

# 石炭灰의 反復載荷에 의한 變形特性

## Deformation Characteristics of Coal Ash due to Repeated Compressive Loading

千 柄 植\* · 朴 興 奎\*\*  
Chun, Byung Sik Park, Heung Gyu

### Abstract

In order to utilize coal ash, which we go to great expense to scrap, as subbase course material, this study attempts to examine the deformation characteristics of coal ash with the addition of some cement when repeated loads are applied. The material of coal ash is obtained from Young dong and Youngwol thermal power plant.

The results are : Unconfined compression strength shows rectilinear increase in proportion to the cement addition ratio.

Within the scope of repeated loads of experimental condition, modulus of elasticity tends to decrease while compression strength shows about 21% increase.

### 要 旨

本研究는 集中大量으로 副産되어 막대한 經費를 들여 廢棄처리 되고 있는 石炭灰를 道路路盤材로서 활용하고자 시멘트를 添加하여 反復荷重을 가하였을 때의 變形特性에 대해서 嶺東火力發電所와 寧越 火力發電所에서 發生되는 石炭灰를 대상으로 檢討한 것이다.

石炭灰에 시멘트 添加率이 增加할 수록 一軸壓縮強度는 直線으로 增加하였고, 시험 조건인 載荷回數에서는 彈性係數가 감소하였으며, 壓縮強度는 약 21% 정도의 증가를 보였다.

%를 차지할 전망이다.

현재 국내 화력발전소에서 鑛廢棄物로 副産되는 石炭灰는 연간 약 200만톤이며, 2001년에는 500만톤 이상으로 증가될 전망<sup>(1)</sup>으로 이의 처리 문제가 심각한 당면 과제로 대두 되었다.

석탄의 에너지 자원으로서의 사용은 公害, 地下水汚染, 輸送 및 石炭灰의 處理 등 여러 가지 제약이 따르지만 그 중에서도 막대한 양의 石炭灰 處

### 1. 序 論

전력 에너지의 수요가 크게 증가하고 세계 각국의 에너지 무기화 경향으로 인해 석탄은 국내 유일한 실용 에너지 자원으로서 비교적 저렴하게 수입되고 있는 중공산 有煙炭과 함께 경제성 있는 脫油代替에너지 資源으로 점 점 더 큰 비중을 차지하여 2000년에는 우리나라 전체 발전량의 약 45

\* 正會員 · 漢陽大學校 工學大學 教授 土木工學科

\*\* 正會員 · 漢陽大學校 大學院 博士課程

리는 급선무로 되어 있다. 현재 우리 나라에서의 처리 방법은 飛灰(Fly ash)와 底灰(Bottom ash)의 구별 없이 발전소 주위 또는 해안 근처 유흥지에 커다란 제방(灰捨場)을 축조 후에 海水 또는 淡水와 혼합되어져 沈澱處理되고 있으며, 시멘트 등에 사용키 위해 별도로 장치된 싸이로에서 채집된 飛灰는 시멘트의 주성분인 Silica가 절반 이상 차지하여 수산화 칼슘과 반응하여 시멘트와 같은 화합물을 형성하므로 시멘트 혼화제로 사용되고 있다.

한 편, 石炭灰의 처리 및 활용에 대한 외국의 연구개발사례<sup>(2-10)</sup>를 살펴 보면, 각 국의 국토 여건에 따라 다소 차이는 있지만 대략 50% 이상을 유용하게 활용하고 있으며, 이용 용도별로 구분하여 보면 시멘트분야, 골재분야, 건축분야, 토공사분야, 농업, 수산분야, 기타분야 등 다각적으로 연구개발되어 활용되고 있다. 특히, 미국, 서독, 영국, 프랑스, 핀란드, 일본등에서는 활용량의 50% 이상을 콘크리트 混和材와 道路路盤材 및 埋立·盛土立材로의 이용이 주종을 이루고 있다.

한 편, 우리 나라는 아직 石炭灰의 建設材料로서의 활용을 위한 본격적 연구는 없는 것으로 보인다. 그러나 필자등<sup>(1)</sup>의 기초실험에 의하면, 石炭灰는 투수성, 전단강도, C. B. R 및 압밀특성등이 동일 입경의 일반흙에 비해 유리한 토질공학작 특성을 갖

고 있음을 알 수 있으며 더욱 自硬性이 있어서 시간이 경과함에 따라 강도 증가가 있어 건설공사에서 盛土, 埋立, 道路路盤材로서의 활용가능성이 예상된다. 本研究에서는 集中大量으로 副産되어 막대한 經費를 들여 폐기처리되고 있는 石炭灰를 路盤材 등의 建設材料로서의 活用性에 대한 검토 목적으로 嶺東地方에 위치한 嶺東火力發電所와 寧越火力發電所의 石炭灰(飛灰와 混合灰)에 시멘트를 添加하여 재령에 따른 압축강도시험을 행하여 강도의 변화를 조사하였다. 또한 개량후에 작용하는 교통하중등의 영향을 검토하기 위해 시멘트를 添加한 處理土(供試體)에 反復荷重을 가하였을 때 생기는 殘留變形 및 彈性變形 그리고 反復載荷後 一軸壓縮試驗을 行하여 應力—變形率關係等을 구하였으며, 여기에 미치는 反復回數와 反復荷重 등에 대해서 검토하였다.

