

反復荷重을 받는 Soil-Cement의 變形特性

Deformation Characteristics of Soil-Cement Mixtures under Repeated load

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

Abstract

Since the paved road suffers from various types of repeated loads for the duration of its life, it is likely to cause permanent deformation and fatigue finally destroying the pavement performance. Accordingly, if we are to keep the pavement performance in good condition, it is required to take steps to prevent such troubles from happening in each stage of pavement, and thus to improve the stability of pavement.

We find it is quite important to settle the problems such as permanent deformation and fatigue rupture by repeated loads both on subbase course and on subgrade. In this regard, we examined the deformation characteristics of soil cements, on which repeated loads are applied.

For the effective examination, we chose to use soil-cements made of cohesive soil and sandy soil respectively, which had 20kg/cm^2 of unconfined compression strength, at the age of 7 days.

The experimental results are :

1. The elastic modulus of soil cement from sandy soil is higher than that of soil cement from cohesive soil.
2. The elastic modulus tends to decrease as the repeated loads rund up to 1,000 times, while increasing between 1,000 times and 1×10^5 times.
3. Unconfined compression strength is seen to increase about 30%.

要 旨

道路鋪裝은 그 壽命期間內에 多數의 反復荷重을 받는 데, 이 반복된 載荷에 의해 永久變形과 疲勞破壞가 발생하여, 鋪裝의 供用性이 低下된다. 따라서 높은 供用性을 維持하려면, 鋪裝의 各部에서 이와같은 問題의 發生을 막고, 鋪裝의 安定性을 向上시키기 위해서는 路盤, 路床에 대해서 반복재하에 따른 永久變形이나 疲勞破壞의 問題를 해결하는 것이 중요하다. 이와 같은 觀點에서 本 研究는 20kg/cm^2 의 7일 강도를 갖는 각각 시멘트량 9.2%와 18.3%인 사질토 soil-cement와 점성토 soil-cement에 있어서 反復荷重을 가하였을 때의 變形特性에 대해서 檢討하였다.

*正會員· 漢陽大學校 工科大學 教授, 土木工學科

**正會員· 漢陽大學校 大學院 博士課程

연구 결과, 사질토 soil-cement 의 탄성계수는 점성토 soil-cement 보다 크며, 반복횟수 1×10^6 회까지 탄성계수가 감소하고, 그 후 1×10^6 회까지는 증가하였다. 또한 一軸壓縮強度는 약 30% 정도의 強度增加를 나타냈다.

1. 序 論

急速한 經濟成長에 따른 현저한 交通량의 증가와 차량의 증량화 및 고속화 경향으로 道路의 중요성과 함께 경제적인 道路建設이 활발히 이루어지고 있다. 현재 우리나라에서는 도로포장의 路盤材料인 모래나 장자갈을 구하기가 어려워지고, 운반거리도 점차 멀어지므로 骨材難이 심각하다. 따라서 骨材의 代用으로 현장 부근의 흙에 시멘트를 적절히 혼합해서 사용하는 시멘트 安定處理工法이 사용되어 왔다. 이 공법의 適應性에 대한 多年間에 걸친 많은 研究에 의해서 그 經濟性이 立證되었고⁽¹⁻²⁾, 실제로도 많은 施工例⁽³⁾가 있다. 종래 soil-cement 의 여러가지 力學的 性質의 評價는 靜的인 하중조건에서 행해지고, 動的載荷에 따른 力學的 特性을 검토한 것은 극히 적었다⁽⁴⁻⁵⁾. 즉, soil-cement 의 路盤材料로서 可, 不는 一軸壓縮強度, CBR, 濕潤·乾燥密度 및 凍結融解試驗에 의해서 判定되어져 왔다.

그러나 道路鋪裝은 그 수명기간 내에 많은 反復荷重을 받아서 soil-cement 의 力學的 性質을 변화시키기도 하고, 이 반복재하에 의한 큰 永久變形과 疲勞破壞의 發生으로 鋪裝의 供用性은 저하하게 된다. 따라서 높은 供用性을 유지하려면 鋪裝의 各部에서 反復荷重에 따른 永久變形이나 疲勞破壞의 問題를 해결하는 것이 중요하다.

