

도심지 굴착에 따른 토류구조물 및 인접지반의 유한요소 해석기법

Finite Element Method for the Analysis of Deep
Excavation in Urban Environment

이 봉 렬*¹
Lee, Bong-Yul
김 광 진*²
Kim, Kwang-Jin
김 학 문*³
Kim, Hak-Moon

Abstract

A finite element computer program is developed for the specific analysis of earth retaining structures in urban excavation. Unlike the existing multi-purpose FEM programs, the newly developed program (EM) consists of very simple and easy data processing system for the urban excavation.

A non-linear material model(GDHM, Generalized Decoupled Hyperbolic Model) is developed and implemented in the program EM.

The results of large scale model tests for earth retaining structures are used for the verification of EM along with GDHM, and the results were satisfactory, but it was found that the program EM needs minor modification for the improvement of its accuracy.

요 지

도심지 지반굴착 해석을 위한 전용 유한요소 프로그램(EM)을 개발하였다. 기존 범용 프로그램과는 달리 사용자가 간단한 입력자료를 작성하고 전·후처리는 자동으로 도화 출력되므로 굴착해석에 쉽게 사용될 수 있도록 하였다. 특히, 새로 개발된 GDHM재료모델((GDHM, Generalized Decoupled Hyperbolic Model)은 8면체평면상에서의 응력경로에 따른 강도변화를 고려하였다. 개발된 EM프로그램은 대형 굴착토조모형실험 결과와 비교 검토함으로써 개발된 재료모델과 굴착전용프로그램의 신뢰성을 검증하여 비교적 정확도가 높은 결과를 얻었고, 향후 미비점을 보완, 개선하여야 한다.

*¹ 정희원, 단국대학교 공과대학 토목공학과 박사과정수료

*² 정희원, Comtech Research 대표

*³ 정희원, 단국대학교 공과대학 토목공학과 부교수

Keywords : GDHM(Generalized Decoupled Hyperbolic Model), EM (Excavation Model), Earth Retaining Structures, Urban Excavation, Ground Movement, FEM

1. 서론

도심지에서의 대형 구조물 건설시 지하 굴착에 따른 토류구조 벽체의 안전성과 인접 구조물의 안전성 검토가 날로 중요시되고 있다. 특히 지하 굴착이 인접 구조물의 안전에 미치는 영향은 기존 탄소성보 프로그램으로는 해석상에 한계가 있으며, 굴착 형상 및 지하수 용출, 그리고 주변 지반에 미치는 외적 하중 조건을 고려한 침하 및 응력해석 등을 고려할 경우 더욱 극명하다. 따라서 최근에는 유한요소법이나 유한차분법에 의한 수치해석에의 의존도가 높아지고 있다. 그러나 이들 수치 해석 프로그램은 지하 굴착 해석에 적용할 경우 입력 자료의 준비에 많은 시간이 소요되고 사용자의 수치해석에 대한 충분한 지식이 요구된다.

본 지하굴착해석을 위해 전용으로 개발된 프로그램(EM)은 Quasi-Static Two-Phase이론에 근거를 둔 유한요소해석을 배경으로 하고 있으며, 새로 개발한 재료모델(GDHM)은 토사는 물론 원위치 암반을 쉽게 모델링할 수 있도록 간편한 공식으로 되어 있어 지하굴착시 주변 토사의 응력-변형 관계에 의한 굴착시 주변지반 거동해석에 적용하였다.

그리고 개발된 GDHM재료모델을 적용한 지하굴착해석전용 유한요소프로그램의 신뢰성을 검증하기 위하여 대형모형 시험결과의 실험측치와 해석 결과와의 비교, 분석을 실시하였다.

2. 수치 해석의 이론적 배경

굴착 해석에서 굴착에 따른 응력 및 변형 계산에 사용될 유한요소 프로그램의 기본 방정식은 다음과 같고, 그림 1. 은 비선형 유한요소

프로그램 주요계산과정의 흐름도를 나타내었다.

2.1 지배 방정식

(1) 유효응력법칙

전응력(σ_{ij})은 유효응력(σ'_{ij})과 간극수압(π)의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij}\pi \quad (1)$$

여기서, δ_{ij} 는 Kronecker Delta 이다.

(2) 고체 입자로 구성된 골격의 응력-변형 관계식

포화된 매체의 변형은 고체 입자의 골격을 통해 작용하는 유효응력과 간극수압간에 다음과 같은 응력-변형 관계식을 갖는다.

$$\{d\sigma\} = [D^e] \left(\{d\varepsilon\} - \frac{1}{3K_g} \{1\}d\pi \right) \quad (2)$$

여기서, D^e 는 응력-변형도 관계를 나타내는 탄소성 행렬이고, ε 은 변형도이며, K_g 는 고체입자 압축성의 역수를 의미한다. 식(2)에서 우측의 마지막 항은 간극수압이 고체 입자에 가해짐으로서 발생하는 포화된 매체에서의 변형도를 의미한다.

