

# 反復荷重으로 인한 地盤의 變形 豫測

## Approximate Prediction of Soil Deformation Caused by Repeated Loading

都            德            鉉\*  
Doh,        Duk        Hyun

### Summary

The Repeated Load Triaxial and Oedometer Tests to the weathered granite & silty clay soil have been fulfilled to investigate their dynamic characteristics.

The results obtained are summarized as follows :

1. In the relation between the repeated triaxial compression and the oedometer test, the recoverable strain of weathered granite soil showed a tendency to decrease by the increase of the repeated loads number(N), and that of silty clay showed approximately constant values while the total strain increased continuously.
2. The changes of plastic strain was dependent to the level of deviator stress which is the most important element in the calculation of soil deformation under repeated load condition. And there was a significance of 10% between the level of stress and plastic strain.
3. When the soil was almost dried or saturated to 100%, the deformation by the repeated loads was small.

However the deformation showed peak around the saturation of 50%.

4. When the deformation was predicted by the repeated triaxial load tests of a laboratory, it is desirable to introduce the threshold stress concept in the calculation of deformation of subgrade of the pavement.
5. The improved design equation (Eq. 16) introducing the modulus of conversion( $F_0$ ), which is based on the Boussineq's theory, is considered to be rational in the design of flexible pavement. From the above results, the deformation to the repeated traffic loads could be predicted by the repeated triaxial tests on the pavement materials or undisturbed soil layers, therefore it is think that the durable and economic pavement could be constructed by reflecting that to the design.

---

\*建國大學校 農科大學

## I. 緒 論

도로 철도등은 장기적 또는 불규칙 및 주기적인 反復荷重으로 인하여 때로는 예측할 수 없는 變形이나 沈下가 일어난다. 또 파도나 풍속의 영향을 받는 海洋構造物등에서도 이와 비슷한 舉動이 예상된다.

도로의 基層이나 路床에서의 移動荷重으로 인한 動的 應力-變形舉動은 長期變形과 龜裂을 발생시키며 다양한 應力을 받아 여러가지 파괴형태를 나타낸다.

이와같은 파괴는 직접적으로는 차량의 停止, 制動, 加速 移動등에 의해 야기되며 適用應力의 크기 지속시간 振動數등의 영향을 받는다.

道路鋪裝의 파괴에는 두 類型<sup>11)</sup>으로 나눌 수 있다.

첫째는 停止車輛이나 移動車輛에 기인되는 路床의 과도한 塑性變形의 누적이다. 이와같은 永久變形은 노면의 평탄성이 결여되어 승차시 불편감을 주게된다.

둘째는 아스팔트 콘크리트의 龜裂이다. 이러한 형태의 파괴는 移動荷重에 의해 야기되는 疲勞의 대표적인 형태로서 Hveem에<sup>12)</sup> 의해 잘 표현되어 있다. 균열은 과도한 소성변형을 일으키고 표층을 裂化(Deterioration)시킨다. 이에 대한 鋪裝의 설계접근방법으로는 荷重反復數와 路床面에서 許容垂直壓縮變形量을 측정하는 방법과 이를 多層 彈性, 粘彈性 시스템으로서 累加永久變形을 예측하는 방법등이 사용되며 이와같은 변형에 대비한 설계는 다짐방법 壓密比(교란되지 않은 시료) 密度, 含水比, 適用荷重의 주기와 응력( $\sigma$ ,  $\sigma_c$ )의 크기, 지속시간, Thixotropy, 등의 요소를 고려해야 한다<sup>3,4,6,13,17)</sup>.

따라서 反復交通荷重으로 인한 永久變形 파괴와 龜裂 파괴를 방지하기 위하여 실험적 설계방법을 개발하는데 많은 연구를 해왔으며 California Highway Dept<sup>31)</sup>에서는 과거의 교통자료로부터 다음과 같은 交通指數(Traffic Index)를 사용하여 可撓性 鋪裝의 설계에 적용한 바 있다.

$$HK = \sqrt{P} \log N \dots\dots\dots(1)$$

여기서 HK; 파괴작용계수, P; 율하중, N; 반복하중의 주기수.

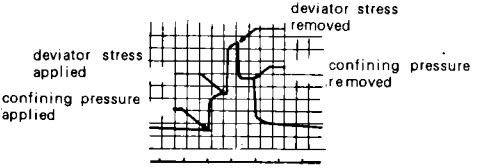
실내시험연구로서는 反復三軸試驗과 反復壓密試驗을 통하여 반복하중이 작용할때의 매카니즘

을 究明하는 것이 주요 대상이 되고 있다.

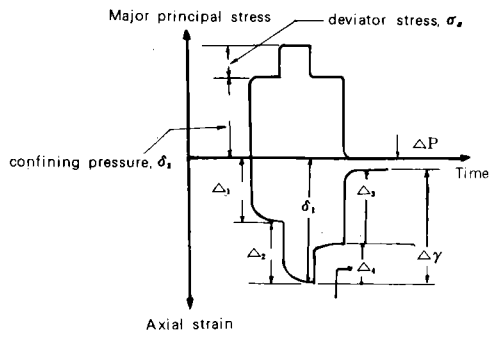
본 연구는 풍화화강토 또는 실트질 점토로 축조한 도로상에 반복교통하중이 작용할 때 이들 흙의 動的 舉動을 구명하고자 반복삼축시험과 반복합압밀시험을 통하여 反復荷重數와 彈性變形(Resilient Deformation) 또는 塑性變形과의 관계를 예측하고 적응력의 크기, 함수비, 단위중량등이 求久變形에 끼치는 영향을 조사하여 도로포장의 합리적 動的 設計에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

## II. 輪荷重의 性質

도로표면에 작용하는 輪荷重은 그 작용위치 및 하중, 응력의 크기, 진동수, 하중증가량등에 따라 路床에 끼치는 영향이 달라진다.



a) Deformation pattern in slow repeated confining pressure test



- $\Delta_1$  Axial strain due to volumetric compression
- $\Delta_2$  Strain due to deviator stress
- $\Delta_p$  Plastic strain
- $\Delta_r$  Resilient strain
- $\delta_t$  Total strain
- $\Delta_3$  Strain due to deviator stress removed
- $\Delta_4$  Strain due to confining pressure removed

b) Analysis of deformation

Fig. 1. Analysis of deformation and deformation-pattern in slow repeated confining pressure test.

Taylor<sup>32)</sup>에 의하면 큰 軸荷重과 높은 속도가 鋪裝道路의 수명을 약화시키는 요인이 된다고 하였다.

