

有限多層土地盤의 應力解析(1)

Stress Analysis of Finite Multi-layered Soils

박 병 기*¹

Park, Byong-Kee

장 용 채*²

Chang, Yong-Chai

Abstract

Generally foundation is composed of complicated multi-layers. Primary objective of this study is to perform numerical analysis on the distribution of stresses on the subgrade with the variation of constitutive equations, the structures and the depth of layer, rigidity, loading condition, etc. Multi-layered soils has been treated as Burmister's elastic model. However, in this research it was intended to analyzed the distribution of stresses on the subgrade with all of the multi-layered soils by using the EVP(elasto-viscoplastic) model, one of the numerical program based on the Biot's equation as governing equation. The numerical results are compared with those by the Burmister's and the Fox' method, which in turn proves to be satisfactory.

This research is aiming at investigating the mechanism of stress transfer within a foundation by using computer program for multi-layers foundation.

요 지

일반적으로 지반은 복잡하고 다양한 다층구조로 되어있다. 이러한 다층토 지반을 해석 하기위해 본문은 지반의 구성식, 층의 구조와 두께, 각층의 강성, 재하조건 등을 변화시켜 수치해석 하였다. 기존의 다층토 지반은 Burmister의 2층계이론인 탄성해로 지중응력분포를 해석하였으나, 여기서는 Biot 방정식을 지배방정식으로하여 개발된 지반해석프로그램에 탄·점소성구성식을 이용하여 층의 조건에 관계없이 2층이상의 모든 다층토지반의 지중응력분포를 해석 하고자 한다. 이들의 결과를 Burmister나 Fox의 결과와 비교하였으며, 서로 근접한 결과를 얻었다.

따라서, 본 연구는 다양한 다층토 지반을 전산 프로그램을 이용하여 실제에 가까운 응력전달기구를 밝히려는 목적으로 수행된 것이다.

*¹ 정회원, 전남대학교 공과대학 토목공학과, 교수

*² 정회원, 전남대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

1. 서론

대부분의 다층토 지반의 해석은 도로와 같은 경우 Burmister가 제안한 2층 탄성체의 이론에 준하여 지반의 응력분포를 해석하여왔고, 이를 일반 지반에도 확장하여 이용되어왔다. 그러나 지반은 이처럼 단순한 탄성체로만 볼 수 없기 때문에, 본 연구에서는 지반의 특성을 보다 잘 표현할 수 있는 지반모델을 이용하여 해석하려고 한 것이며, 이들 해석결과를 현행의 Burmister나 Fox⁽¹²⁾⁽³⁾ 등의 탄성해와 비교한 것이다.

지반모델로서는 탄성모델과 탄·점소성모델을 혼합한 경우와 탄·점소성 모델만을 사용한 경우로 나누고 각층의 강성과 두께, 재하조건 등을 변화시켜 수치해석한다.(단, 여기에 사용한 탄·점소성모델은 경과시간의 효과에 대해서는 다루지 않았다.) 이때 지층의 지반구조는 2층구조로 상층이 강성이 큰 단단한 지반과 하층이 강성이 작은 연약한 지반으로 구성된 경우(Case I), 또는 이와 반대구조를 갖는 경우(Case II)와 3층구조로 상하층이 단단한 지반이고 중간층이 약한 경우(Case III), 이와 반대 구조를 갖는 경우(Case IV)로 크게 나눈다.(표-1, 그림-2)

여기에 사용한 유한요소해석 프로그램은 지배방정식으로 Biot의 응력-변형률 방정식에 각종 구성식을 프로그램으로 가지고 있는 범용 프로그램을 이용하였고, 이의 유한요소해석 기법은 Christian-Boehmer 계의 계산수법을 이용하였다.

2. 지반 모델

지반모델(지반의 구성식)로서는 지반 구성가운데 지층이 단단한 지반에 대해서는 탄성모델을, 상대적으로 연약한 지반의 경우는 탄·점소성 모델을 선정하였다. 이들 모델에 대한 상세는 이미 발표한 바 있어⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾ 생략하고 여기서는 구성식만을 정리하면 다음과 같다.

2.1 탄성모델(E-model)

평면변형률 문제에 대해 응력-변형률관계를

표 1. Detail of ground models(Case I - IV)

Case 1			Case 3		
	$N_1:N_2$	Depth		$N_1:N_2:N_3$	Depth
①	20:3	0.5a:14.5a	⑱	20:3:20	1.5a:0.5a:13a
2	20:6	0.5a:14.5a	20	20:6:20	1.5a:0.5a:13a
3	20:9	0.5a:14.5a	21	20:9:20	1.5a:0.5a:13a
④	20:3	a:14a	⑳	20:3:20	1.5a: a:12.5a
5	20:6	a:14a	23	20:6:20	1.5a: a:12.5a
6	20:9	a:14a	24	20:9:20	1.5a: a:12.5a
⑦	20:3	1.5a:13.5a	㉑	20:3:20	1.5:1.5a:12a
8	20:6	1.5a:13.5a	26	20:6:20	1.5:1.5a:12a
9	20:9	1.5a:13.5a	27	20:9:20	1.5:1.5a:12a
⑦'	20:3	2a:13a	㉑'	20:3:20	2a: 2a:11a
Case 2			Case 4		
	$N_1:N_2$	Depth		$N_1:N_2:N_3$	Depth
⑩	3:20	0.5a:14.5a	㉒	3:20:3	0.5a:1.5a:13a
11	6:20	0.5a:14.5a	29	6:20:3	0.5a:1.5a:13a
12	9:20	0.5a:14.5a	30	9:20:3	0.5a:1.5a:13a
⑬	3:20	a:14a	⑳	3:20:3	a:1.5a:12.5a
14	6:20	a:14a	32	6:20:3	a:1.5a:12.5a
15	9:20	a:14a	33	9:20:3	a:1.5a:12.5a
⑭	3:20	1.5a:13.5a	㉓	3:20:3	1.5a:1.5a:12a
17	6:20	1.5a:13.5a	35	6:20:3	1.5a:1.5a:12a
18	9:20	1.5a:13.5a	36	9:20:3	1.5a:1.5a:12a
⑭'	3:20	2a:13a	㉓'	3:20:3	2a: 2a:11a

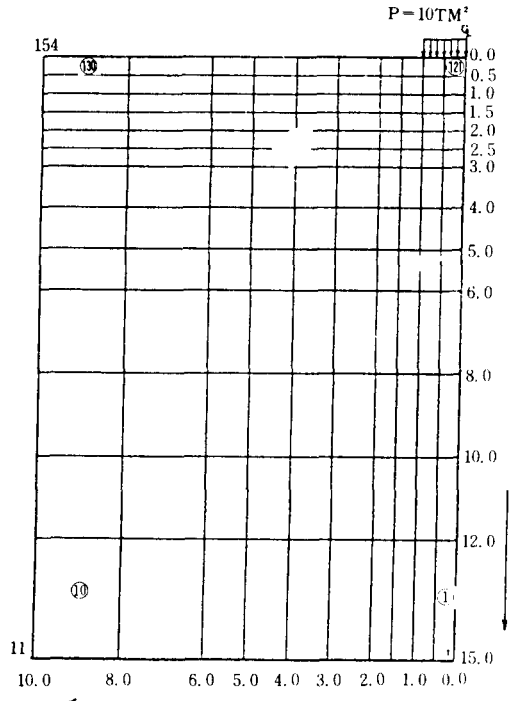


그림 1. Finite element Grid

메트릭스형태로 표현하여 나타내면 다음식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} d\delta_x \\ d\delta_y \\ d\tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_x^e \\ d\epsilon_y^e \\ d\gamma_{xy}^e \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

혹은 $\{d\delta\} = \{D^e\} \{d\epsilon^e\}$

2.2 탄성소성모델(EVP-model)

