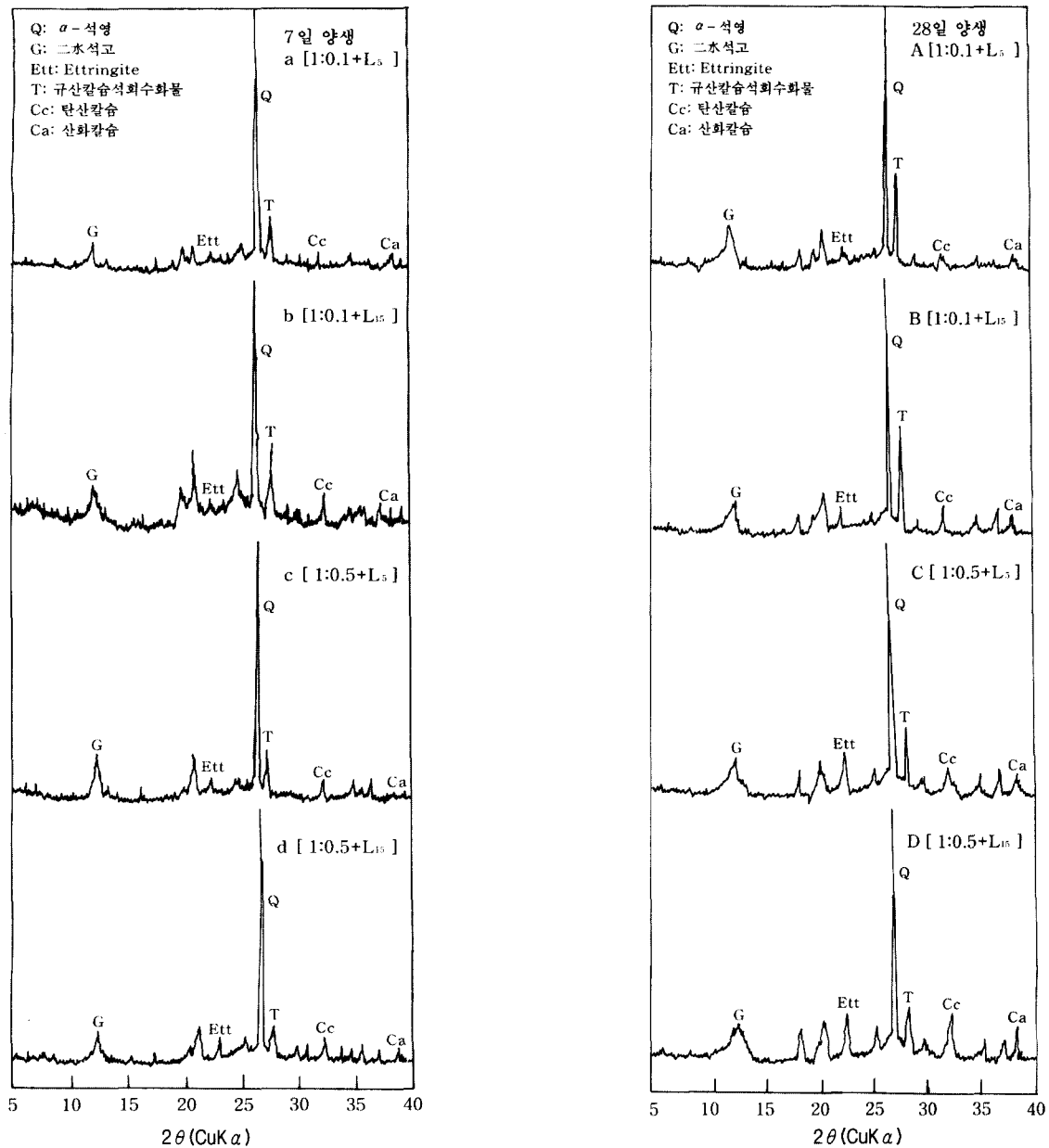


그림 5. 시료토와 프라이애쉬와 소석회 첨가재의 X-선 회절관계

탄산화 반응도 석회 증가에 따라 증대함이 확인되었다. 따라서 이에 상응하여 강도발현도 증대하며 고결화 효과에 기여하고 있다고 본다. 松尾(1979) 등은 프라이애쉬를 첨가한 화강풍화토(Masa토)의 석회 안정처리에서 74 μ 통과 시료토에 석회를 첨가하여 강도를 양생별로 측정된 결과 석회량 증가에 따라 강도가 증가함을 확인하여 이는 처리토의 탄산화 반응의 증가와 강도와의 관계를 보고한 바 있다. 또한 심층 주입액으로 지반개량에 적용한 Bentonite 첨가로 규산석회수화물과 미미한 Ettringite 출현의 실험적 보고도 있다(Joshi 등, 1978).

