

農道の 基層 및 補助基層 工法研究

—路床 및 시멘트 安定處理層의 Mr 特性을 中心으로—

Study on the Base and Subbase Method of Agricultural Road

—On the Resilient Modulus Characteristics of the Subgrade and Cement Treated Base—

都 德 鉉*
Duk, Hyun Doh

Summary

The characteristics of resilient modulus(Mr) which dominates the life of pavement and the design of pavement were investigated on the test specimens which were cement treated and non-treated of the three different soil types.

The results are summarized as follows :

1. The resilient modulus was decreased by increasing the cyclic deviator stress (σ_d), especially the resilient modulus was gradually decreased or sometimes increased when the value of σ_d was greater than 0.75-1.0kg/cm².

2. The resilient modulus was increased by increasing the homogeneous confined stress (σ_{ho}) and such phenomena were distinct on the coarse soils.

3. The resilient modulus was increased by increasing the ratio of confined stress(Kc), and this phenomena were eminent on the coarse soils too, and the higher permanent strain was showed by increasing the value of Kc.

4. In the drained cyclic triaxial compression test, the value of σ_d , Kc, and (σ_{ho}) was introduced by the following interrelated equations which were similar to the Mr model of Cole.¹⁰⁾

$$\frac{Mr}{Kc^n} = K_1 (J_2 / \tau_{c1})^{K_2} \dots \dots \dots \text{(coarse soil)}$$

$$\frac{Mr}{Kc^n} = K_3 (\sigma_{dp} / \tau_f)^{K_4} \dots \dots \dots \text{(fine soils)}$$

5. The stress path was not much affected by the value of Mr, however, moisture content, dry desity, and contant of fines affected the value of Mr.

6. In the soil-cement specimens, the resilient compression strain(ϵ_r) was decreased by the increment of the σ_{ho} , and Mr was decreased by increasing the σ_d

7. In the flexible pavement, the cement treated layer should be designed not to fail by the fatigue before the designed traffic load, and actually the pavement could cover the traffic load

* 建國大學校 農科大學

to a certain extent under the post-crack phase, therefore farther studies on this phenomena are required in the design analysis.

8. The finite element computer program (ANALYS) was used for displacement analysis of pavement containing the cement-treated layer, The result showed that the program used for this analysis was proved to be usable.

I. 緒 論

農工團地를 중심으로 한 農業道路의 鋪裝은 일반도로와는 달리 地域의 特性에 맞추어 耐久性과 經濟性이 先決되어야 할 조건들이다. 이러한 면에서 可撓性鋪裝의 基層이나 補助基層材로서 시멘트, 石灰등의 安定處理工法은 중요한 의미를 지니고 있으며 이미 우리나라는 1960년대 초부터 이 工法에 대한 實驗의 研究와 現地試驗鋪裝을 거쳐 金浦-江華間 도로를 비롯한 數個路線에 實用한 바 있다.

일반적으로 입도 범위가 넓고 부분 또는 완전포화상태에 있는 鋪裝道路의 路床, 시멘트 安定處理層등의 舉動은 짧은 지속시간의 反復輪荷重을 받으므로 靜的 荷重狀態와는 매우 다르며 含水比의 계절적 변동, 특히 습윤층에서의 주기적 凍結融解作用은 土粒子사이의 間隙水의 變動 또는 Suction의 변화를 일으키며 動彈性係數(Mr)應答과 變形(특히 회복성 변형)에 큰 영향을 주는데 이는 곧 鋪裝의 수명과 직결되는 것이다.

지금까지 鋪裝設計 目的으로 Mr 을 구하는 방법에 있어, Ahmed등²⁾과 Seed등³⁾이 靜的荷重試驗 및 反復荷重試驗하에서 흙의 거동의 차이를 확인한 이래 많은 測定方法이 개발되었다.

現地測定方法으로는 平板載荷(靜的 및 反復荷重), 動的試驗(Dynamic Test)등이 활용되어

왔고, 實驗室內的 方法으로는 共振기동試驗, 反復剪團試驗등이 있으며 作用荷重에 따라 空氣壓, 水壓, 油壓, 機械的, 電氣的 방법등이 이용되고 있다.^{9, 33, 4)}

따라서, 本 論文은 農道の 路體, 路床 또는 安定處理基層 및 補助基層材로서 많이 이용되는 粒度가 다른 3가지 試料土를 대상으로 反復三軸試驗과 기타 필요한 시험을 통해 對象土의 動的性質을 究明하고 Mr值로부터 결정한 여러 가지 鋪裝斷面에 대한 安定性을 비교검토하여 農漁村道路鋪裝의 설계에 필요한 기초 資料를 제공하고자 하였다.

II. 使用材料 및 試驗方法

1. 使用材料

使用 試料土는 우리나라에서 路床材로서 흔히 이용되고 있는 서울 東大門區 휘경동 배봉산의 粗粒質 花崗土(A試料), 路床材로서 사용가능한 경기도 파주군 교하면 道路邊의 中粒質花崗土(B試料), 路體材로서 使用可能한 美國 New York州 中部地域인 Newfield에서 채취한 실트질 粘土(C試料)등 3種類이며 이들 시료의 物理的 力學的 特性은 Table-1과 같다.

또한 시멘트 處理土에 사용한 시멘트는 보통 포클랜드 시멘트이다.

Table-1. Physical properties of soil used.

Soils	Specific gravity	Atterberg limit			Gmax (mm)	Mechanical analysis (finer percent ⁵⁾)			USCS	Standard Proctor compaction		Static triaxial test	
		LL (%)	PL (%)	PI		No.10	No.40	No.200		OMC(%)(rdmax(g/cm ³))		o	c
A	2.64	-	-	NP	9.52	62.0	28.0	8.5	SWSP	10.5	1.83	38.7	0.18
B	2.67	30.2	-	NP	5.00	77.2	52.3	21.7	SM	18.4	1.61	20.4	0.32
C	2.75	58.5	31.0	27.5	0.40	100	100	42.2	CL-ML	28.4	1.53	7.2	0.53

2. 試驗方法

供試體는 室內다짐용 기구로 개발된 Havard Miniature Compaction Apparatus(템퍼, 중량 1.8 kg)를 사용하여 표준 Proctor다짐에너지를 가하였을때 얻은 乾燥單位重量(γ_d)에 도달할 때까지 含水比와 다짐回數를 조정(5층: 각층 45~65회)하여 제작하였다.

供試體의 규격은 반복삼축시험기의 최대용량을 고려하여 3.8cm(D)×7.6cm(H)로 제작하였으며 시멘트 處理土의 供試體도 非處理土와 동일다짐에너지로서 제작하였다.

이때의 시멘트함량은 補助基層과 基層材로서 요구되는 壓縮強度 10~30kg/cm²를 얻는데 필요한 含量인 3~12%범위로 하였으며 표준양생방법에 의해 7日 및 28日 양생(단, 시험전 1日 水浸) 후 시험하였다. 本 研究에서 시료의 정적, 동적 강도를 조사하기 위하여 사용한 수직유압 반복작동방식(용량: 비처리토 1000kg, 시멘트 처리토 10,000kg)인 反復三軸試驗機는 三軸供試體 상단에 어떤 형태의 하중이나 反復往復作用의 조절이 가능하도록 되어 있는 장치로서²⁰⁾ 이에 水壓펌프 재료시험시스템 조절장치가 연결되어 있다. 또 반복작동기 밑에는 일정공기압으로 조절되는 垂直靜的 loader가 있다. 이 시스템은 Cell 壓力과 垂直荷重을 적절히 組合함으로써 非等方性 初期主應力 조건의 도입이 가능하며 Fig. 1의 應力經路和 같이 일정구속압 또는 구속압을 변화시키면서 排水反復三軸試驗을 하였다.

軸變形은 供試體 상하에 부착한 2개의 LVDT로 측정하였다. 反復軸差應力은 sine波로서 振動數 20회/min, 持續時間 0.1sec 軸差應力은 0.125~2.0kg/cm²의 범위로 하였다.

이 시험기는 연속적으로 필요한 回數의 반복 하중이 작용하도록 되어 있으며 수직응력과 變形(回復性 또는 永久變形), 間隙水壓등을 연속, 또는 임의시간에 측정가능하도록 되어 있다.