(3) 간극수 흐름의 연속 방정식

간극수 흐름에 대한 연속방정식은 질량보존 관계로부터 유도할 수 있다. 포화된 체적변형도 변화는 식(3)과 같다.

$$d\varepsilon_v = \frac{dn}{1-n} - \frac{d\rho_s}{\rho_s} \quad (3)$$

여기서, n 은 간극율, ρ_s 는 고체 입자의 밀도, ε_v 는 포화된 매체의 체적변형도 변화를 각각 의미한다. 또한 간극수의 체적확산 변화는 다음에 의해 구할 수 있다.

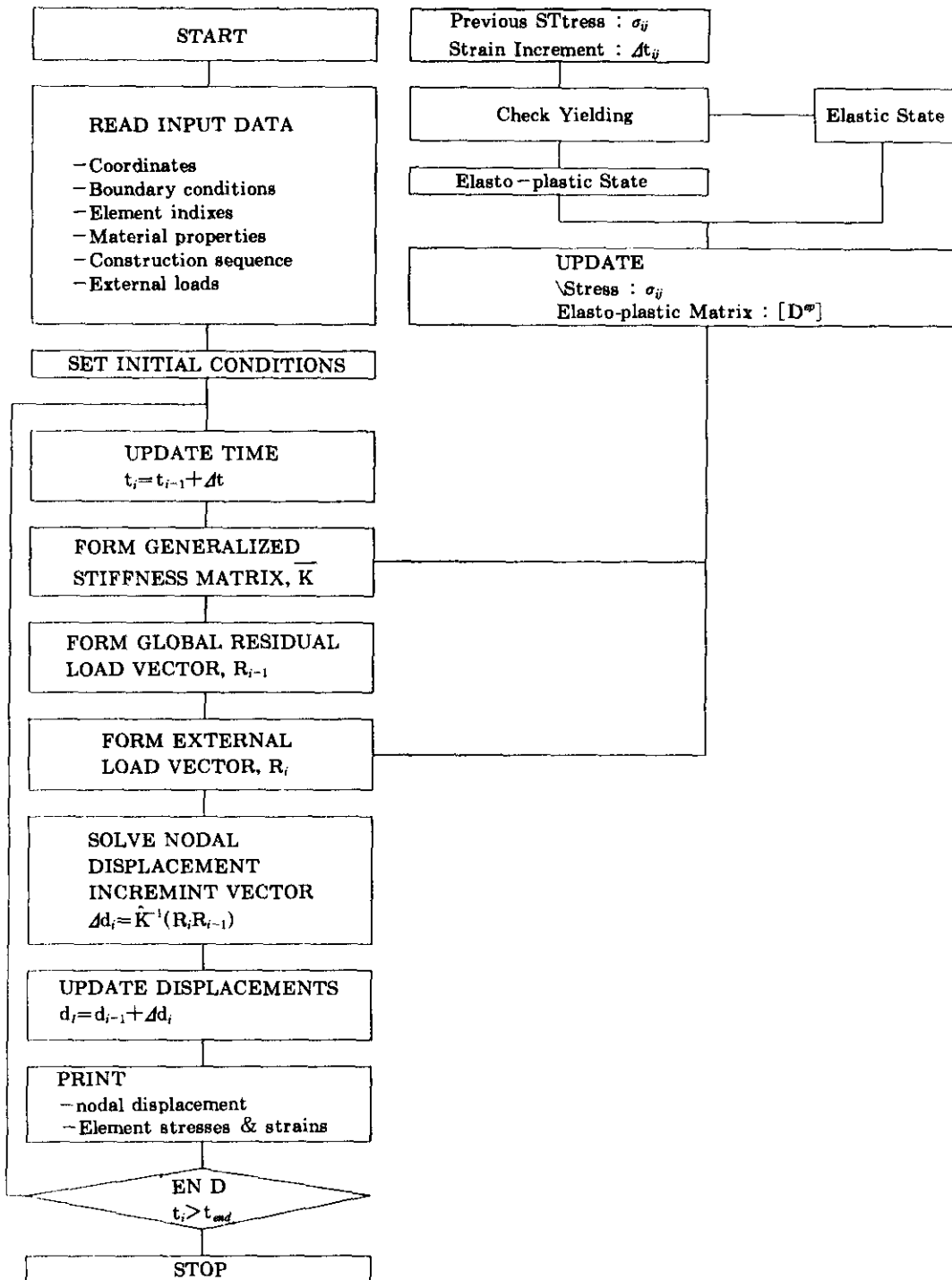


그림 1. 지반굴착전용 프로그램 EM의 흐름도

$$d\epsilon_j = -\frac{dn}{n} - \frac{d\rho_j}{\rho_j} \quad (4)$$

여기서, ρ_j 는 유체의 밀도, ϵ_j 는 간극 속의 체적확산변화를 의미한다. 식(3)과 (4)의 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$n(d\epsilon_r - d\epsilon_s) + (1 - C_s K_s) d\epsilon_s + \left(C_s^2 K_s - \frac{1}{K_m} \right) d\pi = 0 \quad (5)$$

여기서, C_s 는 K_s 와 K_m 은 각각 토립자와 간극혼합물의 압축성을 의미한다. 식(5)에서 $d\pi$ 를 구하면 다음과 같다.

$$d\pi = \bar{m}_2 d\epsilon_s + \bar{m} \cdot n(d\epsilon_r - d\epsilon_s) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \bar{m} = \frac{1}{\left[\frac{1}{K_m} - \frac{K_s}{K_s^2} \right]} \text{ 이고 } \bar{m}_2 = \left[\frac{1 - K_s}{K_s} \right]$$

$\cdot m$ 이다.