포장면에 交通荷重이 이동하면 Fig. 1(a)와 같은 응력이 작용하며 Fig. 1 (b)와 같이 매 주기마다 路床은 彈性變形과 回復되지 않은 塑性變形(永久變形)을 나타내면서 주기수가 반복됨에

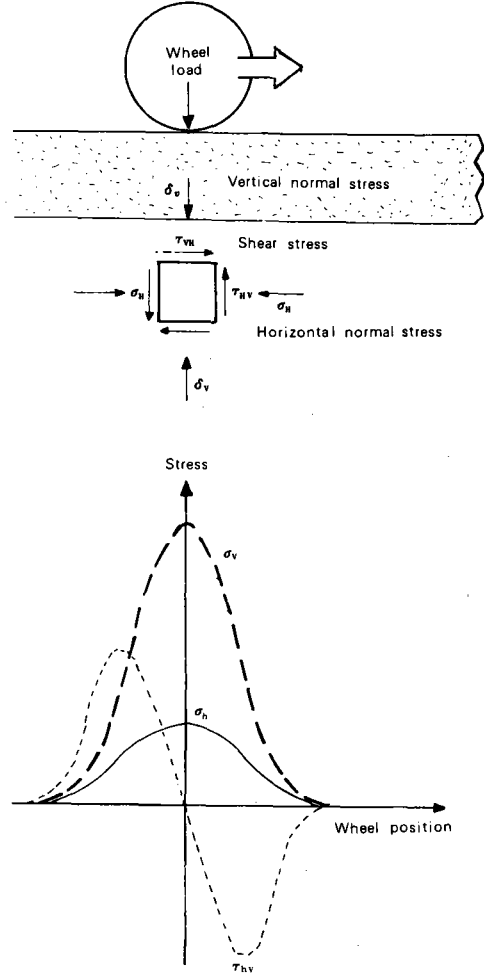


Fig. 2. Subgrade stresses.

따라 塑性變形이 누적되어 총 變形量이 증가한다 28).

路床의 미소 요소가 鋪裝두께와 剛性이 변함에 따라 응력이 변화되는 일반적인 형태는 Fig. 2와 같다.<sup>5)</sup> 이는 시험실에서 Cell 壓과 軸差應力의 脈動을 줌으로서 재현할 수 있으며<sup>2)</sup> 이때 지속 시간은 일반적으로 0.5~2.5sec로 알려져 있다<sup>10)</sup>.

이와같은 移動應力의 組合은 시험실에서 再現하기에는 매우 복잡하다. 종래에는 反復壓密試驗을 수행해 왔으나 이는 2차원 또는 3차원 상태를 고려할 수 없으므로 최근에는 이 결점을 反復三軸試驗에 의해 어느정도 보충하고 있는 실정이며<sup>25)</sup> Morgan과 William<sup>22)</sup> 그리고 Shackle<sup>30)</sup> 등은 供試體의 飽和度, 應力水準, 應力經路 등을 실제 포장에서와 거의 같은 조건으로 재현하여 실내실험을 실시한 바 있다. 또 인장하중의 발생을 고려하여 반복삼축시험을 수행한 결과를 보고한 바도 있다<sup>20)</sup>.

### III. 使用材料 및 試驗方法

#### 1. 使用材料

본 연구에 사용된 試料土는 서울 동대문구 회경동 배봉산에서 채취한 粗粒質 花崗土(A시료), 경기도 파주군 교하면 도로변에서 채취한 細粒質 花崗土(B시료), 미국뉴욕주 중심지 Newfield의 실트질 점토(C시료) 등 3종류이며 이들 試料의 粒度分布曲線은 Fig. 3과 같고 物理的 性質은 Table-1과 같다.

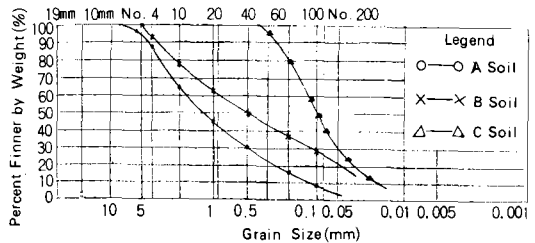


Fig. 3. Grain size distribution curves.

Table-1. Physical properties of soils used.

Soils	Specific gravity	Atterberg Limit			$G_{max}$ (mm)	Mechanical analysis (finer percent %)			A-1 Compaction		
		LL (%)	PL (%)	PI		No. 10	No. 40	No. 200	USCS	OMC (%)	$\gamma_{max}$ (g/cm <sup>3</sup> )
A	2.64	-	-	NP	9.52	62.0	28.0	8.5	SW, SP	10.5	1.83
B	2.67	30.2	-	NP	5.00	77.2	52.3	21.7	SM	18.4	1.61
C	2.75	58.5	31.0	27.5	0.40	100.0	100.0	42.2	CL-ML	23.4	1.53

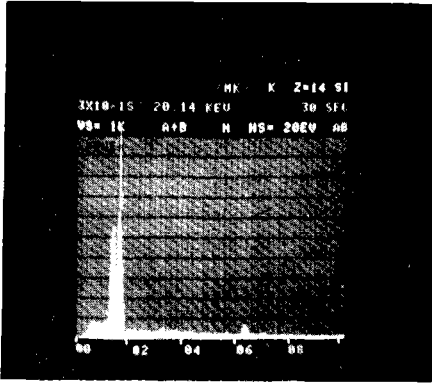
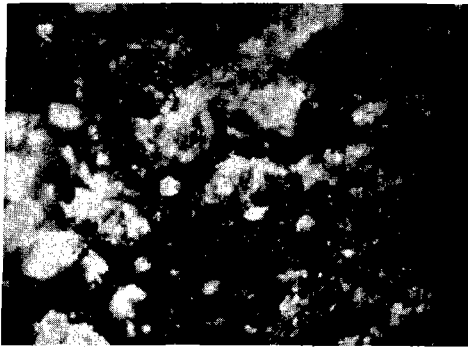
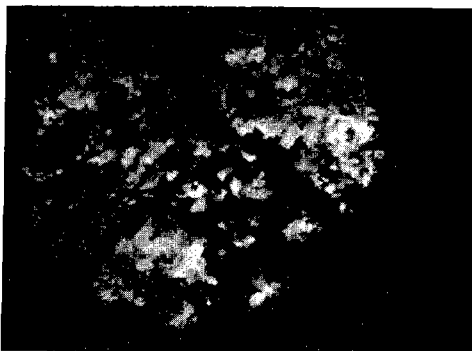


Photo. 1. X-Ray Energy Spectrometer (A soil).



i) Before repeated oedometer test.



ii) After repeated oedometer test.

Photo. 2. Results of Scanning Electron Microscopy (A soil).

이외에도 試料土의 化學成分과 구조를 조사하기 위하여 Photo.1,2와 같이 X-ray energy Spectrometer, Scanning Electron Microscopy 등의 시험을 하였다.

## 2. 試驗方法

### 가. 試料準備

#### 1) 反復三軸試驗

供試體는 교란되지 않은것과 다짐한 것을 사용하였다. 교란되지 않은 공시체 (C시료)는 트리마를 사용하여 주의깊게 제작하였으며 다짐을 한 공시체 (A 및 B시료)는 실험실 다짐용 기구로 개발된 Harvard Miniature Compaction Apparatus를 사용하여 A-1다짐에서의 OMC 및  $\gamma_{dmax}$ 와 동일하도록 공시체를 제작하였다. 이때 사용한 Temper는 18kg이며, 대략 5층 65회로 균일한 밀도가 되도록 ASTM committee D-18에 제안된 방법에 준하여 제작하였고 공시체의 크기는 3.8 cm (D) × 7.6cm (H)이다.

이때 乾燥單位重量의 변화는  $\pm 0.1g/cm^3$  含水比의 변화는 1% 이내로 하였다.

#### 2) 反復壓密試驗

교란되지 않은 供試體는 트리마에 의해 5 cm (D) × 2.5cm (H)의 壓密試驗用 공시체를 제작하였다.