구성식을 최대칭문제 및 2차원 평면변형률문제에 적용할 수 있도록 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_r \\ \dot{\sigma}_z \\ \dot{\tau}_{rz} \\ \dot{\sigma}_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} L+2G & L & 0 & L \\ L & L+2G & 0 & L \\ 0 & 0 & G & 0 \\ L & L & 0 & L+2G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_r \\ \dot{\epsilon}_z \\ \dot{\gamma}_{rz} \\ \dot{\epsilon}_\theta \end{Bmatrix} \quad (2-2)$$

$$-\frac{C_5}{C_4} \begin{bmatrix} C_1^2 & C_1C_2 & 2Gf_{rz}C_1 & C_1C_3 \\ C_1C_2 & C_2^2 & 2Gf_{rz}C_2 & C_2C_3 \\ 2Gf_{rz}C_1 & 2Gf_{rz}C_2 & 4G^2f_{rz}^2 & 2Gf_{rz}C_3 \\ C_1C_3 & C_2C_3 & 2Gf_{rz}C_3 & C_3^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_r \\ \dot{\epsilon}_z \\ \dot{\gamma}_{rz} \\ \dot{\epsilon}_\theta \end{Bmatrix}$$

$$-\frac{C_6}{C_4} \begin{Bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ 2Gf_{rz} \\ C_3 \end{Bmatrix}$$

단, 위 식에서 사용한 기호는 아래와 같다.

$$f_{rz} = \frac{\partial F}{\partial \tau_{rz}}$$

$$C_1 = L \frac{\partial f}{\partial p} + 2G \frac{\partial f}{\partial \sigma_r}$$

$$C_2 = L \frac{\partial f}{\partial p} + 2G \frac{\partial f}{\partial \sigma_z}$$

$$C_3 = L \frac{\partial f}{\partial p} + 2G \frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta}$$

$$C_4 = [L(\frac{\partial f}{\partial p})^2 + 2G\{(\frac{\partial f}{\partial \sigma_r})^2 + (\frac{\partial f}{\partial \sigma_z})^2 + (\frac{\partial f}{\partial \sigma_\theta})^2 + 2(\frac{\partial f}{\partial \tau_{rz}})^2\}] C_5 + \frac{\partial f}{\partial p}$$

$$C_5 = 1 - \exp(-\frac{\nu^p}{\alpha})$$

$$C_6 = \frac{\partial F}{\partial t} = \dot{\nu}_0 \exp(\frac{f-\nu^p}{\alpha})$$

α : 2차 압축지수

t : 경과시간

$\dot{\nu}_0$: 초기체적변형률 속도

ν^p : 체적변형률의 점성성분

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) + D\left(\frac{q}{p} - \frac{q_0}{p_0}\right)$$

$$D = \frac{\lambda - \kappa}{M(1 + e_0)} \quad (\text{dilatancy 계수})$$

$$F \equiv \alpha \ln\left\{1 + \frac{\dot{\nu}_0 t}{\alpha} \exp(f/\alpha)\right\} = \nu^p$$

$$\dot{\sigma}_{ij} = L \cdot \dot{\nu}^e \delta_{ij} + 2G \cdot \epsilon_{ij}^e$$

$$= L \cdot (\dot{\nu} - \dot{\nu}^p) \delta_{ij} + 2G(\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p)$$

$$L = \frac{D(1 + e_0)}{\kappa} - \frac{2}{3} G$$

$$G = G_0 \exp\left(-\frac{e - e_0}{\lambda}\right)$$

3. 수치해석

다층토 지반에 상재하중이 원형하중이나 띠하중으로 작용할 경우 이들의 응력분포를 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 수치해석하였다.

프로그램에 이용된 구성식으로는 강성이 강한 지층은 탄성모델(E-Model), 약한 지층과 중간 지층은 탄·점소성모델(EVP-Model)의 혼합을 각각 이용한 경우와 전체지반을 탄·점소성모델로 하여 수치해석한 경우 각각의 응력분포를 검토하고 그 결과를 기존의 연구(탄성모델을 이용한 Burmister, Fox 등의 이론)와 비교하여 정도를 고찰하였다. 하중은 재하면에 10ton의 상재하중이 작용한 것으로 하였으며, 지반의 경계면은 하단과 양측면은 고정, 상단은 자유로 하며, 배수조건은 상단은 배수, 하단과 양측면은 비배수조건으로 해석하였다.

계산지반의 모델제원은 지반깊이가 15m로 좌우대칭이며 좌 반만 생각하면 폭 X=10m, 깊이 Y=15m인 토체를 요소수 130개, 절점수 154개로 나누어 해석한 것으로 유한요소분할은 다음 그림 1에 나타낸다. 해석결과와 정도가 확인되면 이번에는 2층구조와 3층구조의(Case I, II, III, IV) 지반에 한정하여 지반의 응력분포를 검토한다.

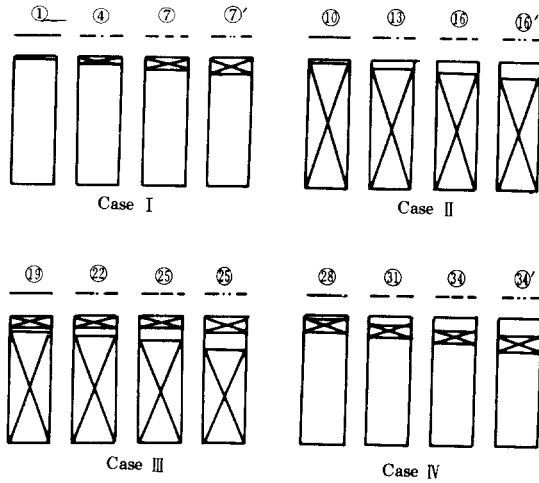


그림 2. Types of ground models

3.1 계산지반의 지반구조

그림 1의 모형지반의 지층구성을 다음 그림 2에서와 같이 4 가지 형태로 나누어 계산이 수행되며, 이를 표-1에 Case I - Case IV로 자세히 나타낸다. (☒: $N=20$ 정도의 지반)

여기서 지층의 강도는 단단한 지반은 표준관입치로서 $N=20$ 정도 (N_1)을 의미하고 연약한 지반이란 약한 순서로 표현하면 $N=3, 6, 9$ 정도 (N_2)을 의미하며 (N 값의 변화는 표-2에서 직접적으로 G_0 값의 변화로 환산된다. Layer 1은 $N=20$ 이므로 표-2의 기호설명에서 탄성계수 E 값을 $E \approx (800-3000)Cu$ 중 $E \approx 2544Cu(t/m^2)$ 을 대입하여 $G_0 \approx 910.0t/m^2$ 을, Layer 2는 $N=3, 6, 9$ 인 경우 $E \approx 2000Cu(t/m^2)$ 을 대입하여 $G_0 \approx 136.5, 273.0, 409.5t/m^2$ 를 사용하였다.), 이들의 분포두께는 재하폭의 1/2 인 a 를 기준으로 $0.5a, a, 1.5a, 2a$ 등으로 나누어 표-1에서와 같은 조합으로 40 개의 지반을 해석하였다. 본문에서는 이 중 각 Case 별로 대표될만한 것에 한하여 논술한다. (0 표)

① Case I

이는 2층 지반구조로서 상층에 강성이 큰 지층 ($N_1=20$)이 있고, 그 아래층에 강성이 약한 ($N_2=3, 6, 9$) 지층이 있는 지반구조로 이들 각 층의 두께가 상층은 재하폭 a 를 기준으로 표-1에서

처럼 $0.5a, a, 1.5a, 2a$ 까지 변화하며 아래층은 $1.5a$ 까지 변화된다.

② Case II

2층 지반구조로서 Case I 과는 정 반대구조로 강성이 큰 지층 ($N_2=20$)이 하층에 있고 강성이 약한 지층 ($N_1=3, 6, 9$)이 상층에 있는 경우로 각 층의 두께는 Case I 과 같이 $0.5a, a, 1.5a, 2a$ 까지 변화시킨다.

