

反復荷重을 받는 흙의 力學的 特性

Mechanical Properties of Soil under Repeated Load

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

Abstract

In case of repeated wheel-loads are acted on subbase course material, field test is generally executed to get the design standard, but the study shows dynamic properties of soils especially under repeated loads, which have not been well known to us. We try not only to obtain yield stress and elastic modulus of soil in terms of rheological model interpretation but also to investigate the influence of the repeated loads. Yield stress of soil induces hardening until approaching critical value along with the increase in number of cycle, whereas the change in modulus of elasticity with respect to the number of cycle greatly depends on the strength of repeated stress, if weak in strength of repeated stress, the modulus of elasticity increases along with the number of cycle, while if strong, it tends to decrease.

要 旨

道路의 路盤에 交通荷重이 반복해서 가해질 경우 흙 구조물의 설계기준을 얻기 위해 현장시험이 행해지고 있으나, 본 연구는 지금까지 잘 알려지지 않은 흙의 動力學的 性質, 특히 反復應力을 받을 때의 성질을 규명한 것으로 流變學的 모델 해석에 의해 흙의 降伏應力 彈性係數를 구하고 이에 대한 반복응력 재하의 영향에 대해서 考察한 것이다.

降伏應力은 재하횟수가 많을 수록 硬化 效果가 현저하므로 그 값이 크고, 어느 재하횟수에 달하면 한계치에 접근한다. 또한 彈性係數는 반복응력이 작은 경우에는 재하횟수가 많을수록 현저하게 증가하고, 반복응력이 커지면 반대로 감소한다.

1. 序 論

經濟成長에 따른 交通量의 증가 뿐만 아니라, 重量化, 高速化의 경향으로 道路의 重要性和 함께 도

로건설이 활발히 이루어지고 있다.

軟弱地盤上에 底盛土로 건설된 도로는 개통 후에 노반의 침하축진과 반복되는 변형에 의해 포장면이

*正會員 · 漢陽大學校 工科大學 土木工學科 教授

**正會員 · 漢陽大學校 大學院 博士課程

파손되는 데, 그 원인은 반복작용하는 차량의 하중이 노반, 혹은 기초지반에 복잡한 응력과 변형이 오랜 세월에 걸쳐 반복해서 작용하기 때문인 것으로 보인다.^(1~6) 따라서, 교통하중에 견딜 수 있는 路床·路盤의 設計에서는 흙이 반복응력을 받는 경우 역학적성질을 명확하게 하여야 한다.

종래, 도로설계의 여러 가지 역학적 성질의 평가는 대부분 정적인 하중 조건에서 행하여지고,⁽⁷⁾ 動的載荷에 따른 역학적특성을 검토한 것은 극히 적었다.^(8~11) 즉, 설계에 있어서의 基準強度는 변형을 무시한 최대강도를 적용하였고, 변형을 고려한 시험으로서는 노상의 지지력비를 결정하는 C. B. R 시험 및 평판재하시험등이 행해지고 있는 것에 불과하다. 그러나 C. B. R 및 평판재하시험처럼 변형만을 규제하는 시험에 있어서는 흙의 강도특성을 충분히 활용하고 있다고 말하기 어렵다. 따라서, 변형과 강도를 동시에 규제하는 설계기준응력이 필요하다.

本 研究에서는 반복응력을 받는 흙의 변형과 강도에 영향을 미치는 載荷條件(反復應力の 크기, 載荷回數) 供試體條件(含水比, 密度, 土質等)의 관계를 구하고, 반복응력을 받는 흙의 거동을 기초로 Rheological 모델을 정하여 압축시의 응력과 변형 속도와의 관계에서 흙의 降伏應力, 彈性係數, 粘性係數를 구하였다.

2. Rheological 모델

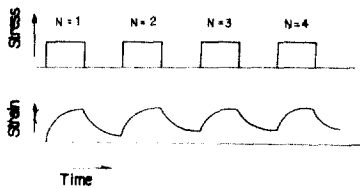


그림 1. The deformation of rheological model formed by repeated loading

反復應力を 받는 흙의 변형은 그림 1과 같고, 재하의 시작에는 Voigt 모델에 의해 나타낸 것처럼 변형한다. 그러나, 응력을 제거하면 어느 크기의 소성변형이 잔류한다. 따라서 이 공시체가 降伏應力을 일으킬 응력을 받았을 때는 변형이 급격하게 증가하는 것을 고려하면, 다진흙의 舉動은^(11~13) Voigt 모델, Maxwell 모델에

Bingham 모델을 직렬로 조합해서 그림 2와 같은 Rheological 모델을 선정할 수 있다.^(14~16) 그림 2의 Bingham 모델에 상당하는 부분은 식(1)처럼 변형을 나타낸다.

$$\dot{\epsilon}_3 = \frac{d\epsilon_3}{dt} = (\sigma - \sigma_v)^n \quad n \geq 1 \quad (1)$$

σ : 壓縮應力(kg/cm²) σ_v : 降伏應力(kg/cm²)

n : 載荷回數 η_3 : 粘性係數(kg.s/cm²)

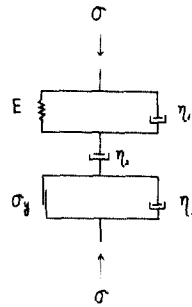


그림 2. Rheological model.

이 모델에 $\sigma = \sigma_v$ 가 되는 一定의 응력을 반복재하하고, 이것을 除荷한 때의 시간과 변형과의 관계는 식(2)와 같고, 이것을 도시하면, 그림 3과 같다. 단, []내의 변형은 공시체가 항복한 후에 작용한 것이다.