그림 5의 A, B, C, D는 2차 첨가재인 소석회를 첨가한 재령 28일의 것으로 X-선회절도에서 혼화재인 프라이애쉬와 소석회의 첨가에 따라 규산칼슘석회수화물과 알민산 유산석회수화물, 유리산화칼슘 등의 결정성 붕우리가 장기재령에 있어서 증대하고 있으며, 탄산화 반응의 결정도 증가하고 있음을 확인하였다. 2차 첨가재인 소석회를 첨가했을 때 C-S-H계의 Pozzolan반응과 수화반응의 결정구조가 고결화 효과에 기여하고, 강도 발현도 증대시키고 있음을 알 수 있다. 탄산칼슘의 출현은 사질토에 소석회를 혼합하였을 때 탄산화 반응이 부차적으로 발현되어 강도

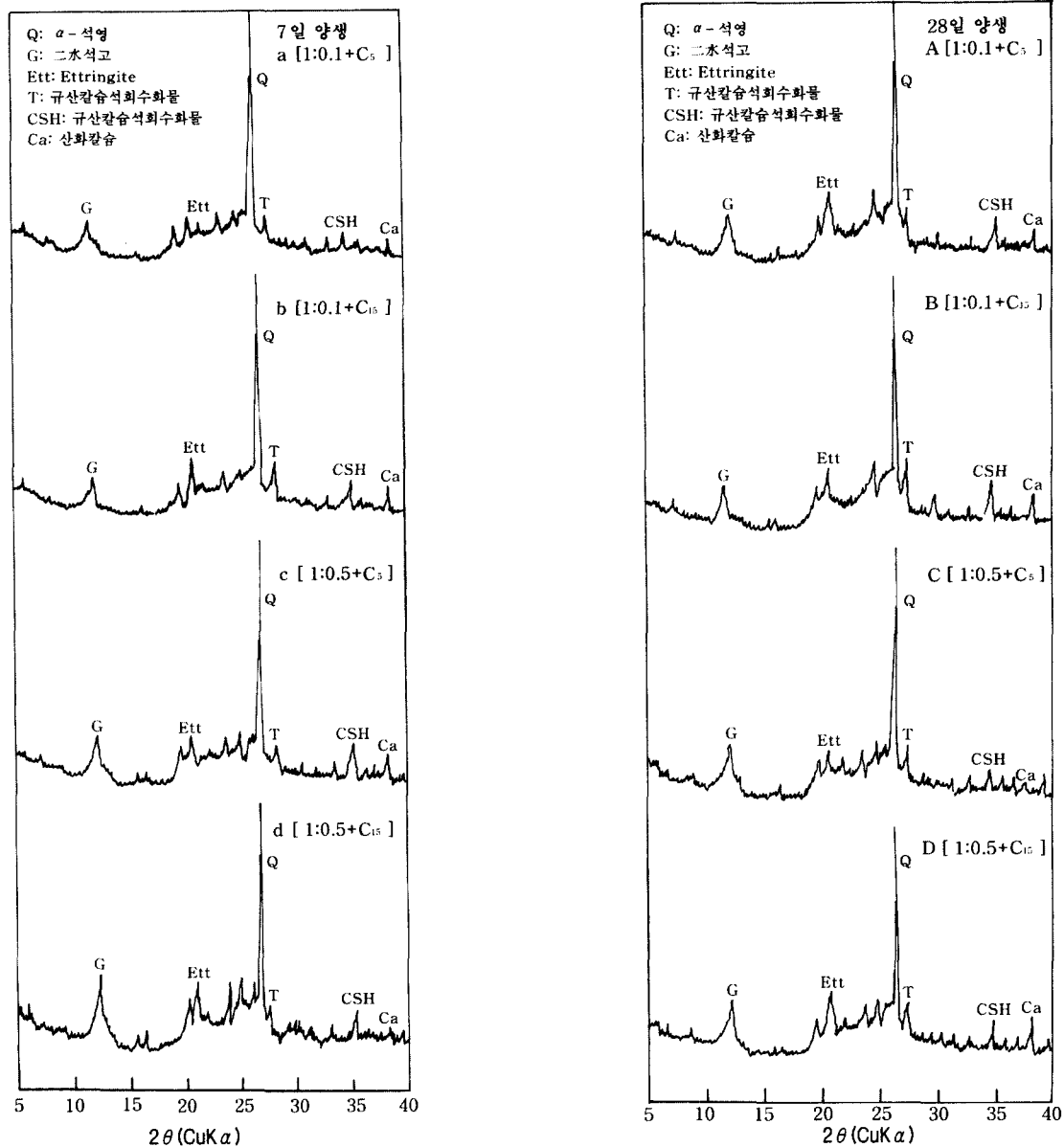


그림 6. 시료토와 프라이애쉬, 시멘트 첨가의 X-선 회절관계

발현에 기여하고 있음을 언급하였으며 탄산화 반응은 다 음 식과 같이 나타내고 있다(松尾 등, 1971).

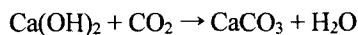


그림 6의 a, b, c, d는 2차 첨가재인 시멘트를 각각 5%, 15% 첨가한 공시체의 재령 7일의 것으로 X-선회절도에서 혼화재인 프라이애쉬와 첨가재인 시멘트의 첨가에 따라 규산칼슘석회수화물의 결정성 붕우리가 초기재령에서 점차 출현하여 증가하나 혼화재 50%이상이 되면 감소하는 경향이다. 알민산유산석회수화물이나 二水석고, 유리 산화칼슘도 증가하는 현상이며 이와 같이 시멘트 첨가의

경우 알민산유산석회수화물의 수화반응으로 장기재령에 있어서 고결화 효과가 현저하여 강도발현이 높아진 것이 라 생각된다.

그림 6의 A, B, C, D는 시멘트를 각각 5%, 15% 첨가한 공시체의 재령 28일의 것으로 회절도에서 프라이애쉬와 첨가재인 시멘트 증가에 따라 장기재령에서는 유산칼슘 석회수화물의 반응생성물은 비교적 붕우리가 낮아지는 경향이고, 알민산유산석회수화물은 점차 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 유리산화칼슘도 증대하여 강도발 현에 큰 영향을 주고 있으며 고결화 효과가 양호함을 알 수 있다. 따라서 처리토의 강도발현도 C-S-H계와는 달리