(4) 체적간극혼합물의 지배 방정식

Quasi-static 하에서의 응력경사($\sigma_{ii,j}$)와 중력은 다음과 같은 평형 관계를 갖는다.

$$\sigma_{ii,j} + \rho \cdot b_i = 0 \quad (7)$$

여기서 ρ 는 간극혼합물의 단위 질량이고 b_i 는 중력의 방향을 나타내는 단위 벡터이다.

(5) 간극수의 흐름 방정식

간극속 유체의 지배방정식은 Kim(1986)12) 등에 의해 다공체 속에서 유체의 흐름식에 대하여 다음과 같이 제시되어 있다.

$$\pi_i + \rho_i \cdot b_i = k' \cdot W_i \quad (8)$$

$$\text{여기서, } k' = \frac{\mu}{\alpha} + \frac{\rho_i}{\beta} |W_i|$$

여기서, μ 는 유체의 동적 점성(dynamic viscosity), ρ_i 는 간극수의 단위질량, α , β 는 다공성 매체의 흐름특성계수, W_i 는 간극수의 토립자에 대한 상대 속도를 의미한다.

2.2 유한 요소 수식화

각 요소에 대해 Field변수를 절점값으로 나

타내면 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{aligned} \{\Delta u\} &= [N] \{\Delta \underline{u}\}, \\ \{\Delta \epsilon\} &= [B] \{\Delta \underline{u}\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \{\Delta w\} &= [N] \{\Delta \underline{w}\}, \\ \{\Delta w_{i,j}\} &= \{1\} [B] \{\Delta \underline{w}\}. \end{aligned}$$

그리고 응력벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\sigma_n\} = \{\sigma_{n-1}\} + \{\Delta \sigma\} + \{1\} \Delta \pi \quad (10)$$

앞에서 제시된 수식들을 서로 혼합하면 응력 증분은 토립자의 변위증분과 공극수의 상대변위증분으로 나타낼 수 있고, 체적간극혼합물과 간극수에 대해서 각각 가상일의 원리를 적용하면 시간 t 에서 다음과 같은 전체 평형방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & H \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_n \\ w_n \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} K_i + EE & C \\ C^T & E \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta w_n \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} R_{n-1}^s + R_{n-1}^f \\ R_{n-1}^f \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,

$$K_i = \sum \int_v [B]^T [D^{*}] [B] dv$$

$$H = \sum \int_v K [N]^T [N] dv$$

$$EE = \sum \int_v \bar{m}_1 [B]^T \{1\} \{1\}^T [B] dv$$

$$C = \sum \int_v \bar{m}_2 [B]^T \{1\} \{1\}^T [B] dv$$

$$E = \sum \int_v \bar{m} [B]^T \{1\} \{1\}^T [B] dv$$

$$F_n = \sum \int_v [N]^T \{T\} ds + \sum \int_v [N]^T \rho \{b\} dv$$

$$G_n = \sum \int_s [N]^T \hat{\pi}_n ds + \sum \int_v [N]^T \rho_i \{b\} dv$$

$$R_{n-1}^s = \sum \int_v [B]^T \{\sigma_{n-1}\} dv$$

$$R_{n-1}^f = \sum \int_v \{1\} \pi_{n-1} dv$$

$$\bar{m}_1 = \left[1 - \frac{K_s}{K_s} \right]^2 \cdot \bar{m}$$

3. 재료 모델 개발

개발된 재료 모델은 GDHM(Generalized

Decoupled Hyperbolic Model)이라 부르며 기존 쌍곡선모델(Duncan과 Chang, 1970)을 일반화시킨 것으로 수정된 쌍곡선모델의 전단강도식은 Mohr-Coulomb이외의 원위치 암반 모델에 사용되는 Hoek와 Brown 경험식을 사용할 수 있고, 8면체평면상에서의 응력경로에 따른 강도의 변화가 고려되었다.