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma_r}{E} (1 - e^{-\frac{E}{\eta_1} t}) + \frac{\sigma_r}{\eta_2} t + \\ & \left[\frac{1}{\eta_3} (\sigma_r - \sigma_v)^n t \right] \quad \text{載荷時} \\ \epsilon &= \frac{\sigma_r}{E} (1 - e^{-\frac{E}{\eta_1} t_1}) e^{-\frac{E}{\eta_2} (t-t_1)} + \\ & \frac{1}{\eta_2} \sigma_r t_1 + \left[\frac{1}{\eta_3} (\sigma_r - \sigma_v)^n t_1 \right] \quad \text{除荷時} \end{aligned} \quad (2)$$

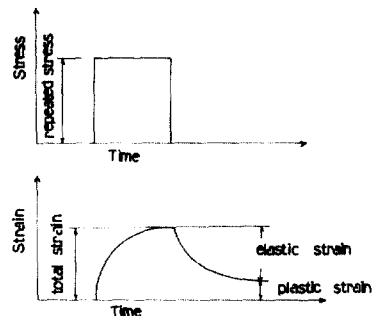


그림 3. Relationship between the displacement of soil under repeated load and time.

여기에서 $E, \eta_1, \eta_2, \eta_3$ 는 반복응력을 받기 전의 彈性係數, 粘性係數이고, $E', \eta_1', \eta_2', \eta_3'$ 는 반복응력을 받은 후의 彈性係數, 粘性係數이다.

식(2)을 시간(t)으로 미분하면 $\frac{d\sigma}{dt} = \dot{\sigma}$ 이며 다음식 (3)을 얻었다.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\dot{\sigma}}{E} \left(1 - e^{-\frac{E\sigma}{\eta_1 \dot{\sigma}}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_2} + \left[\frac{1}{\eta_3}(\sigma - \sigma_0)^n\right] \quad (3)$$

여기서, $\dot{\sigma}$: 應力速度 ($\text{kg/cm}^2/\text{sec}$)

또한, 식 (3)에 있어서 [] 내는 공시체가 降伏한 후 작용한 항이다. 식 (3)에, 1) $n > 1$ (예를 들면 $n=2$) $\eta_2 = \text{일정}$, 2) $n=1, \eta_2 = \text{일정}$, 3) $n=1, \eta_2 = \infty$ 라고 하면 σ 와 $d\epsilon/dt$ 와의 관계는 그림 4에 나타난다. 1)의 조건인 경우에는 $\sigma - d\epsilon/dt$

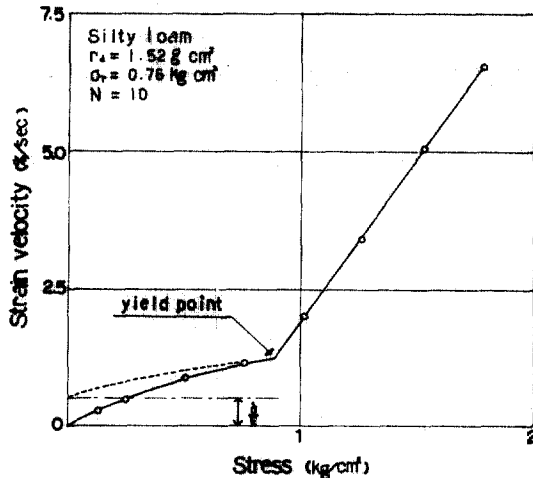
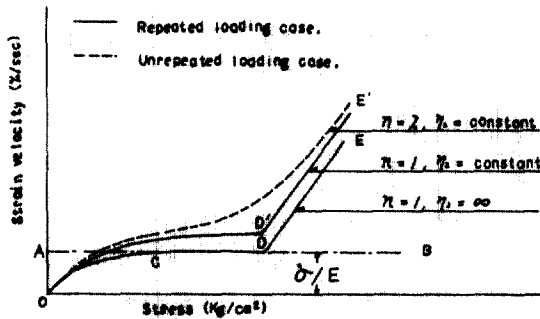


그림 4. Relationship between strain velocity and stress got by rheological model.

dt 는 명확한 折點은 나타나지 않지만, 2), 3)의 조건의 경우 즉, $n=1$ 이 될 때 $\sigma - d\epsilon/dt$ 에서는 명확한 折點을 볼 수 있다. 이 점은 식 (3)에서 [] 내의 항이 작용하기 시작하는 점이기 때문에, 이 점에 상당하는 응력이 降伏應力(σ_0)이다. 따라서 上記 2), 3)의 조건에서 나타낸 $\sigma - d\epsilon/dt$ 곡선을 보면 식 (3)에서 제 1항 조건의 접근선 (그림 4에 있어서는 A-D線)의 종좌표는 $\dot{\sigma}/E$ 와 같으므로, 응력속도($\dot{\sigma}$)가 일정하면, $\sigma - d\epsilon/dt$ 곡선의 折點 앞 부분의 접근선에 대응하는 $d\epsilon/dt$ 의 값에서, 彈性係數(E)를 구할 수 있다. 또 $\sigma - d\epsilon/dt$ 곡선의 직선 A-B로 부터 교차에서 (즉, 곡선 O-D' 또는 O-C-D가 직선 A-B로 부터 교차에서) 粘性係數 (η_1, η_2)를 구할 수 있다.