Ettringite는 시멘트 중의 알민산삼석회의 중요한 생성물이며 석고와 공존하는 경우 시멘트계는 알민산유산석회수화물로 변화하여 결정성도 석회계에 비하여 양호하다고 알려져 있어 강도발현의 고결화 효과가 매우 양호하다는 보고도 있다(Kamon 등, 1991, 赤井 등, 昭和62年).

4.6 다짐처리토의 강도변화

4.6.1 처리토의 양생일수와 일축압축강도와의 관계

적황색토와 프라이애쉬 혼화재 그리고 2차 첨가재인 소석회와 시멘트를 첨가하여 처리토의 양생일수별과 일축압축강도와의 관계를 그림 7에 표시하였다. 대체로 양생일수 증대에 따라 강도 변화는 증가하는 경향이다. 안정 처리를 하지 않은 다짐토에서는 프라이애쉬에 비해 적황색토의 강도 변화는 약간 상회하고 있으며, 시료토의 프라이애쉬 혼화재는 1:0.1~1:1 범위로 프라이애쉬 혼화량 증가에 따라 점차 강도가 증가하고 있다. 또한 소석회나 시멘트 등의 2차 첨가재를 첨가한 1:0.1+L₅~1:0.5+L₁₅와 1:0.1+C₅~1:0.5+C₁₅의 강도 변화를 나타낸 것이다. 이들도 초기재령에서부터 강도발현은 점진적으로 증가하여 장기재령에서 안정화되고 있는 현상이다. 소석회 첨가의 경우에는 Pozzolan 반응의 규산석회수화물의 생성과 알민산유산석회수화물 생성의 수화반응의 결과로 또한 X-선회절 분석에서도 탄산화 반응의 부차적 결정성 반응이 나타나 고결화 효과에 기여하고 있으며, 시멘트 첨가의 경우에도 거의 비슷하게 규산석회수화물과 알민산유산석회수화물의 침상결정의 수화반응이 소석회의 경우보다 더 높은 결정구조로 강도발현은 시멘트의 첨가 폭이 크다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 시멘트의 수화반응 생성물에 의한 입자간의 접착성(Cementation)이 더욱 증대하고