③ Case III

3층 지반구조로서 상하층의 강성이 강하고 ($N_1=N_3=20$) 중간층의 강성이 약한 경우 ($N_2=3, 6, 9$)이다. 상층의 두께는 $1.5a, 2a$ 로 고정시키고 중간층의 두께를 $0.5a, a, 1.5a, 2a$ 로 변화시켜 해석한다.

④ Case IV

3층 지반구조로서 Case III 과 반대인 지층상태이다. 즉 상하층의 강성이 약하고 ($N_1, N_3=3, 6, 9$) 중간층의 강성 ($N_2=20$)이 크다. 중간층의 두께는 $1.5a, 2a$ 로 고정시키고, 상층의 두께는 $0.5a, a, 1.5a, 2a$ 로 변화시킨 것이다.

3.2 토질상수

입력에 필요한 토질상수는 한계상태 이론을 적용하기 때문에 표-2에서와 같이 모두 16 개의 상수가 필요하다. 이들은 통상의 3축압축 시험이나 압밀시험을 통해서 구해지는 값들이며, 또한 이들간의 계산에 의해 구해지는데 이번 연구의 경우는 이론적인 연구이므로 이들의 값을 표-2와 같이 가정하였다.

표-2에서 Layer 1은 지반구성 가운데 $N=20$ 에 해당되는 것이며, Layer 2는 $N=3, 6, 9$ 중 $N=3$ 의 지층을 대표하는 값들이다. 이들 지층은 점성토를 가상하고 있으며 Layer 1은 압축성이 작은 점토지반(또는 밀실한 사질토지반), Layer 2는 통상의 연약한 점성토지반에 해당된다.

$$\lambda : e - \ln p \text{ 곡선의 정규압밀부분 기울기} = 0.434C_c$$

Flow Chart

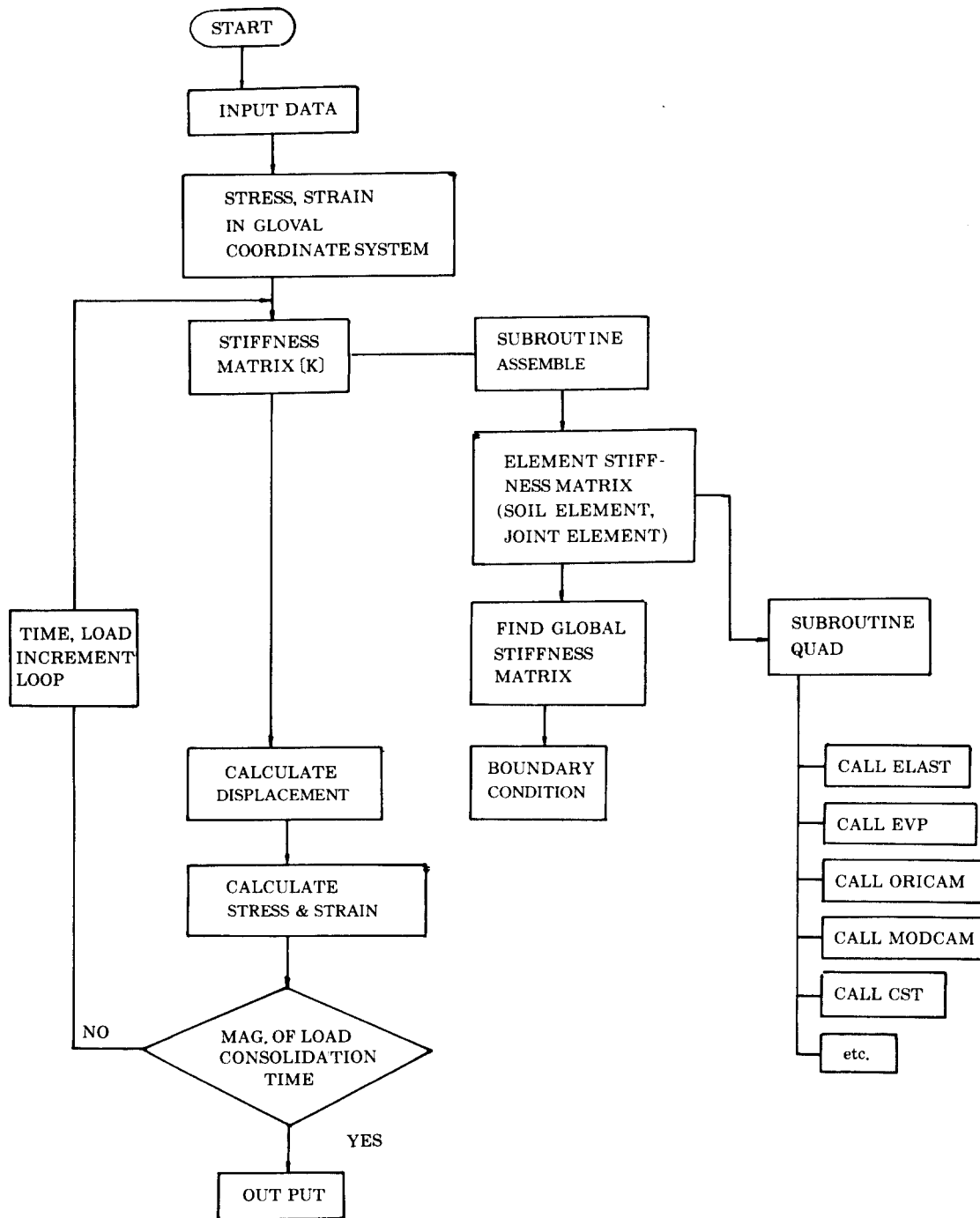


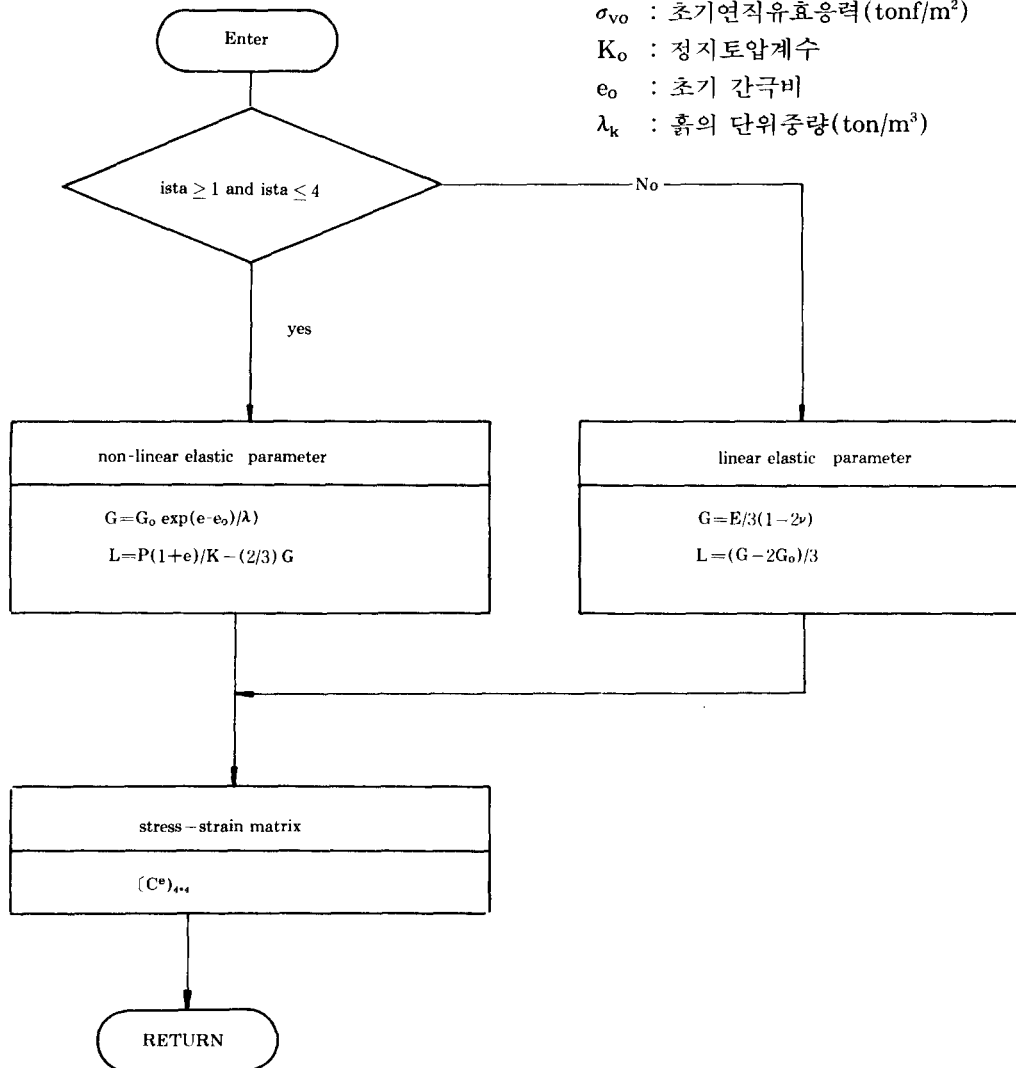
표 2. Soil properties & parameters used in calculation (Unit: Length:m, Weight:ton, Time:day)