이와 같은 觀點에서 시멘트량, 재령 및 흙의 중

류에 따라 soil-cement 의 구조는 크게 변화하고, 反復荷重을 받았을 때 상당히 다른 舉動을 나타낸다고 생각된다. 따라서 本研究에서는 20kg/cm^2 의 7일 강도를 갖는 각각 시멘트량 9.2% 와 18.3% 인 사질토 soil-cement 와 점성토 soil-cement 에 있어서, 반복하중을 가하였을 때 생기는 잔류변형 및 탄성변형을 구하고, 반복후 一軸壓縮試驗을 행하여 應力-變形率 關係等에 대해서 實驗的 檢討를 하였다.

本論文은 國內火力發電所에서 年間 약 200만톤 이상 대량으로 副産되어, 막대한 경비로 바다 灰捨場에 廢棄되고 있는 産業廢棄物인 石炭灰를 海岸埋立, 盛土 및 路盤材等的 建設材料로 활용에 관한 연구의 일환으로 이루어진 것으로서 西海岸開發事業等的 國家施策에 발맞추어 研究를 계속 擴大해 나아가고자 한다.

2. 實驗概要

2.1 試料土 및 供試體製作

砂質土는 東海市에서 채취하고, 粘性土는 江陵市近郊에서 채취하여 No. 16 (1.9mm) 체에 통과한 것을 사용하였으며, 試料의 物理的 性質은 표 1 과 같다.

또한, 사용한 시멘트는 국내에서 생산되는, 포틀랜드 시멘트로서 그 物理的 性質 및 化學的 性分은 표 2, 3 과 같다.

표 1. Physical properties of soil

Test item Soil type	Specific gravity	Atterberg Limit			O.M.C	M.L.D.D	Classification of
		W _L (%)	W _P (%)	P. I.(%)			
점 성 토	2.70	38.2	26.7	11.5	28.0	1.520	Silty Loam
사 질 토	2.65	-	-	-	13.4	1.801	Sandy Loam

표 2. Physical properties of cement

Properties	Specific Gravity	Fineness (cm ² /g)	Setting		Stability (%)	Compression Strength(kg/cm ²)			Tension Strength(kg/cm ²)		
			the first(min)	end(hr)		3days	7days	28days	3days	7days	28days
Cement	3.12	2.920	135	5.05	0.21	135	192	260	14	29	33

표 3. Chemical Analysis of Cement

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	Mgo(%)	SO ₃ (%)	Ig. Loss(%)
Cement	21.4	5.4	3.4	63.4	3.4	1.5	0.6

建設部規定「鐵道鋪裝設計·施工指針」⁽⁶⁾에서 보면 路盤用 시멘트 安定處理土의 목표 압축강도는 아스팔트 포장에서 30 kg/cm², 콘크리트 포장에서는 上部路盤 20 kg/cm², 下部路盤 10 kg/cm² 으로 되어있다. 따라서, 본 실험에서는 7일 재령이 목표 강도 20 kg/cm², 이 되도록 배합설계하여 사질토에 대한 시멘트량 9.2%, 粘性土에 대해서 18.3%을 취했다.

공시체는 직경 50mm, 높이 125mm의 원통형 물드내에 프라그에 의해 油壓재키로 압축하여 밀도가 균일하게 되도록 제작하고, 수분을 차단키 위해서 外面을 파라핀으로 얇게 被服하여, 20±1℃의 항온항습실에서 7일간 양생시켰다.

2.2 試驗方法

反復荷重을 받는 Soil-cement의 強度와 彈性係

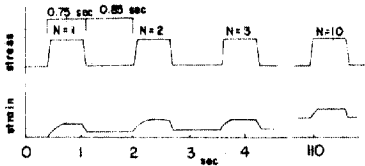


그림 1. Repeated stress and strain



사진 1. Mechanical unconfined repeated loading machine

數(強度의 1/3 點과 原點을 연결하는 割線係數)에 미치는 反復應力度, 載荷回數의 영향을 알기 위해서 공시체에 반복재하율(σ)를 3 단계 (5.09kg/cm², 7.64kg/cm², 10.19kg/cm²)로 변화시키며, 1×10, 1×10², 1×10³, 1×10⁴, 1×10⁵ 회 재하한 공시체에 변형 제어방식으로 靜的一軸壓縮試驗을 행하였다. 그리고 반복재하중에 측정된 縱方向 變形으로 부터 殘留變形 및 彈性變形을 구하였다.

또한, 일축반복재하시험에 사용한 시험기는 사진-1과 같으며, 1회의 載荷時間은 0.75sec, 除荷時間은 0.85sec 이고, 1 cycle의 時間은 1.60sec 이다. 반복재하중의 應力 및 變位와 時間과의 關係는 그림 1과 같다.

