

## 교통하중하의 지하 매설관의 거동 평가

### Performance Evaluation of Buried Concrete Pipe under Heavy Traffic Load

반 호 기<sup>1</sup> Ban, Hoki  
박 성 완<sup>2</sup> Park, Seong-Wan  
김 용 락<sup>3</sup> Kim, Yong-Rak

#### Abstract

Pipeline is very important infrastructure which is directly related to our daily life. Nevertheless, it is not considered significantly unless it breaks. As most pipelines are buried at a certain depth from the surface of road pavement in urban areas, they are subjected to traffic load. This paper presents the performance of buried concrete pipe under heavy traffic load. Hence, one of the major factors affecting their performance is burial depth. To consider this factor, the ratio of burial depth (H) to diameter of pipe (D) was defined as a key variable. The integrity of buried concrete pipe was investigated with two cases of ratio of burial depth to pipe diameter (H/D=2 and H/D=4). The results provide the limit burial depth to ensure the soundness of buried concrete pipe subjected to heavy traffic load, and more economical design is anticipated with the results.

#### 요 지

지하 매설관은 우리의 일상생활과 매우 밀접하지만 일반적으로 붕괴로 인한 피해가 발생하기 전에는 그 중요성에 둔감한 편이다. 대부분의 매설관은 도로포장체 아래에 매설되어 있어 외부하중으로는 주로 교통하중을 받는다. 본 연구에서는 이러한 교통하중을 받는 지하 매설관의 거동에 대해 살펴보았다. 지하 매설관의 거동에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 매설 깊이(H)와 매설관의 직경(D)의 비를 가장 중요한 인자로 보고 연구를 수행하였다. 두 가지 경우의 매설 깊이에 대한 매설관 직경 비에 따른 매설관의 건전성을 살펴보았다. 결과를 바탕으로 매설관의 건전성을 확보할 수 있는 매설깊이를 결정할 수 있었으며, 보다 경제적인 매설관 설계를 할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords :** Buried concrete Pipe, Finite element, Pavement, Traffic load

#### 1. 서 론

지하 매설관은 우리의 일상생활에 없어서는 안 될

필요한 자원 및 에너지 물질(물, 석유, 그리고 가스)등을 운반하는 매우 중요한 지하구조물이다. 이토록 우리의 일상생활과 밀접한 관계가 있는 지하 매설관이지

1 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 연구교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dankook Univ., Tel: +82-31-8005-3472, Fax: +82-31-8005-3496, [spark@dankook.ac.kr](mailto:spark@dankook.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

3 비회원, 미국 네브라스카 주립대학교 토목공학과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Univ. of Nebraska at Lincoln, U.S.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

만, 대부분은 매설관이 붕괴되어 직접적인 불편을 끼치지 전에는 그 중요성을 인식하지 못하고 있다. 최근 전력 및 상수/하수 그리고 가스 등 라이프라인에 대한 관심도에 비하여 그 공학적 거동이나 설계에 대한 합리적인 평가는 그리 높은 편이 아니다. 이는 지중매설관의 특성상 상부 및 그 주변 지반에 대한 상호작용을 고려해야 하는 어려움에 기인한다. 따라서 이러한 상호작용을 고려한 매설관의 거동 평가가 국내외적으로 절실한 실정이다.

지금까지 매설관의 거동에 대한 연구는 다양한 방법을 통해서 이루어져 왔는데, 초창기에는 하중이론에 근거한 경험식(Marson and Anderson 1913; Spangler 1941)과 실험을 통한(Pettibone and Amster 1967; Shmulevich et al. 1985; Liedberg 1991; McGrath 1998; Sargand and Hazen 1998; Potts and Zdravkovic 1999; Mohareb et al. 2001) 해석과 설계들이 이루어져 왔다. 이러한 기존의 해석과 설계 방법들은 지하 매설관의 실질적인 거동에 영향을 미치는 많은 요소들, 즉, 매설관의 종류, 뒤채움 지반재료의 종류, 매설 깊이, 그리고 지하수면의 위치 등을 고려하기에는 한계가 있다. 이러한 환경적인 요소들과 더불어 매설관과 뒤채움 흙의 상호작용이 반드시 고려되어야 한다.