layer	λ	κ	M	C_α	G_0	ν	σ_{vc}	K_{oc}	σ_{vo}
1	0.010	0.002	1.51	0.001	910.0	0.398	2.5	0.661	2.5
2	0.146	0.023	1.34	0.043	136.5	0.374	3.4	0.597	3.4

layer	K_0	e_0	γt	ν_0	λ_k	k_{x0}	k_{v0}
1	0.661	1.148	1.80	1.0E-05	0.010	1.26E-05	1.26E-05
2	0.597	1.492	1.68	1.0E-05	0.146	0.47E-03	0.47E-03

SUBROUTINE ELAST (Linear-Nonlinear Model)

Given : σ_u .



κ : $e - \ln p$ 곡선의 팽윤-재압축부분의 평균 기울기

M : $p-q$ 평면에서 한계상태선의 기울기 = $\lambda - \kappa/D(1+e_0)$, D : $\nu-q/p$ 선의 기울기

C_α : 2차 압축지수 = $d\epsilon_v/d\ln t$

G_0 : 초기전단탄성계수 = $E/2(1+\nu)$, E는탄성계수(800-3000)Cu의 평균값.
 $Cu = q_u/2$, $q_u = N/8$

σ_{vc} : 선행압밀하중시의 연직유효응력 (tonf/m²)

K_{oc} : 선행압밀하중시의 정지토압계수

ν : Poisson 비(가정), N=20: $\nu=0.398$:
N=3: $\nu=0.374$

σ_{vo} : 초기연직유효응력(tonf/m²)

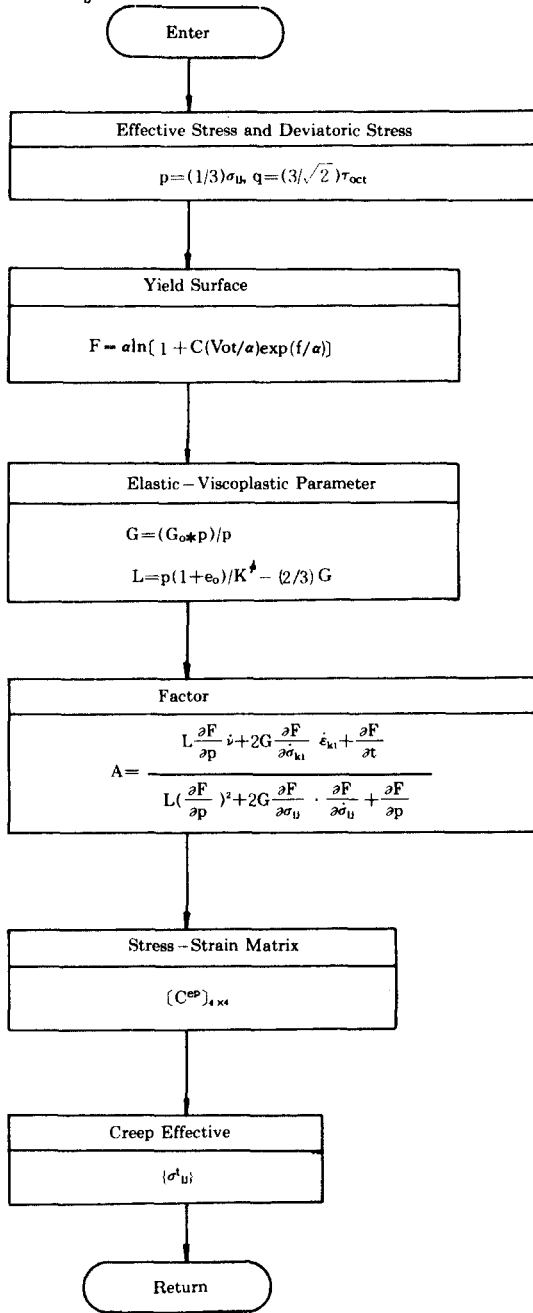
K_0 : 정지토압계수

e_0 : 초기 간극비

λ_k : 흙의 단위중량(ton/m³)

SUBROUTINE EVP(Elastic-Viscoplastic Model)

Given : σ_u



- v_0 : 초기체적변형률속도 = C_a/t_c
- t_c : $t_{90} = H^2 T_v (u=90\%) / c_v$
- λ_k : $e - \ln k$ 직선의 기울기

k_{x0} : 초기 수평방향의 투수계수(m/day)

k_{y0} : 초기 연직방향의 투수계수(m/day)

3.3 프로그램의 개요

본 연구에서 이용되는 유한요소 프로그램의 특징은 연약 지반용이기 때문에 지배방정식으로 Biot 방정식을 주축으로 구성되어 있으며 부 프로그램으로는 탄성(ELAST), 탄소성(ORICAM or MODCAM), 비선형(NLE), 탄점소성(EVP) 구성식을 활용할 수 있도록 되어 있다. 본 프로그램은 이러한 구성식들을 이용하여 다차원 압밀해석, 연약지반을 보강하는 경우의 변형해석 등을 할 수 있는 범용 프로그램으로, 다층토 지반해석에 확장하여 지반의 응력분포를 해석하고자 한 것이다.

본 프로그램의 흐름도와 부 프로그램의 내용을 약술하면 다음과 같다.

4. 해석결과

4.1 해석의 정도

먼저 가정한 토질상수 및 구성식을 이용하여 수치해석할 경우 그 정도를 확인할 필요가 있다. 따라서 여기서는 2층 탄성체지반의 경우에 있어 지층간의 탄성계수 차이(E_1/E_2)에 의한 무차원 응력비를 발표한 Fox³⁾의 연구결과와 비교해 본다.

Fox는 전체지반을 탄성체로 보고 다음 그림 3의 일점쇄선처럼 탄성계수 차이(E_1/E_2)에 의한 무차원 응력비(σ_z/p ; σ_z : 수직응력)를 나타냈다. 여기서 실선은 본 프로그램에 의해 수행된 계산결과인데 Fox와 달리 지반을 탄·점소성체로 보고 수행한 것이다.