## 2. 實驗概要

### 2.1 試料土

試料土의 採取場所는 嶺東地方에 위치한 無煙炭發電所인 嶺東火力發電所와 寧越火力發電所이며, 石炭灰는 粉碎된 底灰가 각 海水 및 淡水와 混合되어 灰捨場에 沈澱處理되는 混合灰(Mixed ash)와 시멘트 등에 사용키 위해 별도로 장치된 싸이로에서

표 1. Chemical analysis of coal ash.

Coal ash type / Test item	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	BiO (%)	SO <sub>2</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Ig.Loss (%)	Sum (%)
Fly ash(영동)	53.39	25.59	0.97	0.18	8.30	0.64	0.63	0.29	0.09	0.02	3.82	5.30	99.22
Mixed ash(“)	57.47	24.40	1.03	0.16	9.14	0.75	0.89	0.81	0.08	0.01	3.48	1.00	99.20
Fly ash(영월)	54.23	24.14	1.13	0.15	7.41	0.86	1.22	0.32	0.09	0.01	3.39	6.00	98.95
Mixed ash(“)	55.90	24.17	1.11	0.11	7.77	1.01	1.34	0.34	0.08	0.01	3.28	3.90	99.02

표 2. Physical properties of coal ash.

Coal ash type / Test item	Specific gravity	Atterberg Limit			O. M. C (%)	γ <sub>max</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Classification of Soil
		W <sub>L</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)			
Fly ash(영동)	2.33	N.P	N.P	N.P	23.8	1.567	ML
Mixed ash(“)	2.27	N.P	N.P	N.P	24.9	1.420	SC
Fly ash(영월)	2.30	N.P	N.P	N.P	21.6	1.393	ML
Mixed ash(“)	2.24	N.P	N.P	N.P	22.1	1.374	SM

표 3. Physical properties of cement

Properties	Specific Gravity	Fineness(cm <sup>2</sup> /g)	Setting		Stability(%)
			the first(min)	end(hr)	
Cement	3.12	2.920	135	5.05	0.21

Properties	Compression Strength(kg/cm <sup>2</sup> )			Tension Strength(kg/cm <sup>2</sup> )		
	3days	7days	28days	3days	7days	28days
Cement	135	192	260	14	29	33

표 4. Chemical analysis of cement and lime

	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO(%)	MgO(%)	SO <sub>3</sub> (%)	Ig. Loss(%)
Cement	21.4	5.4	3.4	63.4	3.4	1.5	0.6
Lime	1.09	0.74	0.15	72.6	0.84	-	24.7

채집된 飛灰(Fly ash) 뿐 이어서 이 두 종류를 試驗對象으로 하였다. 순수 底灰(Bottom ash)는 發電所 施設關係로 排出되고 있지 않았다. 飛灰는 집진기에서, 混合灰는 灰捨場에서 채취하였으며, 試料土의 化學的 成分 및 物理的 性質은 표-1, 2와 같다.

또한 사용된 시멘트는 국내에서 生産되는 포틀랜드 시멘트로서 그 化學的 成分 및 物理的 性質은 표-3, 표-4 와 같다.

2.2 試驗方法

採取된 飛灰와 混合灰에 시멘트를 각 0, 3, 6, 9, 12%로 添加하여 A-1 다짐시험을 하여 最適含水比와 最大乾燥密度를 구하고 이와 동일한 밀도의 供試體를 제작하기 위해 직경 50mm, 높이 125mm의 원통형 몰드내에 넣고 상하프를 油壓채크로 압축하여 밀도가 균일하게 되도록 하고 시료의 종류에 따라 3, 7, 14, 28일 濕潤養生하여 一軸壓縮強度試驗을 하였다. 그리고 反復荷重에 의한 變形의 영향을 調査하기 위하여 공시체를 20±1 °C의 항온항습실에서 7일간 양생시킨 후, 공시체에 反復 載荷應力( $\sigma_r$ )을  $\sigma_r=0.51\text{kg/cm}^2, 1.27\text{kg/cm}^2, 1.78\text{kg/cm}^2$ 으로 하고  $1 \times 10^3, 1 \times 10^4, 1 \times 10^5, 3 \times 10^5$ 회 載荷한 공시체에 變形制御方式로 靜的 一軸壓縮試驗을 행하였다. 그리고 反復載荷중에 측정된 縱방향 變형으로 부터 殘留變形 및 彈性變形을 구했다.

반복하중 일축압축시험에 사용한 시험기<sup>(1)</sup>는, 사진-1과 같으며, 1회의 載荷時間은 0.75sec, 除荷時間은 0.85sec이고, 1cycle time은 1.60sec이다. 反復載荷中の 應力, 變位 및 時間과의 關係는 그림-1과 같다.