그림 2 모델에 반복응력을 N회 재하한 후의 각 계수를 $E_N, \eta_{1N}, \eta_{2N}, \eta_{3N}$ 降伏應力을 σ_{rN} 로 하면, 1회 재하에 있어서는, 응력을 제거하기 전 변형 즉, 반복응력을 재하할 때의 全變形(ϵ_N)은 식 (4)로 나타낸다.

$$\epsilon_N = \frac{\sigma_r}{E_0} \left(1 - e^{-\frac{E\sigma_r}{\eta_1 \dot{\sigma}}}\right) + \frac{1}{\eta_{20}} \sigma_r t_1 + \left[\frac{1}{\eta_{30}} (\sigma_r - \sigma_{y0})^n t_1\right] \quad (4)$$

또, 응력을 제거하고 다음 재하를 시작할 때에 잔류하는 변형, 즉 소성변형은 식 (5)이 된다.

$$\epsilon_{rN} = \frac{\sigma_r}{E_0} \left(1 - e^{-\frac{E\sigma_r}{\eta_1 \dot{\sigma}}}\right) - e^{-\frac{E\sigma_r}{\eta_1 \dot{\sigma}}} + \frac{1}{\eta_{20}} (\sigma_r t_1 + \left[\frac{1}{\eta_{30}} (\sigma_r - \sigma_{y0})^n t_1\right]) \quad (5)$$

여기에서

t_1 : 1회의 載荷時間.

t_2 : 1회의 除荷時間.

따라서, N회 반복응력을 재하할 때, 殘留變形(ϵ_{rN})은 다음식과 같이 된다.

$$\epsilon_{rN} = \left\{ \frac{\sigma_r}{E_{N-1}} + \left(\epsilon_{r,N-1} - \frac{\sigma_r}{E_{N-1}}\right) e^{-\frac{E\sigma_r}{\eta_1 \dot{\sigma} t_1}} \right\} e^{-\frac{E\sigma_r}{\eta_1 \dot{\sigma} t_2}} + \sum_{N=1}^N \frac{\sigma_r}{\eta_{2, N-1}} t_1 + \left[\sum_{N=1}^N \frac{1}{\eta_{3, N-1}} (\sigma_r - \sigma_{y, N-1})^n t_1 \right] \quad (6)$$

또, N회 재하에 의해 생긴 소성변형은 식 (7)이 된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{PN} &= \epsilon_{rN} - \epsilon_{rN-1} \\ &= \left\{ \frac{\sigma_r}{E_{N-1}} + \left(\epsilon_{r, N-1}' - \frac{\sigma_r}{E_{N-1}} \right) e^{-\frac{E_{N-1}}{\eta_{2, N-1}} t_1} \right\} \\ &e^{-\frac{E_{N-1}}{\eta_{2, N-1}} t_1} + \frac{\sigma_r}{\eta_{2, N-1}} t_1 + \left[\frac{1}{\eta_{3, N-1}} (\sigma_r - \sigma_{v, N-1}) t_1 \right] \\ &- \left\{ \frac{\sigma_r}{E_{N-2}} + \left(\epsilon_{r, N-2}' - \frac{\sigma_r}{E_{N-2}} \right) e^{-\frac{E_{N-2}}{\eta_{2, N-2}} t_2} \right\} \\ &e^{-\frac{E_{N-2}}{\eta_{2, N-2}} t_2} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (4)에서 식 (5)를 빼면, N회의 재하를 받을 때 탄성변형 (ϵ_{rN})을 구할 수 있다.

$$\epsilon_{rN} = \frac{\sigma_r}{E_N} (1 - e^{-\frac{E_N}{\eta_{2, N}} t_1}) (1 - e^{-\frac{E_N}{\eta_{2, N}} t_2}) \quad (8)$$

따라서, 탄성변위계수 (E_r)는 식 (9)이 된다.

$$E_r = \frac{\sigma_r}{\epsilon_{rN}} = \frac{E_N}{(1 - e^{-\frac{E_N}{\eta_{2, N}} t_1}) (1 - e^{-\frac{E_N}{\eta_{2, N}} t_2})} \quad (9)$$

재하횟수가 작을 때에는 粘性係數 (η_i)로 표시된 점성저항의 영향이 크고, E/η_i 는 작지만, 재하횟수가 증가하면 점성저항의 영향이 점차 작게 되고, E/η_i 는 크게 된다. 따라서, N회 반복응력을 재하할 때 Rheological model의 彈性係數를 E_N , 彈性變位係數를 E_{rN} 으로 표시하면,

$$\frac{E_N}{E_{rN}} = (1 - e^{-\frac{E_N}{\eta_{2, N}} t_1}) (1 - e^{-\frac{E_N}{\eta_{2, N}} t_2})$$

$e^{-\frac{E_N}{\eta_{2, N}} t_1} = X$ 라고 하면, 이 실험에 있어서 $t_1=0.75$ sec, $t_2=0.85$ sec이므로,

$$\frac{E_N}{E_{r, N}} = (1 - X^{0.75}) (1 - X^{0.85}) = 1 - X^{0.75} - X^{0.85} + X^{1.60} \quad (10)$$

식 (6), (7)에서 voigt모델의 잔류변형은 매우 작으므로 무시하면, 잔류변형은 다음 식과 같고,

$$\epsilon_{rN} = \sum_{N=1}^N \frac{\sigma_r}{\eta_{2, N-1}} t_1 + \left[\sum_{N=1}^N \frac{1}{\eta_{3, N-1}} (\sigma_r - \sigma_{v, N-1}) t_1 \right] \quad (11)$$

소성변형 (재하 하면)은 아래식과 같다.

