

反復載荷에 의한 粘性土의 變形特性

Deformation Characteristics of Clayey Soil Subject to Repeated Compressive Loading

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

Abstract

In this study, it is attempted to examine (1) the residual deformation and elastic deformation induced from the repeated loads (up to the maximum of 100,000 times) on fully compacted soil specimen, the relation between stress and strain by performing the unconfined compressive test, after repeated loads and (2) the effect of water content, dry density, number of cycle, repeated loads, etc. on the effect of the stress-strain relation.

The rate of deformation caused by repeated loads greatly depends on to the condition whether the water content is above or below the plastic limit. It is possible to estimate the initial tangent modulus of soil by means of modulus of elastic deformation obtained by putting repeated loads on the clay soil.

要 旨

다져진 흙의 공시체에 최대 10만회 까지 反復荷重을 가하였을때 殘留變形 및 彈性變形 그리고 反復後 일축압축시험을 행하여 應力-變形率 關係等を 검토하였으며, 여기에 영향을 미치는 含水比, 密度, 反復回數, 反復荷重等에 대해서 考察하였다.

反復回數에 따른 變形의 增加率은 塑性限界를 기준으로 함수비의 정도에 따라 크게 변화 하였으며, 反復荷重을 받은後 구한 彈性變形係數로부터 흙의 初期接線係數의 推定이 가능 하였다.

1. 序 論

經濟成長에 따른 交通量의 激증으로 道路의 重要성과 함께 도로건설이 활발히 이루어 지고 있으며 특히, 交通車輛의 증가 뿐 만 아니라, 重量化나 高速化의 傾向이 현저하다. 또한 軟弱地盤上에 低

盛土로 도로를 건설하면 개통후에 노반의 침하 촉진과 반복되는 변형에 의해 포장면이 파괴되는 데 그 原因은 반복작용하는 차량의 荷重이 路盤 혹은 基礎地盤에 복잡한 應力과 變形을 오랜세월에 걸쳐 반복해서 작용하기 때문인 것으로 보인다.

最近, 反復荷重 작용하에 있어서 道路의 路盤 및

*正會員·漢陽大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

**正會員·漢陽大學校 大學院 博士課程

基礎地盤의 強度變化와 變形에 대한 반복하중과 반복횟수등의 영향에 대해서 많은 연구 보고가 있었다⁽¹⁻³⁾.

本 研究에서는 다져진 시료의 공시체에 일축반복하중을 가하였을 때 생기는 殘留變形 및 彈性變形 그리고 反復後 一軸壓縮試驗을 행하여 應力-變形率 關係等を 구하였으며, 여기에 미치는 含水比, 密度, 反復回數, 反復荷重等에 대해서 검토하였다.

本 研究에서는 基礎研究로서 주로 粘性土를 研究對象으로 하였으나 앞으로 砂質土 또는 鈔일시멘트에 대해서도 檢討하고자 한다. 더욱 서해안개발사업 등 국가시책에 발맞추어 先進外國에서 처럼 産業廢棄物(예, 火力發電所에서 年間 數百萬톤씩 副産되어 막대한 量으로 폐기되고 있는 石炭灰⁽⁴⁾)의 海岸埋立盛土材로서의 活用을 目的으로 檢査연구를 확대해 나아가고자 한다.

2. 實驗概要

2.1 試料土 및 供試體製作

試料土는 江陵市 近郊에서 얻은 실트질로움으로서, NO16(119mm)체에 통과한 것을 사용하였으며, 試料의 物理的 性質은 표 1과 같다.