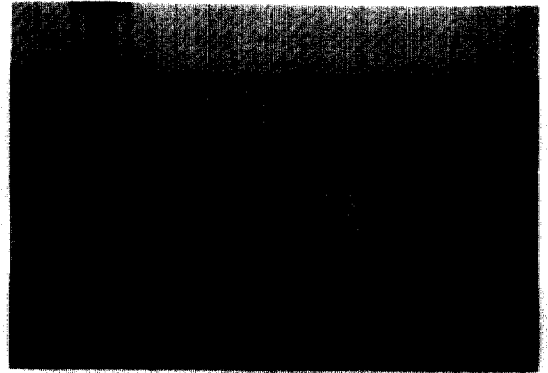


사진 1. Mechanical unconfined repeated loading machine

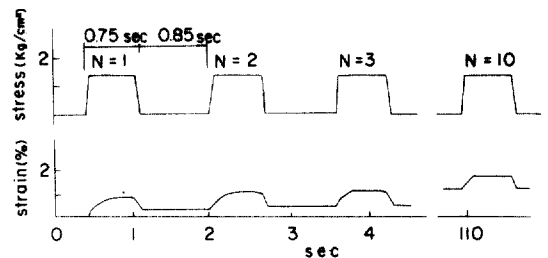


그림 1. Relationship between repeated stress and strain

### 3. 試驗果木 및 分析

#### 3.1 시멘트의 量과 壓縮強度와의 關係

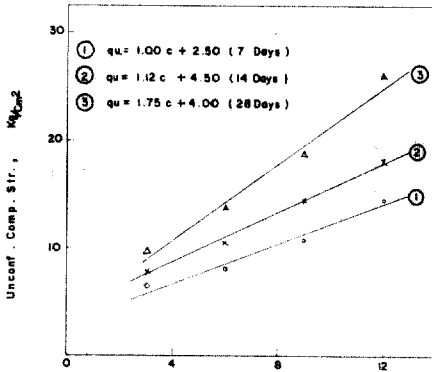
飛灰는 人工的 포조란(pozzolan)이며, 大部分의 粒狀이 球狀이고,  $glass(3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2)$ 의 形態로 존재하고 있으므로 물의 存在狀態에서  $Ca(OH)_2$ 와 和合하는 性質을 가지고 있어 不溶性 Silica質 化合物( $CaO-SiO_2-Al_2O_3 \cdot nH_2O$ )로 硬化하는 Gel狀을 多量 生成한다.

또한 시멘트와 混合할 경우 포조란 反應은 시멘트의 水和에 따라서 發生하는 칼슘( $Ca^{2+}$ )과 灰에서 溶出된  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$ 가 反應해서 칼슘실리카水和物(CSH)과 칼슘 아루미나 수화물(CAH)을 生成하

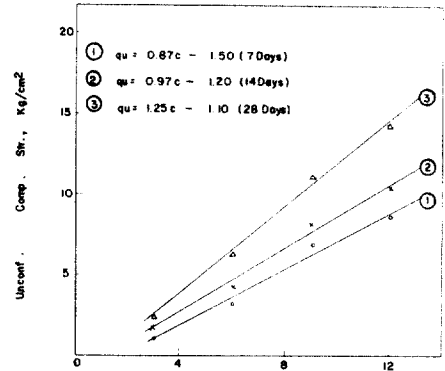
며 石炭灰의 工學的 性質이 改善된다. 즉, 시멘트의 水和時에 剩餘發生하는 遊離된 칼슘과 石炭灰의 포조란 反應때문에 칼슘은 나트륨등 다른 遊離質로 體內고정되기 때문에 안정하게 되며, 치밀하게 高착된다.<sup>(12)</sup>

그림-2는 本 研究에 사용된 石炭灰에 대한 시멘트 添加率(AC)에 따른 壓縮強度의 變化를 養生 期間別로 나타낸 것으로 시멘트 添加量의 增加에 따라 壓縮強度는 거의 直線關係로 增大되었다.

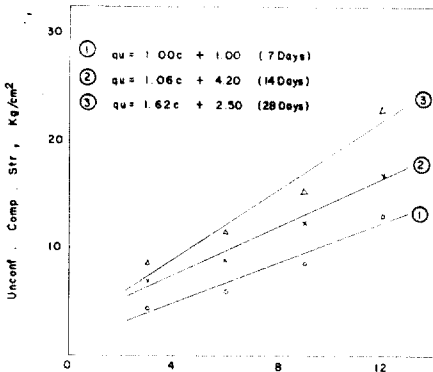
後勝 茂<sup>(13)</sup>는 石炭灰에 시멘트 添加率을 2%에서 10%로 增加 하였을 때 6.6배의 強度 증가가 나타남을 보고한 바 있다.



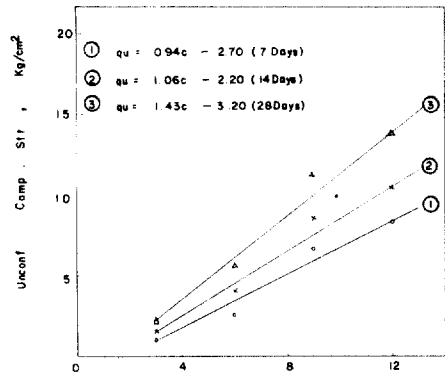
(a) Fly ash (영동)



(b) Mixed ash (영등)



(a) Fly ash (영월)



(b) Mixed ash (영월)

그림 2. Relationship between cement content and unconfined compressive strength of coal ash

### 3.2 養生日數와 壓縮強度와의 關係.

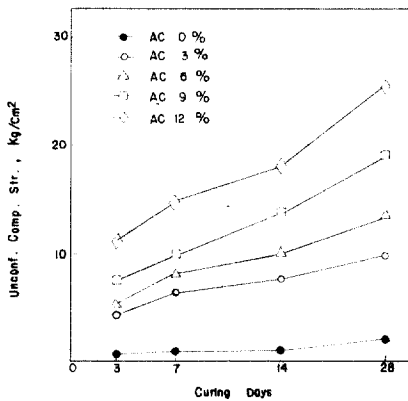
그림-3은 使用試料에 對한 표준양생을 하였을 때의 양생일수와 압축강도와의 關係를 시멘트 添加率 別로 나타낸 것이다.