(1) 체적 및 전단 응력-변형 관계는 각각 독립적인 관계로 가정하였다.

$$dp = K \cdot d\epsilon_v \quad (12)$$

$$d\tau_{oct} = 2G \cdot d\gamma_{oct} \quad (13)$$

여기서, p : 평균압력 (mean pressure),

ϵ_v : 체적변형 (volumetric strain)

τ_{oct} : 8면체평면상의 전단응력

(octahedral shear stress)

γ_{oct} : 8면체평면상의 전단변형

(octahedral shear strain)

K : 체적계수 (bulk modulus),

G : 전단계수 (shear modulus)

(2) 주어진 평균압력하에서 일정한 응력경로에 따라 전단 응력-변형 관계는 쌍곡선으로 가정하였다.

$$\tau_{oct} = \frac{\gamma_{oct}}{b + a\gamma_{oct}} \quad (14)$$

식(14)는 그림 2. 에서 보는 바와 같이 γ_{oct} 가 무한대의 값에 이르러서 최대값 $\tau_{oct, max} = \frac{1}{a}$ 을 갖고 γ_{oct} 가 0에서는 초기기울기인 $2G_i = \frac{1}{b}$ 을

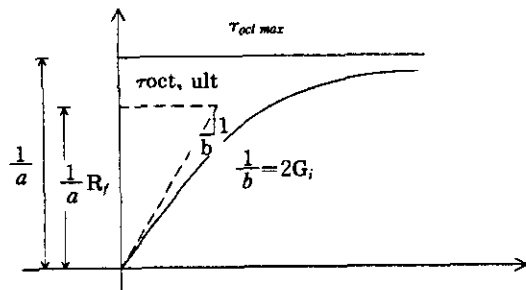


그림 2. τ_{oct} 와 γ_{oct} 관계도

갖는다. 하지만, 삼축압축 실험 결과에 의하면 γ_{oct} 가 유한한 값에서 전단강도($\tau_{oct, ult}$)에 도달하므로 전단강도는 ($\frac{1}{a}$)에 R_f 를 곱한 값을 사용한다. R_f 는 대략 0.7~0.9 사이의 값을 갖는다.

$$\frac{1}{a} = \tau_{oct, max} = \frac{1}{R_f} \tau_{oct, ult} \quad (15)$$

$$\frac{1}{b} = 2G_i \quad (16)$$

식(14)를 γ_{oct} 에 관해서 미분하면,

$$\frac{d\tau_{oct}}{d\gamma_{oct}} = \frac{b}{(b + a\gamma_{oct})^2} \quad (17)$$

식(14)로부터 γ_{oct} 를 구하면

$$\gamma_{oct} = \frac{b \cdot \tau_{oct}}{(1 - a\tau_{oct})} \quad (18)$$

식(18)을 식(17)에 대입하면,

$$2G = \frac{d\tau_{oct}}{d\gamma_{oct}} = 2G \left(1 - \frac{\tau_{oct}}{\frac{1}{a}} \right)^2 \quad (19)$$

(3) 전단강도식은 다음과 같은 일반식으로 나타내었다. (Kim, 1984)¹³⁾

$$\tau_{oct, ult} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\alpha + \beta P)^n + x] R(\theta) \quad (20)$$

$$R(\theta) = \frac{x(\sqrt{3}\cos\theta + \sin\theta) + (2x - 1)[(2 + \frac{\cos 2\theta + \sqrt{3}\sin 2\theta}{x + 5x^2 - 4x})^{\frac{1}{2}}]}{[x(2 + \cos 2\theta + \sqrt{3}\sin 2\theta) + (1 - 2x)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (21)$$

여기서, $x = 1 - \chi^2$ 이고, θ 는 응력경로각이며 χ 는 동일한 평균압력에서 삼축인장에서의 전단강도와 삼축압축에서의 전단강도의 비를 나타낸다. χ 값에 따른 $R(\theta)$ 의 형상이 그림 3.에 나타나 있다.

식(20)에서의 α , β , χ 는 전단강도를 정의하는 상수로 n 값에 따라 표 1.에서와 같이 Von Mises($n=0$), Hoek와Brown($n=1/2$), 그리고 Mohr-Coulomb 또는 Drucker-Prager($n=1$) 강도식을 나타낼 수 있다.

표 1. 강도 상수 α, β, χ

	n=0 Von Mises 또는 Tresca	n=1/2 Hoek, Brown	n=1 Mohr-Coulomb 또는 Drucker-Prager
α	N/A	$(m^2/36+s)\sigma_c^2$	1000
β	N/A	$m\sigma_c$	$6\sin\Phi(3-\sin\Phi)$
χ	$q'-1$	$-1/6m\sigma_c$	$\frac{3(1-\sin\Phi)\sigma_c}{(3-\sin\Phi)} - 100$

