

A Numerical Model for Evaluation of Structural Stability of Void in the Buried Area

Jin Woo Cho^{1#}, Ju Hyung Lee¹, Chin Hyung Lee²⁺

¹ Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

² The Graduate School of Construction Engineering, Chung-Ang University, 84, Huksuk-ro, Dongjak-ku, Seoul 06974, Korea

Abstract

Due to the industrialization and overpopulation of cities, the facilities become bigger and taller and underground common use spaces such as subway, underground passages and tunnels are gradually expanding through the development of deep excavation technology. In the event of a collapse accident, huge damage may occur. When a collapse accident occurs, the member of framework supporting the buried void will be damaged as a result of initial collapse, showing unstable movements in comparison to their stable conditions. Therefore, the safety assessment of the support structure for void is essential in order to rescue a person isolated in the collapsed area. This study develops a numerical model that analyzes the support type for void in the buried area depending on cause of collapse and performs safety assessment of void in the buried area against a vibration that may occur at the time of excavation.

Key words: underground collapse, void in the buried area, damage, numerical model

1. 서론

인간의 삼대 필수 요소인 의, 식, 주 중에 주에 해당하는 건축물은 항상 인류의 곁에 존재해 왔으며, 인간이 사는 데에 있어 중요한 역할을 해왔다. 그러나 건축물은 자칫하면 인간을 해치는 양날의 검이 될 수도 있다. 즉, 빌딩 등의 대형 건물의 붕괴는 천문학적인 물적 경제적 피해액 이외에도 사람의 생명과 직결되는 대형 참사가 된다. 외국의 대형 건물 붕괴 사례로는, 1982년에 미국의 미주리주 캔자스시티에서 하얏트 리젠시 호텔 고가 통로가 붕괴되는 사고가 발생하여 114명이 숨

지고 200명 이상의 부상자가 발생하였으며, 2001년에는 911테러로 110층의 세계무역센터 쌍둥이 빌딩이 붕괴되어 2,500~3,000명이 사망 또는 실종되었다. 2013년에는 방글라데시 공업지구에서 9층 건물이 붕괴되어 1,100여 명이 희생되었다. 우리나라의 경우 건물 붕괴 사고가 최초로 주목을 받은 사례는 1970년 와우 아파트 붕괴 사고로 사망 33명, 부상 40명의 큰 인명 피해를 발생시켰다. 1993년에는 우암 상가아파트 붕괴 사고가 발생하여 28명이 사망하고 50여 명이 부상당하는 인명 피해를 입었으며, 1995년도에는 삼풍백화점 붕괴 사고로 508명이 사망 및 실종되고 937명의 부상자가 생겨

[#] The 1st author: Jin Woo Cho, Tel. +82-31-910-0780, Fax, +82-31-910-0235, e-mail, jinucho@kict.re.kr

⁺ Corresponding author: Chin Hyung Lee, Tel. +82-2-820-6878, Fax, +82-2-812-8331, e-mail, ifinder@cau.ac.kr

한국전쟁 이후 가장 큰 인명 피해가 발생하였다. 최근에는 2014년 마우나 오션 리조트의 강당 건물이 폭설로 무너져 내려 새내기 오리엔테이션을 진행 중이던 부산 외국어대학교 학생들이 매몰되는 사고가 발생하여 사망 10명, 부상자 103명이 발생하였다. 이러한 큰 인명 피해를 발생시키는 대형 건물의 붕괴 시에는 붕괴 형상에 따라 다양한 형태의 공동이 생성되어 붕괴를 당한 건물 내에서 생존자가 발생하기도 한다. 삼풍백화점 붕괴 사고와 방글라데시 건물 붕괴 사고 후 건물 잔해 등에 의해 만들어진 공동에서 각각 17일 만에 기적적으로 구조된 생존자들이 그 예이다. 이러한 생존자를 구호하기 위한 방법으로 최근에 굴착 등에 의한 인명구호 방법이 연구되고 있다(KICT, 2015, Cho, *et. al.*, 2015). 하지만 굴착을 통하여 공동에 생존하는 인명을 구조하기 위해서는 굴착 시 발생하는 굴착 진동에 의해 공동이

2차 붕괴될 위험이 있으므로 굴착에 따른 공동의 지지 구조 안전성 평가가 반드시 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 붕괴 원인에 따른 매몰지역 공동의 지지 유형을 분석하고 인명 구호를 위한 굴착 시 발생하는 진동에 의한 매몰지역 공동의 안전성을 평가할 수 있는 수치 모델을 개발하였다.

II. 공동의 지지형태 분석

빌딩 등의 대형 건물이 붕괴될 때에는 붕괴로 인한 건물 잔해의 종류와 건물 잔해가 어떻게 쌓이느냐에 따라 다양한 공동이 발생한다. 일반적으로 건물 붕괴의 양상 및 그에 따른 공동의 종류는 다음과 같이 5가지로 요약할 수 있다.