養生日數가 7, 14, 28일로 경과할 수록 압축강도는 점차로 증가하였다. 嶺東火力의 飛灰(Fly ash)는 28日 양생하였을 때 無處理灰에서 압축강도가 1.37kg/cm<sup>2</sup>이었으나, 시멘트 添加率(AC) 12%에서 26.20kg/cm<sup>2</sup>로 나타나 19배가 增加하였으며, 混合灰에서는 공시체 성형이 안되어 精確하게 比較 할 수 는 없으나 시멘트 添加率 3%인 경우에 比較 7.5배의 강도증가를 보였다. 寧越火力 石炭灰는 嶺東火力 石炭灰 보다 강도는 약간 작지만 거의 같은 경

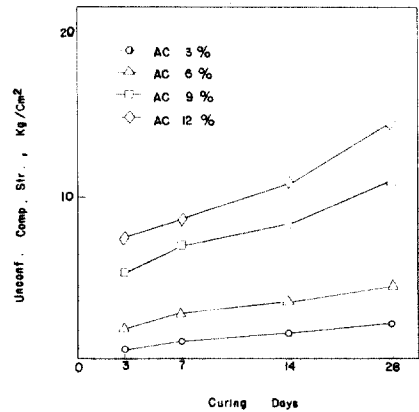
향의 증가를 보였다.

Tsonis<sup>(3)</sup>는 粘土-石炭灰-시멘트 혼합물에 28일 양생에 있어서 시멘트 添加率(粘土와 石炭灰의 건조중량에 對한비)이 22%에서 52%로 증가하였을 때 3.2배의 강도증가를 보였으나 7일 강도 증가는 5%였음을 밝힌 바 있다.

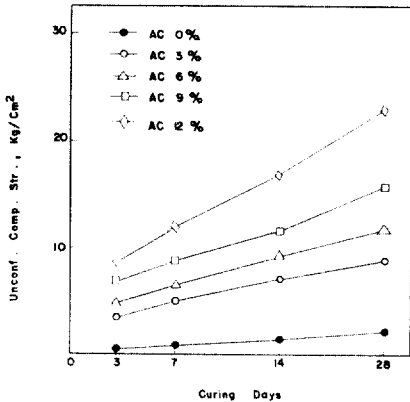
石炭灰를 路盤材로 利用할 경우 車輛荷重을 지지할 수 있는 강도 20kg/cm<sup>2</sup>를 얻기 위하여는 施工後 많은 시일의 양생이 필요하다. 따라서 Soil-Cement 안정처리를 하였을 때 難點으로 지적된 것처럼<sup>(4)</sup> 石炭灰에서도 早期強度 增大와 Cement 添加量으로 부터 發生되는 收縮龜裂을 줄이는 문제에 對해 더욱 연구하여야 할 과제이다.



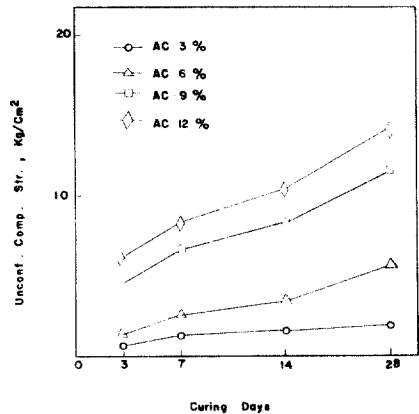
(a) Fly ash (嶺東)



(b) Mixed ash (嶺東)



(a) Fly ash (寧越)



(b) Mixed ash (寧越)

그림 3. Relationship between curing days and unconfined compressive strength of coal ash

### 3.3 反復荷重을 받는 石炭灰의 變形.

石炭灰에 시멘트를 0, 3, 6, 9, 12% 添加한 시료에 대해서 반복재하를 행하여 殘留變形率의 변화를 나타내면 그림-4와 같다.

전반적으로, 사용한 시료는 반복횟수가 많을수록 殘留變形은 증가하였으며, 특히 無處理灰에서 크게 증가하였다.

반복재하응력( $\sigma_r$ ) = 1.27 kg/cm<sup>2</sup> 일 때 嶺東火力 飛

灰(Fly ash)는 250회의 반복재하에서 殘留變形率( $\epsilon$ )은 2.30%에 달하고 파괴되었으나 시멘트 添加率(AC) 12%에서는  $3 \times 10^3$ 회 재하하였을 때 殘留變形率이 0.17%에서 0.31%로 증가하였다. 寧越火力 飛灰는 500회의 반복재하로 2.80%에 달하고 파괴되었다.