시멘트處理土의 強度評價를 위한 一軸壓縮試驗을 비롯한 기타 관련 시험은 韓國工業規格에 準하여 실시하였다.

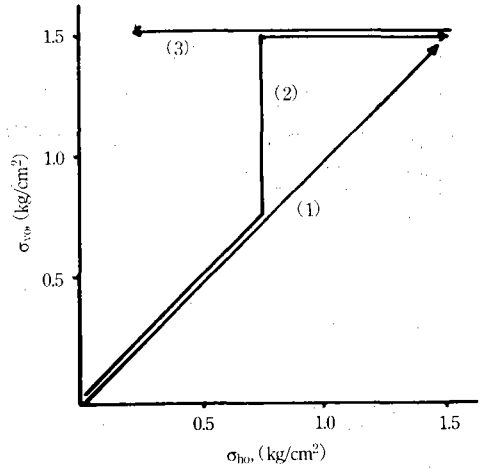


Fig. 1. Confining stress paths.

III. 結果 및 考察

1. 다짐土의 Mr 特性

가. 拘束應力과 Mr과의 관계

非處理土를 대상으로 反復三軸試驗을 한 결과 反復軸差應力(σ_d)-變形(ϵ_p)과의 전형적인 관계는 Fig. 2와 같으며 Mr은 최대응력~최대변형점(A점)과 하중을 제거한 후의 최소응력~최소변형점(B점)을 이은 A-B의 기울기로서 정의되며 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$Mr = \frac{\sigma_d}{\epsilon_p} \dots \dots \dots (1)$$

既 발표논문¹¹⁾에서 反復三軸試驗에 의한 하중반복수(N)와 動彈性變形과의 관계를 應力比별로 나타낸 바 있는데 이 變形量은 반복하중이 가해지는 동안 시간의존도가 높으며 본질적으로

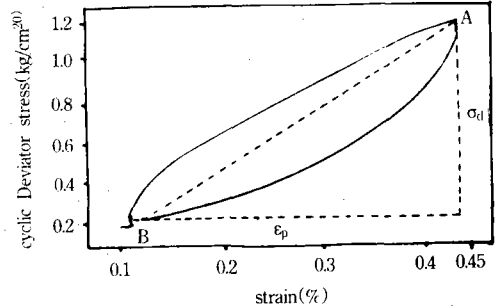


Fig. 2. Typical cyclic Triaxial Test Result.

靜的變形係數와는 다르다는 것을 지적한 바 있다. Allen등³⁾과 Hicks등¹⁹⁾은 反復三軸試驗에서 粒狀材의 回復性 變形은 N=50~100을 지난 후 부터는 거의 안정되는 경향이 있다고 하였으며 본 시험에서도 이들의 결과와 거의一致되었다. 따라서 Fig. 3은 非等方性 구속응력하에서 N=500에서의 σ_d 와 M_r 과의 관계를 보인것으로서 σ_d 가 증가하면 M_r 이 감소하였으나 σ_d 가 0.75~1.0kg/cm²이상 증가되면 M_r 의 감소율이 완만하

거나 오히려 증가하는 경향도 있었다. 이상의 결과에서 拘束壓(σ_h)이 클수록 M_r 이 크게 나타났으며 또 Brown등²⁰⁾이 지적한 바와 같이 동일한 軸差應力하에서는 非等方性 拘束應力比가 클수록 M_r 이 크게 나타났다.

그 이유는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 非等方性 應力하에서는 組織配向이 等方性應力조건 보다 水平方向에서의 動的剪斷作用에 대한 저항성이 약간 적으므로서^{12, 14, 29)} 결과적으로 剪斷彈性係數(G)가 적으나 반복수직응력이 작용하면 配向接觸平均量이 많아지므로, 等方性條件보다 높은 G를 나타내기 때문이다. 한편 粗粒土는 細粒土보다 일반적으로 σ_d 의 증가에 따른 M_r 의 감소율이 적은 경향을 보였다. 이와 같이 路床材로 사용되는 試料土는 拘束壓力에 민감한 영향을 받으므로 室内反復試驗시에는 현지조건을 고려하여 적절한 구속응력하에서의 M_r 을 구할 필요가 있다.

나. M_r 과 기타因子와의 관계

本 試驗성과에서 나타난 기타 土質定數와 M_r 과의 관계를 조사한 바 同一條件에서는 No. 200체 통과율이 많을수록 M_r 은 작은 값을 나타내었다. 또 γ_d 가 클수록 M_r 은 큰 값을 보였고 含水比(w)가 낮을수록 M_r 이 감소하였으며 이 결과는 많은 연구보고^{16, 17, 26, 34)}들이 뒷받침 해주고 있다.

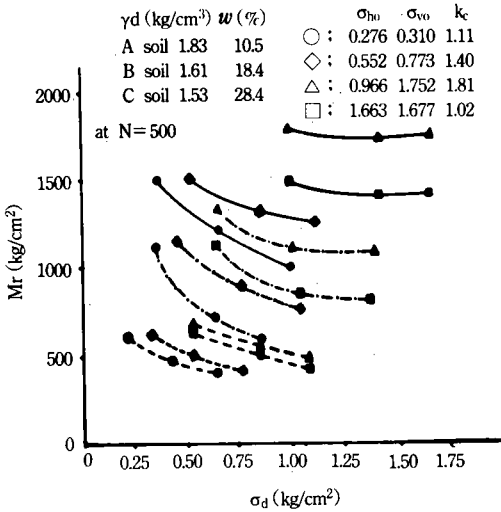


Fig. 3. Relationship between resilient modulus and denator stress with various confining stress.

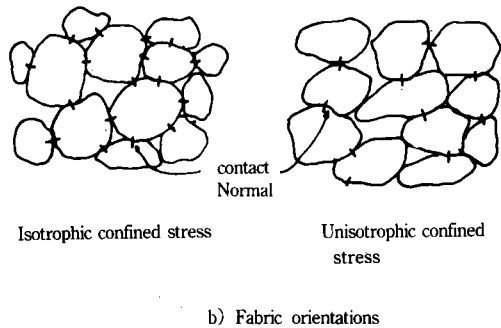
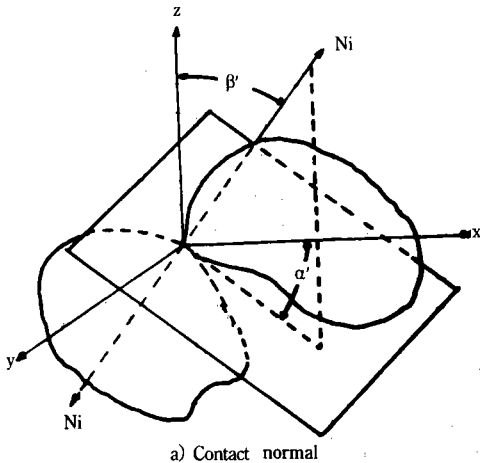


Fig. 4. Schmetic didgram of contact Normal and fabric orientation(after cole).

기타 本 연구결과와 각종 문헌을 중심으로 도로의 鋪裝두께 결정에 이용되고 있는 Mr과 여러가지 因子와의 관계를 要約하면 다음과 같다.

1) 細粒土

① N을 증가시킴에 따라 Mr은 감소하다가 증가한다. N은 특히 포화된 細粒土에서 매우 예민하다.

② 試料를 다진 후 부터 시험진행 경과시간이 길어 질수록 Mr은 증가한다.

③ σ_d 이 증가함에 따라 Mr은 감소하며 σ_d 가 어느 한계이상 커지면 Mr이 증가하는 경우도 있다. 그리고 σ_{ho} 가 증가하면 Mr은 증가한다.

④ 含水量(飽和度)가 증가됨에 따라 Mr은 감소하며 乾燥密度가 증가됨에 따라 Mr도 증가한다.

2) 粗粒土

粗粒土의 경우도 細粒土의 특성과 거의 유사하며 특기할 만한 사항은 다음과 같다.

① 細粒土 含量이 적을수록 Mr은 큰 값을 나타내며 粒子形態의 영향은 그다지 중요하지 않다.

② 應力 持續時間이 감소됨에 따라 Mr이 증가하며 아울러 變形率이 증가됨에 따라 Mr도 증가한다.