무차원 응력비가 지반을 탄성체로 보았을 때는 Fox의 탄성해와 거의 일치한다. 탄·점소성체로 보았을 때를 비교하여 보면 응력이 10% 선에서 깊이에 차이가 있을뿐 그외는 매우 근사한 결과를 나타내고 있다. 이는 사용된 점수치 차이(Fox는 $\nu=0.5$, 본프로그램은 $\nu_1=0.397$, $\nu_2=0.374$)와 구성식(탄·점소성모델)의 차이에서 비롯된

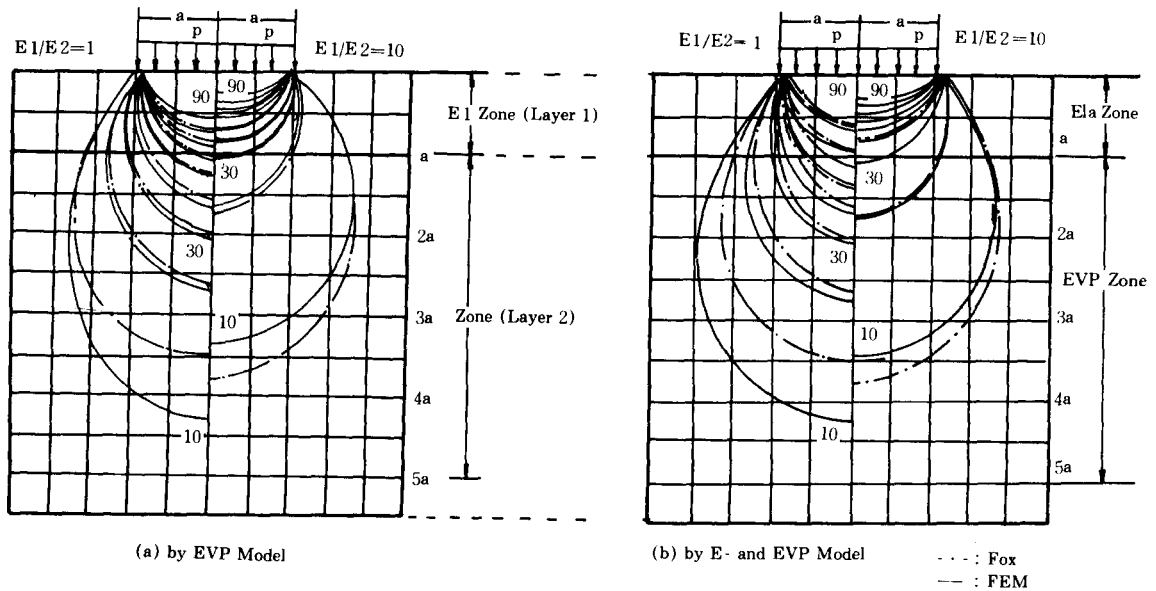


그림 3. Vertical stress distribution

것이다.

이를 다시 깊이 a 까지는 탄성모델을 사용하고, 그 아래깊이는 탄·점소성 모델을 사용한 경우를 비교한 것이 그림 3(b)이다. 대부분의 응력권(이하 응력 Bulb 라함)이 그림 3(a)의 탄·점소성모델을 사용한 경우와 유사한데, $E_1/E_2=1$ 인 경우 90%의 응력 Bulb 만이 지중응력값에 차이를 나타낸다. 즉 그림 3(a)에 나타낸 Fox의 탄성모델, 그리고 탄·점소성모델에서는 90%의 응력 Bulb가 재하판 중앙부 아래에서 $0.6a$ 정도 깊이인데, 그림 3(b)에서처럼 상층은 탄성모델과 하층은 탄·점소성모델을 혼합 사용한 경우는 $0.3a$ 정도 깊이이다. $E_1/E_2=1$ 인 경우는 상하층이 동일지반이기 때문에 임의로 층을 나눠 구성식을 달리한 2층구조의 고찰은 의미가 없지만, $E_1/E_2=10$ 인 경우는 상하층이 동일지반이 아니기 때문에 상하층의 구성식을 달리한 그림 3(b)의 경우에 있어 응력 Bulb는 그림 3(a)와 비교하여 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

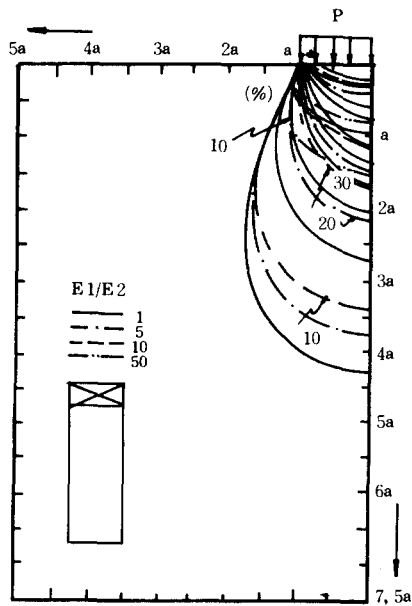
따라서 본 수치계산에 있어 지반을 탄성체로 가정한 경우는 무차원 응력비가 Fox의 연구와 거의 일치하고, 탄·점소성체로 가정한 경우도 10%의 응력선이 깊이에서 약간의 차이가 있을뿐

그 외는 매우 근사한 결과를 나타내고 있다. 따라서 탄·점소성체모델에 의한 본 수치계산의 정도는 매우 높다고 볼 수 있다.

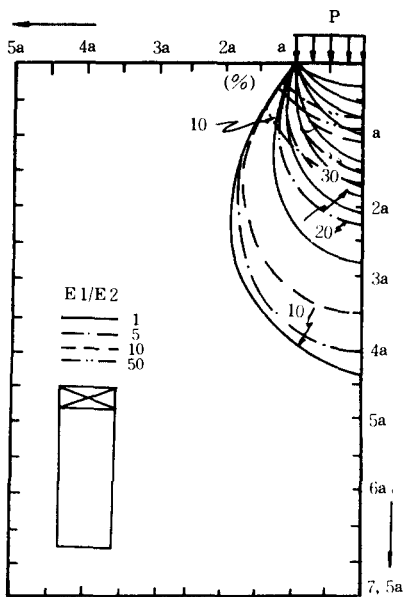
다음으로 탄성모델과 탄·점소성모델의 혼합 사용한 경우와 탄·점소성모델만을 사용한 경우의 특성차이를 알아보기 위하여 상층의 깊이를 a 로 고정하고 이 두층의 E_1/E_2 를 1, 5, 10, 50으로 변화시켰을 때의 응력 Bulb를 그림 4에 나타낸다. 여기서 전체지반을 탄·점소성체로 보고 해석한 경우의 응력 Bulb를 그림 4(a)에 나타내고, 지반 상층을 탄성체로 그 아래는 탄·점소성체로 보고 해석한 경우의 응력 Bulb는 그림 4(b)에 나타낸다.

그림 4(a)는 지반을 탄·점소성모델로 보았을 때 상층지반의 강도가 증가할수록 응력의 분포가 재하판 바로 아래에 집중되는 현상이 나타나고 있다. 즉 응력선 30% 이상은 중앙깊이 $2a$ 이내로 수렴되고 있다. 한편 그림 (b)의 탄성모델과 탄·점소성모델의 혼합 이용한 경우에는 응력선이 그림 (a)의 탄·점소성모델만을 이용한 경우보다 더 깊게 분포되나 경향은 같다. 이는 상층의 강성이 지반의 응력분포에 큰 영향을 미치는 것을 의미한다. 단 이 경우도 $E_1/E_2=1$

은 별 의미가 없고 비교하기 위해 기입한 것이다.



(a) by EVP Model



(b) by E- and EVP Model

그림 4. Vertical stress distribution

따라서 강성이 다른 다층구조의 지반에서는 이와같은 응력분포의 특성을 표현하는 계산법이 확립되어 있어야 한다. 현행의 다층토지반의 제안식들은 지반을 탄성체로 가정하고, 2층구조에 대해서는 정밀한 제안식이 이용되고 있다. 그러나 탄성계수(E)가 서로 다른 3층구조 이상일 때는 거의 2층구조의 단순확장에 불과하다.

한 시점에서는 본 프로그램을 이용하면 이와같은 문제는 제안식과는 상관없이 해석이 가능함을 보여주며 그 정도도 결코 뒤 떨어지지 않는다.

다만 구성식에 있어서 탄성체로 가정한 것보다 점소성체로 가정하는 차이는 있으나 그 차이는 근소하다. 여기서는 강성이 약한 지반의 거동은 탄·점소성이론이 옳다는 가정아래 모든지반에 적용하여 수치해석이 진행된다.