표 1. Physical properties of soil

시 료	공시체종류	함수비(%)	평균밀도 (g/cm^3)
$W_L = 38.2\%$	1	28.0	1.52
	2	24.8	1.52
$W_P = 26.7\%$	3	22.5	1.52
OMC = 28.0%	4	27.0	1.55
	5	28.5	1.48
$\gamma_{dmax} = 1.520 g/cm^3$			

이 試驗土를 所定의 含水比로 조절한 後, 24시간 以上 밀폐용기내에 格納하여 이것을 직경50mm, 높이 125mm의 원통형 몰드내에 所定의 乾燥密度에 相當하는 量을 몰드에 1회에 넣고 上下에서 프라그에 의해 油壓재키로 압축하여 密度가 均一하게 되도록 제작하고, 공시체는 水分을 차단키 위해서 外面을 따라 편으로 얇게 被覆하여, 다시 密閉容器內에 넣어 保管한 후 시험시 上下端面的 파라핀을 제거하여 시험에 사용 하였다.

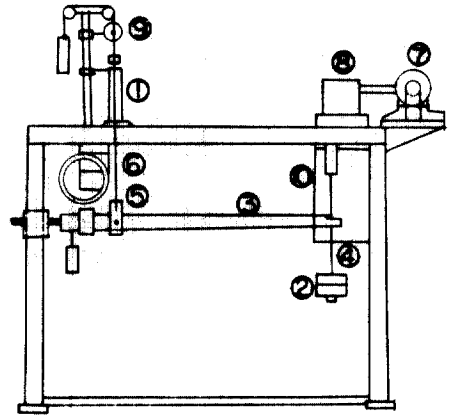


그림 1. Mechanical unconfined repeated loading machine

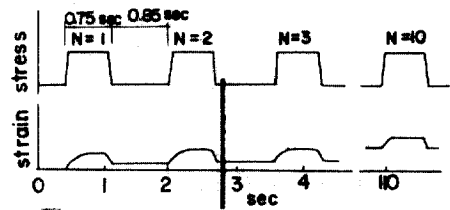


그림 2. Repeated stress and strain

2.2 試驗裝置 및 方法

시험기구는 그림-1과 같다⁽⁵⁻⁶⁾.

motor⁽⁷⁾에서 連結된 reduction gear⁽⁸⁾에서 끌어 올린 荷重⁽²⁾이 주기적으로 지레대⁽³⁾에 載荷 또는 除荷되며 이것은 10倍로 확대되어 支點⁽⁵⁾ 및 ⁽⁶⁾을 움직여 供試體⁽¹⁾의 軸方向에 가해진다.

시험중 지레는 水平을 유지하도록 조절되고 應力系의 平衡을 유지하도록 한다. 任意의 反復回數(counter box⁽¹⁰⁾로 측정)의 載荷時에 공시체에 생기는 變形 또는 除荷時의 殘留變形은 dial gauge⁽⁹⁾에 의해 測定할 수 있다. 1회의 載荷時間은 0.75sec, 除荷時間은 0.85sec이고, 1cycle의 時間은 1.60sec이다. 反復載荷中の 應力 및 變位와 時間과의 關係는 그림-2와 같다.

反復荷重을 4~7段階로 變化시키며, 1×10^2 , 1×10^3 , 5×10^3 , 1×10^4 , 1×10^5 회 載荷한 공시체에 變형제어 방식으로 一軸壓縮試驗을 행하였다.

3. 實驗結果 및 分析

3.1 含水比와 $\log N$ - ϵ 곡선과의 關係

供試體의 密度가 같고 함수비가 다른 경우의 殘留變形率(ϵ), 載荷回數(N), 反復應力(σ)의 關係는

그림 3, 4, 5와 같다. 반복응력이 클수록 잔류변형은 증가하지만, 그 증가율은 함수비가 낮을 때는 작고, 높은 경우에는 크게 나타났다.

즉,含水比가 낮고 反復應力이 낮은 경우에는 反復載荷에 따른 硬化現象의 효과가 적지만, 공시체 파괴를 일으키지 않는 범위내에서 應力이 증가 할수록, 反復回數가 많을수록 硬化現象의 효과가 있었으며, 含水比가 높을수록 그 효과는 현저하였다.