### 나. 試驗方法

#### 1) 反復三軸試驗

##### 가) 供試體의 設置

다짐供試體는 실험하기 전 1~2일간 습기함에 넣어두었다가 실험 직전에 꺼낸 공시체에 여과지, 다공판, 공시체Cap을 설치한다. 그 후 멤브레인으로 공시체를 싸고 원형 ring으로 Sample base와 Load Cell에 묶고 LVDT를 공시체에 밀착고정하여 排水반복삼축시험을 하였다<sup>22)</sup>.

##### 나) 시험장치 및 data 기록

반복하중시험기는 조절된 하중을 공시체에 충격과 반복운동을 垂直油壓反復作動機(용량 1000 kg)에 의해 작동되며 反復荷重下에서 규정된 空氣壓으로 응력제어되는 垂直靜的 loader와 시험장치를 제어하는 材料試驗시스템(MTS) 등으로 이루어져 있다(photo. 3)<sup>15)</sup> 三軸Cell의 상세도는 Fig. 4와 같다. 한편 軸變形은 공시체 표면에 부착한 두개의 LVDT에 의해 측정된다.

시험중에 引張荷重이 발생되지 않는 荷重rod와

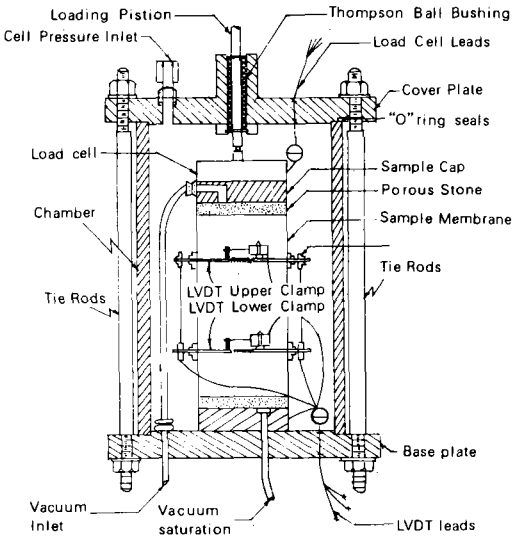
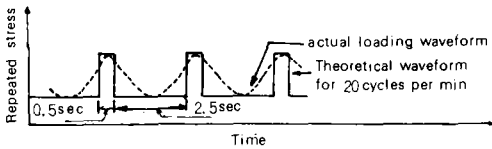
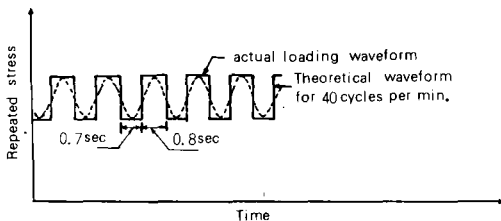


Fig. 4. Triaxial cell diagram.



(a) Repeated triaxial test.



(b) Repeated oedometer test

Fig. 5. Graphical representation of repeated loading waveforms.

공시체 cap 사이의 단단한 철구(steel ball)에 의해 수직하중이 전달된다. 두개의 LVDT와 하중 Cell, MTS작동기의 LVDT등으로 부터 오는 신호는 컴퓨터에서 감시된다.

反復軸差應力은 Fig.5(a)와 같이 대략 分當 20 피크 하중이 나타난다. 反復軸差應力은 여러가지로 변화시키면서 서로 다른 水準을 적용하였다.

기계는 중단없이 10<sup>4</sup>회까지 측정가능하며 水平垂直應力과 彈性變形, 永久變形, 間隙水壓 등은 연속적이거나 임의시간에 측정할 수 있다.

## 2) 反復壓密試驗

기존 Oedometer 시험기를 Fig. 6 및 Photo. 4와 같이 反復荷重이 기계적으로 작용하고 應力水準과 振動數의 변화가 가능하게 荷重裝置를 개조하여 사용하였다.

反復荷重試驗은 수직변형 측정용 다이얼게이지를 비롯하여 간극수압측정을 위해 정확한 기록장치를 사용하고 안정된 동력공급이 되도록 하였다. 공시체의 다공관은 시험중에 공시체바닥에서 일정한 排水가 되도록 장치하였다.

교란되지 않은 시료를 자연함수비 상태에서의 靜的 및 反復壓密 시험을 하였다. 이 시험 장치는 dial gauge LVDT 그리고 減衰抵抗, 赤外線記錄計와 안정된 동력공급으로 이루어져 있으며 反復回數는 Fig.5 (b)와 같이 40cycle/min로서 동일한 시시체에 대하여 應力水準을 변화시키면서 각각의 수직하중에는 10<sup>5</sup>회까지 반복하였으며 반복횟수에 따라 다이얼 게이지로부터 彈性變形과 塑性變形을 처음 8分까지는 每分마다 16, 30, 60分 그리고 그 이후부터는 매 시간마다 측정하였다.

이와 같은 실험장치에 의하여 反復回數別 沈下量과 間隙水壓을 측정하였다.

## IV. 結果 및 考察

### 1. 反復三軸試驗

#### 가. 變形 特性

可撓性 鋪裝의 構造設計에 있어서 路床에서 발생하는 永久變形(rutting)을 최소화 하기 위하여는 어느 특수 反復交通荷重數와 관련하여 수직압 축응력을 許容量으로 제한해야 한다. 즉, 사용재료의 선택, 적절한 설계시공방법을 통한 재료 특성을 조절하거나 허용변형수준을 초과하지 않는 충분한 剛性이 있는 재료를 소정의 두께로 시공하므로써 許容値보다 작은 永久變形이 발생하도록 해야한다 (16, 18, 29).

현실적으로는 실내실험에서 측정한 시료토의 특성으로부터 발생될지도 모르는 永久變形의 量을 실측하여 포장두께를 결정하는 해석방법이 많이 사용되고 있다. 공시체의 靜的인 하중이 점진적으로 증가되면 흙의 구조결괴가 압축됨과 동시에 單位重量이 증가되며 어느 한계이상의 하

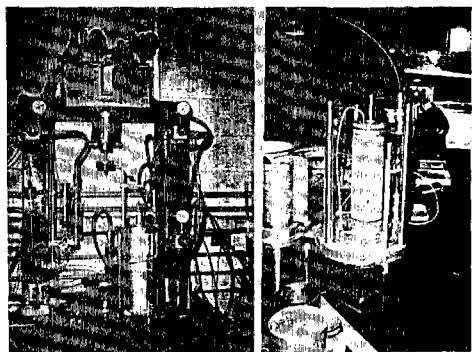


Photo. 3. Repeated triaxial apparatus.

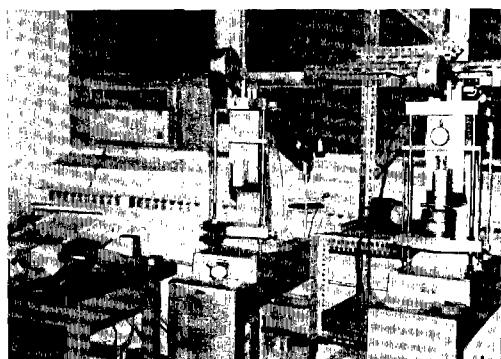


Photo. 4. Repeated oedometer apparatus.

중에서는 土粒子의 相對的 滑動에 의하여 剪斷破壞가 일어난다. 만약 공시체가 反復荷重을 받으면 總變形은 載荷重에 의해서 일어나고 彈性變形은 除荷重에 의해서 일어나며 이 과정에서 반복주기가 지날때 마다 塑性殘留變形(永久變形)이 남게 된다.(Fig. 1). 즉, 반복하중을 받는 동안 공시체의 변형과정은 靜的인 하중에서와 같으나 前者는 점진적이고 계속적으로 응력이 증가하는 반면, 後者는 동일한 응력이 반복되는 것이다.