③ Mr은 振動數의 차이에는 큰 영향을 받지 않는다.

다. Mr의 모델式 검토

前述한 바와 같이 Mr은 現地 또는 室内試驗으로 결정할 수 있는데 Seed등³⁹⁾에 의하면 反復平板載荷試驗과 反復三軸試驗으로 부터 구한 Mr값은 매우 近似하다고 하였으며 Allen등³⁾은 반복삼축시험에서 拘束壓을 변화시킬 경우 일 정구속압에서 보다 포아슨비(ν)가 약간 높다고 하였다.

Mr을 解析하기 위해 제안된 모델式은 彈性理論을 바탕으로 한 Burmister⁴⁾의 式을 들 수 있으며 ν 가 0.5인 均質彈性材로 가정한 路床土에 平板荷重을 1000회 반복하였을때의 Mr은 다음 式으로 나타낼 수 있다고 하였다.

$$E_2 = 1.18 \frac{\sigma_o \cdot \gamma}{\Delta} \dots \dots \dots (2)$$

여기서, σ_o : 평판에 가한 壓力

γ : 평판의 半徑

Δ : 평판에 의한 地面沈下量

Richards등³⁷⁾은 部分飽和된 팽창성 粘土路床의 Mr은 식(3, a)로 구할 수 있다고 하였고 Biarez⁵⁾는 粒狀材에 대한 Mr은 平均主應力에 의존함을 고려하여 식(3, b)를 제안하였다.

$$Mr = K_1 H^{k_2} \dots \dots \dots (3, a)$$

$$Mr = K_1' \sigma_o^{k_2} \dots \dots \dots (3, b)$$

여기서 σ_o : 平均主應力($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$)/3

k_1, k_1', k_2, k_2' : 實驗常數

또 seed³⁹⁾는 식(3)과 유사한 다음식을 Mr의 모델로 제안하였다.

$$Mr = K_1 (\sigma_3)^{k_2} \dots \dots \dots (4, a)$$

$$Mr = K_1' (\theta^{k_2}) \dots \dots \dots (4, b)$$

여기서 σ_3 : 水平拘束應力

θ : 初期應力常數($\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$)

Dunlap(1963, seed³⁹⁾ 문헌참고)은 부분포화된 粒度가 양호한 시료에 대하여 다음 式을 제안하였다.

$$Mr = k_2 + k_3 (\sigma_r + \sigma_0) \dots \dots \dots (5)$$

여기서 k_2 : 不拘束조건에서의 Mr

k_3 : 실험상수

σ_r : 放射방향의 應力

σ_0 : 接線방향의 應力

위의 式(4), (5)는 軸差應力이 고려되지 않은 조건이므로 本 시험결과와 부합되는 Mr모델式으로서는 미흡한 점이 있다.

한편 Wang⁴⁵⁾은 塑性路床土에 대한 Mr모델式을 다음과 같이 개발하였는데 이는 Mr과 動的 軸差應力과의 관계를 잘 설명해 주고 있다.

$$M_r = k_1 + (k_2 - \sigma_{dp}) k_3, (\sigma_{dp} < k_2) \dots \dots \dots (6, a)$$

$$M_r = K_1 + (\sigma_{dp} - k_2) K_4, (\sigma_{dp} > k_2) \dots \dots \dots (6, b)$$

여기서, k_1, k_3, k_4 : 實驗常數

k_2 : 최저 Mr을 나타내는 動的 軸差應力(Fig. 5 참조)

그러나 식(6, a), (6, b)는 Mr에 영향을 끼치는 重要인자인 拘束應力(σ_o)의 因子가 포함되어 있지 않다.

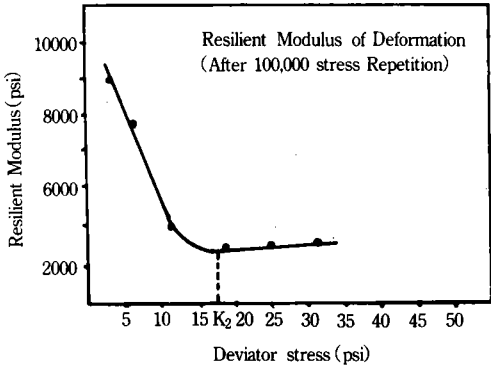


Fig. 5. Stress Intensity Effect on Resilient Behavior of AASHTO Road Test Subgrade soil (Ater seed et al³⁹).

Cole¹⁰은 Mr을 구하는 모델식을 다음과 같이 제안하였다.

$$Mr = k_1 (J_2 / \tau_{cot})^{k_2} \dots \dots \dots (7)$$

여기서, J_2 : 2次 應力常數($\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1$)
 τ_{cot} : 正八面體 剪斷應力($1/3(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2$)^{1/2}

$$\sigma_1 = \sigma_{vo} + \sigma'_{dp}, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{ho}$$

여기서, σ'_{dp} : 반복축차응력

σ_{vo} : 수직구속응력

σ_{ho} : 수평구속응력

k_1, k_2 : 실험상수

粒狀土에서는 軸差應力보다 拘束應力이 Mr에 중요한 영향을 끼치며 식(7)은 σ_3 의 자승이 포함되어 있어 粒狀土에 대한 모델식으로 적합하다고 생각된다. 따라서 식(7)은 A試料과 같은 粒狀土의 Mr모델식으로 이용 가능할 것으로 생각된다.

또 Brown등⁸은 非排水條件으로 細粒土인 Keuper Marl에 대하여 다음 관계식을 제안하였다.

$$Mr = k_3 (\sigma'_{dp} / \sigma'_3)^{k_4} \dots \dots \dots (8)$$

여기서, σ'_3 : 有效拘束應力

k_3, k_4 : 실험상수(단, k_4 는 음수)

식 (8)은 拘束應力의 증가에 따라 Mr이 증가하며 反復軸差應力이 증가함에 따라 Mr은 감소한다. 따라서 本 調査에서 나타난 경향과

일치하므로 식 (4, a), (4, b)보다 상대적으로 相關係數가 높을 것으로 기대된다.

한편 식(8)에서 σdp 를 最大剪斷應力(τ_f)로 공식화하면 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$Mr = k_3 (\sigma'_{dp} / \tau_f)^{k_4} \dots \dots \dots (9)$$

또 Fig. 6에서 Mohr圓을 참고하면 τ_f 는 σ_3 와 다음과 같이 관련지을 수 있다.

$$\tau_f = \frac{\sigma_3 \tan \phi' + C'}{\sec \phi' - \tan \phi'} \dots \dots \dots (10)$$

Fig. 7은 路床 또는 시멘트 安定處理基層材料로서 적합한 粒度로 생각되는 A시료에 대하여 $J_2 / \tau_{cot} \sim Mr$ 과의 관계(식 (7))로 나타낸것이며 Fig. 8은 路床材料로서 사용적합한 재료인 B시료 및 路體材料로서 적합하다고 판단되는 C시료에 대한 $\sigma_{dp} / \tau_f \sim Mr$ 과의 관계 (식 (9))를 나타낸 것이다.

일반적으로 Mr은 σ_{dp} 에 대한 최대전단강도(τ_f)의 비에 의존하며 이값이 증가됨에 따라 Mr은 감소되었다.

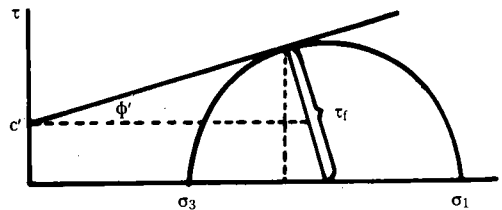


Fig. 6. Relation of τ_f to σ_3 on Mohr circle .

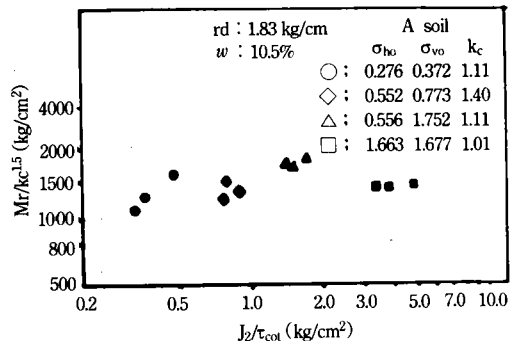


Fig. 7. Relationship between second stress invariant over octahedral shear stress and Resilient Nodus.