그 例로 그림-4에서 反復應力 $\sigma=1.78\text{kg/cm}^2$, 反復回數 1×10^5 회에서 含水比가 24.8% 경우에 $\epsilon=1.4\%$ 였으나, 含水比가 28%일 경우에는 $\epsilon=3.4$ 에 달하며 파괴되지 않았으나, 反復應力이 $\sigma=2.77\text{kg/cm}^2$ 로 증가하면 1×10^5 회에서 파괴되었다. 이것은 파괴되지 않는 범위내에서 反復應力을 많은 횟수로 재하 하는 것이 硬化現象의 효과가 있다고 본다.

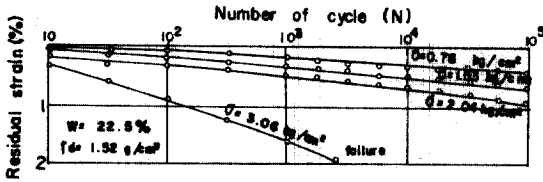


그림 3. Relationship between number of cycle, residual strain and applied stress

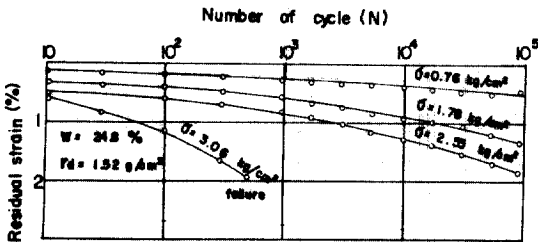


그림 4. Relationship between number of cycle, residual strain and applied stress

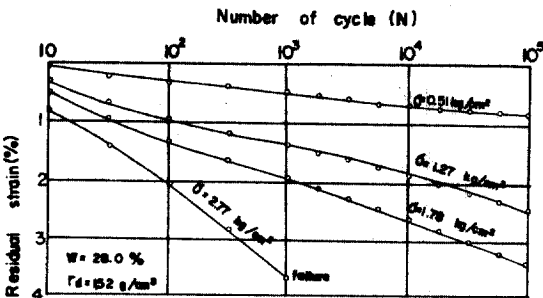


그림 5. Relationship between number of cycle, residual strain and applied stress

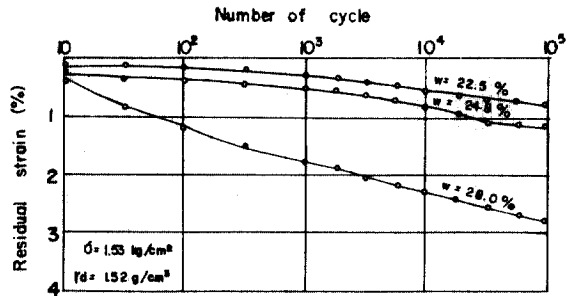


그림 6. Relationship between water content, number of cycle and residual strain

그림-6은 함수비가 다르고 ($w=22.5\%$, 24.8% , 28.0%) 밀도가 동일($\gamma_d=1.52\text{g/cm}^3$)한 3種의 공시체에 同一應力($\sigma=1.53\text{kg/cm}^2$)을 反復載荷한 경우의 $\log N-\epsilon$ 관계를 나타낸 것이다. 이 곡선은 거의 塑性限界에 인접하여 함수비의 정도에 따라 형상을 다르게 하며, 시료의 함수비가 塑性限界 以下の 경우에는 殘留變形의 增加는 載荷回數의 對數에 대하여 약간 증가하는 경향을 보이지만, 함수비가 높을 때는 反復載荷에 기초를 둔 硬化現象이 현저하기 때문에 殘留變形은 크게 增加한다.

3.2 密度와 $\log-\epsilon$ 곡선과의 關係

含水比가 거의 동일($w=27.0\sim 28.2\%$)하게 하고 밀도를 다르게 한($\gamma_d=1.48, 1.52, 1.55\text{g/cm}^3$) 공시체에 일정한 應力($\sigma=1.27\text{kg/cm}^2$)을 反復載荷한 경우 $\log N-\epsilon$ 관계는 그림 7과 같다. 공시체 밀도가 낮을수록 殘留變形이 크고, 높은 밀도에서는 변형이 작았다.