4.2 원형하중

1) 2층 구조일 경우(Case I, II)

(주) 그림에서 응력분포값의 차이가 거의 없을 경우에는 실선위에 조그만하게 파선이나 일·이 점쇄선으로 겹쳐 표시한다. 또한 50% 이상의 응력 Bulb는 대부분 근접하고 상부로 밀집하여 있어 모두다 표시하면 분간하기 어렵기 때문에 실선만을 표시한다.

표-1에서 본바와 같이 2층구조에서는 상층이 강하고 하층이 약한 경우(Case I)와 상층이 약하고 하층이 강한 경우(Case II)로 대별할 수 있다. 그림 5(a), (b), (c)에서 (a)는 Case I의 경우로서 상하층의 두께와 상층의 강성($N_1=20$)을 고정하고, 그 아래층의 강성을 $N=3, 6, 9$ 로 변화시켜 응력분포를 구한 것이다. (b)는 (a)의 경우에서 강성이 큰($N_1=20$) 상층의 두께를 0.5a, a, 1.5a, 2a까지 변화시켜 본 것이고 아래층은 강성이 작은 $N_2=3$ 으로 고정한 경우이다. (c)는 Case II로서 Case I과 완전 반대인 경우로 아래층의 강성은 $N_2=20$, 상층의 강성은 $N_1=3$ 으로 고정하되 상층의 두께를 0.5a, a, 1.5a, 2a까지 변화시킨 것이다.

그림 5(a)는 상층의 강성($N_1=20$)이 크고, 하층의 강성($N_2=3, 6, 9$)이 약한 경우, 상층의 강성과 두께(0.5a)는 고정하고 하층의 강성을

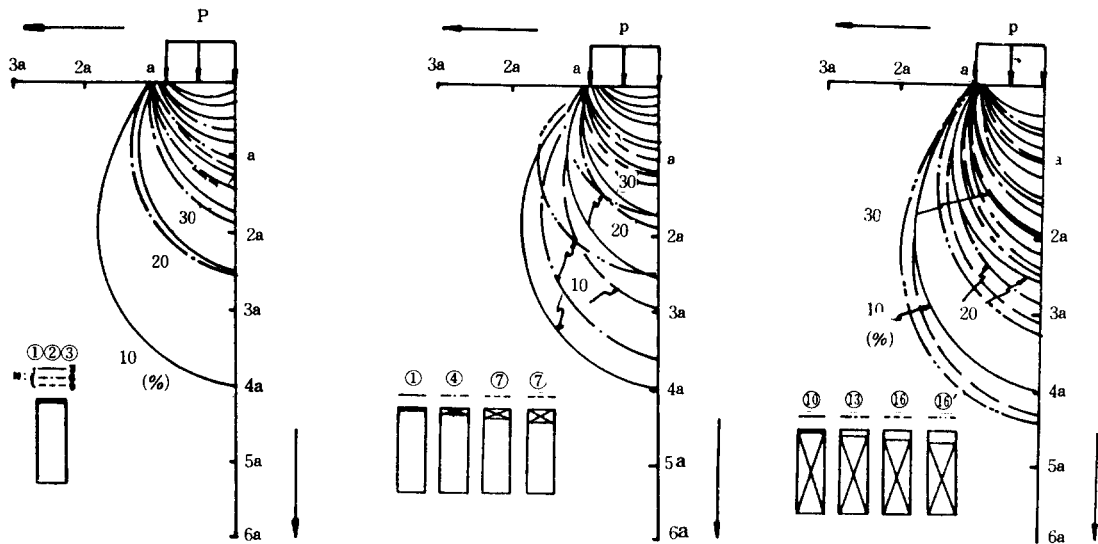


그림 5 Vertical stress distribution of 2 layered system in axial symmetric condition plain strain condition

증가시켜 본 결과, 하층의 강성이 증가할수록 응력분포선에는 별 변화가 없어 거의 같은 선에 표시되나, 그 위 응력분포선은 하부로 커진다.

그림 5(b)는 상층의 단단한 지층이 두꺼워질수록 응력 Bulb가 작아지는 것을 알 수 있다. 단단한 지층($N_1=20$)의 두께가 $0.5a$ 인 경우(No. ①) 10%의 응력 Bulb가 재하판 중앙에서 $4a$ ($2B$)깊이 이지만, 두께가 $2a$ 인 경우(No. ⑦)는

$2.5a$ ($1.25B$)깊이 정도이다. 따라서, 상층의 단단한 지층이 두꺼워질수록 상부에서 응력의 대부분을 흡수하여 하부로의 응력전달이 줄어든다.

그림 5(c)에서는 상층의 연약층의 두께가 두꺼워질수록 응력 Bulb는 커져 (b)의 경우와 반대의 현상이 나타난다. 상부 연약한 지층의 두께가 $0.5a$ 인 경우(No. ⑩)는 10%의 응력 Bulb가 재하판 중앙깊이 $4a$ ($2B$)정도지만, 두께가 $2a$ 인 경우

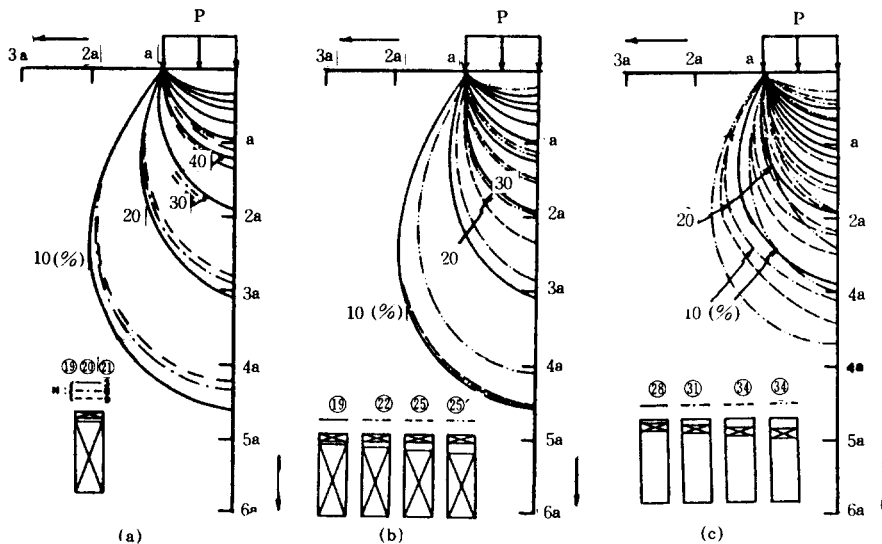


그림 6. Vertical stress distribution of 2 layered system in axial symmetric condition.

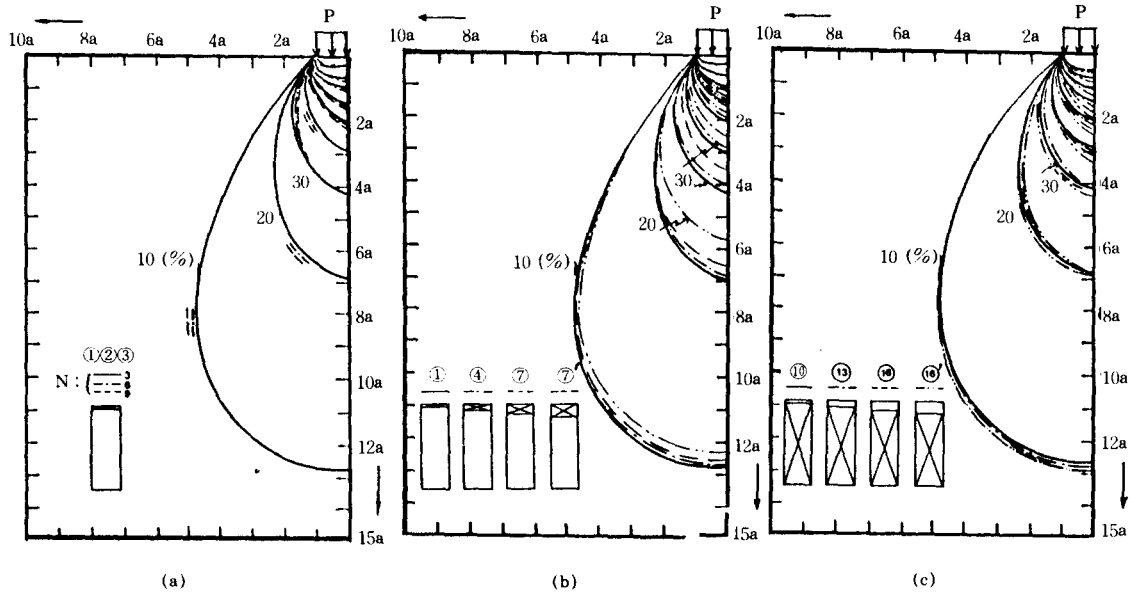


그림 7. Vertical stress distributions of 2 layered systems in plain strain condition.