$$\epsilon_{PN} = \frac{\sigma_r}{\eta_{2, N-1}} t_1 + \left[\frac{1}{\eta_{3, N-1}} (\sigma_r - \sigma_{v, N-1}) t_1 \right] \quad (12)$$

따라서, 반복응력 재하에 의해 생기는 잔류변형은 Rheological 모델에서는 Maxwell 모델 및 Bingham 모델의 dashpot 변형에 의한 것이므로 잔류변형의 변화 및 소성변형의 변화에서 粘性係數를

구할 수 있다. 잔류변형의 증가율은 아래식 (13)과 같다.

$$\frac{d\epsilon_r}{dN} = \frac{\sigma_r}{\eta_{2, N-1}} t_1 + \left[\frac{1}{\eta_{3, N-1}} (\sigma_r - \sigma_{v, N-1}) t_1 \right] = \epsilon_{PN} \quad (13)$$

粘性係數 η_3 는 Bingham 모델의 계수이며, $\sigma-d\epsilon/dt$ 곡선에 있어서 공시체가 항복한 후의 직선부의 기울기에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_3 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta(d\epsilon/dt)} = \frac{\sigma_E - \sigma_D}{(d\epsilon/dt)_E - (d\epsilon/dt)_D} \quad (14)$$

3. 實驗概要

3.1 試料土 및 供試體製作

試料土는 江陵市 近郊에서 얻은 실트질로움, 점토 및 점토와 모래의 混合土(점토와 모래의 중량비 2:1, 1:1)의 4종류로 No 16(1.19mm)체에 통과한 것을 사용하였다.

이 試料土를 所定の 含水比로 조절한 후, 24시간 이상 밀폐용기내에 格納하여 所定の 乾燥密度에 상당하는 양을 직경 50mm, 높이 125mm의 원통형 몰드내에 1회에 넣고 상하에서 프라그에 의해 油壓재키로 압축하여 密度가 均一하게 되도록 제작하고, 공시체는 수분을 차단기 위해서 外面을 파라핀으로 얇게 被覆하여, 다시 밀폐용기내에 넣어 24시간 보관한 후, 시험시 上下端面的 파라핀을 제거하여 시험에 사용하였다. 공시체는 표 1에 나타난 8종류이다.

표 1. Properties of specimen

Test item	Specimen class	Moisture content (%)	Density (g/cm ³)	Unconf. comp. Str. (kg/cm ²)	
Soil type					
silty loam	1	28.0	1.52	2.48	
silty loam	2	24.8	1.52	3.52	
silty loam	3	22.5	1.52	4.09	
silty loam	4	27.8	1.55	3.19	
silty loam	5	28.2	1.48	2.10	
Clay	6	31.2	1.40	4.62	
Mixed soil	2:1	7	24.2	1.56	2.92
clay:sand	1:1	8	19.7	1.65	2.20

3.2 試驗方法

彈性係數 및 降伏應力에 미치는 반복응력도, 재하횟수의 영향을 조사하기 위해, 공시체에 수 단계의 응력을 1×10^5 회까지 재하였다. 각 공시체에 재하한 응력의 크기는 공시체의 종류에 따라 일축압축강도를 기준으로 하여 정하였다.

所定の回数에서 반복응력을 받은 후의 공시체에 대해서 일정한 응력속도로 일축압축시험을 행하여, $\sigma - d\varepsilon/dt$ 관계를 구하였다. 또한, 반복시험에 사용한 시험기 및 응력의 재하요령은 전에 보고한 바와 같다^(17~18).

4. 實驗結果의 分析 및 考察

4.1 반복응력을 받는 흙의 응력과 변형속도와의 관계

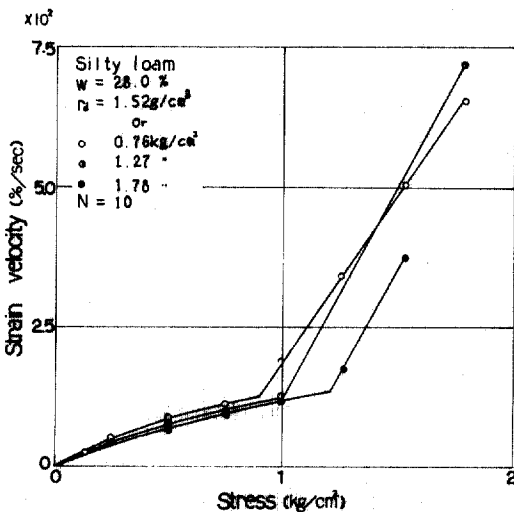


그림 5. Relationship between stress and strain velocity.

다진흙의 공시체에 반복응력을 가한 후에, 일정한 응력속도 ($\dot{\sigma} = 0.018 \text{ kg/cm}^2/\text{sec}$)에서 압축할 때의 $\sigma - d\varepsilon/dt$ 곡선은 그림 5와 같다.

이 관계는 그림 4의 2) $n=1, \eta_2 = \text{일정}$ 또는, 3) $n=1, \eta_2 = \infty$ 가 되는 조건의 곡선과 같은 형이고, 식 (3)의 제3항의 n 가 1에 접근하며, 항복이 생긴 후에 Bingham流動이 생긴 것으로 나타난다. 따라서 반복응력을 받는 흙의 $\sigma - d\varepsilon/dt$ 곡선의 折點에 상당하는 응력에서 降伏應力 또, 折點에 상당하는 응력보다 작은 범위에서 $\sigma - d\varepsilon/dt$ 곡선의 접근선 종 좌표에서 彈性係數를 간단하게 구할 수 있다. 재하횟수 적을 때에는 점성 (특히 η_2)의 영향이 크고, 그림 4의 조건 2)의 곡선과 유사하지만, 재하횟수가 증가하면, 점성 (η_2)의 영향은 작고 조건 3)의 곡선과 유사하다.