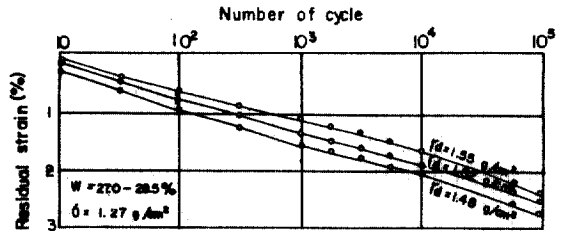


그림 7. Relationship between dry density, number of cycle and residual strain

3.3 反復荷重을 받는 흙의 彈性變形과 彈性變形係數

彈性變形率은 載荷回數가 5,000회까지는 反復載荷한 應力에 대하여 거의 일정한 값을 보였지만, 載荷回數가 그 이상이 되면 크게 감소한다(그림 8).

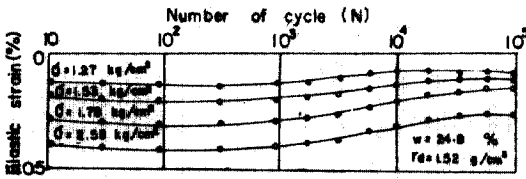


그림 8 Relationship between applied stress, number of cycle and elastic strain

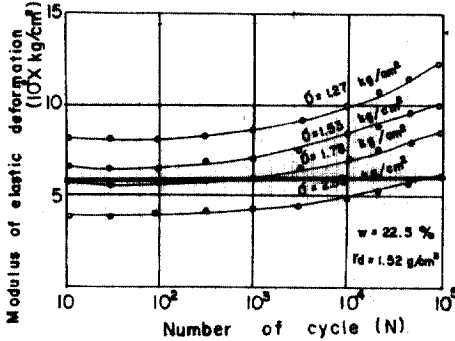


그림 9. Relationship between applied stress, number of cycle and modulus of elastic deformation

이 경향은 함수비가 클수록 또 反復應力이 클수록 현저하게 나타낸다.

임의 횡수의 反復載荷時 彈性變形率(ϵ_r)에서 彈性變形係數(E)를 구하여 이것과 반복하는 재하횡수(N), 반복응력(σ)와의 관계를 나타내면 그림 9와 같다. 彈性變形係數는 반복하는 응력이 작을수록 크고, 그의 값은 재하횡수가 5,000회 以上에서 증가가 크고, 그 증가의 비율은 反復應力이 작을수록 현저하다.

3.4 反復荷重을 받는 흙의 壓縮強度

反復荷重을 공시체에 가한 후에 일축압축강도시험을 행하여 應力-變形率 關係를 나타내면 그림 10과 같다. 반복하중을 받지 않은 공시체의 경우는 처음부터 非彈性的인 應力-變形率 곡선을 나타내지만 반복하중을 받으면 거의 彈塑性體와 같은 形의 應力-變形率 곡선을 나타낸다. 초기 변형에서는 硬化現象에 따라 彈性的인 舉動을 나타내지만, 변형이 커지면 그 效果가 없어지고, 塑性的인 舉動을 나타내고, 어느 應力에 달하면 변형은 크게 증가한다.

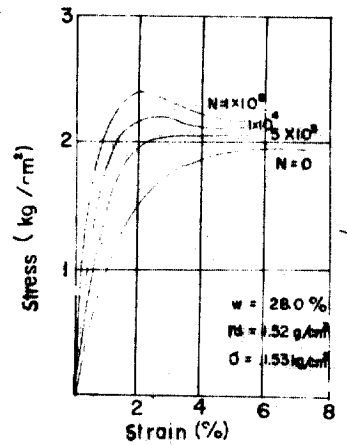


그림 10. Relationship between strain and stress

4. 考 察

4.1 反復荷重을 받는 흙의 變形特性

含水比를 변화시킨 시료에 대해서 一定荷重의 反復재하를 행하면 함수비가 클수록 재하횡수에 따른 殘留變形은 크진다(그림 6).