(No. ⑩)는 중앙깊이 4.4a(2.2B)정도까지 응력 Bulb가 형성된다. 그러므로 상층의 연약한 지층이 두꺼워질 수록 상부의 응력이 점점 하부로 전달된다.

2) 3층 구조일 경우

상하층의 강한 지층사이에 약한지층이 낀 경우 (Case III)와 상하층의 약한 지층사이에 강한 지층이 낀 경우(Case IV)로 구별할 수 있는데, 이는 그림 2의 Case III과 Case IV에 해당된다.

그림 6(a), (b), (c)에서 (a)는 Case III으로서 상하층의 강성($N_{1,3}=20$)과 지층의 두께(1.5a, 0.5a, 13a)를 고정하고 중간층의 강성만을 $N_2=3, 6, 9$ 로 변화시켜 응력분포도를 구한 것이다. (b)는 (a)의 경우에서 강성이 약한 중간층의 강성($N_2=3$)을 고정하여 이 중간층의 두께를 0.5a, a, 1.5a, 2a로 변화시킨 것이다. (c)는 Case IV로서 Case III과 반대인 경우로 상하층에 강성이 약한 지층($N_{1,3}=3$)이 있고 중간층에 강성이 강한지층($N_2=20$)이 낀 경우로, 중간지층의 두께는 고정(1.5a, 2a)하고 상층의 강성이 약한 지층($N_1=3$ 으로 강성은 고정)의 두께만을 0.5a, a, 1.5a, 2a까지 변화시킨 것이다.

그림 6(a)에 나타난 바와 같이 중간층의 강성

이 클수록($N_2=3, 6, 9$) 응력 Bulb가 점점 적어지는 것을 알 수 있다. 따라서 중간층의 강성이 커질수록 응력분포는 상부로 옮겨 집중하게 된다.

그림 6(b)는中间的 약한 지층이 두꺼워져도 (No. ⑬, ⑭, ⑮) 10%의 응력 Bulb는 재하판 중앙 아래 약 4.6a 깊이로 거의 변화가 없고, 다만 중간층의 두께가 2a인 경우(No. ⑮)의 응력 Bulb만이 재하판 중앙아래 약 4.1a 깊이로 줄어들고 있다. 다시 20%, 30%의 응력 Bulb를 살펴보면 이들은 강성이 약한 중간층의 두께가 두꺼워질 수록(0.5a, a, 1.5a, 2a) 차례로 줄어들고 있다. 즉 10%의 응력 Bulb는 그 깊이가 그림(b)의 지중응력분포도 No. ⑮에서 보인바와 같이 상층부 두께 2a와 중간층 두께 2a의 합 4a의 깊이에서 응력이 전달되므로 바로 다음층의 강성이 큰 지층과 접하게 된다. 따라서 이 지점에서 응력 Bulb가 이점쇄선처럼 줄어들고 깊이는 4.1a 정도가 된다. 또한 20%, 30% 정도의 응력 Bulb에서도 이들의 응력 Bulb가 강성이 큰 상층두께($N_1=20$, Depth=1.5a)아래 깊이에 형성되기 때문에 강성이 약한 중간층의 두께가 두꺼워질수록 응력 Bulb는 연약층안으로 차례로 분포되어 가는 것을 볼 수 있다.

그림 6.(c)는 중간층에 일정한 두께의 단단한 지층($N_2=20$)이 존재할 경우 상층의 두께변화에 따른 지반의 응력분포도이다. 상층의 연약한 지층이 두꺼워질수록 응력 Bulb가 커져 하부로 분산되고 있다. 강성이 약한 상층의 두께가 0.5a 인 경우(No. 28) 10%의 응력 Bulb가 재하판 중앙에서 2.9a(1.45B)정도 깊이이지만, 상층의 두께가 2a인 경우(No. 34)는 3.7a(1.85B)정도 깊이이다. No. 28의 경우도 20%의 응력 Bulb가 재하판 중앙아래 1.8a(0.9B)정도 깊이이지만, No. 34인 경우는 3a(1.5B)정도 깊이이다.

4.3 띠하중

1) 2층 구조일 경우(Case I, Case II)

그림 7(a), (b), (c)는 그림 5의 (a), (b), (c)와 지층의 구조, 두께, 강도 등은 모두 같고 단지 하중조건을 원형하중에서 띠하중으로 바꿔 해석한 것(축대칭 조건에서 평면변형률 조건으로 바꿈)으로 2층 구조지반이다.

그림 7(a)는 단단한 지층인 상층의 강성은 고정하고 하층의 강성을 변화시킨 것으로, 하층의 강성변화에 별 영향이 없다는 것을 알 수 있다. 띠하중으로 작용할 경우 20%의 응력 Bulb는 재하판 중앙 아래 7a(3.5B)정도 깊이까지

나타나고, 10%의 응력 Bulb는 12.8a(6.4B) 깊이 까지 작용한다.

그림 7(b)는 상층의 단단한 층이 두꺼워질수록 응력 Bulb의 깊이가 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉 상부에서 응력을 흡수하여 하부로의 전달을 줄인다.

그림 7(c)는 그림 7.(b)와 반대로 상층의 연약한 지층이 두꺼워질수록 응력 Bulb의 깊이가 늘어나는 것을 알 수 있다. 그러므로 상층의 연약한 지층이 두꺼워질수록 상부 응력을 하부로 더 넓게 분산시킨다.

2) 3층 구조일 경우(Case III, Case V)

그림 6(a), (b), (c)와 모든조건을 같게 하고 하중조건만을 앞에서처럼 원형등분포하중에서 띠하중으로 바꾼 경우이다.

그림 8(a)는 상하층의 단단한 지반 사이에 약한 지반이 끼어있어 이 약한지반의 강성을 변화시킨 경우인데, 중간층의 강성이 클수록 응력 Bulb는 상부로 줄어든다. 중간층의 강성변화 폭이 크지 않을경우, 10% 응력 Bulb의 깊이 변화는 거의 없다.