混合灰에서 無處理試料의 공시체가 성형이 안되어 정확한 비교는 할 수 없었지만 飛灰처럼 재

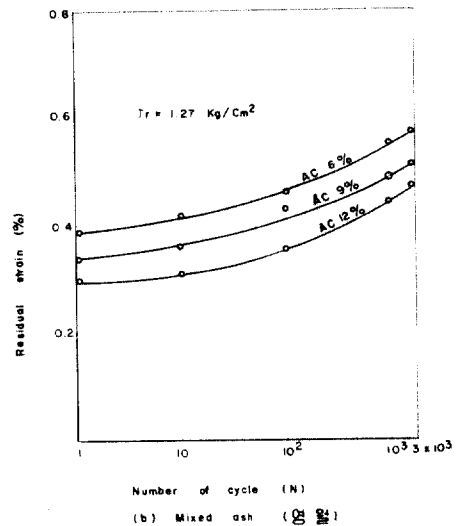
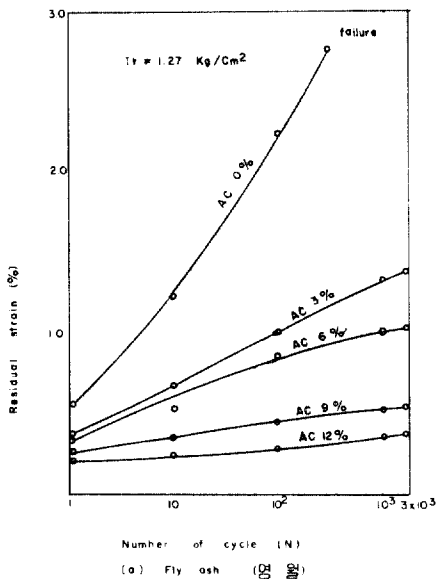
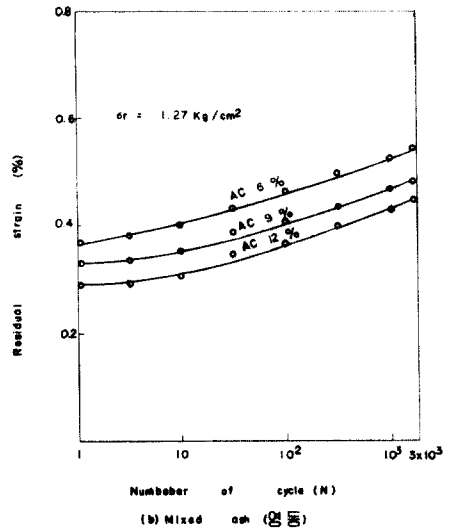
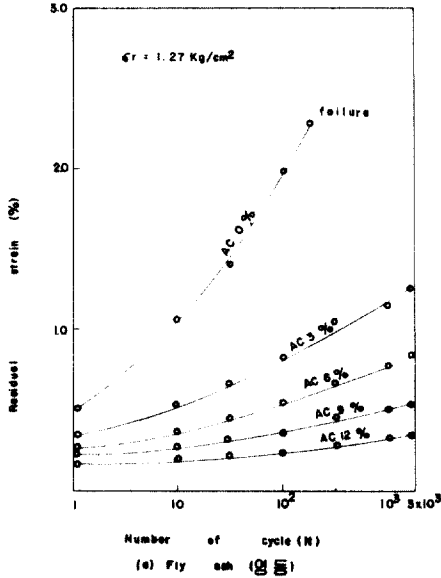


그림 4. Relationship between number of cycle and residual strain

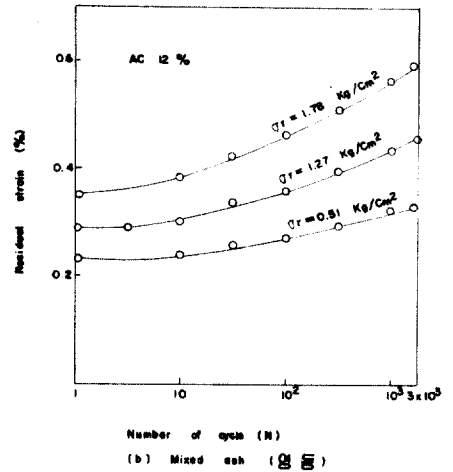
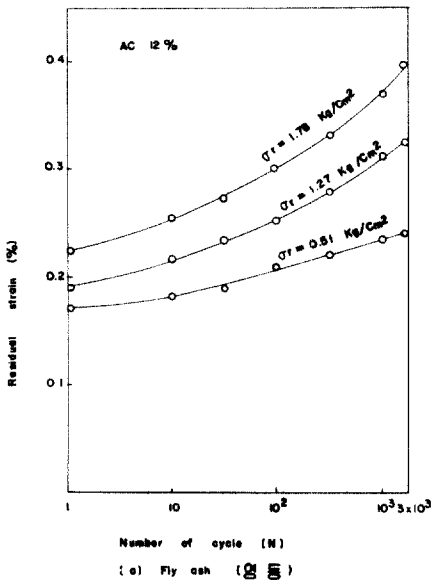


그림 5. Relationship between number of cycle, residual strain and applied stress

하횟수에 따라 잔류변형율이 증가하였고 그 변화 정도는 작았다. 粘性土와 Soil-Cement에 대해서는 이미 검토된 것 처럼 필자등<sup>(11)(15)</sup>은 실트질 로움에 반복재하응력  $\sigma_r=1.27\text{kg/cm}^2$ 으로  $1 \times 10^5$ 회 반복재하 하였을 때 잔류변형율이 0.45%에서 2.40%로 크게 증가하였다. 또한 점성토 Soil-Cement에서 반복재하응력  $\sigma_r=5.09\text{kg/cm}^2$ 으로  $1 \times 10^5$ 회 반복재하 하였을 때 잔류변형율이 0.01%에서 0.10%로 증가하였다.