이와같이 불완전 포화토가 반복하중을 받으면, 변형에 관계하는 성질이 변화한다. 즉, 반복하중을 받으면 되풀이 되는 횡수의 증가에 따라 변형의 증가율은 감소한다⁽⁷⁻¹⁰⁾.

Raymond⁽¹¹⁾는 Leda clay에서 $\sigma_3 = 35\text{kpa}$ 주었을 때 1×10^3 회에서 변형이 현저한 변화를 보였고, 櫻井裁之는 粘土에서 재하횡수 6×10^4 회 정도에서 逆S字型으로 나타났다. 河上房義⁽¹²⁾는 로옴 시료에 반복 횡수가 1×10^4 회에서 현저히 나타났다고 하였다.

本試驗에서는 반복재하횡수가 5,000회 以上에서 현저히 나타났으며, 반복응력 외에도 함수비나 밀도에 따라서 영향을 받는것을 알 수 있다(그림 3~7).

이를테면, 載荷回數에 대한 殘留變形의 증가율을 보면, 塑性限界를 넘어 그 傾向이 다르고, 함수비가 높은 공시체에서는 재하횡수가 증가하면, 변형의 증가율이 크게 되지만, 함수비가 낮으면 그 반대의 경향을 나타낸다.

흙중에 내부 파괴가 생기지 않는 범위내의 높은 응력을 반복하는 경우, 어느 횡수 이상 반복되면, 낮은 응력 일때보다 변형의 증가율이 낮다. 즉, 변형에 대한 抵抗이 큰것은 불완전한 排列列狀態에 있는 土粒子에 높은 應力이 가해지면 낮은 응력을

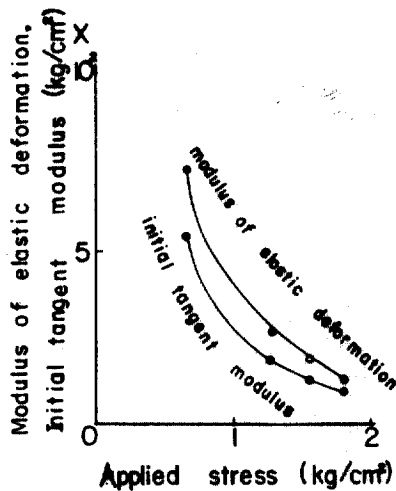


그림 11. Relationship between applied stress and modulus of elastic deformation, initial tangent modulus

가했을 때 보다 빠르게 平行排列狀態로 가고 간격도 감소하고 입자간에 작용하는 電位에너지도 크게 되므로, 어떤 크기의 변화를 생기지 못하는 데 필요한 에너지가 크게 되기 때문인 것으로 보인다.

그러나 내부 파괴가 생기는 높은 반복응력을 경우에는 비교적 적은 횡수에서 공시체가 파괴 되었으므로 거의 반복재하에 따른 변형에 대한 抵抗의 증가는 기대할 수 없다.

그림 11은 함수비(w) 28.0%, 밀도 $\rho_a = 1.52 \text{ g/cm}^3$ 의 공시체에 反復應力을 변화시켜 재하하여 10만 회에서 구한 彈性變形係數(E_c)와 10만회 재하후에 행한 일축압축시험에서 구한 初期接線係數를 比較한 것이다. 彈性變形係數가 初期接線係數보다 약간 크지만, 反復應力에 대하여 유사한 變化를 나타낸다. 이 관계에서 임의 횡수의 反復載荷를 받은 후의 흙의 接線係數는 壓縮試驗을 行하지 않아도 재하중의 彈性變形係數에서 推定할 수 있다.

4.2 反復荷重을 받은 흙의 壓縮強度

흙이 외부에서 反復 壓縮力을 받으면, 흙의 種類에 따라 程度의 差는 있지만, 容積變化를 일으켜 압축강도가 變化하는데 反復應力이 높을 수록, 反復回數가 많을 수록 強度가 크다(그림-12).