Fig. 7은 B시료에 대하여 軸變形, 放射(Radial)變形 및 體積變形( $\epsilon_r = \epsilon_1 - 2\epsilon_3$ )과 적용응력수와의 관계를 半對數紙에서 나타낸 것이다. 그림에서 하중주기가 반복됨에 따라 軸變形과 體積變形은 증가(압축)하고 放射變形은 점차 팽창한다. 이는 Monismith<sup>21)</sup>의 결과와 거의 일치된다.

Fig. 8은 試料別로 OMC로 다진 A, B 및 C시료를 대상으로 反復三軸試驗에 의한 荷重反復數와 塑性變形 및 彈性變形과의 관계를 應力比別로 나타낸 것으로 塑性變形 뿐만아니라 彈性變形도 반복하중이 가해지는 동안 變形量은 시간

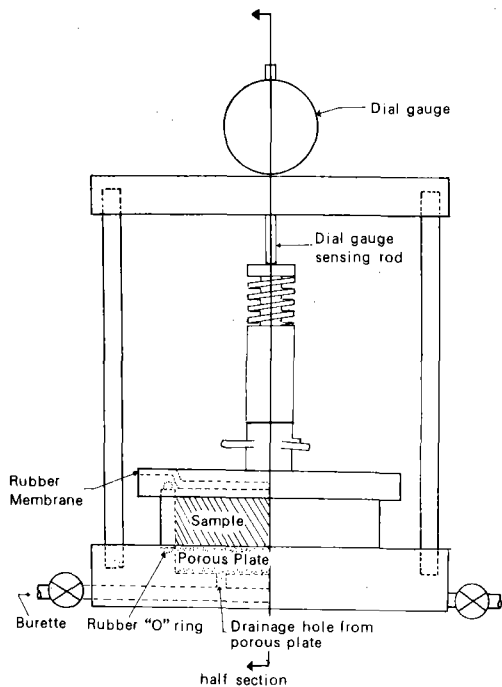


Fig. 6. Diagrammatic layout of oedometer cell.

에 의존한다는 것을 알았다. 따라서 변형은 본질적으로 彈性變形과 일치하지 않는다.

Fig. 9는 塑性變形과 彈性變形사이의 模式圖를 나타낸 것인데<sup>33)</sup> 여기서 임의의 荷重反復數에서의 총변형  $\delta_t$ 는 소성변형  $\delta_p$ 와 彈性變形  $\delta_e$  성분이 합이 된다.

따라서,

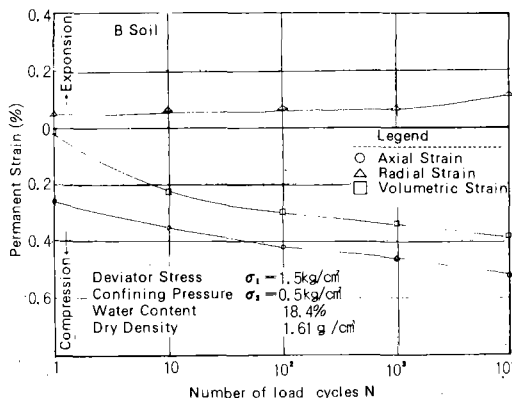
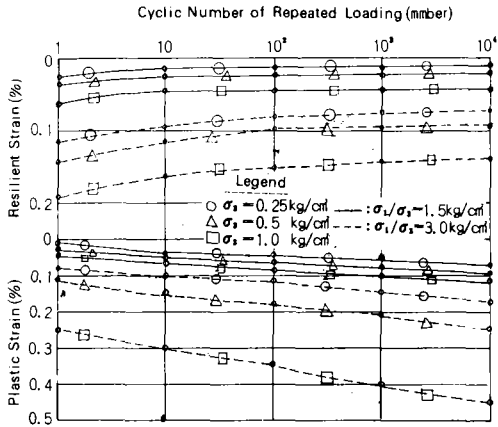


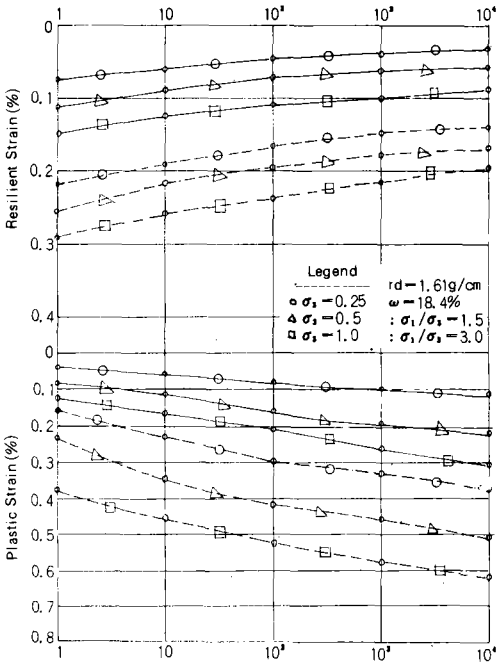
Fig. 7. Correlation of axial and radial strain and volumetric strain in repeated triaxial test.

反復荷重으로 인한 地盤의 變形 豫測

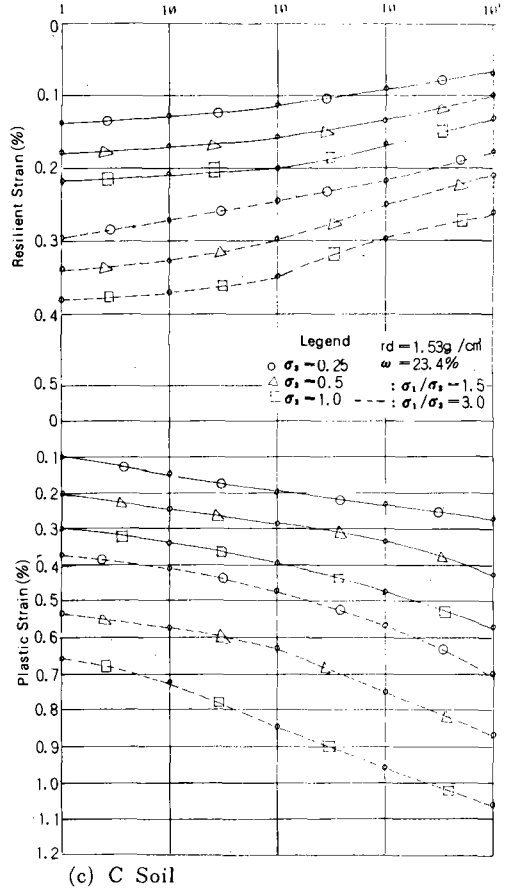


(a) A Soil

Water Content 10.5%  
 Dry Density 1.83g/cm<sup>3</sup>  
 Frequency of Stress Application 40per min  
 Duration of Stress Application 1.5sec



(b) B Soil



(c) C Soil

Fig. 8. Correlation of the number of repeated loading resilient strain and plastic strain.

的 性質, 土粒子的 初期構造, 反復荷重의 振動數 등에 좌우된다.