그림 6은 $N=1 \times 10, N=1 \times 10^5$ 회 반복응력을 재하한 후 압축시험에 있어서 응력과 변형속도와의 관계에 반복응력의 영향을 나타낸 것이다. $N=1 \times 10$ 회에 있어서는 $\sigma - d\varepsilon/dt$ 곡선의 반복응력도 크기의 영향은 작고, $\sigma - d\varepsilon/dt$ 곡선은 그림 4와 같은 형을 나타내고 降伏應力이 작으며, 彈性係數는 $1 \times 10^2 \sim 2 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위이다. 그러나, 재하횟수가 많을수록 반복응력도의 크기와 영향이 점차 크게 나타나고, 降伏應力도 크게 된다.

4.2 반복응력을 받는 흙의 降伏應力

그림 7은 공시체에 반복응력을 가한 후에 降伏應力과 載荷回数와의 관계를 나타낸 것이다. 재하횟수가 적은 경우에는 硬化도 작고 공시체는 변형하기 쉽기 때문에 降伏應力은 작지만, 변형에 따르는 경화현상이 현저한 $N=1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5$ 회 이상이 되면 降伏應力은 크게 증가하고 이상이 되면 降伏應力은 크게 증가하고 $N=1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$ 회가 되면 변형이 따르지 않는 硬化現象이 현저하므로 점차 일정치로 접근한다.

降伏應力의 재하횟수에 대한 변화는 함수비에 따라 다르다. 즉, 함수비가 높은 공시체에서는 반복응력 재하중 소성변형의 변화에서 볼 수 있는 변형에 따르는 경화가 재하횟수가 적을 때에 현저하고, 재하횟수가 많을 때에 彈性變位係數에서 볼 수 있는 것처럼 변형이 따르지 않는 경화는 작으므로, 降伏應力은 재하횟수가 적을 때에 증가하고, 비교적 적은 재하횟수로 한계치에 달한다. 한편, 함수비가 낮

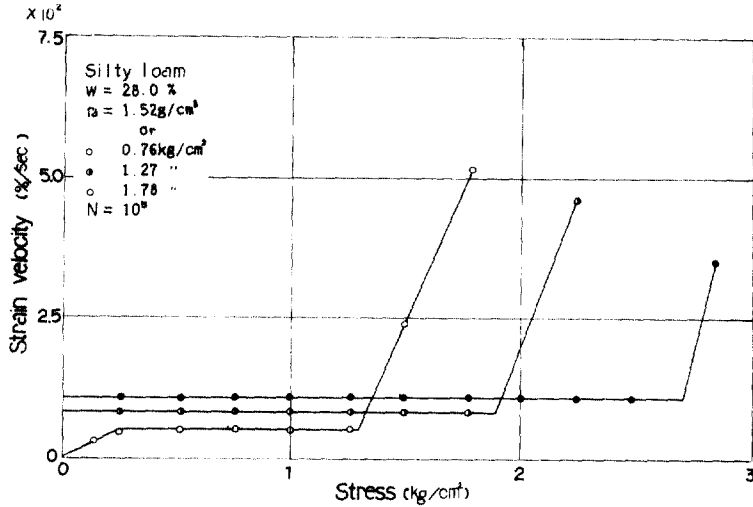


그림 6. Relationship between stress and strain velocity.

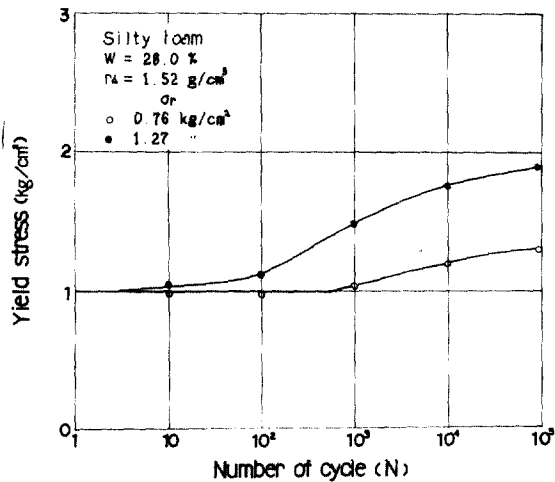


그림 7. Relationship between the change of yield stress and number of cycle.

은 공시체에서는 재하횟수가 증가하면 소성변형의 변화는 비교적 크다. 따라서 재하횟수가 증가해도 변형을 수반하는 硬化가 진행되고, 또한 변형을 수반하지 않는 硬化는 현저하게 증가한다. 그 때문에 이와 같은 공시체에서는 $N=1 \times 10^5$ 회까지 降伏應力이 크게 증가하는 경향이 있다. (그림 8)

또, 거의 동일 함수비가 되면 재하횟수가 적을 때에는 공시체의 初期密度가 클수록 降伏應力이 증가하였으며, 재하횟수가 많을수록 그 변화는 컸다. (그림 9) 즉, 재하횟수가 많아지면, 입자간 결합력의 증가에 의한 硬化效果에 의해 降伏應力은 증가

하는 것이다. 따라서 모래의 공시체에 있어서는 밀도에 의한 강도의 변화는 있어도 반복응력재하에 의한 입자간 결합력의 증가는 전혀 생각할 수 없다.