- V형 붕괴 및 공동: V형 붕괴는 대체로 중앙 기둥이

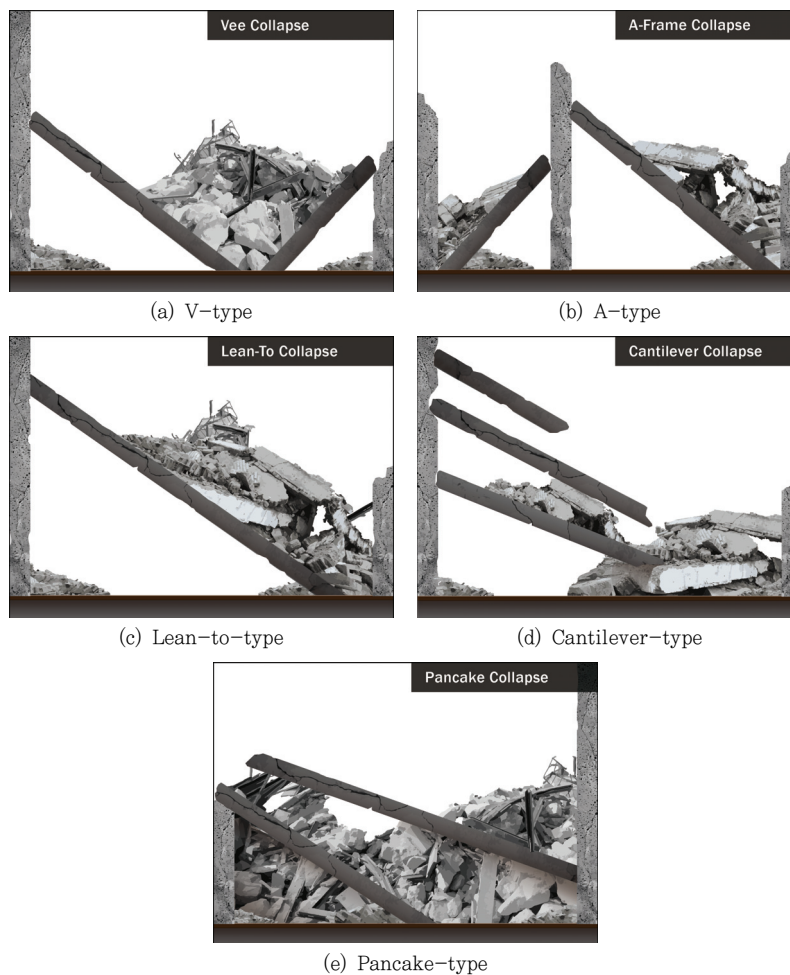


Figure 1. Types of voids in buried area

충격이나 화재 등에 의하여 그 기능을 상실할 때 기둥이 지지하는 바닥이나 지붕이 붕괴되어 가라앉아 V형 형태의 공동을 형성하는 경우를 말한다. V형 붕괴는 지지부재의 구조적 열화 및 파괴 혹은 폭발 등에 의하여 발생할 수 있다.

- A형 붕괴 및 공동: 역 V형 붕괴라고도 불리는 A형 붕괴는 양쪽 기둥이 충격이나 화재 등에 의하여 그 기능을 상실하면서 그 기둥들이 지지하는 바닥이나 지붕이 붕괴되어 A형 형태의 공동을 형성하는 경우를 말한다.
- 기댄형(Lean-to) 붕괴 및 공동: 기댄형 붕괴는 바닥, 지붕 혹은 구조물의 한 면이 붕괴되어 기댄형 형태의 공동을 형성하는 경우를 말한다.
- 캔틸레버(Cantilever)형 붕괴 및 공동: 비지지 기댄형 붕괴라고도 불리는 캔틸레버형 붕괴는 가장 위험한 붕괴 형태 중의 하나이다. 붕괴 후에 남은 구조물들은 비지지로 허공에 매달려 있는 형태가 된다.
- 팬케이크(Pancake)형 붕괴 및 공동: 캔틸레버형 붕괴와 마찬가지로 팬케이크(Pancake)형 붕괴는 가장 위험한 붕괴 형태 중의 하나이며, 생존자가 있을 확률이 가장 적은 붕괴 형태이다. 붕괴로 인해 바닥들이 팬케이크 형태로 쌓임으로써 공동이 거의 생기지 않으나, 경우에 따라서는 가구나 다른 재료들에 의해 작은 공동이 형성되기도 한다.

본 연구에서는 Pancake형 및 Cantilever형은 발생 빈도와 생존자 확률이 매우 낮아 대표 지지형식에서 제외하였으며, V형과 A형은 Lean-to형과 비슷하므로 Lean-to형을 공동의 대표 지지형식으로 선정하였다.

III. 공동의 지지구조 유한요소 모델링

1. 비선형 연속체 손상역학 모델

Kachanov(1958, 1986)와 Lemaitre(1984, 1985, 1986)에 의해 제안된 등방성 손상에 대한 손상변수 D 는 다음과 같이 주어진다.

$$D = 1 - \frac{A_D}{A_T} \quad (1)$$

여기서 A_D 는 미세균열과 미세응력 집중 및 미세균열 사이의 상호작용을 고려하는 손상영역의 면적을 나타내며, A_T 는 비손상영역의 총면적을 나타낸다. 이때 손상영역의 면적에 작용하는 응력을 유효응력이라 한다. 등방성 손상에 대하여 미세균열의 기계적 거동은 미세균열의 방향성에는 무관하며 오로지 스칼라 변수인 D 에 의존하게 된다. 따라서 모든 응력성분에 대한 유효응력 $\bar{\sigma}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (2)$$

여기서 응력을 나누는 계수인 $(1 - D)$ 는 재료의 손상량과 연관된 감소계수이다. 손상변수 $D = 0$ 은 비손상상태를 나타내며, $D \in [0, 1]$ 은 부분손상상태를 의미한다. 그리고 $D = D_c$ 는 완전한 국지적 파단상태를 나타내며, D_c 는 파단상태에서의 손상량이다.