河上房義<sup>(16)</sup>는 로움시료에 재하횟수가  $1 \times 10^4$ 회에서 잔류변형<sup>(17)</sup>이 현저히 나타났다고 하였고, Raymond는 Leda Clay에  $\sigma_3=35\text{KPa}$ 로 주었을 때  $1 \times 10^5$ 회에서 변형이 현저한 변화를 보였다. 柳場重正 등<sup>(18)</sup>은 시멘트량 73%의 Soil-Cement에 대해 高應力이 가해짐에 따라서 증가하였으며, 재하횟수가 많을수록 이 경향이 현저하였다.

시멘트處理 효과가 가장 큰 嶺東火力 石炭灰의 시멘트 添加率 12%에 대해 검토한 결과, 그림-5는 재하횟수(N)와 잔류변형율( $\epsilon$ )과의 관계를 반복재하응력( $\sigma_r$ )별로 나타냈다.

강도가 다르기 때문에 各應力條件에 있어서 飛灰와 混合灰의 잔류변형의 증가 경향에 대해서 엄밀한 비교는 할 수 없지만, 모든 반복횟수에 있어

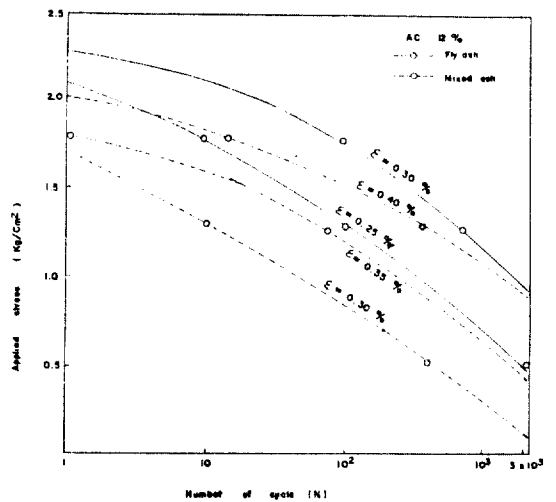


그림 6. The limit of applied stress in connection with strain

서 混合灰의 쪽이 飛灰보다 상당히 큰 잔류변형을 나타냈으며, 高應力이 됨에 따라서 잔류변형율의 증가도 크게 되고 있다.

잔류변형율, 반복재하횟수 및 반복응력도의 관계를 나타낸 그림-5에서 시료토에 소정의 잔류변형율이 생기는 應力度를 구하여 이것과 재하횟수와 의 관계를 나타내면 그림-6과 같은 곡선이 된다. 여기서 어느 土質 構造物의 부분에 許容된 最大殘留變形을 規定하면 그 構造物의 材料로 사용한 흙

에 대해서 그림-6과 같은 관계도에서 어느 재하 횟수에 대한 許容反復應力度를 구할 수 있다.

이와 같이 석탄회가 노반재로서 사용되었을 경우를 고려하면 어떤 반복횟수에 있어서도 잔류변형율에서 處理灰는 非處理灰보다 상당히 적었으며, 이것은 處理土가 실제 노반에서 殘留沈下量이 적게 되는 것을 의미하고 있으며 특히, 포장면의 不等沈下量이 작게 되는 가능성을 나타내고 있다.

그림-7은 탄성변형율( $\epsilon_r$ )과 재하횟수(N)의 관계

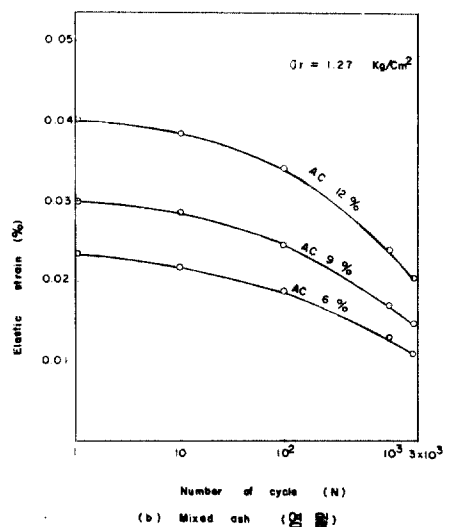
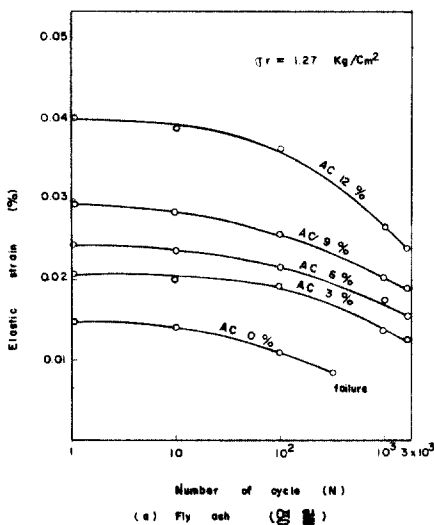
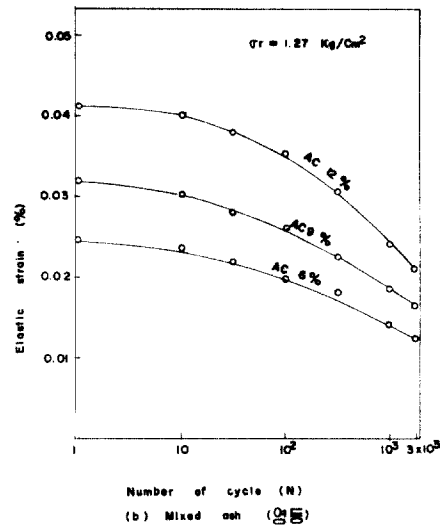
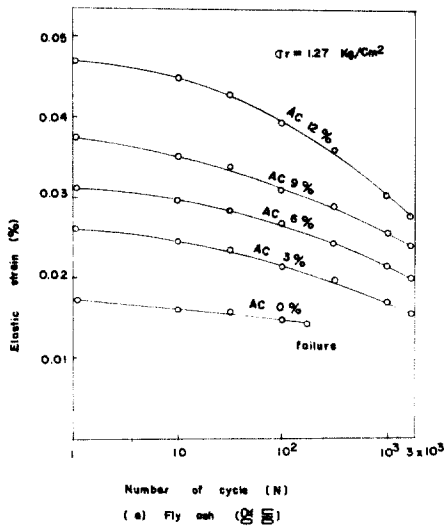