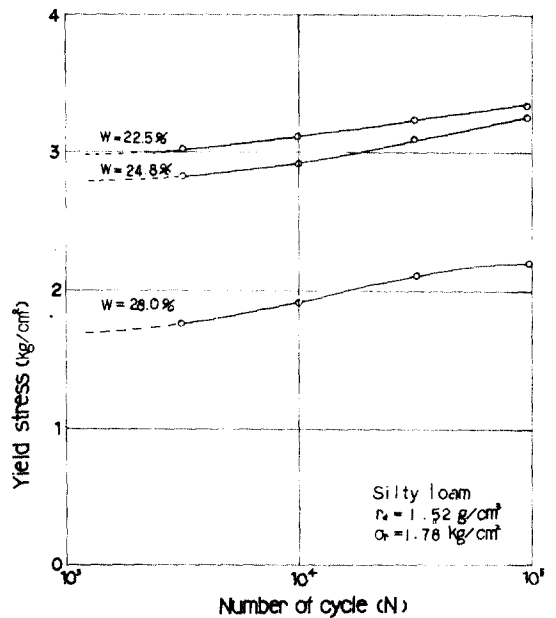


그림 8. Relationship between the change of yield stress and number of cycle (water content).

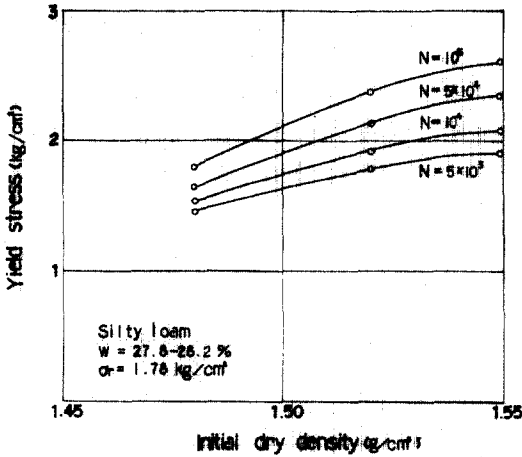


그림 9. The influence of yield stress upon the initial dry density.

그러나, 그림 10에 있어서 사질토의 경우 소성변형의 변화는 거의 볼 수 없는 $N=1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 회에서 降伏應力이 증가하지만, 다져진 흙에서는 점토를 포함하고 있어 많은 硬化가 있다는 것을 나타낸다.

이와 같이, 降伏應力은 토질이 달라도 공시체 중에 점토를 포함하면, 재하횟수에 따른 변화는 같은 경향을 나타내지만, 그 크기는 점토 함유량이 많은 공시체가 크다.

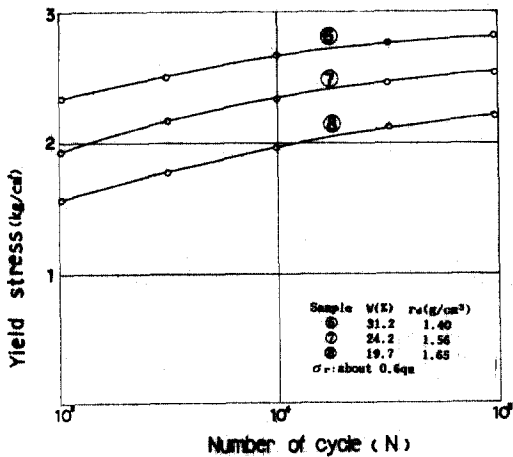


그림 10. Relationship between the change of yield stress and number of cycle (soils).

4.3 Rheological 모델을 기초로 구한 흙의 彈性係數

공시체가 작은 반복응력을 받을 경우에는 재하횟수가 많아져도 입자배열과 입자간격의 변화율은 크고, 입자간의 결합력이 서서히 증가하므로, 공시체의 전단저항력도 서서히 증가한다. 그 때문에 Rheological 모델을 기초로 구한 흙의 탄성계수는 재하횟수가 많을수록 크고, 그 변화는 반복응력도가 작을수록 현저하다. (그림 11)

한편, 공시체가 큰 반복응력을 받는 경우에는 재하횟수가 적을 때 소성변형은 크고, 입자구조의 변화가 급격히 생기며 입자간격이 감소하고, 변형에 따르는 경화가 현저하다. 그 때문에 변형에 대한 저항력은 크게 되고, 彈性係數의 증가가 현저하다. 그러나 큰 응력을 많이 받으면 공시체 내에 局部的인 剪斷破壞가 생기며, 비교적 변형이 작은 범위에서 구한 彈性係數는 이 局部的인 剪斷破壞에 의한 변형증가의 영향을 크게 받고 재하횟수가 많으면 오히려 감소하는 것도 있다.

작은 반복응력을 받는 공시체의 彈性係數는 재하횟수와 함께 증가하므로 彈性係數와 載荷回數와의 관계에서 無載荷 공시체의 彈性係數를 추정할 수 있다. 그 크기는 공시체의 조건에 따라 다르지만, 최적함수비에 가까운 함수비를 가진 공시체에서는 $E=1 \times 10^2 \sim 5 \times 10^2 \text{ kg/cm}^2$ 이다.