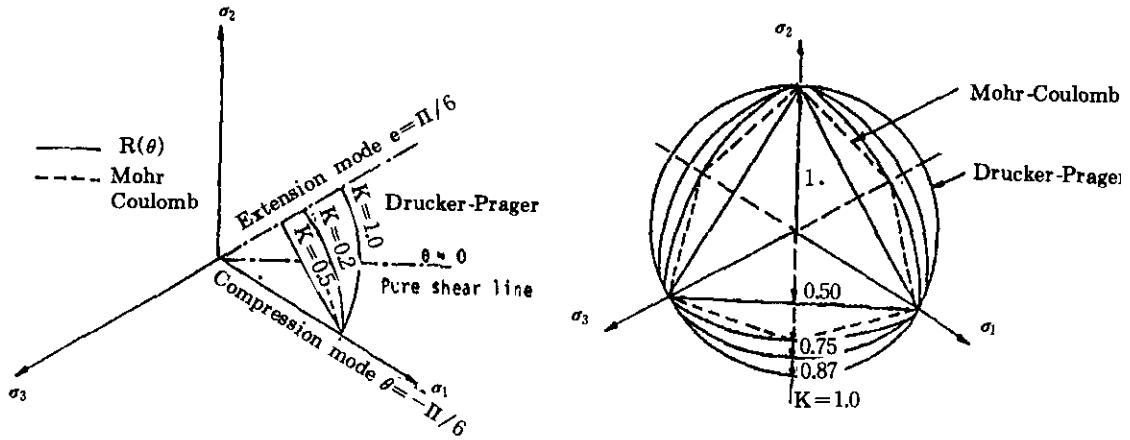


그림 3. K값의 변화에 따른 R(theta)의 형상

식(15)와 (20)으로부터

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{R_r} \frac{\sqrt{2}}{3} [(\alpha + \beta P)^n + \chi] R(\theta) \quad (22)$$

식(22)를 (19)에 대입하면 하중재하에 의한 전단계수 G_r 는 다음과 같은 간편한 일반화된 식으로 표시된다.

$$G_r = G_r \left[r - \frac{R_r \tau_{oct}}{\tau_{oct, ult}} \right]^2 \quad (23)$$

식(23)에서 G_r 는 정수압상태에서의 초기 전단계수로 다음과 같은 경험식이 사용된다.

- 점성토의 경우 (Hardin과 Black, 1968)¹⁰⁾

$$G_r = \frac{1230(2.973 - e)^2}{(1 + e)} \bar{\sigma}_{oct} \frac{1}{2} OCR \bar{k} \quad (24)$$

여기서, e : 간극비, OCR : 과압밀비
 \bar{k} : 소성지수의 함수로 표현되는 상수값

- 사질토의 경우 (Janbu, 1963)¹¹⁾

$$G_r = \frac{1}{2(1 + \nu)} K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (25)$$

ν : 포아슨비, P_a : 대기압

K_{ur} , n : 재료정수, σ_3 : 구속압력

식(23)은 일반화된 쌍곡선모델로, Mohr-Coulomb강도식을 사용하고 응력경로가 삼축 압축방향인 경우는 Duncan과 Chang(1970)의 원래식과 동일함을 다음과 같이 증명할 수 있다.

$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (26)$$

$$\tau_{oct, ult} = \frac{\sqrt{2}}{3} (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{6\sin\Phi}{(3 - \sin\Phi)} P + \frac{6\cos\Phi}{(3 - \sin\Phi)} C \quad (27)$$

$$P = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (28)$$

식(28)을 식(27)에 대입한후 σ_1 에 대해서 풀면,

$$\sigma_1 = \frac{(1 + \sin\phi)}{(1 - \sin\phi)} \sigma_3 + \frac{2\cos\phi}{(1 - \sin\phi)} C \quad (29)$$

식(29)의 σ_1 을 다시 식(27)의 우편에 대입하면,

$$\begin{aligned} \tau_{oct, ult} &= \frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{(2\sin\phi \sigma_3 + 2\cos\phi C)}{(1 - \sin\phi)} \end{aligned} \quad (30)$$

식(26)과 (30)을 식(23)에 대입하면,

$$G = G_1 \left[1 - \frac{R_c(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2\sin\phi \sigma_3 + \cos\phi C} \right]^2 \quad (31)$$

식(31)은 Duncan과 Chang(1970)9)이 제안해서 널리 사용되어온 원래 쌍곡선모델이다.

4. 개발된 GDHM모델과 굴착전용 프로그램의 특징 및 가정

개발된 GDHM 재료모델과 지반굴착 전용 프로그램 EM(Excavation Model)의 특징 및 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 굴착은 Y축 (수직중력방향)을 중심으로 좌우대칭인 평면변형으로 해석모델은 우측만 사용하였다. (그림 4. 참조)
- 2) 지표면을 포함한 지층은 수평하며, 해석선택으로는 전응력, 비배수 유효응력, 그리고 배수 유효응력 해석이 있다.
- 3) 각 지층별 지반 모델 선택으로는 탄성, Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, 수정 Cam Clay, 그리고 개발된GDHM 모델을 적용할 수 있다.
- 4) 벽체는 수직이며 자중을 무시한 보요소로 모델링하였고 벽체와 주변지반의 접촉면은 절리(joint)요소를 사용하여 활동이 가능하다.
- 5) 버팀대(strut)와 앵커(anchor)는 자중을 무시한 트러스 요소로 모델링 하였으며 초기응력의 입력이 가능하다.
- 6) 외력으로는 지표면에 작용하는 수직방향

의 분포하중과 벽체에 작용하는 수평방향의 분포하중이 지정된 굴착단계에서 작용할 수 있도록 하였다.

- 7) 해석단계로는 지반의 초기응력을 구하는 중력하중단계와 지반의 단계별 굴착, 버팀대나 앵커의 설치 또는 제거등이 고려되었다.