그림 7. Relationship between number of cycle and elastic strain



를 나타낸 것이다. 彈性變形率은 재하횟수가 많을수록 크게 감소하였다. 이 경향은 시멘트 添加率이 많을수록 현저하게 나타났다.

### 3.4 反復載荷後 應力-變形曲線과 彈性係數

嶺東火力에서 채취한 시료에 시멘트 12%를 첨가한 공시체를 소정의 반복재하를 행한 후 일축압축시험을 행하여 應力-變形率 曲線을 구하면 그

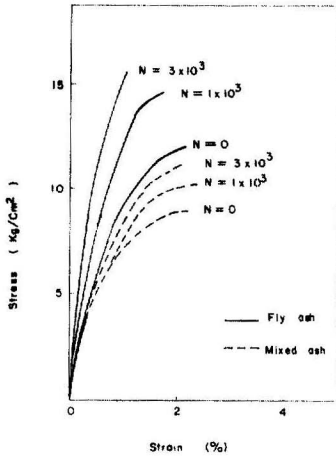


그림 8. Relationship between strain and stress

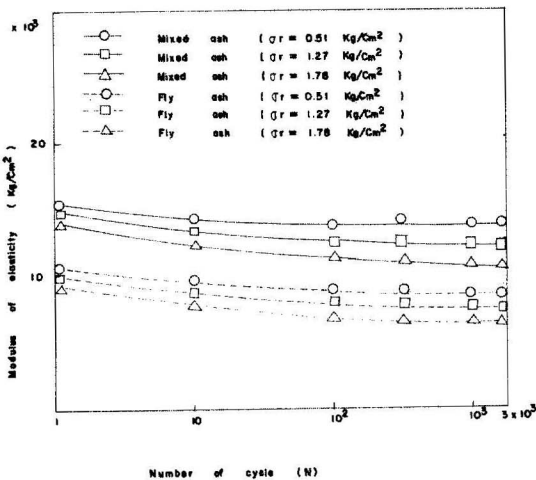


그림 9. The change of elastic modulus resulting from number of cycle

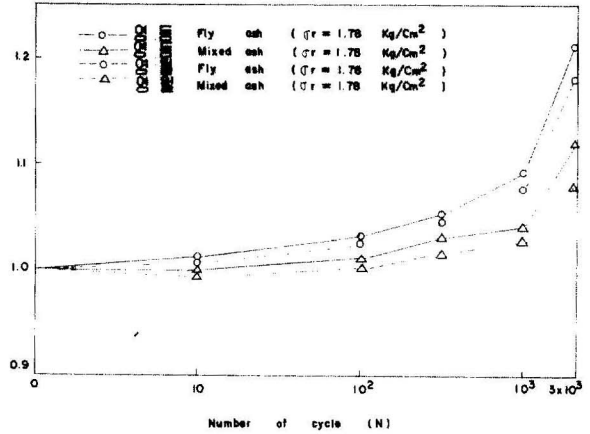


그림 10. The increase rate of strength resulting from number of cycle

림 8 과 같다. 이미 점성토와 soil-cement에 대해서 검토된 것 처럼 處理灰에서도 반복재하를 받지 않은 공시체에서는 非彈性的인 應力-變形率 曲線을 나타내지만, 반복재하를 받으면 거의 彈性體와 같은 形의 應力-變形率 曲線을 나타낸다.

應力-變形率 曲線을 기초로 하여 파괴강도의 1/3점에서 割線彈性係數를 구하고 그것들의 반복횟수에 따른 변화를 나타내면 그림-9와 같다.

전반적으로, 시멘트를 添加한 混合灰의 彈性係數는 飛灰보다 크며, 어느 應力條件에 있어서도 재하횟수  $3 \times 10^3$ 회 까지 彈性係數가 감소 하였다.

### 3.5 反復載荷를 받는 石炭灰의 壓縮強度

載荷回數에 따라 시멘트 添加率 12%인 石炭灰에 無載荷供試體의 強度에 대한 비를 나타내면 그림-10과 같다.