4.4 반복응력을 받는 흙의 粘性係數

공시체의 조건, 반복응력도, 재하횟수에 따른 점성계수 및 탄성계수와의 관계를 비교하면 그림 12

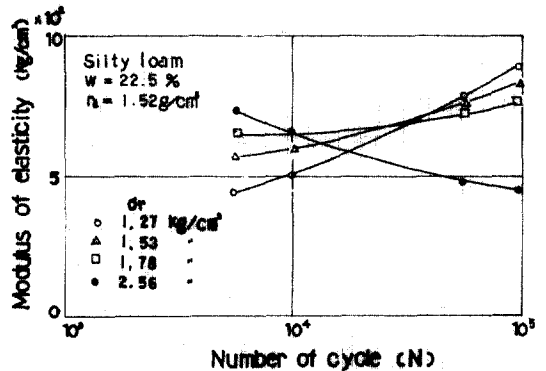


그림 11. Relationship between number of cycle and modulus of elasticity.

와 같다. 즉, 공시체 내에 국부전단파괴가 생기지 않는 크기의 반복응력을 받는 경우에는 탄성계수와 같은 경향이며 재하횟수가 $N=1 \times 10^4$ 이상이면 voigt모델의 점성계수도 증가한다. 그 증가율은 반복응력이 작을 수록 크지만 재하횟수에 의한 탄성계수의 변화보다 작다. 함수비의 변화에 따른 탄성계수의 변화는 점성계수의 변화보다 크고, 반복응력을 받을 때 voigt 모델의 변형은 반복응력도가 작고 함수비가 낮은 공시체는 빠르게 한계에 도달하는 것을 알 수 있다.

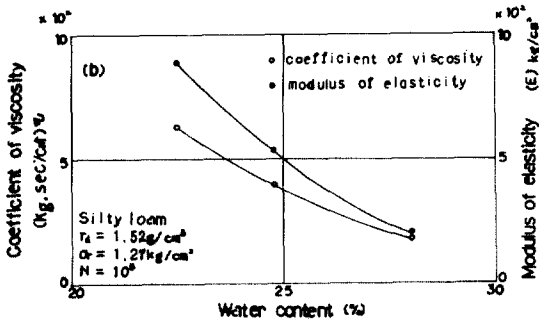
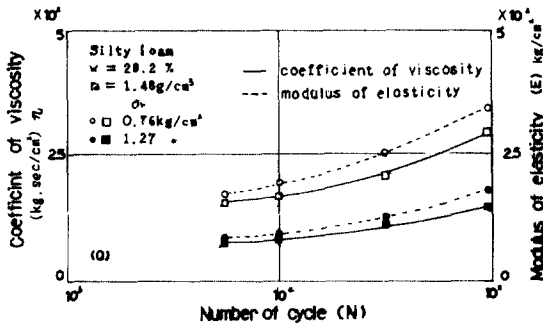


그림 12. The comparison between viscosity coefficient and modulus of elasticity.

잔류변형과 재하횟수와와의 관계를 나타낸 곡선은 여러 형으로 나타나므로 식 (13)에서 粘性係數 (η)를 구하는 것은 어렵다. 그 때문에 어느 범위의 재하횟수에 있어서는 잔류변형의 평균값에서 η_2 를 구한다. 동일 종류의 공시체에 반복응력을 변화시켰을 때의 재하횟수에 의한 粘性係數 (η_2)의 변화는 표 2와 같고, $N=1 \times 10^4$ 회 때의 잔류변형은 어느

응력도의 범위에서는 응력에 비례하고, η_2 도 응력에 따라서 1×10^4 회 이상 반복응력을 받으면 변형에 따른 경화가 다르므로 粘性係數 (η_2)의 크기도 다르며, 특히 반복응력이 작을 때 粘性係數 (η_2)가 크다. 그러나, 재하횟수에 의한 변화는 반복응력도가 클수록 크다. 이것은 변형에 따르는 硬化效果의 차에 의한 것이다.

또, 동일밀도에 함수비가 다른 공시체에 ($W=22.5\%$, 24.8% , 28.0%) 반복응력 ($\sigma_r = 1.78 \text{ kg/cm}^2$)

표 2. The influence of applied stress upon the change of viscosity coefficient. (silty loam, $w = 28.0\%$, $r_d = 1.52 \text{ g/cm}^3$)

Number of cycle (N)	Coefficient, η_2 (kg·sec/cm ²)			
	Applied stress (kg/cm ²)	10~10 ²	10 ² ~10 ³	10 ³ ~10 ⁴
0.76	2.33×10^4	2.85×10^3	3.46×10^6	2.56×10^7
1.27	1.36×10^4	1.95×10^3	1.99×10^6	2.14×10^7
1.78	1.20×10^4	1.33×10^3	1.60×10^6	1.84×10^7

표 3. The influence of water content upon the change of viscosity coefficient. (silty loam, $r_d = 1.52 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_r = 1.78 \text{ kg/cm}^2$)

Number of cycle (N)	Coefficient, η_2 (kg·sec/cm ²)			
	Water content (%)	10~10 ²	10 ² ~10 ³	10 ³ ~10 ⁴
22.5	1.20×10^5	1.00×10^6	5.72×10^6	4.45×10^7
24.8	8.01×10^4	5.72×10^5	4.00×10^6	2.14×10^7
28.0	1.20×10^4	1.33×10^5	1.60×10^6	1.84×10^7

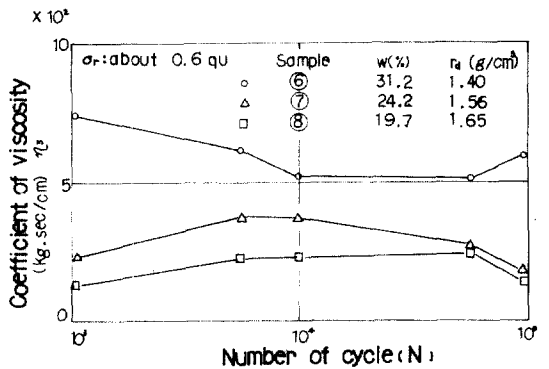


그림 13. Relationship between coefficient of viscosity and number of cycle.