여기서  $N_n$ ,  $N_0$ 는 하중반복의  $n$ 번째와 첫번째 수이며  $\xi_n$ ,  $\xi_0$ 는  $N_n$ 과  $N_0$ 에 대응하는 變形比이다. 따라서 供試體의 파괴시에 하중주기수의 예측을 위하여 필요한  $\xi$ 값은 식(4)에서 결정해야 한다.

$\theta$ ,  $\xi_0$ 와  $\delta_{p1}$ (첫번째 하중주기수에서 회복되지 않는 변형)의 값은 이미 주어진 것으로 가정하였다.

前述한 바와 같이 反復荷重하에서 흙 공시체에 주어진 주기수에서 總變形( $\delta_t$ )<sub>n</sub>은 彈性變形( $\delta_e$ )<sub>n</sub>과 回復될 수 없는 變形( $\delta_p$ )<sub>n</sub>으로 이워진다.

$$\text{즉, } (\delta_t)_n = (\delta_p)_n + (\delta_e)_n \dots\dots\dots (3)$$

$$\delta_t = \delta_e + \delta_p \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 10은 화강토 시료에 대한 荷重反復數와 變形比 즉 총변형에 대한 塑性變形比( $\xi$ )와의 관계를 나타낸 것으로 破壞領域(0.75~0.90) 부근에 도달하기 전까지는 하중반복수와 變形比는 半對數紙에서 직선관계를 보여주고 있다<sup>33)</sup>.

이때  $\xi - \log N$ 사이의 線型관계는 시료의 物理

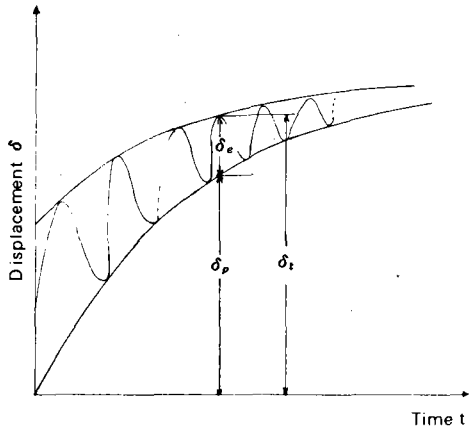


Fig. 9. Modelling of strain-time behavior generated by repeated loading.

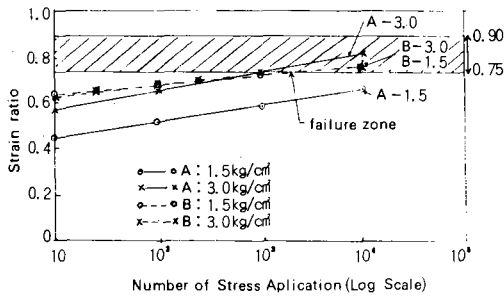


Fig. 10. Typical strain ratio-number of load cycles relation in repeated triaxial compression tests on a compacted sandy soil (A and B soils).

이 된다.

탄성 변형은累加회복되지 않는 변형에 비하여 매우 작기 때문에 대략적으로 다음의 값으로 가정한다

$$(\zeta_e)_n \doteq (\delta_e)_1 \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $(\delta_e)_1$ 은 탄성 변형이다.

그러므로 식(2)은

$$(\zeta_t)_n \doteq (\delta_e)_1 + (\delta_p)_n \dots\dots\dots (5)$$

이 되며 변형비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\zeta_n = \frac{(\delta_p)_n}{(\delta_p)_n + (\delta_e)_1} \dots\dots\dots (6)$$

식(4)과 식(5)를 합하면

$$\zeta_n = \frac{(\delta_p)_n}{(\delta_p)_n + (\delta_e)_1} \dots\dots\dots (7)$$

이를 다시 정리하면

$$(\delta_p)_n = \zeta_n \frac{(\delta_e)_1}{1 - \zeta_n} \dots\dots\dots (8)$$

따라서 반복하중 n번째 주기수에서의 총변형은

$$(\delta_t)_n = (\delta_p)_n + (\delta_e)_n = \frac{(\delta_e)_1}{1 - \zeta_n} \dots\dots\dots (9)$$

또 변형 -log N관계에서 식(2)의 2가지 변형요소 중 土粒子的 破碎性이 큰 풍화화강토(A, B 시료)의 경우 탄성 변형은 반복횟수가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있으나 이를 무시하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta_e}{\delta_t} + \frac{\delta_p}{\delta_t} = 1.0 \dots\dots\dots (10)$$

식(10)의 좌변 1항은  $N \rightarrow \infty$ 에서 다음과 같은 최종 변형량을 예측할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{\delta_e}{\delta} \right)_t &= 0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{\delta_p}{\delta} \right)_t &= 1.0 \\ \lim_{t \rightarrow \infty} (\delta)_t &= \delta_f \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

한편 應力水準이 낮으면 荷重反復數에 따라 軸變形이 적으나 應力水準이 커짐에 따라 軸變形이 점차 커지다가 결국 파괴된다. 이는 Fig. 11과 같은 Glynn<sup>9)</sup>의 연구결과로부터 應力水準이 증가할 때 본 시료의 파괴패턴을 예상할 수 있을 것으로 생각된다. 또 Brown<sup>2)</sup>과 Seed<sup>29)</sup> 등은 변형에 대한 저항력의 증가는 반복응력적용의 크기와 반복수에 의해 좌우된다고 하였다. 그러나 실트질 粘土와 같은 지반에 가벼운 反復交通荷重이 작용하면 Thixotropy현상에 의하여 強度가 회복되어 변형에 대한 저항력이 증가한다는 것은 도로의 변형에 영향을 끼치는 요소이다. 이는 應力適用數와 應力變化의 크기 및 含水比의 변화에 영향을 받을 가능성이 있는 것으로 이 역할은 鋪



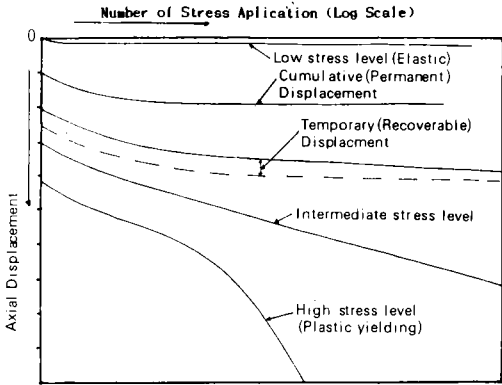


Fig. 11. Typical results of repeated load triaxial compression tests.

裝이 파괴되기 전에 적용할 수 있는 反復應力數를 결정하는 중요한 요소가 될 수 있다.

Yasuhara<sup>33)</sup> 등은 응력이 初期應力을 초과하였다 하여도 應力適用의 수(N)가 적을 때 생긴 永久變形은 대략 直線에 가깝다고 하였다. 즉,

$$\epsilon_p = m_p(\sigma_a - \sigma_0) \dots \dots \dots (12)$$

여기서  $m_p$ : 비례상수(이 크기는 軟性에서 剛性범위내에서는 흙의 Consistency에 좌우된다).

$\sigma_a$ : 軸差應力

$\sigma_0$ : 初期應力

Fig. 12는 荷重反復數와 공시체의 피로수명 관계를 보다 상세히 나타내 주고 있다. Fig. 12에서 I과 II는 3가지 다른 변형과정의 전환점이 된다. 만약 반복하중을 받는 공시체의 피로수명이 荷重反復數와 일치한다면 점II에 대응하는 荷重反復數는 바로 공시체의 피로수명이 될 것이며, 반복하중이 크면 클수록 이 수명은 짧아진다.