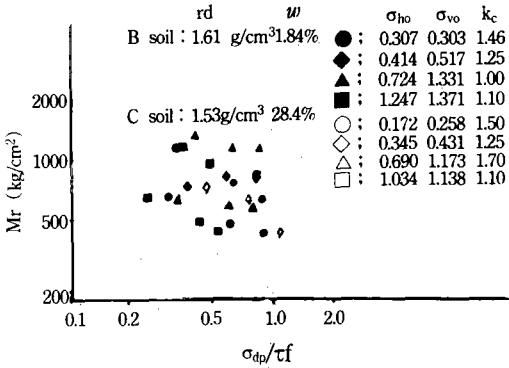


Fig. 8. Relationship between maximum shear stress and Resilient modulus.

Fig. 7에서 kc值가 1.4보다 큰 데이터의 Mr은 비교적 큰 값을 나타내므로²¹⁾ kc의 영향을 소거하기 위하여 이를 대략 kc=1.0의 범위로 修正하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{Mr}{k_c^n} = k_1 (J_2/\tau_{cot})^{k_2} \dots \dots \dots (11, a)$$

$$\frac{Mr}{k_c^n} = k_1 (\sigma_{dp}/\tau_f)^{k_4} \dots \dots \dots (11, b)$$

직선회귀에 의하면 식(7)의 修正式인 식(11, a)의 n 값은 대략 1.5, 식(9)의 修正式인 식(11, b)의 n 값은 대략 0.5이었는데 이는 kc가 B試料 또는 C試料 보다 A試料와 같은 粗粒土에서 Mr에 주는 영향이 더 큼을 의미하는 것이다.

이와 같이 kc를 補完 修正하여 試料別로 J2/tau_cot - Mr/kc^{1.5} 및 sigma_dp/tau_f ~ Mr/kc^{0.5}의 관계를 나타내면 각각 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다.

Fig. 1에서의 拘束應力經路(1)에 대하여 직선회귀법에 의해 k1, k2를 구할 수 있으며 fig. 9에서의 상관계수 r=0.838이었으며 拘束應力經路(2), (3)에서는 이 보다 r값이 약간 낮았으나 큰 차이는 없었다. 또 Fig. 10과 같이 B試料 및 C試料의 경우 拘束應力經路(1)에 대하여 각각의 相關係數는 r=-0.815, r=-0.798이었으며 sigma_vo와 w가 同一條件에서 拘束應力經路(2), 및 (3)에서는 위의 값 보다 r이 약간 낮게 나타났다.

이상과 같이 Mr과 kc, J2/tau_cot, 그리고 Mr과 Kc, sigma_dp/tau_f 사이에는 상호 특수한 관계가 있었다.

한편 材料特性이 Mr에 주는 영향을 검토하기 위하여 epsilon, sigma_dp/tau_c, kv, w, gamma_d, f (세립토含量)등의

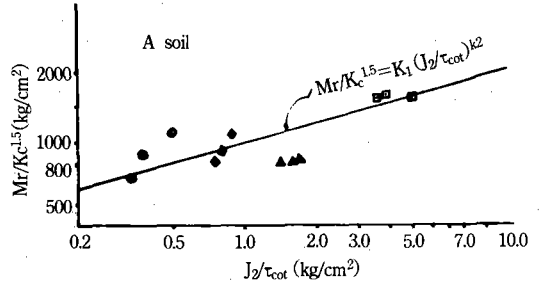


Fig. 9. Relationship between Ja/sigma_cot and Mr/kc^{1.5}.

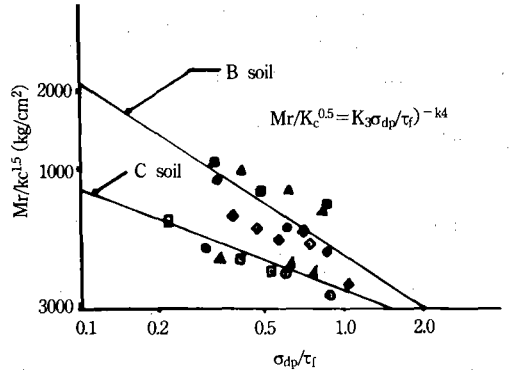


Fig. 10. Relationship between Ja/sigma_cot and Mr/kc^{0.5}.

因자를 대상으로 多重回歸分析을 한 바 應力函數(epsilon, sigma_dp/tau_f, kc 등)는 물론이고 w, gamma_d, f 등도 Mr에 영향을 주는 중요한 인자이며 시료別 r값은 A시료 0.824, B시료 0.802, C시료 0.798로 나타났다.

시멘트處理土의 Mr 特性

安定處理基層이나 補助基層으로 구성된 도로에 反復交通荷重이 계속 작용하면 균열 발생과 鋪裝構造가 弱화되어 결국 파괴에 이른다. 이와 같은 動的荷重을 받는 安定處理層의 Mr은 反復三軸壓縮試驗, 蠕試驗, 割裂引張試驗으로 결정할 수 있으며 이들 시험사이의 성과의 차이는 거의 무시할 수 있을 정도^{22, 43, 45)}이므로 本論文에서는 非排水상태에서의 反復三軸試驗 (間隙水壓은 무시하였음)으로 Mr을 결정하였으며 試料의 종류와 시멘트含量, 養生期間, 기타 試料安定變數(w, gamma_d 등)가 Mr에 주는 영향을 검토하였다.

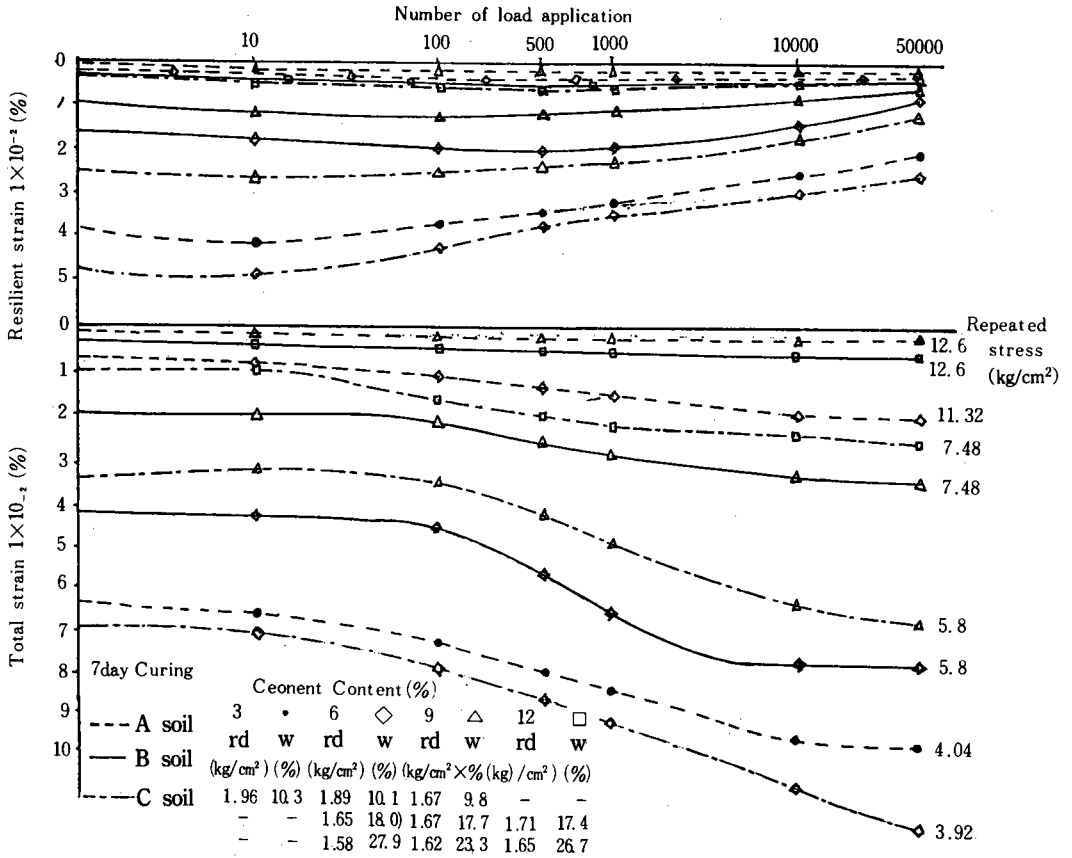


Fig. 11. Relationship between strains and number of load application of cement-treated soil.