시멘트 처리한 石炭灰가 反復壓縮力을 받으면, 石炭灰의 종류 및 시멘트 添加量에 따라 정도의 차는 있지만 石炭灰 粒子 사이에 比表面積이 큰 시멘트로 치밀하게 結着되어 다짐密度가 증대되고 함수비가 감소되어 容積變化를 일으켜 壓縮強度가 變化하는 데 반복횟수가 클수록 강도가 增加하였다. 이미 실트질 로옴과 soil-cement에 대해서 검토된 것 처럼<sup>(1)(15)</sup> 本 試驗에서도 재하횟수가 많을수록 강도는 점증하고  $3 \times 10^3$ 회에서 約 21%의 강도 증가를 나타냈다.

#### 4. 結 論

본 연구에서는 석탄회를 道路路盤材로 활용키 위해 부족한 강도 증대를 위해 시멘트를 添加하여 반복재하후 일축강도시험을 행하여 변형특성을 검토한 것으로 그 결과를 정리하면 대략 다음과 같다.

(1) 石炭灰에 시멘트 添加率이 增加할수록 壓縮強度는 直線的으로 增加하는 傾向으로 나타났으며, 飛灰의 강도가 混合灰보다 큰을 알 수 있었다.

(2) 殘留變形은 높은 反復應力일수록 크고, 그 변화는 飛灰가 混合灰보다 크게 증가하였다.

(3) 본 실험과 같은 응력조건에 있어서  $3 \times 10^3$ 회까지는 반복횟수에 대해서는 石炭灰에 시멘트 添加量이 많을수록 彈性變形率이 크게 감소 하였으며, 그 변화의 크기는 混合灰가 飛灰보다 컸다.

(4) 시멘트를 添加한 재하횟수 彈性係數는 각 應力條件에서 재하횟수  $3 \times 10^3$ 회까지는 감소하였으며, 시멘트를 添加한 飛灰도 같은 경향을 보였으나 변화의 크기는 混合灰보다 작았다.

(5) 시멘트를 添加한 石炭灰에서 壓縮強度는 반복횟수가 클수록 漸增하고  $3 \times 10^3$ 회에서 약 21%의 강도 증가를 보였다.

#### 謝 辭

本 研究는 1988~90년도 韓國科學財團의 目的基礎研究 費支援(課題番號 880607)에 의하여 수행중인 연구 일부를 밝히며 깊은 감사를 드린다.

#### 參 考 文 獻

1. 千柄植, 曹泳求, “火力發電所에서 副産되는 石炭灰의 工學的特性”, 大韓土木學會論文集, NO. 8(2), 1988. 6, pp.59-66.
2. Donald, H. G and Yen-Kuang, Lin, “Engineering Properties of Compacted Fly Ash”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, SM4, April, 1972, pp.361-380.
3. P. Tsonis, S. Christoulas and S. Koliass, “Soil Improvement with Coal Ash in Road Construction”, *Proceedings of The Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2 May, 1983, pp.961-964.

4. J. Havukainen, “The Utilization of Compacted Coal Ash in Earth Works”, *Proc. of The Eighth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, May, 1983, pp.1-31.
5. R. E. Franklin, W. E. Gibbs and P. T. Sherwood, “The Use of Pulverised Fuel Ash in Lean Concrete Road Bases”, Department of The Environment, T. R. R. L Report. LR 736, 1982, pp.1-31.
6. C. Bogonacki and R. Haag, “Fly Ash as a Structural Back Fill”, *Proc. of America Power Conference*, Vol. 42, 1980, pp.898-903.
7. H. M. Harding and J. F. Potter, “The Use of Pulverised Fuel Ash in Lean Concrete Road Bases”, Department of The Environment Department of Transport, T. R. R. L Report LR 838. Crowthorne, 1985, pp.1-15.
8. P. T. Sherwood and M. D. Ryley, “The Use of Stabilized Pulverized Fuel Ash in Road Construction”, Ministry of Transport. R. R. L Report No. 48, Crowthorne, 1966. pp.1-43.
9. 五十嵐 和彦, “石炭灰利用の 現状と展望”, 日本電力土木, No. 204, 1961, pp.13-20.
10. 玉貫滋 “石炭灰の資源化技術”, 日本火力原子力發電, Vol. 30, No. 6, 1979. pp.25-33.
11. 千柄植, 朴興奎, “反復載荷에 의한 粘性土의 變形特性”, 大韓土木學會論文集 No. 9(1), 1989. 3. pp.89-95.
12. 安田 稔, “各種石炭灰의 諸性狀と有效利用の展望”, 日本電力土木, No 204. 1961. pp.21-40
13. 後藤 茂外 2人, “石炭灰의 土木材料としての利用に關する研究(その 2)”, 第17回土質 工學研究發表會, pp.2665-2668.
14. 都德鉉, 李在顯, “道路基層 安定處理에 關한研究”, 大韓土木學會論文集, Vol 26, No 2, 1978, pp.73-84.
15. 千柄植, 朴興奎, “反復荷重을 받는 Soil-Cement의 變形特性”, 大韓土木學會論文集, Vol 9(2), 1989. 9.
16. 河上房義, 小川正二, “くう返し應力を締固め土の力學的性質”, 土木學會論文集, No 96, 1965. pp.8-14.
17. Raymond, G. P and Gaskin, P. N., “Repeated Compressive Loading of Lead Clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 10, 1979, pp.1-10.
18. 柳場重正外 2人, “繰返し荷重を受けるソイルセメントの變形および強度特性”, 土木學會論文集, Vol. 231, 1974, pp.55-60.

(接受 : 1989. 9. 8)