3. 試驗結果 및 考察

3.1 反復荷重을 받는 Soil-cement의 變形

시멘트 安定處理土의 목표 7일 강도 20kg/cm² 되도록 시멘트량을 첨가한 시료에 대해서 반복재하를 행하여 殘留變形率의 변화를 나타내면, 그림-2와 같다.

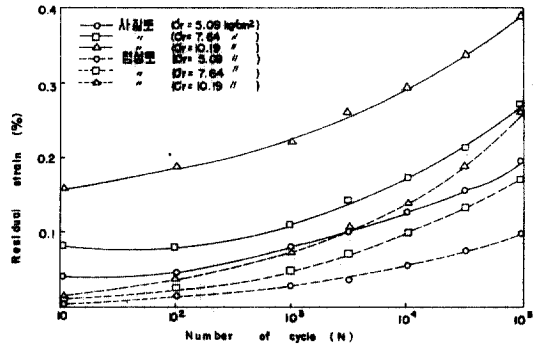


그림 2. Relationship between number of cycle, residual strain and applied stress.

강도가 다르기 때문에 各載荷應力 條件에 있어서 사질토 soil-cement와 점성토 soil-cement의 殘留變形의 증가 경향에 대한 엄밀한 비교는 할

수 없지만, 전반적으로 모든 반복횟수에 있어서, 사질토 soil-cement 쪽이 점성토 soil-cement 보다 현저하게 큰 殘留變形率을 나타내고 있다.

사질토 soil-cement의 반복재하응력 $\sigma_r=7.64\text{kg/cm}^2$ 일 때 1×10^5 회의 재하로 잔류변형률(ϵ)은 0.11%에 달하지만, $\sigma_r=10.19\text{kg/cm}^2$ 에서는 $\epsilon=0.22\%$ 로 상당히 크게 변화하였다. 또 점성토 soil-cement 에서도 재하응력이 클수록 잔류변형률이 증가를 보였으나, 사질토 soil-cement 에 비해 작았다.

柳場重正⁽⁶⁾은 시멘트량 73%의 soil-cement에 대한 비회복성 변형은 高應力이 됨에 따라서 증가율이 상당히 크게 나타난다고 하였고, 林洋介⁽⁶⁾은 山砂의 경우 載荷 level (일축압축강도에 대한비)이 50% 정도 이상이 되면 잔류변형이 현저하게 증가 하였으며, 載荷回數가 많을 수록 이 경향이 현저하다고 하였다. 따라서, 공시체에 내부 파괴가 생기지 않는 범위내의 높은 응력을 반복하는 경우, 낮은 응력일 때 보다 변형의 증가율이 크다. 즉, 변형에 대한 저항이 큰 것은 불완전한 排列狀態에 있는 粒子에 높은 應力이 가해지면 낮은 응력을 가하였을 때 보다 빠르게 平行排列狀態로 가고 간격도 감소하고 입자간에 작용하는 專位에너지도 크게 되므로, 어떤 크기의 변위를 생기지 못하는 데 필요한 에너지가 크게 되기 때문인 것⁽¹⁰⁾으로

로 생각된다.

그러나, 내부 파괴가 생기는 높은 반복 응력일 경우에는 비교적 적은 횟수에서 공시체가 파괴되므로 거의 반복재하에 따른 변형에 대한 저항의 증가는 기대할 수 없다.

이런 점을 보다 명확하게 하기 위해서 각 반복 횟수와 한계 횡축에 재하응력/강도비를 나타내고, 종축에 잔류변형률을 나타내면 그림 3과 같다.

이것들의 折線을 비교하면, 같은 재하응력/강도비에 대해서 어느 반복횟수에 있어서도, 사질토 soil-cement의 잔류변형률이 점성토 soil-cement 보다 현저히 크게 나타났다. 재하응력/강도비=0.4에서 비교하면 1×10^5 회에 있어서 사질토 soil-cement의 잔류 변형률은 점성토 soil-cement의 3.8 배, 1×10^3 회에서는 2.5 배, 1×10^4 회에서는 2.2 배, 1×10^6 에서 1.6 배가 된다. 특히, 사질토 soil-cement의 재하응력/강도비-잔류변형률의 관계에서는 0.36 부근에서 급격히 잔류변형률이 증가하였다.