또한, 도시지역의 매설관들은 일반적으로 도로포장체 아래에 매설되어 있기 때문에 차량 하중을 주로 받으며(Lee et al. 2002), 매설관 설치 방향에 대하여 종 또는 횡방향의 하중을 동시에 받는다. 이러한 포장체 또한 매설관의 존재로 인하여 전체적인 거동에 영향을 받게 된다. 따라서 도로포장체와 매설관이 공존하는 하나의 구조체로서, 앞서 언급된 다양한 변수들과 상호작용을 고려한 지하 매설관의 거동과 포장체의 거동을 동시에 고려한 보다 정확한 해석을 통한 설계가 필요하다. 이를 위해서는 실험적인 접근 방식과 수치해석적 접근방식이 병행되어야 한다.

앞에서 언급된 매설관의 거동에 영향을 미치는 다양한 요소 중 본 연구에서는 포장체 아래에 매설된 콘크리트 매설관의 깊이에 따른 거동적 특성과 그 건전성에 대하여 수치해석적 방법으로 살펴보았다. 이를 위해 콘크리트 매설관 주변흙의 재료 구성 모델 개발과 더불어 콘크리트 매설관과 주변 지반의 상호작용을 고려하여 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 콘크리트 매설관의 설계 시 우선적으로 고려되어야 할 매설관 깊이를 결정하는데 도움을 줄 뿐 아니라 콘크리트 매설

관의 균열 발생 패턴을 살펴봄으로써 매설관의 건설시 보강해야 할 위치를 인지함으로써 설계상의 문제점을 개선하여 경제적이고 안전한 매설관 설계에 도움을 줄 것이다.

## 2. 유한요소 모델링

유한요소 상용프로그램인 ABAQUS(2008)를 사용하여 2차원 평면변형 모델로 교통하중을 받는 포장체 아래에 매설된 콘크리트 매설관의 거동을 살펴보았다. 이를 위해 뒤채움 흙의 거동은 탄소성 모델, 콘크리트 매설관의 거동은 손상모델, 그리고 아스팔트콘크리트 표층은 선형 점탄성 모델을 각각 적용하였다.

뒤채움 흙의 거동을 나타내기 위해 적용된 비선형 탄소성 모델에서, 비선형 부분은 Duncan and Chang(1970)이 제안한 쌍곡선 모델을 사용하였다. 이 모델은 각 하중 증분을 선형으로 계산하지만, 각 하중 증분으로 인하여 발생하는 응력변화에 따른 접선 탄성계수(Et)를 사용함으로써 비선형성 응력을 나타내준다. 이러한 접선 탄성계수는 아래의 식 (1)과 같다.

$$E_t = E_i \left[ 1 - \frac{R_f(1 - \sin\phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos\phi + 2\sigma_3 \sin\phi} \right]^2 \quad (1)$$

여기서,  $R_f$  = 파괴비, 보통 0.7 to 1.0

$$E_i = \text{초기 탄성계수} = K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n$$

$$P_a = \text{대기압}(101.3\text{kPa})$$

$$K, n = \text{재료 상수}$$

$$c = \text{점착력}$$

$$\phi = \text{내부 마찰각}$$

$$\sigma_1 \text{과 } \sigma_3 = \text{최대 및 최소 주응력}$$

소성부분은 Drucker-Prager 파괴 모델과 비연관 유동법칙(non-associated flow rule)을 적용하였다. Drucker-Prager 파괴 모델을 축차 응력과 정수응력(hydrostatic stress)으로 표현하면, 식 (2)와 같다.

$$f(s, p) = \|s\| + \sqrt{2}(3\alpha p - k) = 0 \quad (2)$$

여기서,  $s$ 와  $p$ 는 각각 축차와 정수응력을 나타내며,  $\alpha$ 와  $k$ 는 재료 상수이다.

콘크리트 매설관 모델에 사용된 손상모델(damage model)은 탄소성 모델에서 식 (3)과 같이 소성부분의 거동을 탄성의 강도감소와 연관이 있다는 이론에서 출발하였다.

$$D^e = (1-d)D_0^e \quad (3)$$

여기서,  $d$ 는 감소변수로서 0에서 1까지로 표시되며,  $D_0^e$ 는 초기 탄성강도이다.