Fig. 11은 시멘트處理供試體에 대한 N과 動彈性變形(ϵ_d) 및 總變形과의 관계를 보인 것이며 Table-2는 7일 양생공시체(σ_c)에 대하여 N=500에서의 주요시험 결과치를 요약정리한 것으로 동일한 시멘트함량에서는 조립토로서 壓縮強度가 높은 공시체일수록 動彈性變形 또는 總變形이 적은 것으로 나타났다. 이때 반복응력이 과대하면 總變形이 매우 커지고 Mr이 급격히 감소됨을 고려하여 대략 初期強度의 40%이하의 反復應力로 작용시켰다.

fig. 12는 σ_d 와 Mr과의 관계를 N=500에서의 결과를 양생기간 별로 나타낸 것으로 σ_d 를 4.83 9.66 14.49kg/cm²로 증가 시킴에 따라 非處理土에서와 같이 곡선관계를 이루면서 Mr은 감소되는 경향을 보였다. 그리고 시료의 종류와 Mr은 最適시멘트 함량에 따라 다르나 양생기간 28일

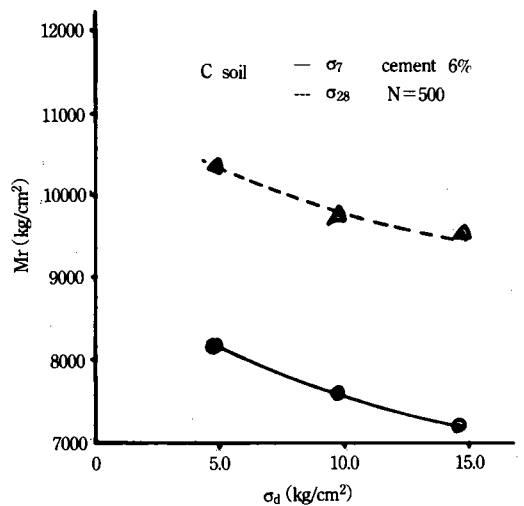


Fig. 12. Resilient modulus of a function of deviator stress and confining stress.

Table-2. Result of cyclic triaxial test of cement-treated soils(7days curing, N=500).

Soils	Item	cement content(%)			
		3	6	9	12
A	repeated stress (kg/cm ²)	4.04	11.32	12.6	-
	resilient strain (× 10 ²), (%)	3.82	0.45	0.30	-
	qu · (kg/cm ²)	10.1	28.3	42.7	-
	Mr (kg/cm ²)	10,575	163,506	420,000	-
B	repeated stress (kg/cm ²)	-	5.8	7.48	12.6
	resilient strain (× 10 ²), (%)	-	1.93	1.20	0.55
	qu · (kg/cm ²)	-	20.2	28.3	38.5
	Mr (kg/cm ²)	-	41,865	62,333	229,090
C	repeated stress (kg/cm ²)	-	3.9	5.8	7.48
	resilient strain (× 10 ²), (%)	-	4.14	2.50	0.63
	qu · (kg/cm ²)	-	9.8	14.5	18.7
	Mr (kg/cm ²)	-	8,909	23,200	118,730

(σ_{2d})에서는 σ₁보다 대략 1.25~1.45배 큰 값을 나타내었다.

Wang⁴¹⁾이 反復應力 強度와 拘束壓이 Mr에 주는 영향을 조사한 결과를 보면 軸差應力の 크기에 관계없이 初期應力常數가 클수록 Mr은 큰 값을 나타내었으며 초기응력상수가 일정할 때에는 σ₁가 증가하면 Mr은 감소하였다. Wang⁴⁵⁾이 제안한 이들 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Mr = k_1(k_2 - \log \sigma_d) I_1^{k_3} \dots\dots\dots(12)$$

여기서, I₁: 초기응력상수(主應力의 합 : kg/cm²)

k₁, k₂, k₃: 양생기간과 재료에 따른 상수

또 Mitchell²⁵⁾ Seed³⁶⁾ Shen⁴⁰⁾ 등은 시멘트 3%를 처리한 실트질 점토를 대상으로 한 시험에서 Mr은 다음 식으로 구할 수 있다고 하였다.

$$Mr = k_1 \frac{(I_1)^{k_2}}{(\sigma_1)^{k_3}} (t)^{k_4} \dots\dots\dots(13)$$

여기서, σ₁: 主應力

t: 양생기간

k₁~k₄: 재료상수

이상과 같이 시멘트처리토의 Mr은 N, σ_d, σ₁, 양생기간의 함수관계로 나타낼 수 있다.

한편 시멘트 처리토는 非處理土에서와 같이

γ_d가 증가되면 Mr이 증가되며 w가 증가되면 Mr은 감소되었다.

Felt¹⁵⁾는 시멘트의 수화에 필요한 w는 σ_{dmax}를 나타내는 w(OMC)보다 약간 건조측에서 最大 壓縮強度를 보인다고 하였으며 Mr도 이와같은 w에서 최대치를 나타낼 것으로 추정된다. Table-2에서 qu가 증가하면 Mr도 증가되었는데 Lotfi²⁴⁾에 의하면 10×11.5cm²크기의 供試體에서 qu와 Mr은 log Mr = -0.659 + 0.00075qu의 관계식이 성립된다고 하였다.

後述하는 可撓性 鋪裝斷面 해석과 設計를 위하여 시멘트處理層의 Mr 特性值선택에 고려해야 할 사항을 본 시험결과와 각종자료를 종합^{28, 35, 40, 45)} 요약하면 다음과 같다.

① 시멘트處理土의 Mr 應答 또는 k_c(應力比)에 영향을 주는 최대인자는 시료의 粒度와 시멘트 含量이다.

② 일정강도의 반복응력하에서 시멘트 處理土의 Mr은 粗粒質土에서는 주로 γ_d에, 細粒質土에서는 γ_d와 w에 좌우된다. 특히 세립질토는 γ_d와 w가 약간 변하여도 Mr에 큰 영향을 준다.

③ 시멘트處理層의 Mr은 初期強度의 30~40%應力까지는 작용응력강도를 증가시킴에 따라 급속히 감소한다.

④ 反復壓縮試驗의 시작전에 養生期間이 길수록 그리고 最適시멘트含量까지는 시멘트含量이 증가할수록 Mr은 커진다.

⑤ 水浸을 함으로서 시료가 포화되면 Mr은 감소된다.

Mr은 이외에도 많은 인자에 의해 변하고 시험방법에 따라 매우 민감하기 때문에 設計目的에 有效적절한 값을 선택해야 한다.

IV. Mr에 의한 鋪裝두께 設計

가. 接近方法

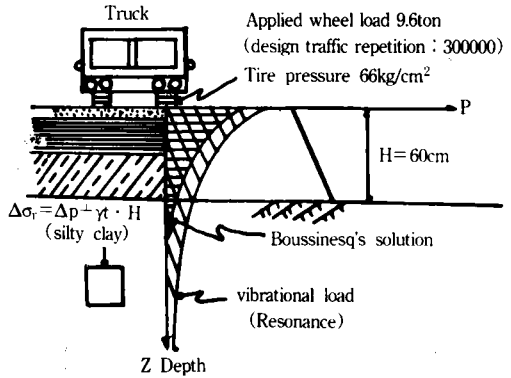
反復荷重은 시멘트處理層을 포함하는 포장의 疲勞破壞로 인하여 荷重移動能力을 損失시키고 永久變形을 일으키며 균열을 통한 浸透水로 路床을 弱화시켜 鋪裝構造의 서비스 효과를 감소시킨다.