이와 같이 soil-cement가 포장노반재료로서 사용되었을 때, 잔류변형은 어떤 반복횟수에 있어서도 사질토 soil-cement가 점성토 soil-cement 보다 상당히 크므로, 이것은 실제 노반에서 사질토 soil-cement의 잔류침하량이 크게 되는것을 의미하고 있으며, 특히, 포장면의 부등 침하량이 크게 되는 가능성을 나타내고 있다. 그러므로 부등침하에 의한 포장면의 국부파괴를 경감한다라는 점에서는 노반용 soil-cement 재료로서는 점성토가 사질토보다 오히려 바람직한 성질을 가지고 있다고 생각된다.

殘留變形率(ϵ), 載荷回數(N) 및 反復載荷應力(σ_r)의 관계를 나타낸 그림 2에서 시료에 소정의 잔류변형률이 생기는 應力을 구하여, 이것과 載荷回數와의 관계를 나타내면 그림 4와 같은 곡선이 된다.

여기서, 어느 토질구조물의 부분에 許容된 最大 殘留變形率을 規定하면, 그 構造物의 材料로 사용한 흙에 대해서 그림 4와 같은 관계도에서 어느 재하횟수에 대한 許容反復應力度를 구할 수 있다.

이와 같이 soil-cement가 파괴에 이르지 않는 정도의 반복하중을 받으면, 그의 工學的 性質을 개선하게 된다. 따라서 soil-cement에 유해한 손상을 주는 소위, 疲勞破壞에 이르는 限界應力條件에 맞

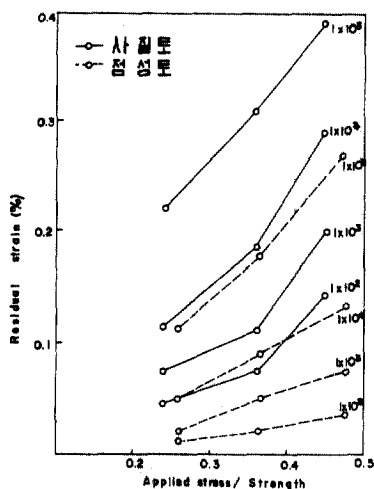


그림 3. Relationship between applied stress/strength and residual strain

3.2 反復載荷後 應力-變形率 曲線과 彈性係數

소정의 反復載荷를 받은 soil-cement 의 공시체 에 대해서, 應力-變形率 曲線을 그리면 그림 6 과 같다.

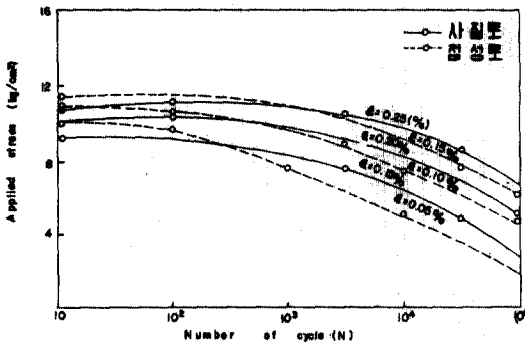


그림 4. The limit of applied stress in connection with strain

추어 합리적인 포장설계를 하는것이 중요하다 생각된다.

그림 5 는 탄성변형율과 재하횟수의 관계를 나타 낸 것이다. 재하횟수 5×10^2 회까지는 약간 증가하는 경향을 나타내고, 그 후 1×10^5 회까지는 감소되었다. 점성토 soil-cement 에서는 반복응력이 클수록 탄성변형율은 크며, 사질토 soil-cement 에서는 反復應力 差의 變化가 점성토 soil-cement 의 경우에 비교해서 현저히 작았다.

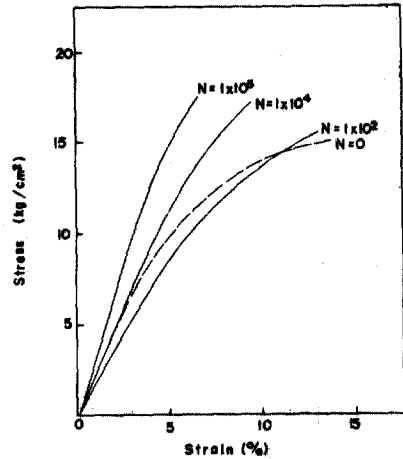


그림 6. Relationship between strain and stress.

이미 非處理土에 대해서 검토된 것처럼⁹⁾, 사질토 의 soil-cement 공시체에서도 처음에는 非彈性的인 應力-變形率 곡선을 나타내지만, 반복재하를 받으면, 거의 彈塑性體와 같은 形의 應力-變形率 곡선을 나타낸다. 즉 初期變形에서는 硬化現象에 따라 彈性的인 舉動을 나타내지만 變形이 커지면 그 效果가 없어지고, 塑性的인 舉動을 나타내고 어느 應力에 달하면 變形은 크게 증가한다.