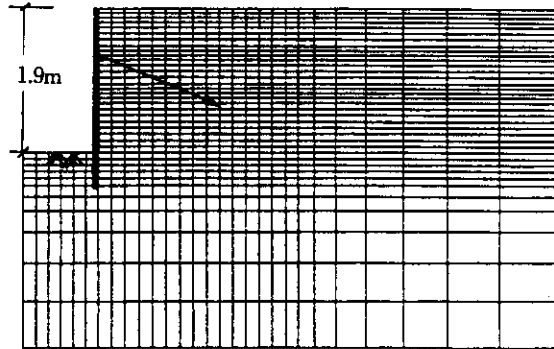


그림 4. 토류구조에 대한 유한요소망

5. 개발된 GDHM모델과 프로그램 검증 및 결과분석

개발한 굴착전용 해석프로그램 (EM)과 지반재료모델(GDHM)의 신뢰성을 검토하기 위하여 최근 Illinois대학에서 수행된 앵커지지대형모형시험을 해석하여 예측치와 비교하므로써 개발된 재료모델과 지반굴착전용 프로그램의 신뢰성을 검증, 평가하였다.

본 검증해석에 사용된 모형시험은 높이 2.3m의 엄지말뚝과 토류판으로 구성된 벽체가 지표면으로부터 깊이 69cm에 30°의 각도로 작용시킨 앵커에 의해 버틸 수 있게 설계된 앵커 지지시스템으로 최종 굴착심도는 1.9m이다. 본 검증해석에 적용된 지반, 벽체, 그리고 앵커의 물성치를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지반 물성치

$$\text{Uniform sand(SP)} : T = 1.63t / m^3,$$

$$\phi = 38^\circ, C = 0$$

$D_r=45\sim55$, $K_0=1-\sin\Phi=0.384$, $\nu=0.35$

(2) 암지말뚝 : 수평간격=61cm,

단면적=8.9cm²,

단면2차모멘트=40cm⁴,

$E=2.1\times 10^6\text{t}/\text{m}^2$, $\nu=0.2$

(3) 앵커 : EA=1,590ton, L=3.51m,

Tension=0.39tons / Pile

새로 개발된 GDHM재료모델 상수 R_i 와 초기전단계수 G_i 를 구하기 위하여 구속응력 $\sigma_3=2.46\text{t}/\text{m}^2$ 에서 수행한 삼축압축실험 자료를 식(33)에 따라 도시한 결과 $R_i=0.9$, $G_i=4500\text{t}/\text{m}^2$, $\nu=0.35$ 에서 삼축실험결과에 그

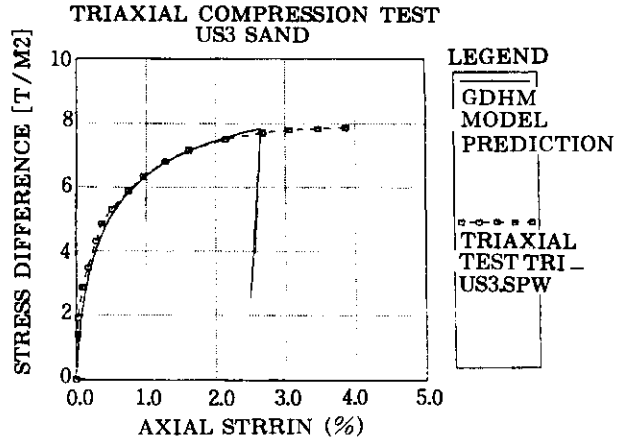
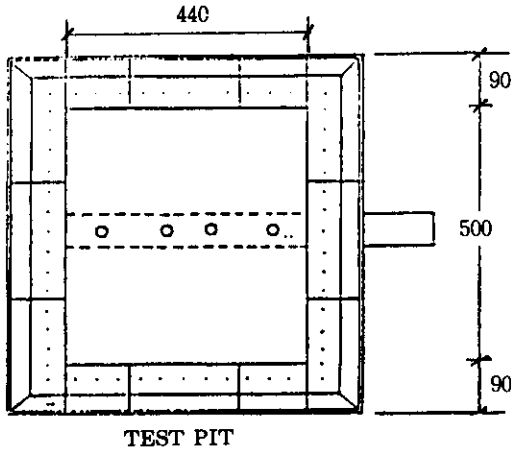


그림 6. GDHM모델과 삼축압축실험 결과의 비교



TEST PIT

평면도 (단위: cm)

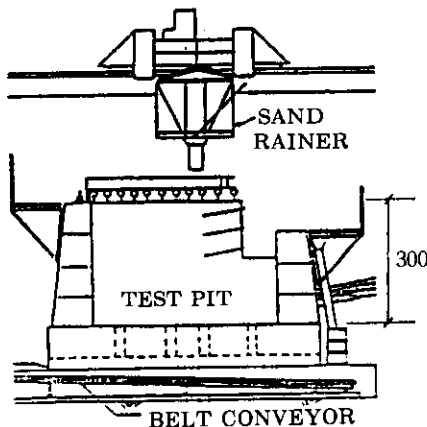


그림 5. 대형 굴착 토조실험기의 평면도와 단면도
(토조 내부크기 : 5m×4.4m×3m)

림 5. 에서 보는 바와 같이 일치하는 결과를 얻었다.