여러가지 反復應力인  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 와  $\sigma_4$ 가 II점에 대응하는 하중주기수는 각각  $N_1, N_2, N_3$ 와  $N_4$ 이다.

여기서  $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 < \sigma_4$ 이면  $N_1 > N_2 > N_3 > N_4$ 이 되며 만약 피로수명이  $N_1$ 이라 가정하면  $\sigma_1$ 에 대한 공시체의 許容反復應力이 될 것이다.

또 C시료와 같은 실트질 粘土의 경우 주기과 응력이 증가됨에 따라 覆歷減衰가, 약간 감소하여 많은 주기들을 반복한 후에도 파괴는 계속되며 永久變形은 靜的荷重試驗보다 현저히 컸다. 이는 土粒子의 구조변화 粘土의 Creep현상 卓越(predominant) 2次壓密에 기인하는 것으로 생

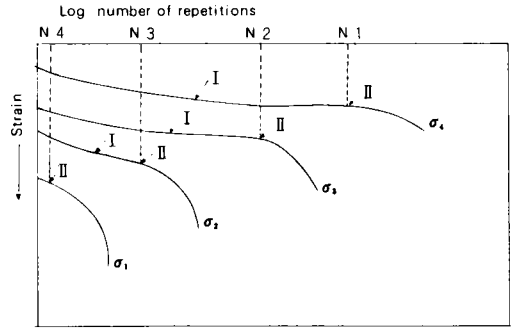


Fig. 12. Hypothetical strain vs number of load repetition.

각된다.

주기수와 소성변형과의 관계는

- (1) Arithmetic(소성변형 對 축차응력)
- (2) Semilogarithmic(소성변형 對 축차응력의 상용대수)
- (3) log-log(소성변형의 상용대수 對 축차응력의 상용대수)

등으로 나타낼 수 있으며 각각의 그림에서 直線 回歸分析에 의하여 변형량을 예측할 수 있다. 이 중에서 일반적으로 사용되고 있는 半對數紙 방법으로 Yasuhara<sup>33)</sup> 등이 分析한 식은 다음과 같다.

$$E^p = Be^{nx} \dots \dots \dots (13)$$

여기서 B와 n은 실험상수이다. 합리적으로 설계된 기존 鋪裝構造의 路床, 基層등에서는 관계적인 交通荷重으로부터 비교적 작은 응력이 작용한다. 즉, 拘束壓力 10kg/cm<sup>2</sup>이상은 기대할 수 없으므로 적용된 軸差應力이 X=0.55를 초과할 수 없다. 실제의 목적에는 Dyaljee & Raymond<sup>7)</sup>에 의하면 고속도로 路床砂質土의 소성변형은 다음식을 이용할 수 있다고 하였다.

$$E^p = 0.004e^{4.07X} N^{0.12} \dots \dots \dots (14)$$

윗식은 Olowokere<sup>25)</sup>의 資料分析 결과에 의하여 입증되고 있으며 이와같은 分析方法은 실내실험 시간 절약에 크게 기여할 것이다.

Barksdale<sup>1)</sup>은 粒狀土에 대한 反復三軸 壓縮으로부터 다음과 같은 永久變形量 豫測公式를 제시하였다.

$$\frac{E^p}{\sigma} = \frac{1/K\sigma^n}{1 - \frac{\bar{\sigma}Rf(1 - \sin\phi)}{2(C \cos\phi + \sin\phi)}} \left(\frac{N}{N_0}\right)^m \dots\dots\dots(15)$$

여기서 E<sup>p</sup>; 塑性變形(永久變形)  
 Kσ; 拘束壓의 함수로서 초기탄젠트 계  
 계수조정의 함수있음.  
 C; 粘差力  
 ϕ; 내부마찰각  
 Rf; 0.75 ≤ Rf ≤ 1에서 점근적인 應力  
 差와 壓縮強度와의 관계되는 상수  
 m; 경험계수  
 σ; 平衡應力

Finnie<sup>8)</sup> 등에 의하면 주기수와 소성변형 관계  
 는 E<sup>p</sup> = AN<sup>m</sup>으로 나타낼 수 있다고 하였다 (여기  
 서 A, m은 실험상수, N은 주기수)

한편 塑性 變形量은 공시체 자체의 含水比의  
 영향을 받는다.

Fig. 13은 화강토를 대상으로 飽和度가 변형에 끼  
 치는 영향을 나타낸 것이다. N<sub>c</sub> = 10회 이상에서  
 는 氣乾狀態와 飽和狀態의 공시체에서 변형의 차  
 는 극히 작으나 중간의 飽和度(S<sub>r</sub> = 54.6%)의 공  
 시체는 앞의 兩者에 비해 변형량이 컸다. 따라서  
 부분포화 점성토의 경우 함수비가 흙의 力學的  
 舉動을 좌우하는 결정적 요인이 된다. 만약 반복  
 응력의 크기가 밀도를 증가시키는데 충분하고 흙  
 이 반복응력작용에 의해 다져져서 飽和度를 높인  
 다면 강도가 감소된다.

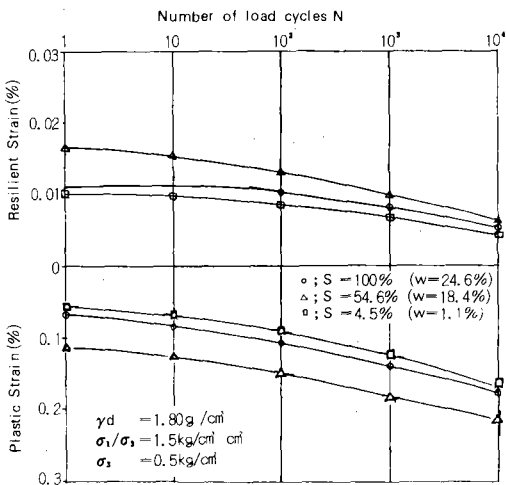


Fig. 13. The effect of strain characteristics and degree of saturation. (C soil)

많은 연구자들은<sup>19), 23), 26), 27)</sup> 이를 含水比와  
 soil suction의 기능으로 기술하였다. 反復荷重은  
 間隙水의 排水와 吸入力(suction)이 교대로 발생  
 하기 때문에 주기적 하중기간이 길수록 變形(沈  
 下)量이 크다.

즉, 反復荷重을 받으면 토립자 사이의 吸入力  
 이 감소한다. 그리고 初期 吸入値는 OMC의 2%  
 乾燥測으로 알려졌다.

Cunning<sup>6)</sup>은 移動荷重 전 후의 間隙水壓에 대  
 해서 "Bow와 Stern" 理論을 제안한 바 있다. 이  
 에 의하면 이 압력은 土粒子의 분리를 야기시키  
 고 무거운 輸荷重 전 후에서 鋪裝의 부풀음 현상  
 을 일으키게 한다고 하였다.

反復排水三軸試驗에서 반복하중인 작용하는 동  
 안에 발생하는 Dilatancy 效果는 有效應力比 뿐만  
 아니라 반복하중의 振動數에 지배된다<sup>14)</sup>.

나. 變形係數

變形係數는 흙의 強度特性과 관련된되는 중요  
 한 요소이다. 흙이 交通荷重으로 구성된 反復荷  
 重을 받을 때 荷重의 작용을 평가하기 위해서는  
 그와 같은 흙의 變形係數를 고려해야 한다.