應力-變形率 곡선을 기초로 하여, 파괴강도의 1/3 점에서 割線彈性係數를 구하고, 그것들의 반복횟수에 따른 變化를 나타내면 그림 7과 같다.

전반적으로, 사질토의 soil-cement 의 탄성계수는 점성토 soil-cement 보다 크다. 사질토 soil-cement 에서는 어느 응력조건에 있어서도 1×10^5 회까지는 탄성계수가 감소하고, 그후 1×10^5 회까지 계속 증가하였다. 점성토 soil-cement 에 있어서도 사질토 soil-cement 와 같이 5×10^2 회 전 후까지는 약간 저하하고 그 후 증가하는 경향을 나타냈으며, 그 변화의 정도는 사질토보다 작다.

soil-cement 의 彈性係數는 路盤의 荷重分散 效果 및 乾燥收縮에 의해 균열이 발생되는 매우 중요한 요인이다^(11, 12). 특히, 사질토 soil-cement 에서 복회

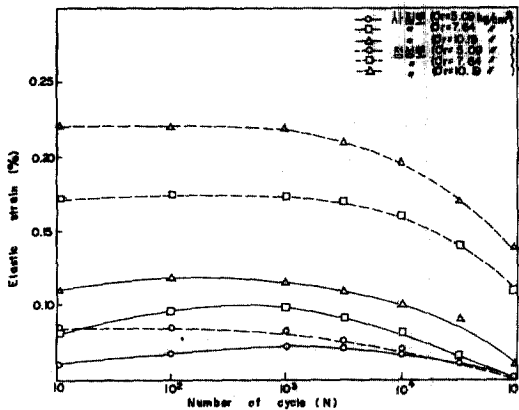


그림-5 Relationship between number of cycle, Elastic strain and applied stress.

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

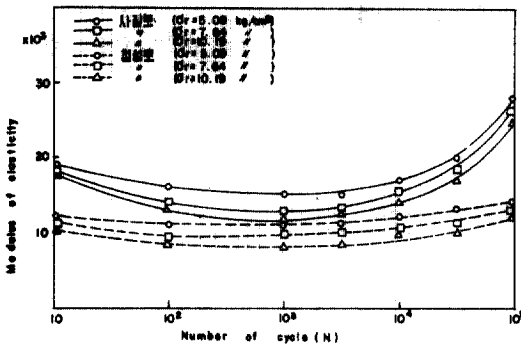


그림 7. The change of elastic modulus resulting from number of cycle.

수에 따라 soil-cement의 탄성계수가 크게 변화하였고 반복횟수 10萬回 범위내에서 최대값은 최소값의 1.9 배 정도까지 달한다. 따라서 彈性係數의 증가는 荷重分散效果라는 점에서 바람직하다. 또한, soil-cement의 彈性係數는 반복횟수 1×10^5 회 정도까지는 일시적으로 저하한다라는 사실을 고려하면, soil-cement 施工後, 수축균열 발생시기를 반복횟수 1×10^5 회정도에 상당하는 교통량에 맞도록 양생 후 가능한 초기에 하중을 주는 일이 균열발생 방지에 바람직하다고 생각된다.

3.3 反復荷重을 받는 Soil-cement의 壓縮強度

반복횟수에 따라 無載荷 供試體의 強度에 대한 비를 나타내면 그림-8과 같다.

soil-cement가 反復 壓縮力을 받으면, 흙의 種類 및 시멘트량에 따라 정도의 차는 있지만, 土粒子

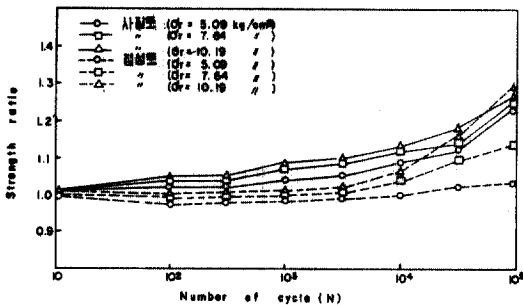


그림 8. The Increase rate of strength resulting from number of cycle.

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강도가 變化하는데 반복응력이 높을수록, 반복횟수가 많을수록 強度가 크다.