재료의 구성방정식은 상태변수라고 불리는 몇몇의 변수들을 통하여 비가역적 열역학의 틀에서 정식화될 수 있다. 관찰에 의하면 탄성 손상을 소성 손상 및 다른 내부 상태변수로부터 분리할 수 있다. 따라서 손상 변형에너지 해방률은 선형 열탄성의 틀에서 유도가능하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = \frac{-W_e}{(1 - D)} = \frac{\sigma_{eq}^2}{2E(1 - D)^2} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \sigma_{eq} = \left(\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}, \quad \sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk},$$

$$f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) = \left[\frac{2}{3} (1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)^2 \right]$$

여기서 $W_e (= \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^e)$ 는 총 탄성변형에너지이고, σ_{eq} 는 상당 von Mises 응력, s_{ij} 와 σ_{kk} 는 각각 응력 텐서의 편차와 트레이스를 나타낸다. 그리고 δ_{ij} 는 Kronecker delta, σ_m 은 등방응력 그리고 ν 는 포아송 비이다. 소산포텐셜은 Legendre-Fenchel 변환(1978)을 이용하여 관련변수의 함수로 정식화된다.

$$F = \underbrace{F_p(\bar{\sigma}, X, R, D)}_{\text{plastic}} + \underbrace{F_D(Y, D, p)}_{\text{damage}} \quad (4)$$

여기서, p 는 유효 축적 소성변형률이며 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{p} = \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

von Mises의 항복이론에 근거한 상관소성이론에 의하면 소성 소산포텐셜은 다음과 같이 구해진다.

$$F_p(\bar{\sigma}, X, R, D) = (\bar{\sigma}^D - X^D)_{eq} - R - \sigma_y + \frac{3}{4X_\infty} X_{ij}^D X_{ij}^D \quad (6)$$

여기서, $\bar{\sigma}^D$ 와 X^D 는 각각 유효응력의 편차항과 반복하중에 대한 비선형 운동경화의 back-stress 이다. X_∞ , σ_y 그리고 R 은 각각 수렴 back-stress, 초기 항복응력, 등방경화 응력함수를 나타낸다. 상당 von Mises 응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{eq} &= (\bar{\sigma}^D - X^D)_{eq} \\ &= \left[\frac{3}{2} \left(\frac{\sigma_{ij}^D}{1-D} - X_{ij}^D \right) \left(\frac{\sigma_{ij}^D}{1-D} - X_{ij}^D \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7) \end{aligned}$$

손상재료에 대한 상태 및 소산 포텐셜로부터 일반화된 정상규칙(generalized normality rule)과 변형률 속도의 분리를 가정하면 아래의 구성방정식을 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^t = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (8)$$

(a) 탄성변형률 속도

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{1+\nu}{E} \frac{\dot{\sigma}_{ij}}{1-D} - \frac{\nu}{E} \frac{\dot{\sigma}_{kk}}{1-D} \delta_{ij} \quad (9)$$

여기서 $\dot{\sigma}_{ij}$ 는 응력텐서의 속도를 나타낸다.

(b) 소성변형률 속도

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F_p}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\lambda}}{1-D} \frac{\bar{\sigma}_{ij}^D - X_{ij}^D}{(\bar{\sigma}^D - X^D)_{eq}} \quad (10)$$

여기서 $\dot{\lambda}$ 는 소성 승수이다.

(c) 운동경화 법칙

$$\dot{X}_{ij}^D = \sum_{k=1}^n (\dot{X}_{ij}^D)_k = \sum_{k=1}^n \gamma_k \left(\frac{2}{3} c_k \dot{\epsilon}_{ij}^p - (X_{ij}^D)_k \dot{p} \right) \quad (11)$$

여기서 n 은 back-stress 수, c_k 와 γ_k 는 반복하중 시험에 의해 구해지는 모든 back-stress 진전을 위한 재료상수이다. 본 연구에서는 n 을 2로 정하였다.

(d) 등방경화 법칙

$$\dot{r} = Q (b \cdot e^{-bp}) \dot{p} \quad (12)$$

여기서 Q 와 b 는 완전양진형 변형률 제어 반복하중 하에서 얻을 수 있는 등방경화와 연관된 재료상수이다.

(e) 손상 진전률

$$\dot{D} = -\dot{\lambda} \frac{\partial F_D}{\partial Y} = -\frac{\partial \Phi^*}{\partial Y} \quad (13)$$

구성방정식을 완성하기 위해서는 손상 소산포텐셜을 명시할 필요가 있다. 본 연구에서는 Legendre-Fenchel 변환(1978)을 이용하여 개발된 손상 소산포텐셜 Φ^* 을 채택하였으며(Do et al., 2014) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi^*(D, \dot{p}, p, Y) = \frac{1}{2} \frac{S(-Y/S)^2 (k_1 p^{m-1} m + 1) \dot{p}}{D^\beta p^{2n}} \quad (14)$$