소성 손상모델은 Lubliner 등(1989)이 처음 제안하였으며, Lee and Fenves(1998)에 의해 수정모델이 제안되었다. 수정된 소성 손상모델의 응력과 평형소성변형( $\bar{\epsilon}^p$ )의 함수로 아래 식 (4)와 같이 표현된다.

$$f(\sigma, \bar{\epsilon}^p) = \frac{1}{1-\kappa} (\kappa I_1 + \sqrt{3J_2} + \beta(\bar{\epsilon}^p) \langle \sigma_{\max} \rangle) - c_c(\bar{\epsilon}^p) \quad (4)$$

여기서,  $\kappa$ 와  $\beta$ 는 무차원 재료상수이며,  $\sigma_{\max}$ 와  $c_c$ 는 각각 최대 주응력과 압축 점착력을 나타낸다.  $I_1$ 과  $J_2$ 는 각각 일차 불변응력텐서(first invariant stress tensor)와 이차 불변응력텐서(second invariant of deviatoric stress tensor).

재료상수  $\kappa$ 는 초기 일축 및 이축 압축항복응력인  $\sigma_{t0}$ 와  $\sigma_{c0}$ 를 이용하여 아래의 식 (5)에서 구할 수 있다.

$$\kappa = \frac{\sigma_{t0} - \sigma_{c0}}{2\sigma_{t0} - \sigma_{c0}} \quad (5)$$

일반적인 콘크리트의 일축과 이축의 최대항복응력은 1.10~1.16이기 때문에 재료상수  $\kappa$ 는 0.08~0.12의 값을 가진다(Lubliner 등 1989). 소성 손상모델 또한 비연관 유동법칙을 적용하였으며, 이는 아래의 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$g = \sqrt{2J_2} - \alpha_p I_1 \quad (6)$$

$$= \|s\| + \alpha_p I_1$$

여기서,  $\|s\|$ 는 norm of the deviatoric 응력이며,  $\alpha_p$ 는 팽창상수이다. 따라서 소성변형율은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\bar{\epsilon}}^p = \dot{\lambda} \left( \frac{s}{\|s\|} + \alpha_p I_1 \right) \quad (7)$$

포장체 표층인 아스팔트콘크리트는 일반적으로 시간과 온도에 영향을 받은 선형점탄성 거동을 보인다. 이러한 선형점탄성 모델의 일반식은 식 (8)과 같다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \int_0^t E(t-\tau) \delta_{ij} \frac{\partial \epsilon_{kk}}{\partial \tau} d\tau$$

$$+ \frac{1}{1+\nu} \int_0^t E(t-\tau) \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial \tau} d\tau \quad (8)$$

여기서,  $\sigma_{ij}$ =응력텐서,  $\epsilon_{ij}$ =변형텐서,  $\nu$ =포아송 비,  $E(t)$ =선형 점탄성 이완탄성계수(relaxation modulus),  $\delta_{ij}$ =Kronecker delta,  $t$ =시간,  $\tau$ =적분변수이다.

선형 점탄성 이완탄성 계수는 선형점탄성 범위 내에서 실내실험을 통해서 구할 수 있으며, 실험에서 얻어진 결과를 일반화된 맥스웰(Generalized Maxwell) 모델을 적용하여 수학적인 형태인 Prony series로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{s=1}^n E_s \exp\left(-\frac{t}{\rho_s}\right) \quad (9)$$

여기서,  $E_\infty$ 와  $E_s$ 는 일반화된 맥스웰 모델에서의 스프링 상수이며,  $\rho_s$ 는 이완(relaxation) 시간,  $n$ 은 맥스웰 계(Maxwell unit)의 개수이다.

## 2.1 모델형상 및 경계조건

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 모델링의 일반적인 개략도와 유한요소망을 보여주고 있다. Fig. 1(a)에서 보는바와 같이 구조물은 매설관의 중심을 기준으로 좌우 대칭이기 때문에, Fig. 1(b)와 (c)와 같이 구조물의 절반만 사용하여 해석하였다. 또한, 유한요소망의 우측 끝단과 하부는 무한요소(infinite element)를 사용하여 경계효과를 없앴으며, 두 종류의 매설관 깊이를 보여주고 있다.

매설관과 주변흙의 상호작용(soil-pipe interaction)을 고려하기 위하여 Fig. 2에서와 같이 접촉개념을 적용하였다. 그림에서 보듯이 주 면(master surface)과 부 면(slave surface)의 짝으로 구성되어 있으며, 두 면의 분리는 Coulomb의 마찰법칙에 의해 지배된다. 본 논문에서는 마찰계수 0.3을 적용하였다.