다음은 식(25)에 n 값을 0.5로 가정하여 위에서 구한 값을 대입하면 K_w 은 대략 800정도의 값을 갖는다. 지반은 각 50cm 두께의 6층으로 구분하였으며 각층에서의 G_i 값은 식(16)을 사용하여 구하였다.

이상 설명한 각 물성치를 사용하여 개발된 지반굴착전용 프로그램의 수치해석을 수행한 주요 결과를 그림 7.과 그림 8.에 계측치와 비교하였다.

그림 7.은 최종굴착후 변위분포도를 나타내며 해석결과 지표면 침하의 평균치는 계측치와 거의 같으나 지표면 침하현상에 대한 해석결과는 비교적 균등하게 분포되어 있음에 비하여 계측치는 벽체의 가까운 곳에 집중되어 있다. 벽체에 인접한 지표면 부근에서는 구속응력이 작고 상대적으로 전단응력이 크게 작용하므로 전단파괴 내지는 벽체와 지반이 쉽게 분리되는 곳으로 앞으로 이 부분을 보다 정확히 묘사할 수 있는 재료모델수정이 요구된다.

계측결과 벽체의 수평변위는 매우 미소한 것으로 나타나 있음에 반해 해석결과 벽체 상부의 수평변위는 약 5mm로 계측치보다 약 3배 정도 큰 값을 나타내었다. 따라서 벽체의 수평변위를 좀 더 정확히 예측하기 위해서는 주변

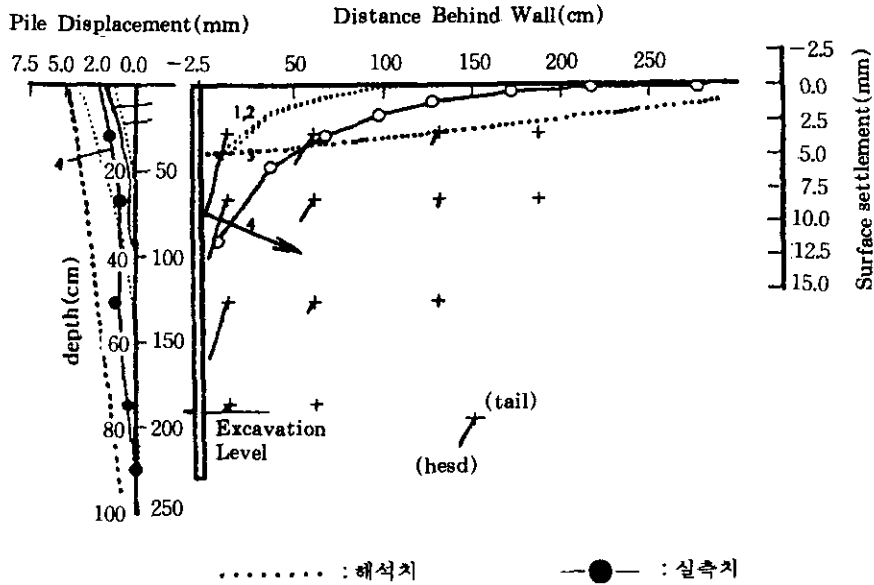


그림 7. 최종굴착후 계측 및 수치해석 결과 변위분포도

지반의 초기응력 및 등방향 압축, 응력-변형 실험자료가 요구되며 이들 자료가 해석 입력자료에 고려되어야 한다.

그림 8은 최종 굴착후 벽체 휨모멘트 분포도를 나타내었으며, 해석결과에서 알 수 있듯이 계측치와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

본 검증예제에서 나타난 바와 같이 개발한 재료모델과 지반굴착 프로그램(EM)은 국부적으로는 계측치와 상이한 점이 있으나 전체적인 거동형태는 계측치와 거의 일치하는 결과를 얻었다. 그러나 향후 더욱 많은 실측자료와의 비교분석을 통하여 미비한 부분은 보완, 개선되어야 할 것이다.