여기서 S 는 손상 변형에너지, n 은 재료 경화지수, β 는 형상계수, k_1 과 m 은 손상 진전과 관련된 재료상수이며, 이 모두는 손상 법칙의 비선형성을 부여하게 되며 1축 인장시험을 통하여 구할 수 있다. 식 (14)를 손상 에너지 해방률, Y 에 대하여 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{D} = -\frac{\partial \Phi^*}{\partial Y} = \frac{\bar{\sigma}_{eq}^2}{2ES} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \frac{(k_1 p^{m-1} m + 1) \dot{p}}{D^\beta p^{2n}} \quad (15)$$

금속과 같은 연성재료에 대하여 유효 상관응력 $\bar{\sigma}_{eq}$ 은 지수 경화법칙을 이용한 축적 소성변형의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\sigma}_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{1-D} = K p^n \quad (16)$$

여기서 K 는 재료상수이다. 이제 식 (16)을 식 (15)에 대입하고 식 (13)의 손상 발생률을 고려하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{D} = \frac{K^2}{2ES} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \frac{(k_1 p^{m-1} m + 1) \dot{p}}{D^\beta} \quad (17)$$

위식을 영역 $[D_0, D]$ 와 영역 $[p_0, p]$ 에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\frac{D^{\beta+1}}{\beta+1} \Big|_{D_0}^D = \frac{K^2}{2ES} f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) (k_1 p^m + p) \Big|_{p_0}^p \quad (18)$$

단축 하중의 경우에는 $p = p_0$ 일 때 $D = D_0$ 가 되고 $W_e = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E}$ 일 때 $f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) = 1$ 이 된다. 따라서

위의 식은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$D^M - D_0^M = \frac{K^2}{2ES} M [k_1 (p^m - p_0^m) + (p - p_0)] \quad (19)$$

여기서 $M = \beta + 1$ 이다.

파단이 발생하는 최대 손상에 대한 경계조건 즉, $p = p_r$ 일 때 $D = D_c$ 를 이용하면, 식 (19)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$D_c^M - D_0^M = \frac{K^2}{2ES} M [k_1 (p_r^m - p_0^m) + (p_r - p_0)] \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)으로부터 다음의 식이 성립된다.

$$\frac{D^M - D_0^M}{D_c^M - D_0^M} = \frac{k_1 (p^m - p_0^m) + (p - p_0)}{k_1 (p_r^m - p_0^m) + (p_r - p_0)} \quad (21)$$

아래의 식 또한 유효하다.

$$\frac{K^2}{2ES} = \frac{D_c^M - D_0^M}{M [k_1 (p_r^m - p_0^m) + (p_r - p_0)]} \quad (22)$$

식 (22)를 식 (17)에 대입하면 비례재하 하중의 경우에 일반적인 다축응력상태에서의 비선형 손상 진전률을 구할 수 있다.

$$\dot{D} = -\frac{\partial \Phi^*}{\partial Y} = \frac{D_c^M - D_0^M}{M [k_1 (p_r^m - p_0^m) + (p_r - p_0)]} \times f\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) \frac{(k_1 p^{m-1} m + 1) \dot{p}}{D^\beta} \quad (23)$$

여기서 D_c 는 파단상태에서의 손상량이고 D_0 는 초기 균열이 발생하는 한계점이다. p_r 과 p_0 는 각각 파단 상태에서의 소성 변형률과 초기 균열이 발생할 때의 소

성 변형률이다.

본 연구에서 개발된 대변형 효과를 고려한 반복 소성이 수반된 비선형 연속체 손상역학 모델은 총 13개의 재료 변수가 적용된다. 즉, 반복 소성모델의 등방경화와 운동경화를 계산하는데 필요한 6개의 변수 $c_1, c_2, \gamma_1, \gamma_2, Q, b$ 와 손상 진전을 산출하기 위한 7개의 변수 $D_{cr}, D_0, k_1, m, \beta, p_0, p_r$ 가 반복 소성 손상모델을 실행하는데 필요하게 된다. 이러한 모델 변수들은 다음과 같은 방법으로 결정될 수 있다.

- 재료 상수 Q 와 b 는 완전양진형 변형률 제어 반복 하중 실험으로부터 얻을 수 있는 반복 피크 응력과 축적 소성변형률 사이의 관계식으로부터 구해지는 변형률 경화 곡선으로부터 결정할 수 있다.
- 변수 $c_1, c_2, \gamma_1, \gamma_2$ 는 초기 탄성영역의 크기, 상수 Q 와 b 그리고 식 (11)로부터 구할 수 있다.
- 과거 이력을 알 수 없는 초기 손상의 크기 D_0 와 한계 소성변형률 p_0 는 재료로부터 측정하기가 매우 어렵다. 일반적으로 이 두 변수는 손상계산을 시작하는 단계에서 '0'으로 취해진다.
- p_r 과 D_{cr} 은 재료에 파단이 발생했을 때의 변형률과 손상변수를 의미한다. p_r 은 유효저항단면적의 내하력을 위태롭게 저하시키는 손상의 양과 관계된다. 이론적으로 한계 손상변수 D_{cr} 은 파단이 발생했을 때 '1'과 같아야 한다. 하지만 실험적으로 관찰한 결과를 보면 파단은 $D = 1$ 이전에 발생한다.
- 나머지 재료변수인 k_1, m, β 는 손상변수와 축적 소성변형률 사이의 관계곡선으로부터 구할 수 있다. 변수 β 는 식 (23)에서 보여 지는 바와 같이 손상 진전의 비선형성의 정도를 나타내며, 소성변형

률 함수인 손상 진전에 미치는 기공 성장 3단계의 영향을 고려하게 된다.