Shen은 13% 시멘트로 처리된 사질토에 초기 壓縮強度의 15%의 반복응력을 24,000회 가하였을 때, 초기강도의 10% 정도가 증가하였으며, 실트질 점토에서는 초기 壓縮강도의 50~80%의 반복응력에는 8~35%의 강도 증가를 보였고, Robichon⁽⁴⁾는 시멘트량 10%의 soil-cement에 대해서 약 2.1 kg/cm²의 反復應力을 가하였을 때 재하횟수에 따라 30~50%의 강도 증가를 나타냈다. 柳場重正⁽⁵⁾은 7.3% 시멘트로 처리된 사질토에 30萬回 재하하였을 때 약 20%의 강도 증가가 나타났다고 하였다.

本 試驗에서는 재하횟수가 많을수록 강도는 漸增加하고, 10萬回에서 約 30%의 강도 증가를 보였다.

4. 結 論

(1) 20 kg/cm²의 7일 강도를 갖는 각각 시멘트량 9.2%와 18.3%인 사질토 soil-cement와 점성토 soil-cement에 있어서 사질토 soil-cement는 재하횟수가 많을수록 殘留變形이 크고, 재하응력/강도비=0.4에서는 점성토 soil-cement의 변형에 3.8배를 나타냈다.

(2) 反復荷重을 가한 후, 정적 一軸壓縮試驗을 행하면, 그의 應力-變形率曲線은 彈塑性體와 같은 형을 나타낸다.

(3) 사질토 soil-cement의 탄성계수는 재하횟수 1×10^5 회까지 감소하였다가 그 후 1×10^6 회까지 증가하였다.

(4) 壓縮強度는 반복재하횟수가 많을수록 漸增加하고, 1×10^6 회에서 約 30% 정도의 강도 증가를 보였다.

(5) 점성토 soil-cement의 彈性變形率은 載荷回數 5×10^5 회까지는 약간 增加하나 그 후 1×10^6 회까지 減少하였으며, 사질토 soil-cement보다 현저하였다.

(6) 一定回數의 反復載荷를 행하면 최대 經濟效果를 나타내는 許容反復應力度를 구할 수 있고, 따라서 疲勞破壞에 이르는 限界應力條件에 맞추어 합리적인 포장설계를 할 수 있을 것으로 사료된다.

感謝의 말

본 연구는 1988년도 한국과학재단 목적기초연구비 지원(과제번호 880607)에 의해 수행중인 연구의 일부임을 밝히며, 동재단에 심심한 사의를 표한다.

參考文獻

1. 全夢角, "Socil Cement 安定處理에 관한 研究報告", 大韓土木學會誌, Vol 13, No. 2, 1965. pp. 16~28.
2. 都德鉉, 李在顯, "道路基層處理에 관한 試驗研究", 大韓土木學會誌, Vol 26, No. 2, 1978. pp. 73~84.
3. 建設部, "建設研究所材料", No 402, 1980. pp. 5~44.
4. S. N. Doshi and M.S.Mesdary, "Estimations of Dynamic of Soil-Cement" *Australian Road Research Board*, Vol 15, 1985, pp. 90~96.
5. 寺師昌明外 3名, "石灰セメント系 安定處理土의 基本的 特性に比關する研究", 日本 港灣技術研究所報告, Vol 22, No. 1, 1983, pp. 70~95.
6. 建設部, "道路舗裝設計. 施工指針", 1985. pp. 265~267.
7. 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, Vol 9, No 1, 1989, pp. 89~95.
8. 場重正外 2名, "土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", 日本 土木學會論文報告集, Vol 231, 1974, pp. 55~60.
9. 林 洋介外 3名, "土返し荷重下の安定處理土の變形特性", 第20回 土質工學研究發表會 發表講演集, 1985, pp. 1597~1598.
10. 河上房義, 小川正二, "くろ返し應力を受けた締固ぬ土の力學的性質", 日本 土木學會論文集, No96, 1965a. pp. 8~14.
11. Shen, C.K., "*Behavior of Cement Stabilized Soil Under Repeated Loading*", Ph.D. Thesis, University of California, 1965.
12. 岡田 清, 川村清紀, "ソイルセメントの乾燥收縮應力に關する二, 三の考察", 日本 土木學會論文集, No 142, 1967, pp. 37~45.
13. Robichon, J.M., "*Resilience Characteristics of An AASHO Soil Stabilized with 10% Cement*", Research Report, University of California, 1963.

(接受: 1989. 4. 26)