Fig. 8(c)에서 하중주기수를 Parameter 로서  
 이용하면 Fig. 14과 같은 應力과 變形의 관계를  
 얻을 수 있다.

Fig. 14에서 곡선은 대략 3단계로 구분할 수  
 있다.

첫단계는 下降伏點에서 硬化效果가 발생하는  
 점이며 이때 공시체의 변형은 상당히 크다. 이단  
 계에서 變形率은 하중반복주기수가 증가됨에 따  
 라 감소되기 때문에 곡선간의 거리는 점진적으로  
 좁아진다.

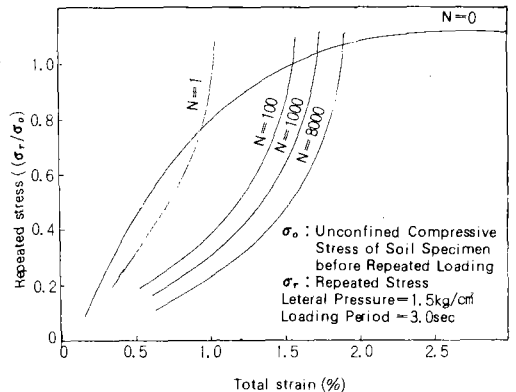


Fig. 14. Repeated stress vs strain. (C soil)

두번째 단계는 硬化의 시작점으로부터 그것이 끝나는 점이다. 변형의 증가율은 응력증가에 비하여 감소하며 공시체는 彈性的으로 변형한다.

세번째 단계는 硬化效果가 거의 최대에 달하는 점으로서 흙은 Microscopic 현상을 나타낼 것이며 그 안에서는 거의 보이지 않는 變形이 생겨 결국 파괴에 이른다. 이때 요구되는 반복하중 주기수는 반복하중이 커짐에 따라 적어질 것이다.

Fig. 8(c)에서 할선계수 (Second Modulus) 방법을 이용하여 變形係數值  $E_0$  (靜的荷重方法으로),  $E_{8000}$  ( $N=8000$ 에 대한 반복하중방법으로) 그리고  $\frac{E_{8000}}{E_0}$ 의 비를 구하면 흙공시체의 變形係數值는 累加變形으로 인하여  $N$ 의 증가와 더불어 감소되므로  $N=0$ 에서 더 크다. 그리고 이 값은 변형이 결국 일정하게 되어 한계치에 도달한다. 즉 흙 공시체는 硬化效果가 두번째 단계의 끝에서 극에 달한 후에 Brittle 파괴를 일으키게 되므로 變形係數의 값은 0이 될 것이다.

鋪裝의 設計에서 차량의 推定數는 곧 흙의 變形係數를 결정하는 하중주기의 수가 된다.

그러나 실제로는 위에서 언급한 바와같이 反復荷重에서의 變形係數 ( $E_r$ )는 대개 측정횟수에 비해 매우 작은 하중주기에서 극한치로 된다. 따라서 흙의 變形은 變形係數를 결정한  $N$ 值가 되도록 압축된 하중주기를 취해야 한다.

본 실험에서 細粒質 花崗土 (B시료)의 경우  $N$ 值는 약 8000회이며 이 값을 취하여 變形率  $\epsilon = 1.0\%$ 에 대한 반복하중하에서의 變形係數는 側壓을  $1.5\text{kg/cm}^2$ 로 하였을 때 不拘束試驗에서  $199\text{kg/cm}^2$ , 拘束試驗에서  $273\text{kg/cm}^2$ 이었다. 軸荷重  $P$ , 접선반경  $a$ , 彈性係數  $E$ 인 路床이나 補助基層의 許容變形量  $\Delta$ 인 이상적인 재료에서의 이론적 응력을 취한 Boussinesq의 공식을 기초로 삼축시험을 하여 可撓性 鋪裝의 두께 ( $G$ )를 결정할 때 다음 설계공식이 사용된다.

$$T = \sqrt{\left(\frac{3P}{2\pi E \Delta}\right)^2 - a^2} \dots\dots\dots (16)$$

이 식에서 路床의 變形係數  $E$ 는 정적하중방법으로 결정되며  $E$ 值는 Fig. 14에서  $N=0$ 을 나타내는 곡선에서 구한다. 반복하중인자를 고려하면  $E$ 值는  $N=0$ 대신  $N>1$ 인 곡선에서 결정해야한다. 그러나 간단한 설계를 위하여 정적하중방법에 의하여 결정된 變形係數를 반복하중의 그것

으로 환산한 환산계수 ( $F_0$ )를 사용한다. 즉  $F_0 = E_0/E_r$ 이 된다.

따라서 식 (16)은 다음과 같이 된다.

$$T = \sqrt{\left(\frac{3P F_0}{2\pi E \Delta}\right)^2 - a^2} \dots\dots\dots (17)$$

본 실험에서는  $E$ 값이 거의 압축된 점에서의  $N$ 值는 약 8000주기이다. 따라서  $\epsilon = 1.0\%$  변형에 대한  $E_r$ 值는  $273\text{kg/cm}^2$ 이 되고  $\epsilon = 1.0\%$ 에 대한 靜的 變形係數  $E_0$ 는 Fig. 14에서 각각  $361\text{kg/cm}^2$ 이다.

따라서 換算係數  $F_c$ 는 다음과 같다.

$$F_c = \frac{E_0}{E_r} = \frac{361}{273} = 1.32 \dots\dots\dots (18)$$

CBR시험과 平板載荷 試驗值도 이와 같은 방법으로 처리하여 사용하는 것이 안전할 것으로 생각된다.

## 2. 反復壓密試驗

反復壓密試驗은 연약지반상에 도로를 축조하였을 때의 次下量 豫測에 유용한 방법이다.<sup>33)</sup>

Fig. 15는 교란되지 않은 C시료를 반복압밀시험에서의 反復回數와 彈性 變形 및 塑性變形과의 관계를 반복하중의 크기별로 나타낸 것이다. 反復三軸試驗에 비하여 復元性 및 塑性變形量이 적은 값으로 나타났다.

그리고 彈性은 반복횟수가 증가함에 따라 거의 일정하거나 약간 감소하는 경향을 보였다.

반복삼축시험에서의 持續時間은 3sec이었으나 반복압밀시험에서는 1.5sec로 실시하였고 또 反復荷重의 크기가 다르므로 상호간의 비교가 어려우나 일반적으로 反復壓密試驗에서 總變形量이 반복삼축시험에서보다 적은 것으로 나타났다.

## V. 結 論

花崗土와 실트질 粘土를 대상으로 反復三軸 및 反復壓密試驗을 실시하여 對象土의 動的 성질을 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 反復應力과 反復回數와의 관계는 花崗土의 경우 반복하중수가 증가함에 따라 彈性 變形이 약간 감소하는 경향을 보였고, 실트질 점토는 거의 일정한 값을 보였으며 총변형은 계속 증가되었다.