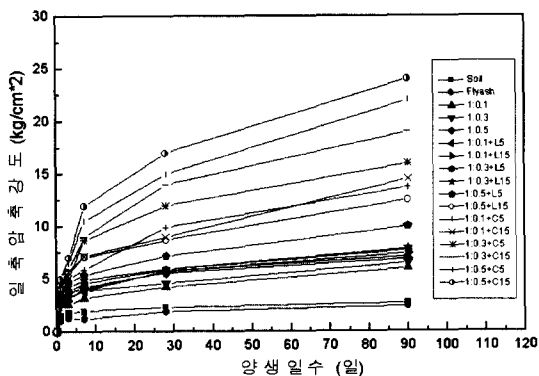


그림 7. 재령에 따른 압축강도의 변화

있음을 알 수 있다. 또한 프라이애쉬의 강도발현은 종류에 따라 다르지만 유리산화칼슘(CaO)의 함유량에 의해 강도 변화가 달라 강도와 산화칼슘이 서로 상호관계가 있음을 알 수 있다.

松尾(1979) 등은 화강풍화토(Masa토)와 같은 사질토에서는 프라이애쉬를 첨가하면 Pozzolan 반응생성과 세립분에 소석회를 첨가하면 탄산화 반응이 부차적으로 생성하여 장기양생에서 강도의 증가가 감소하였다 하며 이는 초기의 탄산화 반응의 증가와 더불어 강도발현의 증가의 효과가 있으나 장기에 있어서는 탄산화반응의 감소가 있었다고 보고 한 바 있다. 시멘트 첨가의 경우 롬-실트에서도 안정재 증가와 더불어 강도가 증가하며 프라이애쉬의 시멘트 첨가는 강도발현에 알민산유산석회수화물의 수화반응이 주된 고결화 효과에 기여하고 있음을 토론했 바 있다(Kamon, 1991).

처리토의 양생일수에 따른 강도-변형율의 변화는 초기 양생에 있어서는 전반적으로 양생일수 증가에 따라 변형율 감소를 보이고 있으며, 시료토와 혼화재인 프라이애쉬, 그리고 2차 첨가재인 소석회, 시멘트 첨가에 따른 변형율은 6%정도 감소 범위이고 첨가재로 처리했을 때는 양생일수증가에 따라 1~2% 범위로 적어졌다. 이는 앞서 언급한 조밀성과 접착성 등 고결화 효과가 높아졌다는 것을 의미한다. 석회첨가의 경우는 Pozzolan 반응생성물이나 탄산화작용의 성향이고, 시멘트첨가의 경우에는 수화반응과 Pozzolan 반응생성물의 영향이 전자에 비해 후자가 더 큰 고결화 효과에 기여한 것이라 본다.

4.6.2 회절 X-선 강도와 일축압축강도의 변화

회절 X-선 강도(CPS)는 회절상(像)의 면적(적분면적)을 측정하는 방법으로 그림 3~그림 6에서와 같다. 처리토

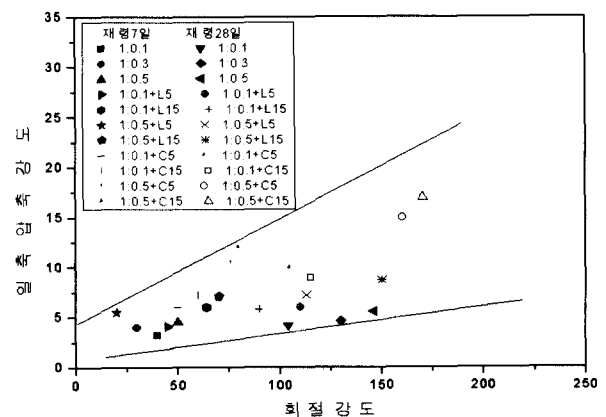
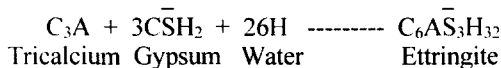