손상변수를 결정하는 과정은 다음과 같다.

- (1) 모래시계 형태의 인장시험편을 만능시험기에 물린 후 하중 고정을 위해 재료의 항복응력의 1/4에 해당하는 하중을 시험편에 재하한다. 이후 변위제어 하에서 반복하중 시험을 실시한다.
- (2) 반복하중 시험 동안 시편의 강성변화를 알아보기 위해서 시편의 게이지 부분에 신장계를 설치한다. 신장계 대신에 변형률 게이지를 부착할 수도 있다. 이 경우 시편 중앙의 최대 비틀림 때문에 변형률 게이지로부터 구한 값이 신장계로부터 얻어지는 값보다 약간 크지만 그 차이는 매우 미미해서 무시할 수 있다.
- (3) 반복하중 시험은 미리 결정한 하중이력에 따라 시편의 변형이 최대가 되어 넥킹현상이 발생할 때 까지 계속 진행한다. 손상시험 동안 각 사이클에 대하여 영율과 대응하는 소성변형률을 측정한다. 이때 영율의 측정은 재하(reloading)때 보다는 제하(unloading) 시에 수행하여야 한다. 손상변수는 아래의 식에 의해 유도된다.

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} \tag{24}$$

여기서 E_0 는 재료의 초기 영율이고 E 는 재하시에 실제 영율이다. 본 연구에서는 모든 손상모델 변수를 전술한 변형률 제어 반복하중 시험들을 통하여 구하였으며 본 연구에서 선정한 재료인 SM490에 대한 값들을 <Table 1>과 <Table 2>에 나타내었다.

Table 1. Damage model parameters for the isotropic and the kinematic hardening rates

Material	c_1	c_2	γ_1	γ_2	Q	b
SM490	236.0	11.34	30.51	3800.	260.0	17.65

Table 2. Damage model parameters for the damage evolution

Material	D_{cr}	D_0	k_1	m	β	p_0	p_r
SM490	0.60	0.0	0.012	1	1.151	0.0	0.8

2. 비선형 연속체 손상역학 모델 검증

본 연구에서 개발된 비선형 연속체 손상모델의 효율성을 검증하기 위하여 Aboutalebi, *et. al.*(2011) 이 수행한 실험 및 해석을 개발된 손상모델을 이용하여 시뮬레이션 하여 실험 및 해석결과와 본 손상모델을 이용한 해석결과를 직접 비교하였다. 그들은 St14 강재의 인장 시험을 통하여 하중-변위관계를 구하고 이를 유한요소 모델을 이용하여 손상을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 해석하여 실험과 비교하였다. 실험 및 해석에 관한 자세한 내용은 참고문헌에 잘 나와 있다. <Figure 2>에 실험에서 구한 축방향 하중-변위 곡선과 손상을 고려하지 않고 유한요소법으로 해석한 경우(FEM)와 선형 손상 진전에 입각한 손상모델을 유한요소법에 적용하여 해석한 경우(FEM+CDM)의 해석결과가 나와 있으며 본 연구에서 개발된 손상모델에 의한 해석결과와 비교하였다. 결과를 보면 실험결과와 손상을 고려하여 해석한 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한, 개발된 손상모델에 의해서 얻어진 결과가 손상을 고려한 유한요소 해석 결과(FEM+CDM)보다 훨씬 더 실험값에 근접하는 것을 알 수 있는데, 이것은 본 손상모델에서 고려한 비선형 손상 진전과 대변형 때문이다. 뿐만 아니라 손상에 의한 재료의 연화를 정확하게 모사하기 위해서는 손상역학이 구성방정식에 반드시 포함되어야 함을 알 수 있다.

개발된 비선형 손상모델을 이용한 탄소강에 대한 손상 진전 해석결과를 실험결과와 비교하였다. <Figure 3>에 계산된 손상변수를 작용하는 소성변형률에 대해서 도시하여 Le Roy, *et. al.*(1981)이 수행한 실험결과와 비교하였다. Le Roy 등은 인장 시에 발생하는 핵생성과 기공의 성장을 SEM (scanning electron microscopy)을 통하여 관찰하였으며 다른 종류의 탄소강들에 대해서 작용 변형률과 기공의 면적 분량에 대한 관계식을 정립하였다. 이에 대한 자세한 사항은 참고문헌에 잘 나와 있다. 결과를 보면 손상 진전에 있어서 상당한 비선형성을 관찰할 수 있으며, 개발된 손상모델에 의해 예측된 값과 실험을 통해 얻은 값이 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

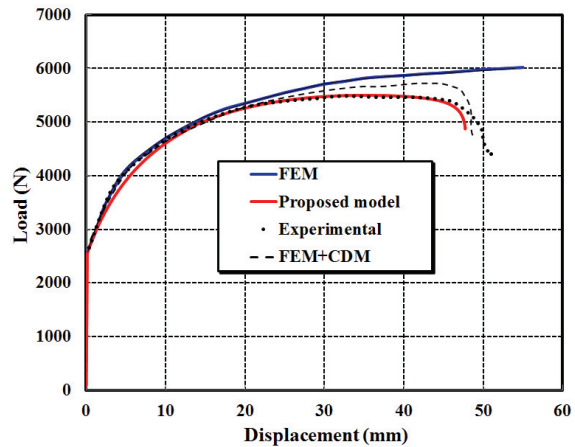


Figure 2. Comparisons of the analytical result with the experimental and the numerical data