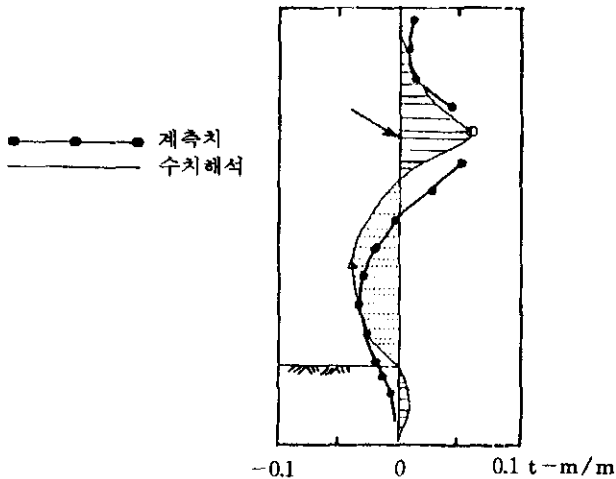


그림 8. 벽체의 휨모멘트 분포 비교

5. 결 론

- (1) 본 연구를 통하여 개발된 지반굴착 전용 수치해석 프로그램은 Quasi-Static Two-Phase 이론에 근거를 둔 유한요소 해석을 배경으로 하고 있으며, 유한요소 해석의 복잡하고 난해한 문제점을 개선하여 지반굴착해석에 용이하게 활용할 수 있도록 개발되었다. 또한 개발된 GDHM 재료모델의 적용으로 토사지반의 거동해석에 신뢰성있는 결과를 본 연구를 통하여 확인하였다.
- (2) 새로 개발된 재료모델은 GDHM(Generalized Decoupled Hyperbolic Model)이라 부르며 기존 쌍곡선모델을 일반화시킨 것

으로 암반모델에 사용되는 Hoek와 Brown의 경험식을 사용할 수 있고, 8면체평면상에서의 응력경로에 따른 강도의 변화가 고려되었으며, 실내 3축압축시험의 응력변형곡선과 일치하는 결과를 얻었다.

- (3) 개발한 지반굴착 프로그램(EM)의 검증 결과 국부적으로는 계측치와 상이한 점이 있으나 전체적인 거동 형태는 계측치와 거의 일치되며, 향후 더욱 많은 실측자료와의 비교 분석을 통하여 미비한 부분은 보완, 개선되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건교부 '95 연구개발사업지원의 일환으로 수행된 결과이며, 상기부처에 심심한 사의를 표합니다. 본 연구를 위해 여러 가지 도움을 제공해주신 Illinois 대학 토목공학과 E. Cording 교수님, 시설안전기술공단의 안상로 박사님, 코오롱 기술연구소의 최수일 소장님, 박영진 차장님, 엄진석 대리님에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. 건설교통부(1996), '95 연구개발사업 연차보고서, "도심지 지반굴착에 따른 토류구조물의 설계 및 안전관리 시스템 개발", 1996. 10
2. 이봉렬, 김학문(1993), "지하굴착에서 인접건물의 거동에 대한 수치해석 검토", 1993년도 대한토목학회 학술발표회 개요집(I), 1993. 10.
3. 이봉렬, 김광진, 김학문, "Hoek-Brown암반모델을 이용한 비선형 유한요소 터널해석 및 평가", 한국지반공학회 창립 10주년기념 및 '94 가을 학술발표회 논문집, 1994. 10.
4. 이봉렬, 김광진, 김학문, "비선형 유한요소법을 이용한 터널해석 및 효율성 평가", 대한토목학회 논문집 제 15권 제 3호, 1995. 5.
5. Burland, J. B. , Simpson, B. and St. John, H, D. (1979) "Movement around Excavations in London Clay." Proc. 7th European Conf. SMFE, 1979. VOL 1.
6. Clough and Tsui "Performance of tie-back walls in clay", ASCE J, Geotech. Div., 100 (Dec.).
7. Clough, G. W., Smith E. M. ,and Sweeney B. P. (1987). Movement control of excavation support systems by iterative design. Found. Eng. Vol 2, ASCE, Proc. of Congress, pp. 869-884
8. Craft, J. R(1983) "Diaphragm walls for the support of Deep Excavations." HKIE Seminar on June 6 1983.
9. Duncan, J. M., and C. Y. Chang(1970): Non-linear Analysis of Stress and Strain in Soils, J. Soil Mech. Found. Div. ASCE, vol. 96, no. SM5, pp. 1629-1653, September 1970.
10. Hardin, B. O., and W. L. Black(1968): Vibration Modulus of Normally Consolidated Clays, J. Soil Mech. Found. Div., vol. 94, no. SM2, pp. 353-369, March 1968
11. Janbu, Nilmar(1963): Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests, Proc, Eur, Conf, Soil Mech, Found. Eng. , Wiebaden, 1963, vol. 1, pp. 19-25.
12. K. J. Kim, S. E. Blouin, D. A. Timian(1986) "Experimental and theoretical response of multi phase porous media to dynamic loads", Annual Report No. 1 to Air Force Office of Scientific Research, 1986
13. K. J. Kim, S. E. Blouin(1984), "Response of Saturated Porous Nonlinear Materials to Dynamic Loadings," Report to Air Force Office of Scientific Research, Washington, DC, No. F49620-81-C-0014, 1984.
14. Peck, G. Wayne(1976), "Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground: State of the Art Report, Proceedings on Soil Mechanics and Foundation Engineering", 7th Int. conf. , Soil Mech. FDN, Mexico City, Mexico
15. "Review of Design Methods for Excavations", GCO Publication No. 1/90
16. Xanthakos, P. P(1991), "Ground Anchors and Anchored Structures. "J. wiley & Sons. Inc, 1991, pp 564-570

(접수일자 1997. 3. 17)