鋪裝構造의 構成因子는 交通變數(輪荷量의 반복과 크기) 환경변수(溫度變化) 材料特性(強度, 彈性) 등으로 아스팔트 表層은 피로균열이나 과도한 應力變形量을 제한하고 또 基層이나 路床은 垂直變形을 적절히 제한하는 방법^{16, 30, 35)}을 취하여 포장두께를 결정할 수 있다. 특히 移動輪荷重에 의해 일어나는 시멘트處理層의 變形은 Fig. 13에서 보는바와 같이 本質적으로 動彈性的이며, Bofinger⁶⁾는 최대인장응력 Mitchell²⁷⁾은 최대휨응력 Larsen²³⁾은 曲率係數, Irwin²⁰⁾은 에너지 密度를 파라미터로 彈性論的 해석방법을 통하여 포장두께를 결정하는 방법을 제안한 바 있다.

현재에는 시멘트處理層을 포함한 道路鋪裝의 대표적인 設計는 AASHTO¹⁾, California州(K值를 이용)⁴²⁾, PCA³⁴⁾등의 방법이 많이 이용되고 있으며 이때 두께결정을 위한 層係數 a와 等價係數 (SR)는 Van til⁴⁷⁾의 방법에 따라 다음 式으로 산출할 수 있다.

$$SR = as / ai \dots\dots\dots (9)$$

여기서, as : 표준시료의 層係數
 as/ai : 대상시료의 層係數
 Van til은 qu(一軸壓縮強度) 또는 Mr을 기초로



Item	As'con Surface	soil-cement base	Crushed stone subbase	subgrade
Thickness(cm)	5	20	35	∞
Mr (kg/cm²)	60,000	80,000 (qu=30kg/cm²)	6,000	1,000
μ	0.30	0.20	0.40	0.50
soils	-	A soil treated cement	-	C soil
Remark				

Fig. 13. Representation of Layer Linear Elastic pavement system.

유도한 식(9)로부터 Fig. 14와 같은 Nomograph를 작도하여 포장두께를 결정하는 방법을 제안하였으며 현재까지 이 방법이 많이 활용되고 있다.

여기서는 軸對稱應力~變形 상태하에 있는 路床과 시멘트處理基層의 非線形 構造應答^{35, 36)}을 유한요소 컴퓨터 프로그램(ANALYS)으로 해석하여 彈性應力~彈性變形관계에서의 포장단면의 沈下量을 구명하고 이를 實測值 또는 기준설계방법과 비교하여 본 프로그램에 의한 해석의 合理性을 검토하였다. 시멘트처리층을 포함한 포장설계 순서 및 실험해석 방법의 흐름도는 Fig. 15와 같다.

나. 設計 條件

1) 設計 荷重

設計交通量은 재료의 성질과 관계되며^{25, 26, 30)} 본 연구에 사용된 設計荷重은 Fig. 13에서 보는바와 같이 DB 24 ton(접지압 6.6kg/cm²)로 하였다.

2) 材料의 特性

가) 아스팔트 콘크리트 表層

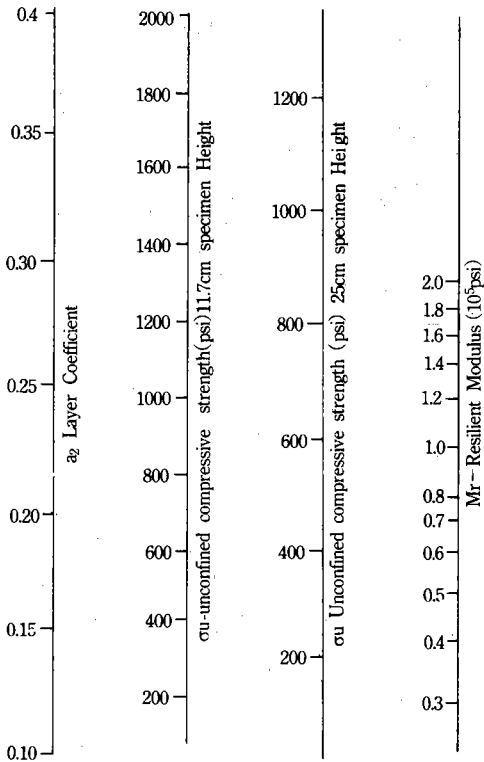


Fig. 14. Layer coefficient nomograph based on unconfined compressive strength.

① 아스팔트 혼합물의 剛性은 온도와 荷重率에 의존하며¹⁶⁾ 차속도가 80~100km/hr일때 Mr는 開粒度 아스콘의 경우 20,000(30°C)~60,000(0°C)kg/cm², 密粒度아스콘에서 50,000~120,000kg/cm², ν 는 혼합형식에 관계없이 0.30로 하였다.

나) 시멘트 安定處理層

시멘트處理層의 휨시험에 의한 휨강성계수 (Mb)는 사용시료의 종류, 시멘트함량, 材齡, 건조단위중량 양생방법등에 따라 다르나 간이시멘트 安定處理 자갈의 경우 30,000~60,000kg/cm², 입도 양호한 碎石의 경우 120,000kg/cm²내외³⁰⁾이다.

本 시험에서 壓縮強度 10kg/cm²정도의 補助 基層用 시멘트處理土(B시료 또는 C시료)의 Mr은 10,000kg/cm², 壓縮強度 30kg/cm²정도의 基層用材로서의 所要強度(A시료 또는 B시료)인 경우 80,000kg/cm²를 적용하였으며 ν 는 0.20을 적용하였다.

室內 試驗資料가 없을 경우 Otte³⁴⁾는 設計目的上 다음식으로 시멘트處理材의 Mb를 결정할 수 있다고 하였다.

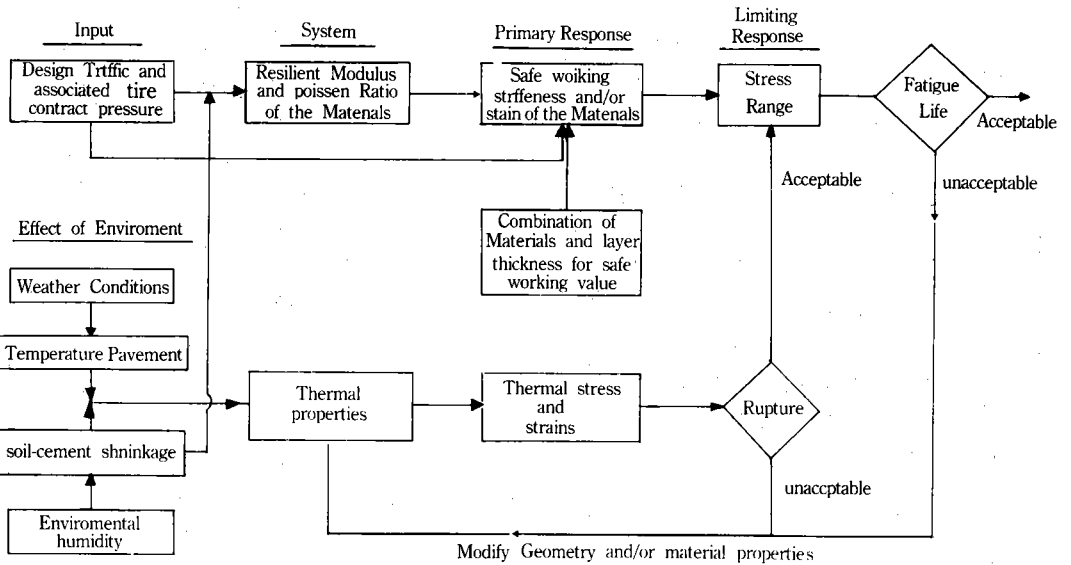


Fig. 15. Flow Diagram of a Design procedure for pavements with cement Treated Base.

$$M_b = 8q_b + 3,500(\text{시멘트처리 쇄석}) \dots (14a)$$

$$M_b = 10q_b + 1,000(\text{시멘트처리 자갈}) \dots (14b)$$

여기서 q_b : 휨강도

또 휨시험에서의 許容引張變形은 재료가 파괴될때의 變形(ϵ_b)과 荷重反復數(N_f)에 의존하며 Otte^{31, 32)}는 다음과 같은 관계가 있다고 하였다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_b} = 1 - 0.11 \log N_f \dots (15, a)$$

$$N_f = 10^{9.1} \left(1 - \frac{\epsilon}{\epsilon_b}\right) \dots (15, b)$$

다) 非處理 碎石 및 자갈

應力依存度가 높은 粒狀材는 seed³⁹⁾가 제안한 식(4)에 의하여 M_r 을 결정할 수 있다. 다만, 식(4)에서 k_1 , k_2 (재료상수)는 입도양호한 碎石의 경우 각각 5.0과 0.75의 값을 취하며 M_r 은 대략 $6,000 \text{ kg/cm}^2$ 을 추천하고 있다.