그림 8. 처리토의 Ettringite 회절X-선 강도와 일축압축강도와의 변화

의 재령 7일과 28일의 X-선 회절도에서 수화반응생성물의 변화를 나타내는 X-선 회절봉우리의 높이와 폭의 반값의 곱으로 표시하는 일종의 결정강도이다. 그림 8은 처리토인 적황색토와 프라이애쉬의 혼합토, 그리고 2차 첨가재인 소석회 및 시멘트를 첨가한 처리토의 첨가비, 재령별의 반응에 의한 생성물의 회절 X-선 강도의 변화를 추적하였다. 추적한 결과 처리토는 혼합비, 첨가비와 재령증대에 따라 Ettringite(d:9.7Å 또는 3.88Å)의 반응생성의 변화를 확인한 것이다. 그림과 같이 시료토와 프라이애쉬의 혼합비의 증가와 재령 증대와 더불어 Ettringite의 X-선 봉우리가 출현하여 점차로 커지고 2차로 첨가한 소석회와 시멘트의 처리토는 전자에 비해서 후자의 결정강도의 봉우리가 약간 크게 나타나고 있어 결정강도의 증가를 보이고 있다. 이는 소석회 첨가에 비해 시멘트 첨가의 경우가 결정강도가 크기 때문이다. 따라서 처리토의 혼합비 또는 재령별의 일축압축강도의 증가는 Ettringite의 실질적인 고결화 효과와 대체로 상관이 있음을 추측할 수 있다.

처리토에서 얻어진 일축압축강도와 시료토의 Ettringite의 회절 X-선 강도 (Diffraction Intensity)의 상관성을 지적한 바도 있었고 Ettringite의 형성은 화합물 조성이 수화반응을 하면 알민산석회는 석고와 결합하여 알민산유산석회수화물로 되며 다음과 같이 화학식으로 표시하고 있다 (Kamon,1991).



그 밖에 처리토의 반응생성은 Tobermorite, Band산 석회수화물 [(4CaO · Al₂O₃ · 13(H₂O)], 가수 gehlenite(2CaO · SiO₂ · Al₂O₃ · 8H₂O) 등 Pozzolan 반응 생성물 즉, 석회수화생성물의 생성도 고결화 효과에 기여하고 있음도 거론되었다.

알민산유산석회수화물은 더욱 높은 유산염 형으로 석회 및 석고의 농도가 높은 것을 의미한다. 또한 화학 조성식에서와 같이 1분자 중에 45% 정도의 결정수를 흡입하고 있어, 연약지반의 안정 처리에 있어서 주로 함수비 저하의 역할에 효과 있는 반응 생성물이라 한다. SEM분석에 의해 동정(同定)이 가능하며 그 결정 형태는 Ettringite가 침상결정(針狀結晶)을 형성함으로 전자 현미경 관찰에서도 판별 할 수 있게 되었다 (赤井 등, 昭和62年).

5. 결론

프라이애쉬의 건설재료로서의 유효성에 대해서는 화학조성, 물리적 성질 및 인공Pozzolan 재 등의 성능이 개발되어 많은 분야에서 그 이용도가 다양화되었다. 또한 토질안정재로서 결정성 구조의 반응과 강도발현에 관해서도 많은 연구와 실용화가 되고 있다. 적황색토와 프라이애쉬 처리토의 본 연구에서 얻어진 반응 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 적황색토와 프라이애쉬의 혼합비를 증가에 따라 건조 밀도는 증가해 가며 최적함수비는 감소하는 경향이고 소석회나 시멘트 첨가에 의해 건조밀도도 증가를 보이거나 경량화 범위는 혼합비 1:0.3 ~ 1:0.5 정도이다.
- (2) 적황색토와 프라이애쉬의 혼합비를 및 재령이 증가하여도 프라이애쉬의 고유산화칼슘(CaO)의 함유량이 적을 때에는 유리산화칼슘의 증가도 크지 않으며, 2차 첨가재인 소석회 및 시멘트 첨가에 따라 유리산화칼슘이 크게 증가함은 산화칼슘의 반응생성물인 규산질석회수화물의 고결화 작용이 주된 반응으로 보이며 2차 첨가재에 의한 반응생성도 강도발현의 증가에 기여하고 있음을 알 수 있었다.
- (3) 확인 된 알민산유산석회수화물(Ettringite)의 결정강도 (CPS) 변화는 비교적 적으나 소석회와 시멘트 첨가에 의한 수화 및 Pozzolan반응이 점차 증가 해가며, 이에 상응한 일축압축강도도 증가를 보여 결정강도와는 대체로 상관이 있음을 추측할 수 있었다.