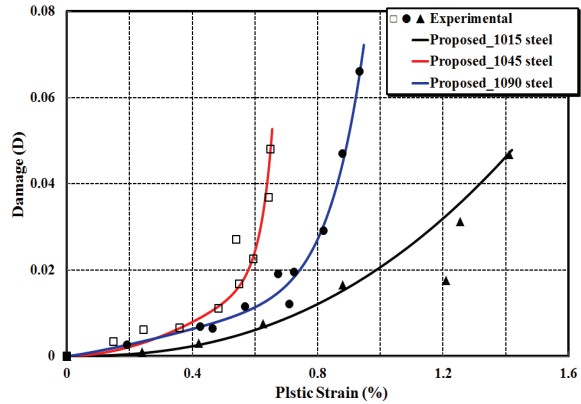


Figure 3. Comparisons of the damage evolution predicted by the proposed model with the experimental measurements

3. 비선형 연속체 손상역학을 이용한 공동의 지지구조 유한요소 모델

전술한 바와 같이 본 연구에서는 <Figure 1(c)>에 나와 있는 Lean-to형을 공동의 대표 지지형식으로 선정하였다. 따라서 타당성을 확인한 비선형 손상모델을 이용하여 Lean-to형의 지지구조를 유한요소를 이용하여 모델링하고 진동에 의한 반복하중이 재하 되는 경우의 이력거동을 조사하였다.

대부분의 초고층 건물들은 철골구조이거나 철근콘크리트구조와 철골구조의 복합구조이다. 철골조는 그 특성상 철근 콘크리트보다 붕괴에 취약하므로 본 연구에서는 철골구조의 건물을 고려하였다. 철골구조는 강재 빔을 연결한 뼈대구조물 이므로 붕괴 시에는 강재

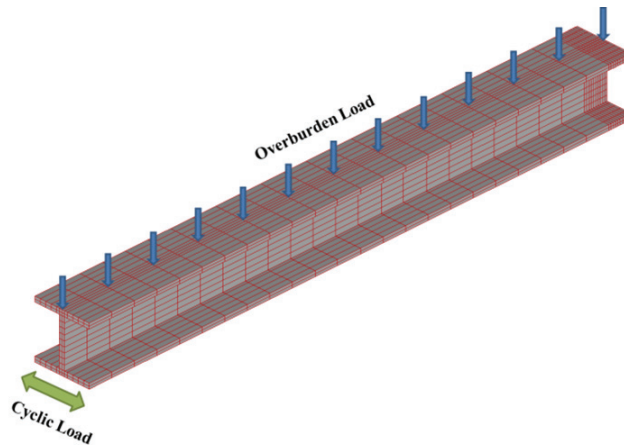


Figure 4. Finite element model

빔이 지지구조의 구조부재가 된다. 따라서 지지구조의 해석을 위해서 강재 빔(H 형강)을 모델링 하였으며 유한요소 해석모델을 <Figure 4>에 나타내었다. H형강의 재료는 가장 많이 사용되는 SM490 강재를 선정하였다. 유한요소모델은 절점당 3개의 이동 자유도를 가지는 3차원 8절점 등 매개 변수 입체요소를 적용하였다.

하중은 지지구조 위에 쌓여 있는 붕괴 더미들을 상재 하중으로 고려하여 분포하중의 형태로 H 형강 상부 플랜지에 중력방향으로 재하 하였으며 진동에 의한 반복 하중을 외력으로 상정하여 바닥에 지지되는 하부 플랜지에 수평 반복하중의 형태로 재하 하였다. 수평 반복하중은 점차적으로 증가하는 형태로 변위제어로 재하 하였다. 경계조건으로는 벽체 등에 지지되는 부분의 절점들의 모든 변위를 구속하여 경사진 캔틸레버 형태가 되도록 하였으며 하중이 재하 되는 모든 절점을 하중방향과 같은 방향으로 운동학적으로 연계시켜 변위 유도 경계조건이 되도록 하였다. 유한요소해석 시에는 타당성 검증 연구에서 행했던 것처럼 수렴을 수월하게 하고 과도한 전단 잠김 현상을 방지하기 위해서 저감적분법을 사용하였다.

공동을 지지하는 지지부재는 초기 붕괴로 인하여 필연적으로 손상을 받게 되며 건전한 상태에 비해 불안정한 거동을 보이게 된다. 이러한 초기 손상을 고려하기

위해서 손상은 전 부재에 걸쳐 발생한다고 가정하고 인위적으로 초기 손상변수 D_0 를 '0'이 아닌 값을 할당하여 해석을 수행하였다.