그림 8(b)는 상하층의 단단한 지반 사이에 약한 지반이 끼어 있을때 약한 지반의 두께를 변화시킨 것으로써, 두께가 두꺼울수록 응력

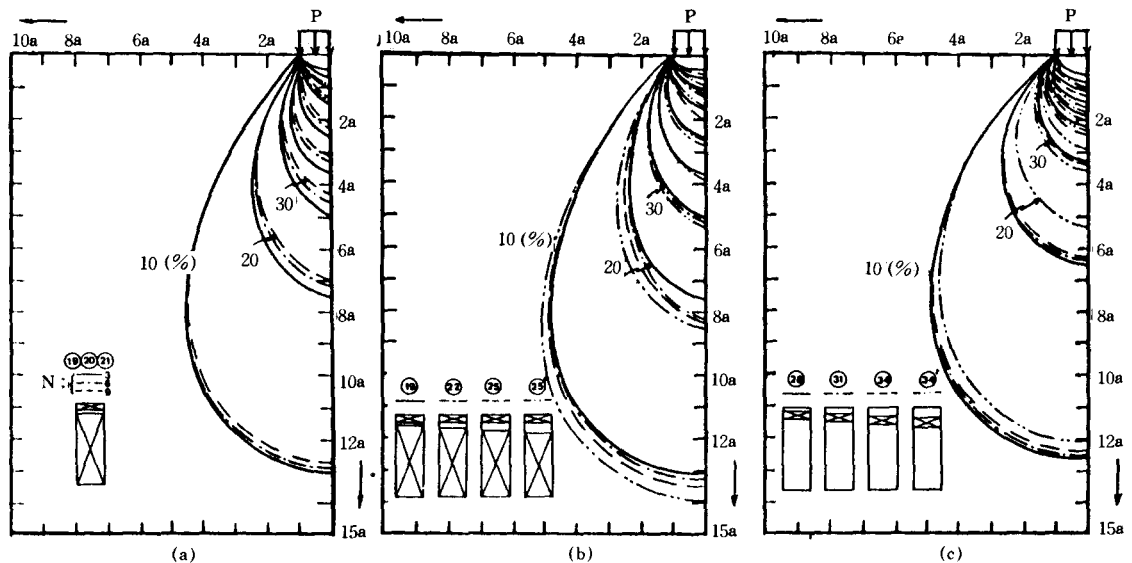


그림 8. Vertical stress distribution of 3 layered system in plain strain condition.

Bulb 는 하향하여 커진다.

그림 8(c)는 (b)와 반대 경우로서 상하층의 약한 지반사이에 강성이 큰 단단한 지반이 존재할 때, 상층의 약한 지반의 두께가 두꺼워질수록 큰 응력의 응력 Bulb 는 하부로 커지고, 작은 응력의 응력 Bulb 는 상부로 작아진다. (c)에서 20%의 응력 Bulb 는 상층의 두께가 0.5a 일 경우(No. ㉔)는 재하판 중앙부 아래 6.5a(3.25B) 정도 깊이이지만, 상층의 두께가 2a 일 경우(No. ㉕)는 재하판 중앙부 아래 5.2a(2.6B) 정도 깊이이다. 그러나 30%의 응력 Bulb 가 No. ㉔의 경우는 재하판 중앙부 아래 3.4a(1.7B) 정도 깊이이지만, No. ㉕의 경우는 재하판 중앙부 아래 3.6a(1.8B) 정도의 깊이를 갖는다.

즉 상하의 약한 지층사이에 강한 지층이 끼어 있을 때 상층의 약한지층의 두께가 두꺼워질수록 응력분포도에서 큰 응력 Bulb(응력선이 30% 이상)는 하향하여 깊어지고, 작은 응력 Bulb(응력선이 10%, 20%)는 거의 변화가 없으나 상부에서 분포폭이 좁아지고 있다.

5. 결 론

다양한 지층으로 구성된 다층토 지반은 그 해석방법이 아직 제안되지 않고 있다. 다만 2층 지반에 있어서는 Burmister의 탄성모델을 사용하고, 3층이상의 지반해석은 이 탄성모델에 준하여 확장 해석하고 있으나 그것이 실제와 어느정도 근사한가에 대해서는 정설이 없다. 상기와 같은 제안식과는 달리 지반의 구성식, 층의 구조, 각층의 두께와 강도, 지반의 재하조건 등을 고려한 전산프로그램을 이용하여 수치계산 방법에 의해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 2층 구조의 연직응력 분포에 관하여

상층에 단단한 지층이 있고 하층에 약한 지층이 존재할 경우 응력분포는 상층의 강성이 클수록, 그리고 상층의 두께가 두꺼울수록 상부에서 응력의 대부분을 흡수하기 때문에 응력 Bulb 가 상부로 밀집된다. 그러나 역으로 상층에 약한 지층이 있을 경우는 약한 지층의 두께가 두꺼워질수록 상층의 응력 Bulb 는 하부로 널리 분산된

다.

② 3층 구조의 연직응력 분포에 관하여

상하층에 단단한 지층이 있고 중간층에 약한 지층이 존재할 경우 응력 Bulb 는 중간층의 강성이 클수록 상부로 밀집하고, 중간층의 두께가 두꺼울수록 응력 Bulb 는 중간의 연약층 안으로 분포된다. 그러나 상하층이 약하고 중간층이 단단할 경우(중간층의 두께고정)는 상층의 연약층 두께가 두꺼워질수록 큰 응력 Bulb 는 하부로 커지고, 작은 응력 Bulb 는 상부에서 좁아져 상층의 응력을 하부로 분산시킨다. 또한 3층이상의 지층 구조를 갖는 지반의 응력분포는 기본적으로 위와 같은 2층계 지반의 응력분포의 조합으로 설명할 수 있다.

③ 구성식에 관하여

탄·점소성모델만을 사용한 경우와 탄성모델에 탄·점소성모델을 혼합하여 사용한 경우, 이들의 응력분포도는 서로 유사한 결과를 얻었다. 또한 이들의 결과는 기 발표논문에 사용한 탄성모델과도 큰 차이가 없다는 것이 밝혀졌다. 따라서 기존 2층구조지반의 탄성해는 매우 유용한 계산방법이다. 그러나 연약지반에 대해 탄성해의 적용은 문제가 있으며, 이 경우는 탄·점소성해가 보다 높은 정도의 값을 갖을 것이며 3층이상의 경우에도 적용된다.

④ 원형하중조건과 띠하중 조건에 관하여

원형등분포하중(축대칭 조건)일때는 상재하중의 10% 응력 Bulb 가 재하판 중앙에서 4.2a(2.1B) 정도 깊이까지 형성되지만, 띠하중(평면변형률 조건)일때는 약 12.8a(6.4B) 깊이까지 형성된다.(탄성해에서는 원형등분포하중일때 J.E. Bowles 는 10%의 응력 Bulb 가 약 1.9B 정도, T.W.Lame 은 1.86B 정도; 띠하중일때 J.E. Bowles 는 10%의 응력 Bulb 가 6B 정도 깊이이라고 발표하였다.)⁴⁶⁾ 이는 기존의 탄성해와 거의 같은 값이며, 탄·점소성모델에 의한 경우의 응력 Bulb 가 탄성해에 비해 약간 깊게 나타나는 것을 알 수 있다.

본 연구는 1990년도 한국과학재단 박사학위과정 논문 연구비 지원을 받아 수행된 것으로 이에

깊은 감사 드립니다.

참고문헌

1. Burmister, D.M(1962). "Application of Layered System Concepts and Principles to Interpretations and Evaluations of Asphalt Pavement Performances and to Design And Construction," Proc. Int.Conf. Structrul Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan. pp.441-453.
2. Burmister, D.M(1958). "Evaluation of Pavement Systems of the WASHO Road Test by Layered System Methods," HRB Bull. 177. pp.26-54.
3. Fox. L.(1948) : "Computation of Traffic Stresses in a Single Structure," Proc. 2nd int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 2. pp.236-246.
4. J.E.Bowles - "Physical and geotechnical Properties of Soils," Second Edition pp.342-244.
5. T,W.Lamb, R,V,Whitman. "Soil Mechanics," SI Version. pp.97-115.
6. 이문수(1984) "유한요소법에 의한 다차원 압밀의 변형해석," 고려대학교 대학원 석사학위 논문.
7. 강병선(1985) "탄소성 Model에 의한 복합연약지반의 변형에 관한 수치해석," 전남대학교 대학원 박사 학위 논문, pp.6-57.
8. 장용채(1986) "다층토 지반의 응력분포에 관한 유한요소 해석," 전남대학교 대학원 석사학위 논문. pp.9-27.
9. 장용채외 3인(1989) "다층토 지반의 응력 해석," 대한토목학회 강연집 pp.403-407.

(접수일자 1990. 8. 24)