참고문헌

1. 박은영, 조삼덕, 홍성완, 김중학(1992), "국내 석탄회의 안정처리재 혼합연구" 대한토목학회 학술 발표회 개요집, pp. 515~518.
2. 정두영, 이광준(1996), "적황색토화 한 화강암질 풍화잔적토의 화학적 풍화특성에 관한 연구", 한국지반공학회지, Vol 12, No.4, pp. 115~129.
3. 천병식, 고용일(1995), "석탄재의 건설재료로서의 활용에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제11권, 제2호, pp. 99~106.
4. 松尾, 宋 (1971), "縮固め土の構造と工學的性質の相關性に関する微視的研究", 土木學會論文集, No.189, pp. 63~77.
5. 松尾, ほか(1979), "フライワッシュを添加したマサ土の石灰安定處理について", 第34回年次學術講演會集, 土木學會, pp. 167~168.
6. 片岡哲之, 緒方信英(1997), "貯藏石灰灰化學・強度特性(2~3), 日本第32回地盤工學研究發表會, pp. 327~328.
7. 鳥居和之, ほか(1986), "縮め固れた石灰灰における反應生成物と強度に関する基礎的研究", 日本土木學會論文集 第372号/V-5,

pp. 65~74.

8. 經部, 朴洪 ほか(平成8年), “建設残土と石炭灰を用いた流動化處理土の有効利用に関する研究”, 第31回地盤工學研究發表會, 地盤工學會, pp. 193~194.
9. 堀内 ほか(1997), “發生土および廢棄物の地盤工學的處理と有効利用”, 日本地盤工學會, 土と基礎, 45-6(473), pp. 55~60.
10. 赤井, 嘉門 ほか(昭和62年), “各種廢棄物のセメント系固化による有効利用について”, 京都大學土木工學教室論文, pp. 11~18.
11. 鳥居和之, 川村滿紀(1989), “路盤・盛土材料としての締め固めたフライワッシュ”, 日本地盤工學會, 土と基礎, 37-2(373), pp. 64~69.
12. Carlos Oteo Mazo (1994), “Behavior of Flyash in Experimental Embankments”, XIII ICSMFE, New Delhi, India, pp. 1603~1606.
13. Chain J. Poran and Faouzi Ahtchi-ali (1989), “ Properties of Waste Incinerator Flyash”, Journal of Geotech Engineering, ASCE, Vol 115, No.8, pp. 1118~1133.
14. DAVE T.T, CHANG, W.H.PERN, C.C HUANG(1990), “ The Study Of Fly Ash Stabilization On Laterite Soil in Taiwan”, Tenth Southeast Asian Geotechnical Conference, 16-20 April, pp. 41~46.
15. Diamond. S (1984), “The Utilization of Flyash”, Cement and Concrete Research, Vol.14, No.4, pp. 455~462.
16. Donald H. Gray and Yen-Kuang Lin (1972), “Engineering Properties of Compacted Flyash”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, pp. 361~380.
17. Edil R.B, Faul M, Berchouex.M and Kevin D, Vesperman, ASCE (1987), “Flyash as a Potential Waste Liner”, American Society for Testing and Materials, STP 876, pp. 447~463.
18. Joshi, R.C and Ward, M.A (1980), “ Cementations Flyashes-Structural and Hydration Mechanism”, Proc. of 7th Int. Congress On The Chemistry of Cement, pp. 78~83.
19. Masashi Kamon, and Supakij Nontananandh (1991), “ Combining Industrial Wastes With Lime For Soil Stabilization” ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vo.117, No.1, pp. 1~17.
20. R.C. Joshi, G.S. Natt and P.J. Wright (1978), “Soil Improvement by Lime-Flyash Slurry Interaction”, Proc. SSRSTEP, Sidney Australia, pp. 707~712.
21. Tuncer B. Edil, Linda K. Sandstorm and P.M. Berthouex(1992), “Interaction of Inorganic leachate With Compacted Pozzolanic Flyash”, Journal of Geotech Engineering, ASCE. Vol 118, No.9, pp. 1410~1430.

(접수일자 2000. 9. 26)