<Figure 5>에 초기 손상변수 값이 각각 0.1과 0.2인 경우의 해석결과를 나타내었으며 초기 손상이 없는 경우와 비교하였다. 결과를 보면 초기 손상이 없는 경우에 비해 손상이 존재하는 경우에는 내하력이 감소하고 있으며 초기 손상 값이 클수록 감소 정도도 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 또한 손상이 존재하는 경우는 외력에 저항하는 성질인 변형에너지, 즉 포락선으로 둘러싸인 부분의 면적으로 측정할 수 있는 에너지 흡수율도 감소함을 알 수 있는데, 그 감소 정도는 내하력의 그것에 비해 상대적으로 큼을 알 수 있다. 내하력의 감소와 마찬가지로 손상 값이 클수록 에너지 흡수율의 감소 정도도 증가함을 알 수 있다. 마지막으로 손상이 발생한 경우에는 손상이 존재하지 않는 경우에 비해 제하시에 소성변형 능력이 감소함(제하 시 변위가 줄어들음)을 알 수 있고, 그 감소 정도 또한 손상 값이 클수록 증가함을 알 수 있다. 즉, 초기 손상이 존재하는 지지구조는 무 손상 구조에 비해 연성능력이 감소함을 알 수 있다. 이는 초기 손상은 지지구조의 취성화를 가져와서 외부 하중에 대해 갑작스러운 파괴를 야기 시킬 수 있다는 것을 의미한다.

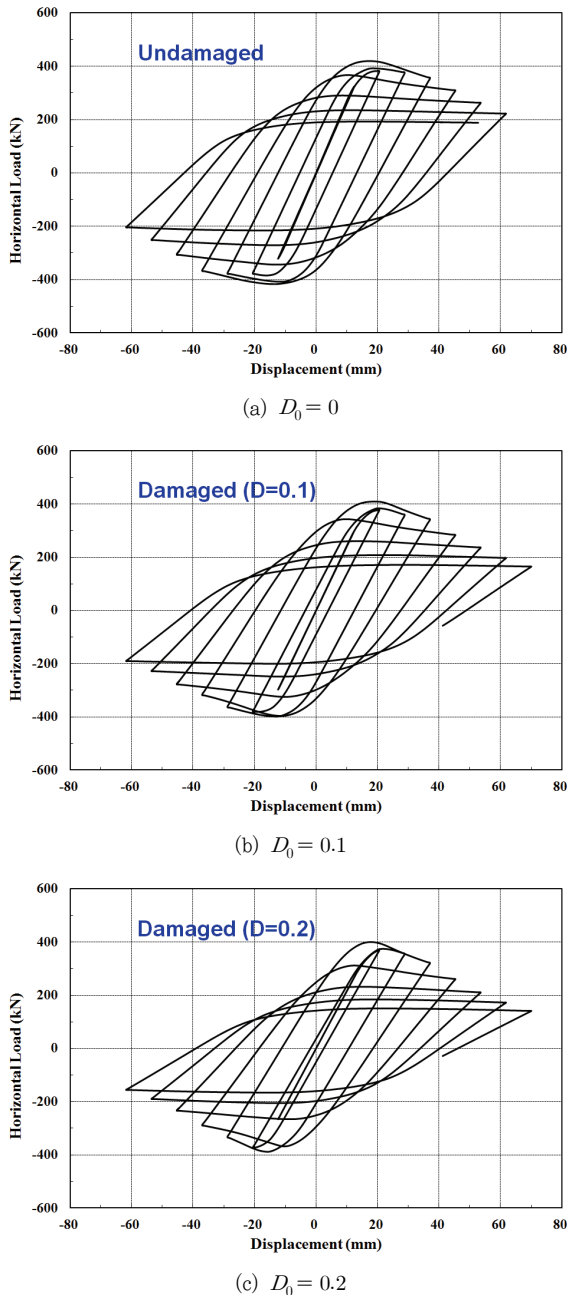


Figure 5. Comparison of the hysteresis curves

IV. 결론

건물 붕괴에 의해 생성된 공동을 지지하는 지지부재는 초기 붕괴로 인하여 필연적으로 손상을 받게 되며 건전한 상태에 비해 불안정한 거동을 보이게 된다. 따라서 붕괴 매몰지역 공동의 안전성 평가를 위해서는 초기 손상을 고려한 공동의 지지구조 거동 예측이 필요하다. 본 연구에서는 유한요소 해석기법과 다양한 하중

하에서의 재료 및 구조물의 손상을 예측함과 동시에 손상을 고려한 파괴현상을 예측할 수 있는 연속체 손상역학을 이용하여 매몰지역 공동의 안전성을 평가할 수 있는 새로운 비선형 연속체 손상역학 모델을 개발하였다.

1. 붕괴 시 손상이 발생한 매몰지역 공동의 지지구조를 모델링하기 위하여 굴착 시에 발생하는 진동에 의한 영향을 고려할 수 있는 새로운 비선형 연속체 손상역학 모델을 제시하였으며, 개발된 손상역학 모델에 대한 타당성을 검증하였다.
2. 유효성이 입증된 비선형 연속체 손상역학 모델을 이용하여 공동의 대표형식으로 선정된 Lean-to형을 유한요소를 이용하여 모델링하였고 진동에 의한 반복하중이 재하 되는 경우에 공동의 지지구조 이력거동을 조사하였다.
3. 초기 손상이 클수록 외력에 대한 지지구조의 내하력과 에너지 흡수율(변형에너지) 및 연성능력이 감소함을 알 수 있었다. 즉, 초기 손상이 존재하는 지지구조는 외력에 대한 저항성이 감소하게 되며 외부 하중에 대해 갑작스러운 파괴가 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 한국건설기술연구원 2016년도 주요사업 “인명구호용 수평굴착 및 안정화 기술 개발” 과제의 지원에 의해 연구되었음.