이 논문은 한국과학재단 1986년도 국제공동 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

參 考 文 獻

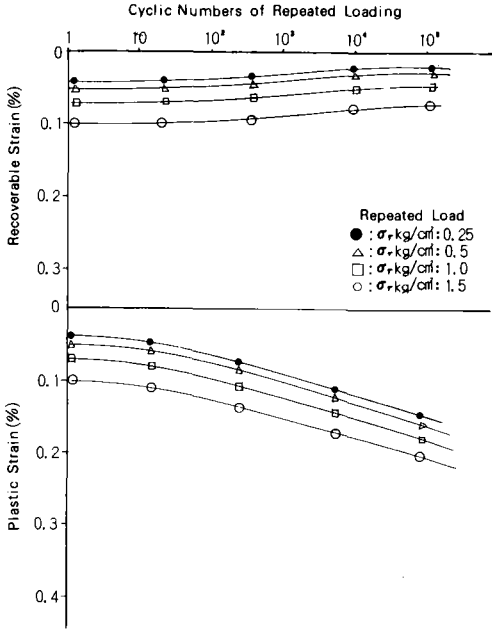


Fig. 15. Correlation of the number of repeated loading resilient strain and plastic strain in repeated oedometer tests. (C soil)

2. 塑性變形的 변화는 주로 軸差應力에 좌우되며 軸差應力은 반복하중하에서 흙의 無形量 계산에 가장 중요한 요소이다. 본 시험에서는 應力水準과 塑性變形사이에는 10%의 유의성이 인정되었다.

3. 乾燥土에 가깝거나 또는 飽和度가 100%에 가까운 함수상태에서는 반복하중의 작용에 따른 변형량은 적었으나 飽和度50%내외에서는 변형량이 피크를 이루었다.

4. 鋪裝道路 路床의 침하량은 반복 하중시험으로부터 변형량을 예측할 경우 초기응력 개념을 도입하는 것이 바람직하다.

5. Boussinesq의 이론을 기초로 하여 換算係數를 도입한 設計公式 (Eq. 16)을 可撓性 鋪裝 설계에 적용하는 것이 바람직하다고 생각된다.

이상의 실험결과에 의하면 포장도로 工事用材料 또는 기초지반의 교란되지 않은 시료로부터 反復三軸 또는 反復壓密試驗을 실시함으로써 耐久의이고 經濟的인 포장을 건설할 수 있을 것으로 생각된다.

1. Barksdale R. D. ; Compressive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for use in Dynamic Testing, HRB, Record No. 345 (1971).
2. Brown, S. F, K. H. Andersen, and J. McElvaney ; The Effect of Drainage on Cyclic Loading of clay Proc. of the 9th ICSMFE, Vol. 2. 195-200 (1979).
3. Brown, S. F. and A. F. L. Hyde ; Repeated Load Triaxial Testing of a Silty Clay, Geotechnique 25, No. 1 95-114 (1975).
4. Brown, S. F. and P. S. Pell ; Subgrade Stress and Deformation under Dynamic Load ASCE, Vol. 93. No. SM1 17-46 (1968).
5. Chaddock B. C. J. ; Repeated Triaxial Loading of Soil, Apparatus and Preliminary Result TRRL 711, 1-11 (1987).
6. Cunning. D. A. ; The Consolidation of a Layer of Saturated Soil under Moving Loads Proc. 1st A.R.R.B. Conf. (1962).
7. Dyaljee. V. A, and G. P. Raymond ; Repeattive Load deformation of Cohesiveless Soil ASCE GT. 10, 1215-1229 (1982)
8. Finnie. L. and W. K. Heller, Creep of Engineering Materials, Mcgraw Hill Book Co., Inc, New York. (1959).
9. Glynn B. E. et al. ; A Stress-Strain Relationship for Clays subjected to Repeated Loading, Proc. 7th Intl. Conf. Soil Mech. Found. Eng. I 159-163 (1969).
10. Grant R. ; A laboratory study of the effect of Repeated Loading on the Consolidation of a Subgrade Material, The University of New South Wales, school of Highway Engineering Thesis .
11. Hudson W. R. Vehicular Damage on Low -Volume Roads TRR 1106. 31-38 (1988).
12. Hveen, F. N. ; Pavement Deflections and Fatigue Failures. Bulletin 114, Highway

- Research Board, 43-87 (1955).
13. Hyde, A. F. L. and S. F. Brown : The plastic deformation of a silty clay under creep and repeated loading. *Geotec.* Vol. 26, No. 1, 173-184 (1976).
  14. Hyde, A. F. L. and S. J. Ward : A pore pressure and stability model for a silty clay under repeated loading. *Goetec.* Vol. 35, No. 2, 113-125 (1985).
  15. Jose R. Montalvo, Chris A. Bell and E. Wilson James : Comparison of Diametral and Triaxial Repeated Load Testing Techniques on Untreated Soils. TRR 988, 6-13 (1984).
  16. Kawakami F. and S. Ogawa : Strange and Deformation of Compacted Soil Subjected to Repeated Stress Applications. *Proceeding of the 6th ICSMFE.* Vol. 1, 264-268 (1965).
  17. Larew H. G. et al. : A Strength Criterion for Repeated Loads. HRB. No. 41, 529-556 (1960).
  18. Lentz R. W and Y. B Gilbert : Prediction of Permanent Strain in Sand Subjected to Cycle Loading. TRR 749, 54 (1980).
  19. Luo Wen-kum : The Characteristic of Soils Subjected to Repeated Loads and Their Applications to Engineering Practice, *JSSMFE* Vol. 13, No.2 11-27 (1973).
  20. Mcvay Michael and Taesiri : Cyclic Behavior of Pavement Base Materials ASCE GT. III No. 1. 1-17 (1985).
  21. Monismith et al., Permanent Deformation Characteristics of Subgrade Soils due to Repeated Loads TRR 533, 1-17 (1975).
  22. Morgan J. R. and J. F. Williams : Repeated Loads on Cement stabilized sand, *Proc. 5th A.R.R.B. Conf.* Vol. 5, pt 6 (1970)
  23. Montan E. S and T. B. Edil : Repetitive -Load Behavior of Unstrated Soils. TRR 872, 41-48 (1982).
  24. National Academy of Science : Test Procedure for Characterizing Dynamic Stress-Strain Properties of Pavement Materials, Special Report 162 (1975).
  25. Olowokere, D. O. : Strength and Deformation of Railroad Ballast Subject to Triaxial Loading, thesis presented to the Queen's University, at Kingdom, Canada, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (1975).
  26. Sabri M. E. and T. B. Edil : Repetitive -Load Behavior of Unsaturated Soils, T. R.R. 872, 41-48 (1982)
  27. Sangrey D. A : The Behavior of Soils Subjected to Repeated Loading. The University of Cornell., Thesis of Doctor of Philosophy, 1-285 (1968).
  28. Seed H. B. and J. W. N Fead : Apparatus for Repeated Load Tests on Soils American Society for Testing Materials Vol. 254, 78-89 (1959)
  29. Seed H. B., G. G., Mitry, C. L. Monismith and C. K. Chan : Prediction of Flexible Pavement Deffections Form Laboratory Repeated-Load Test, HRB 35, 1-117 (1965).
  30. Shackel B. : Some Effect of Repeated Triaxial Stresses on Road Pavements, PhD Thesis, Univ of N.S.W. (1974)
  31. Takeshita, H. : Wheel Load diffusion in Subbases (Part 2) Res Reports of Res Inst. of Public Works, No. 118, 204-224 (1963) (In Japanese)
  32. Taylor, H : The nature of Traffic Loading ARRB, Proc., Vol. 2, No. 2, (1964)
  33. Yasuhara K. & K. Hirao : A Simplified Strain-time Relation for Soils Subjected to Repeated Loads, intl. Symposium on Soils Under Repeated and Transient Loading Vol. 2. pp791-800 (1980).