즉, 흙이 反復荷重을 받으면 강도가 높아지고 잔류변형율의 증가율이 감소하고 혹은 彈性係數가 크게 되는 현상은 주로 細粒子에서 일어나고, 흙의

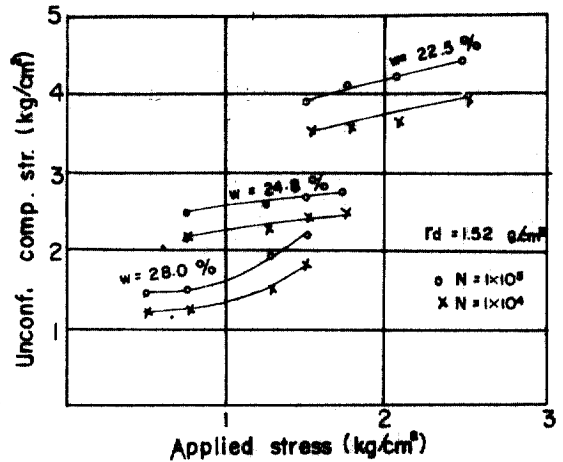


그림 12. Relationship among applied stress, dry density and unconfined compressive strength

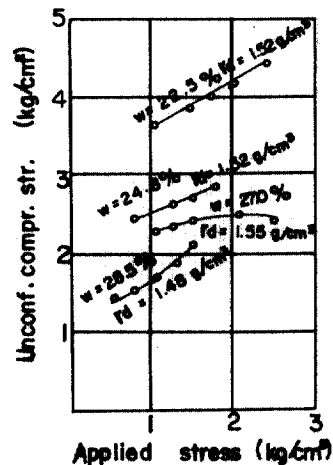


그림 13. Relationship among water content, dry density, applied stress and unconfined compressive strength.

構造에서 생기는 硬化現象에 따른 것이다.

Lambe⁽¹⁴⁾는 이 현상을 土粒子 相互間에 생기는 電位에너지, 土粒子의 排列, 土粒子의 徑의 變化, 土-水系의 特質等에 따라 지배 된다고 하였는데, 이것은 흙의 압축강도에 영향을 미치고, 첫번째와 세번째항은 흙의 탄성거동에 영향을 미친다고 추정하고 있다.

不完全 飽和土의 강도 증가는 反復應力, 載荷回數, 載荷中의 軸방향 압축변형이 큰만큼 현저하다고 하나,⁽¹⁵⁻¹⁸⁾ 本 實驗에서는 함수비와 밀도가 壓縮強度에 미치는 영향을 조사한 바(그림-13) 함수비

가 낮을수록, 밀도가 높을수록 일축압축강도는 크고, 反復應力の 증가에 따른 일축압축강도의 증가는 밀도가 낮은 공시체에 있어서 현저했다. 그러나 밀도가 높은 공시체가 큰 반복응력을 받으면, 일축압축강도가 증가하지 않고, 오히려 저하하는 것은 이 공시체에 過轉壓에 가까운 상태로 다졌기 때문에 反復應力の 영향이 나타나지 않기 때문일 것으로 생각된다.

5. 結 論

(1) 反復荷重을 받은 흙의 殘留變形은 反復應力 외에도 含水比나 密度의 영향을 받으며, 含水比가 낮을수록, 密度가 클수록, 殘留變形은 작고, 反復回數 增加에 따라 漸増하지만 그 增加率은 현저히 減少하였다.

(2) 載荷回數에 대한 殘留變形의 增加率은 含水比가 塑性限界를 境界로 해서 그 傾向이 다르다.

즉, 塑性限界 以上の 含水比에서 反復回數가 증가하면 變形의 增加率은 크게 되지만, 含水比가 塑性限界 보다 낮으면 變形의 增加는 크지 않다.