또 시멘트處理層위에 포설되는 非處理碎石의 경우 輕車輛의 M_r 은 3500 kg/cm^2 , 重車輛의 M_r 은 $6,000 \text{ kg/cm}^2$ 을 추천하며 이때 ν 는 0.40를 취한다.

라) 路床土

시멘트處理層아래의 路床土의 M_r 은 1000 kg/cm^2 을 취하였으며 시험데이터가 없을 때는 Heukelom¹⁸⁾에 의해 다음 식으로 구하여 이용하고 있다.

$$M_r = K \cdot \text{CBR} \dots (17)$$

여기서, K : 5~20, ν 는 0.50를 추천하고 있다.

3) 재료의 安全支持應力 및 變形

시멘트 處理層에 支持되는 As'con표층 바닥면의 許容引張變形과 路床面の 許容壓縮變形의 추천값은 Table 3과 같다.

다. 두께 결정 및 檢討

위에서 정의한 強度定數를 이용하여 Soil-cement층이 포함되어있는 포장도로가 彈性的 응답을 하는 것으로 생각하여 Fig 13에 제시한 포장단면을 대상으로 設計輪荷重(DB 24ton) 및 設計交通量(100,000대)이 작용할때 多層彈性理論에 입각한 有限要素 컴퓨터 프로그램(ANALYS)에 의하여 各層바닥의 水平引張變形을 검토한 바, 表層 -4 $\mu\epsilon$, 시멘트 안정처리기층 -36 $\mu\epsilon$, 쇄석보조기층 +52 $\mu\epsilon$ 이었다. 노상의 연직압축변형은 326 $\mu\epsilon$ 로 나타났으며 모두 허용범위내에 들었다. Fig. 15는 1986年度 農漁村道路鋪裝工法研究¹³⁾의 일환으로 제시하였던 단면에 대하여 본 프로그램에 의하여 水平 및 연직인장 변형량을 검토한 후 안전하고 경제적이라고 판단되는 빛가지 단면구조를 제시한 것이다.

V. 結 論

3種類의 試料土와 이에 시멘트를 處理한 試料를 대상으로 農道の 疲勞壽命을 지배하는 因子인 動彈性係數(M_r)의 특성과 M_r 을 기초로 한 基層 및 補助基層의 設計에 대한 研究結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 反復軸差應力(σ_d)이 증가함에 따라 M_r 는 감소하며 특히 $\sigma_d = 0.75 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 이상에서부터는 減少率이 완만하거나 또는 증가되는 경우도 있었다.

2. M_r 는 等方性 拘束應力(σ_{ho})이 증가함에 따

Table-3. Maximum permissible tensile and compressive strain in the thin bituminous Surfacing and Subgrade soils.

Number of load repetition (kg/cm ²)	Tensile strain $\times 10^6 (\mu\epsilon)$						Vertical Compressive strain ($\mu\epsilon$) Subgrad soils
	Gab-graded bituminous materials			Asphalt Concrete			
	materials stiffness (kg/cm ²)			Void in mix as a percentage			
	2400	5000	8000	2	5	9	
10 ⁵	510	430	400	440	410	360	83
10 ⁶	350	300	280	290	270	240	65
10 ⁷	250	210	200	190	175	150	57

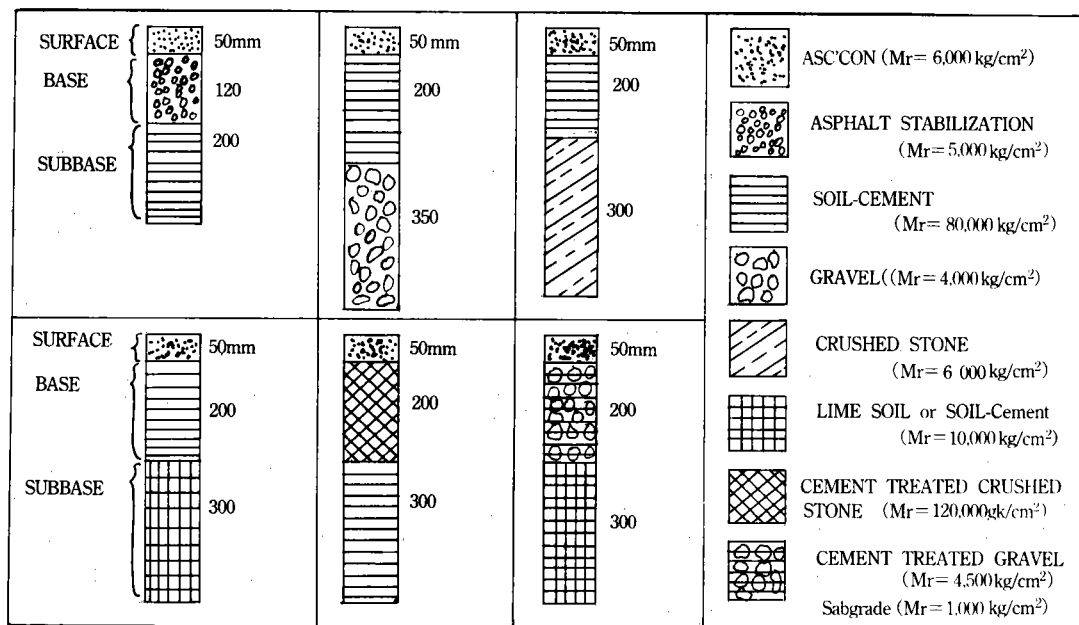


Fig. 16. Suggested Layouts for cement-treated layer in pavement.

라 증가하였으며 이 경향은 粗粒土에서 뚜렷하게 나타났다.

3. 拘束應力比(k_c)가 증가함에 따라 M_r 는 증가하였는데 이 경향도 粗粒土에서 뚜렷하였으며 K_c 가 증가할수록 永久變形도 크게 나타났다.

4. 排水反復三軸壓縮試驗에서 σ_{ho} , σ_d , K_2 등은 다음의 關係式이 성립되었는데 이는 Cole⁽¹⁰⁾의 M_r 모델과 비슷하였다.

$$\frac{M_r}{k_c^n} = k_1 (J_2 / \tau_{cr})^{k_2} \dots \dots \dots (\text{粗粒土})$$

$$\frac{M_r}{k_c^n} = k_1 (\sigma_{dp} / \tau_c)^{k_4} \dots \dots \dots (\text{細粒土})$$

5. 應力經路는 M_r 에 크게 영향을 주지 않았으며, 含水比, 乾燥單位重量, 細粒土 含量등은 M_r 에 영향을 주는 因子이다.

6. Soil-cement供試體에서는 σ_{ho} 가 증가될수록 動彈性 壓縮變形(ϵ_d)이 감소되었고 σ_d 가 증가됨에 따라 M_r 는 감소되었다.

7. 시멘트處理層을 포함하고 있는 可撓性 鋪裝道路에서 시멘트處理層은 포장이 設計交通量을 感當하기 전에 疲勞破壞가 발생되지 않도록 설계되어야 하며 실제로는 post-crack상태에서도 어느정도의 교통량을 感當할 수 있는데 이를

設計解析에 이용하기 위해서는 보다 많은 연구가 요망된다.

8. 시멘트處理層을 포함하고 있는 鋪裝道路의 變形解析을 위하여 개발한 有限要素 컴퓨터 프로그램(ANALYS)은 이용가치가 있는 프로그램으로 判明되었다.

본 연구는 1986년도 문교부의 대학교수 해외 파견 연구비지원에 의하여 이루어졌음.