References

Aboutalebi, F. H., M. Farzin, and M. Poursina. 2011. Numerical Simulation and Experimental Validation of a Ductile Damage Model for DIN 1623 St14 Steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 53: 157-165.

Jin Woo Cho, Soo Ho Chang, Hak Seung Kim, and Ju Hyung Lee. 2015. A Study on Rapid Rescue Alternative for Urban Collapse and Burial Areas Using Horizontal Drilling Technologies. *Korean Review of Crisis & Emergency*

Management. 11(9): 95-104.

Kachanov, L. M. 1958. Time of the Rupture Process under Creep Conditions. *Izv. AN SSSR., Otd. Tekh Nauk.* 8: 26-31.

Kachanov, L. M. 1986. Introduction to Continuum Damage Mechanics. *Martinus Nijhoff, Dordrecht.*

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). 2015. Scenario-Based Horizontal Drilling and Stabilization Technologies for Urban Search and Rescue (US&R) Operations. *KICT 2015-164.*

Le Roy, G., J. D. Embury, G. Edward, and M. F. Ashby. 1981. A Model for Ductile Fracture Based on Nucleation and Growth of Voids. *Acta. Metal.* 29: 1509-1522.

Lemaitre, J. 1984. How to Use Damage Mechanics. *Nuclear Eng. and Design.* 80: 233-245.

Lemaitre, J. 1985. A Continuous Damage Mechanics Model for Ductile Fracture. *J. of Eng. Mat. and Tech.* 107: 83-89.

Lemaitre, J. 1986. Local Approach of Fracture. *Eng. Frac. Mech.* 25: 523-537.

Lemaitre, J. and J. L. Chaboche. 1978. Phenomenological Approach of Damage Rupture. *J. de Mecanique Appliquee.* 2(3): 317-365.

Vuong Nguyen Van Do, Chin Hyung Lee, and Kyong Ho Chang. 2014. A Nonlinear CDM Model for Ductile Failure Analysis of Steel Bridge Columns under Cyclic Loading. *Comput. Mech.* 53: 1209-1222.

Korean References Translated from the English

조진우, 장수호, 김학승, 이주형. 2015. 수평굴착기술을 활용한 도심지 지하붕괴 매몰지역의 긴급구호 방안에 관한 연구. *한국위기관리논집.* 11(9): 95-104.

한국건설기술연구원. 2015. 시나리오 기반 인명구호용 수평굴착 및 안정화 기술 개발. *한국건설기술연구원 2015년도 주요사업 연차보고서.* KICT 2015-164.

Received: Sep. 23, 2016 / Revised: Oct. 11, 2016 / Accepted: Oct. 17, 2016

붕괴 매몰지역 공동의 안전성 평가를 위한 수치모델 개발

국문초록 산업화 및 도시 과밀화로 인하여 시설물이 점점 대형·고층화되고 있으며 대심도 굴착기술의 발전을 통해 지하철, 지하도, 터널 등 지하 공용 공간이 증가되고 있어 붕괴사고 시 엄청난 피해가 발생할 수 있다. 붕괴사고 발생 시 매몰 공동을 지지하는 부재는 초기 붕괴로 인하여 필연적으로 손상을 받게 되며 건전한 상태에 비해 불안정한 거동을 보이게 된다. 붕괴 지역에 고립되어 있는 인명을 구조하기 위해서는 구조전문가의 투입이 필요하며, 이 때 구조전문가의 안정성이 담보되어야 한다. 따라서 초기 손상을 고려한 공동의 지지구조 안전성 평가가 반드시 필요하다. 본 연구에서는 붕괴 원인에 따른 매몰지역 공동의 지지 유형을 분석하였으며, 유한요소 해석기법과 다양한 하중 하에서의 재료 및 구조물의 손상을 예측함과 동시에 손상을 고려한 파괴현상을 예측할 수 있는 연속체 손상역학을 이용하여 매몰지역 공동의 안전성을 평가할 수 있는 새로운 비선형 연속체 손상역학 모델을 개발하였다.

주제어 : 지하붕괴, 매몰 공동, 손상, 수치모델

-
- Profiles **Jin Woo Cho** : He received his M.A from Chung-Ang University, Korea in 2000. He is senior researcher of Geotechnical Engineering Research Division at Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. His interesting subject and area of research is eco-friendly construction materials, disaster decision support technology, and urban search and rescue(jinucho@kict.re.kr).
- Ju Hyung Lee** : He received his Ph.D. from Seoul National University, Korea in 2014. He is research fellow of Geotechnical Engineering Research Division at Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. His interesting subject and area of research is offshore geotechnical Engineering, cofferdam and working platform for bridge foundation, and urban search and rescue(leejh73@kict.re.kr).
- Chin Hyung Lee** : He received his Ph.D. from Chung-Ang University, Korea in 2005. He is assistant professor of the graduate school of Construction Engineering in Chung-Ang University. His research interests include weld-induced residual stresses, constitutive modeling, behavior of welded steel structures under various types of loading and analysis of functionally graded materials by utilizing mesh-free method. His major research papers are: "Analysis of uniaxial ratcheting behavior and cyclic mean stress relaxation of a duplex stainless steel (2014)" and "Modeling the high cycle fatigue behavior of T-joint fillet welds considering weld-induced residual stresses based on continuum damage mechanics (2016)"(ifinder@cau.ac.kr).