을 재하하였을 때 재하횟수에 의한 점성계수 (η_2)의 변화는 표 3에 나타냈다. 변형을 수반하는 硬化效果가 적은 저함수비 공시체에서는, 재하횟수에 의한 粘性係數 (η_2)변화는 작고 고함수비 공시체에서는 컸다.

粘性係數 (η_2)는 그림 12의 $\sigma-d\epsilon/dt$ 곡선의 항복 후 직선의 기울기에서와 같이 반복응력도의 크기에 의해 그다지 변하지 않으며, 그림 13에서와 같이 점성계수는 재하횟수에 따라 거의 변화가 없지만 그 값은 점토함유량이 많을수록 크다.

5. 結 論

다져진 흙의 공시체가 반복하중을 받을 때 그 거동을 나타내는 Rheological 모델을 정하고, 이 모델과 압축시에 따른 $\sigma-d\epsilon/dt$ 관계에서 탄성계수와 항복응력을 구한 결과를 정리하면 대략 다음과 같다.

(1) 흙의 降伏應力은 재하횟수가 많을수록 硬化效果가 현저하므로 그 값은 크게되고, 어느 재하횟수에 달하면 한계치에 접근한다. 또 降伏應力은 반복응력이 클수록 증가하지만, 어느 한계가 넘으면 내부파괴가 생기기 때문에 그 값은 감소한다.

(2) 降伏應力은 함수비가 낮을수록 크고, 함수비가 높을수록 작다. 또한, 재하횟수가 작을 경우 밀도가 달라도 항복응력은 그다지 변화가 없었지만, 재하횟수가 증가하면, 높은밀도에서는 현저하게 증가하였다.

(3) Rheological 모델을 기초로 한 재하횟수에 의한 彈性係數의 變化는 반복응력이 작은 경우에는 재하횟수가 많을수록 현저히 증가하지만, 반복응력이 클 경우에는 반대로 감소한다.

(4) Voigt 모델의 粘性係數 (η_1)는 $N=1 \times 10^4$ 회 이상에서 증가하지만, 그 증가율은 탄성계수의 증가율보다 적다. 또, 반복응력이 클수록, 함수비가 높을수록 粘性係數 (η_1)는 작다.

(5) 粘性係數 (η_2)는 $N=1 \times 10^4$ 회 이상 재하하면 硬化效果에 따라 반복응력이 작을수록 그 값은 커진다. 粘性係數 (η_2)는 재하횟수에 따른 변화는 없었지만, 점토함유량이 많을수록 크다.

(6) 흙 구조물 설계에 있어서는 용도에 의해 設計基準應力이 다르지만, 반복하중을 받는 도로 구조물의 설계는 반복응력을 받는 흙의 변형, 硬化現

象 및 降伏應力 등을 고려한 設計基準 應力에 따라 행하여야 한다.

參 考 文 獻

1. Larew, H. G., G. A. Leonards., "A Strength Criterion for Repeated Loads", *HRB Proc.* Vol. 42, pp. 529~556.
2. Shake, 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 Macerial", *Journal of Geotechnical Division, ASCE*, Vol. 100, GT. 7, 1974, pp. 825~841.
4. 櫻井 裁之, "くろ返し荷重を受けろ粘土の變形特性", 日本道路公團 試驗所報告, 1974, pp. 40~44.
5. 賣鳥 正人, "燥返し載荷を受けろ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.
6. 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 土質研究發表會發表 講演集, 1985, pp. 653~656.
7. 建設部, "道路鋪裝設計, 施工指針", 1985, pp. 265~267.
8. Glynn, T. E., Kirwan, R. W., "A Stress-Strain relationship for clays subjected to repeated loading", *Proc. 7th Int'l. Conf. Soil Mech. Fdn. eng.*, 1, 1969, pp. 159~163.
9. Gordon, B. B., "Repeated plate loading tests on compacted subgrades" *ASTM Spec. Pub.*, No. 254, 1959.
10. 金八圭, 宋典燮, "反復荷重을 받는 等方正規壓密粘土의 應力-變形 特性 및 限界反復應力", 大韓土質工學會 論文集, Vol. 4, No 3, 1988, pp. 43~52.
11. Roscoe, K. H., A. N. Schofield and C. P. Worth., "On the Yielding of Soils", *Geotechnique* Vol. 8, No1, 1958, pp. 22~53.
12. Haythornthwaite, R. H., "Mechanics of the Triaxial Test for Soils", *Jour. Soil Mech. and Found. Div. ASCE* Vol. 86, SM2, No 10, 1960.
13. 星楚埜和, "土の力學における塑性の基本理論と三軸試驗への適用", 土木學會論文集 第21號.
14. 李鍾珪, "粘土의 Creep 舉動에 관한 流變學的 研究", 서울大學校 博士學位論文, 1981.

15. 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, No 96, 1965 a, pp. 8~14.
16. 土質工學會 編輯委員會, “土と構造物の動的相互作用”, 日本土質工學會, 1979, pp. 411~452.
17. 千柄植, 朴興奎, “反復荷重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.
18. 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, No. 2, 1989, pp. 125~131.

(接受: 1990. 8. 31)