參 考 文 獻

1. AASHO Interim Guide for Design of Pavement Structure(1972), AASHTO T 173(1972), T 274(1972).
2. Ahmed, S. B., and H. G. Larew, "A Study of the Repeated Load Strength Moduli of soils," Proceedings of the International Conference on structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan, pp. 637-648 (1962).
3. Allen, J. J and M. R. Thompson, "Resilient Response of Granular Materials Subjected to

- Time-Dependent Lateral Stress," Transportation Reserch Record No, 510., Transportation Research Board, pp.1~13 (1974).
4. Burmister, D. M. ; The Theory of stresses and displacements in layered systems and application to the design of Airport Run ways, HRB proc vol. 23 pp.126-149 (1943).
 5. Biarez, J, "Analysis of flexible Airfield pavements by surface plate Loading, Proc. Intl'l Conf. On the Structural Design of Asphalt pavements, Univ. of Michigan (1962).
 6. Bofiger, H. E., "The fatigue behavior of soil-cements, Australian Road Reserch vol. 2., No. 4 (1965).
 7. Brown, S. F. and P. S. Dell, "A fundamental Structural Design Procedure for Flexible Pavements." Proceedings of the Third International Conference on the structural Design of Asphalt Pavement. vol. I., pp.369-375 (1972).
 8. Brown, S. F., A. K. F. Lashine and A. F. L. Hyde, "Repeated Load Triaxial Testing of a sily clay," Geotechnique, vol. 25, No. 1, pp.95~114, (1975).
 9. Chaddock, B. C. J., "Repeated Triaxial Loading of soil, Apparatus and Preliminary Result," TRRL 711, pp.1~11. (1982).
 10. Cole D. M., L. H. Irwin and T. C. Johnson, "Effect of Freezing and Thawing or Resilient Modulus of a Granular Soil Exhibiting Nonlinear Behavior." Transportation Reserch Record No. 809, Transportation Research Board, pp.19~26, (1981).
 11. 都德鉉 "反復荷重으로 인한 地盤의 變形豫測," 韓國農工壑會誌 第30卷, 第3號 pp. 69~81 (1988).
 12. 都德鉉, 高在晚, 吳圭泰, "粒狀體 試料의 空隙比의 頻度分布", 大韓土質工學會誌 第4卷 第3號 pp.5~18 (1988).
 13. 都德鉉, 姜예默: 農漁村道路 鋪裝工法研究. 農業振興公社 農業土木試驗研究所 報告書 86-05-09 pp.1~220 (1986).
 14. Dormon, G. M. and C. T. Metcalt, "Design Curves for Fiexible Pavement Based on Layered System Theory," Highway Research Record, No. 71. pp.69 (1965).
 15. Felt, E. J. ; Factors Influencing physical Properties of soil Cement Mixtures. HRB Bull. 108~163 (1955)
 16. Freeme, C. R., and C. P. Marais, "Thin Bituminous Surface ; Their Fatigue Behaviour and Prediction," special Report No, 140, Highway Research Board, pp.158 (1973).
 17. 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. pp.1~122 (1976).
 18. Heukelom W, and A. J. G. Klomp, Dynamic Testing as a Means of Controlling pavements during and after Construction," procoodings of the First Intl, conference on the structural Design of Asphalt pavement pp.667, (1962).
 19. Hicks, R. G and C. L. Monismith : Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials, HRR. No, 345, pp.15~31, (1971).
 20. Irwin, L. H., "Evaluation of stabilized soils in Flexural Fatigue for rational pavement Design Ph. Dissertation, Texas A&M Univ, (1973).
 21. Ishibashi, I, L H. Irwin, and W. S. Lee, "Resilient Behavior of Base and Subgrade Materials," school of Civil and Enviromental Engineering and Department of Agricultural Engineering, Cornell University pp.1~149.
 22. Koliaas, S., and R. I. T. Williams., "Cement-Bound Road Material, strength and Elastic Properties Measured in the Laboratory," TRRL 334, pp.1~62, (1978).
 23. Larsen, T. J., P. J. Nussbam, and B. E. Colley, "Research and Development Laboratories, Bulletin D 142, (1969).
 24. Lotfi, H. and M. W. Witczak ; Dynamic charac-

- terisation of cement-treated base and Subbase materials TRR 1031 pp.41~48 (1985).
25. Mitchell, J. k, and C. K. Shen, "Soil-Cement Properties determined by repeated Loading in Relation to Bases for Flexible Pavement, "Second Intl. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavement. pp.348~373 (1967).
 26. Mitchell, J. K., and C. L. Monismith, "A Thickness Design Procedure for Pavements with Cement Stabilized Bases and Thin Surfacing, "Proceedings of the Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements pp.409~411.
 27. Mitchell, J. K., C. L. Monismith, and P. Dzwilewski, "Behavior of stabilized soils under Repeated loading, a summary report with a suggested structural Pavement Design Procedure," U. S. Army Engineer Waterways experiment station, soils and Provement Laboratory, Contract Report No. 3~145, Report 6, pp.1~160, (1974).
 28. Monismith, C. L., H. B. seed, F. G. Mityr and C. K. Chan : Predictions of pavement deflections from Laboratory Tests, second international conference on the Structural Design of Asphalt pavements, Proceedings univ. of Michigan pp.109~150, (1967).
 29. Oda, M., "The Mechanism of Fabric Changes During Compressional Deformation of sand." Soils and Foundation, Japanese Society of soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 12, No 2. pp.1~18 (1972).
 30. Otte, E., P. E. Savage., and C. L. Monismith, "Structural Design of Cemented Pavement Layers," Transportation Engineering of ASCE. TE. 4 pp.428~446 (1982).
 31. Otte, E., "Factors Affecting the Behavior of Cement-Trated Layers in Pavement." Proceedings of the 9th ARRB Conference, Brisbane, Australia, vol. 9. session 1. pp.1~16 (1978).
 32. Otte, E., "A Structural Design Procedure for Cement-Treated Layers in Pavements," thesis presented to the University of Pretoria, at Pretoria, south Africa, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (1978).
 33. Pretorius, P. C. : Design considerations for pavements containing soil-cement bases ph. D. Dissertation, university of California, Berkeley (1970).
 34. Portland Cement Association, "Soil-cement Miztures, Laboratory hand book pp.1~62 (1972).
 35. Raad, L., "Behavior of Stabilized Layers Under Repeated Loads," Transportation Research Record 1022. pp72~79 (1985).
 36. Raad, L., "Design criteria for soil-cement Bases Graduate Division of the university of California, Berkeley pp.1~224 (1977).
 37. Richards, B. G., and R. Gordon, "Prediction and Observation of a Flexible Pavement on an Expansive Clay subgrade," Proceedings of The 3rd International Conference on structural Design of Asphalt pavements, London, pp. 133~143 (1972).
 38. Seed H. B., C. K. Chan, and C. E. Lee., "Resilience Characteristics of Subgrade Soils and their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavement," Proceedings of The International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement, University of Michigan pp.611~636 (1962).
 39. Seed H. B., G. G. Mityr., C. L. Monismith, and C. K. Chan, "Prediction of Flexible Pavement Deflections From Laboratory Repeated-Load Test," national corperative highway research prograss report 35, pp.1~117 (1967).
 40. Shen e. H, "Behavior of soil-cement in Repeated compression and Flexure," HRR 128, pp. 68~100 (1967).
 41. Silver. M. L, and T. K. Park," Journal Testing procedure Effects on Pynimic soil Behavior."

- ASCE, GT 10, pp.1061~1083 (1975).
42. State of California, Division of Highway : Materials Manual, Vol. I. "Test Method Northern california 301~F. (1964).
 43. T.R.B special Report 162 : Test procedures for characterizing Dynamic stress-strain properties of Pavement materials, National Research council National Academy of sciences washington, D. C, pp.1~38 (1975).
 44. Wang, M. C., J. K. Mitchell, and C. L. Monismith, "Behavior of stabilized soils Pavement," HRR 351, pp.93~111. (1971).
 45. Wang, M. C., J. K. Mitchell, and C. L. Monismith, "Behavior of stabilized soils under Repeated Loading," stresses and deflections in cement-stabilized Pavement, U. S. Army Engineer Waterways Experiment station, contact Report No. 3~145, pp.1~125, (1970).
 46. Whittle, J. P., and H. G. Larew, "Effects of Repeated Loads on Elastic Micaceous soils stabilized with Portland Cement," HRR. 86 pp. 28~38 (1964)
 47. Van Til, C. T., B. F. McCullough, B. A. Vallvega, and R. G. Hicks., "Evaluation of AASHO Interim Guide for Design of Pavement structures, NCHRP Report 128, TRIS, National Research Couhcil, washington, D. C, pp. 112~119, (1972).