(3) 反復荷重을 받은 후에 彈性變形係數는 反復後 행한 일축압축강도에서 구한 흙의 初期接線係數 보다 약간 크고 유사한 變化를 나타냈으며, 임의 횡수의 反復載荷를 받은 흙의 初期接線係數는 彈性變形係數에서 推定할 수 있다.

(4) 정적 일축압축시험에서 塑性적인 舉動을 나타낸 粘性土의 供試體에 미리 反復荷重을 가한후 정적 일축시험을 행하면, 그의 應力-變形率 곡선의 형은, 반복하중을 받지 않은 공시체와 다른 형인 彈塑性體와 같은 형을 나타내며, 일축압축강도는 密度가 높을수록, 含水比가 낮을수록 크다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구소의 '88목적기초연구의 일환으로 수행중인 일부이며, 본 연구에 협조해준 여러분께 감사드립니다.

參 考 文 獻

1. Gaskin, P. N., Raymond, G. P. and Addo-Abedi, F. Y., "Repeated Compressive Loading of a Sand",

Canadian Geotechnical Journal, Vol. 16, 1979, pp. 798-802.

2. Shacke I B, "Repeated Loading of soils-A Review", *Australian Road Research*, vol. 5, No. 3, Oct. 1973, pp. 22~47.

3. Stephen, F. B, "Repeated Load Testing of a Granular Material", *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, Vol. 100, GT. 7, 1974, pp. 825~841.

4. 千柄植, 曹泳求, "火力發電所에서 副産되는 石灰土의 工學的 特性", *大韓土木學會論文集*, Vol. 8, Vol 8 1988, pp. 59~66.

5. 土質工學會 編集委員會, "土と構造物の 動的相互作用", *日本 土質工學會*, 1979, pp. 411~452.

6. 千柄植, 吳在應, "地盤振動理論과 實際", *建設研究社*, 1978, pp. 798~802.

7. 安原一哉, 平尾和年, "燥返し荷重 をうはる 飽和粘土の 舉動," 第 17 回 土質工學研究發表會發表 講演集 1982, pp. 1717~1720.

8. 岩尾雄四郎外 4名, "有明粘土層의 燥ろ返う 應力試驗," 第 19 回 土質工學 研究發表會發表 講演集 1984, pp. 523~524.

9. 實鳥正人, "燥返し載荷を受ける粘性土 の 動的變形特性", 第 20 回 土質工學 研究發表會發表 講演集 1985, pp. 649~650.

10. 千西有三外 2名, "燥返し載荷を受けた粘土の 強度特性について," 第 20 回 土質工學研究發表會發表 講演集 1985, pp. 653~656.

11. Raymond, G. P., and Gaskin, P. N., "Repeated Compressive Loading of Leda Clay", *Canadian Geotechnical Journal*, vol 16, 1979, pp. 1~10.

12. 櫻井裁之, "くろ返し荷重を受ける粘土 の 變形特性", *日本道路公團 試驗所報告*, 1974, pp. 40~44.

13. 河上房義, 小川正二, "くろ返し應力を受けた締固め土の 力學的性質", *日本 土木學會 論文集*, No96, 1965 a, pp. 8~14.

14. Lambe, T. W., "The Engineering Behavior of Compacted clay", *Journal of soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 84, SM2, May, 1958, pp. 567~578

15. 吉團洋, "燥返「荷重を受ける不かく亂まさ土 の 變形特性", 第 19 回 土質工學研究發表會發表 講演集, 1984, pp. 529~530.

16. 佐々木康, 永井文男, "燥返し荷重による砂 の 永久變形

量についこ”，第21回 土質工學研究發表會發表 講演集，
1986, pp. 619~620.

17. 安原一哉外 2名, “燥返し荷重をうける 飽和粘土 地盤
の 間隙水壓 の 評價 と 變形 解析”, 第21回 土質工學

研究發表會發表講演集, 1986 pp. 663~666.

18. 石原研而, “土の動的強度”, 土と基礎, July, 1972. pp. 73
~79.

(接受: 1988. 11. 11)