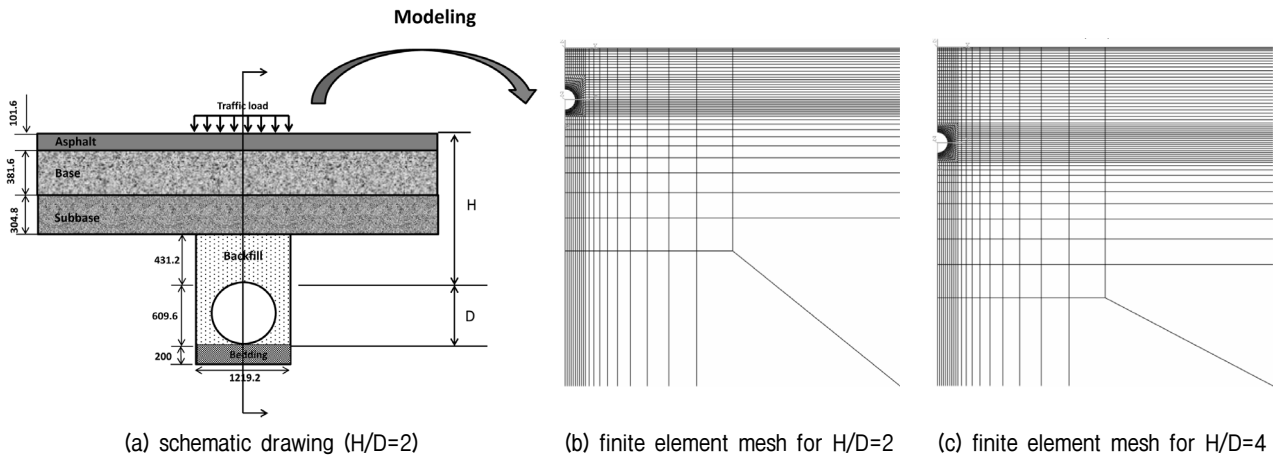


Fig. 1. Schematic drawing and finite element mesh used in this study (unit: mm)

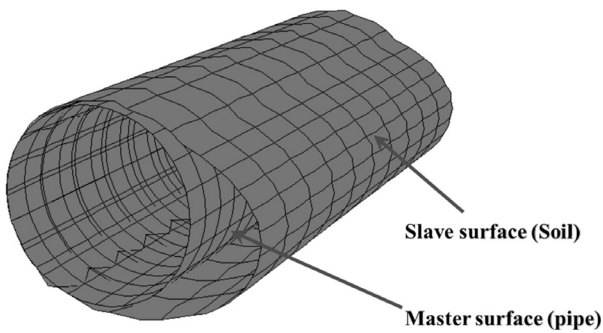


Fig. 2. Schematic diagram of contact pair

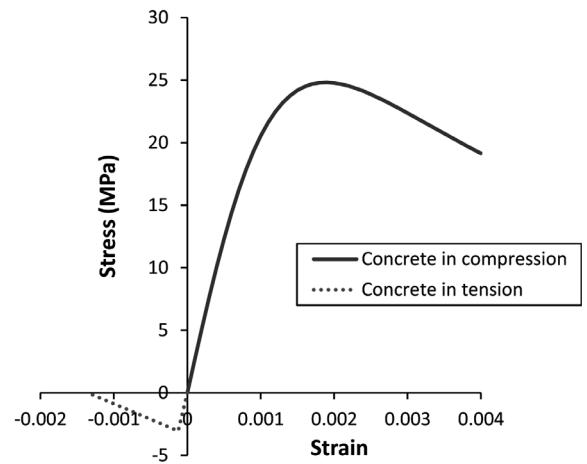


Fig. 3. Stress-strain relationship of buried concrete pipe used in this study

## 2.2 재료물성

수치해석에 사용된 콘크리트 매설관의 물성치는 인장 균열과 압축 파쇄(crushing)를 입력하였다. Fig. 3의 응력-변형률 관계에서 압축부분은 Todeshini 등(1964) 그리고 인장부분은 Zarghamee and Fok(1990)의 관계식을 이용하였다. 그림에서, 변형율이 0.000123까지 인장 응력이 증가하며 그 후에 응력이 콘크리트 탄성의 1/10의 기울기로 감소하여 응력이 0이 되는 완전 균열상태가 된다. 본 논문에 사용된 부호는 압축을 정(positive)의 값으로, 인장을 부(negative)의 값으로 나타냈다.

Fig. 1의 (a)에서 보듯이 수치 해석에 사용된 물성치

Table 1. Linear viscoelastic properties of asphalt concrete

| Layer            | s        | $E_s$ (MPa) | $\rho_s$ (s) | Poisson's ratio |
|------------------|----------|-------------|--------------|-----------------|
| Asphalt Concrete | 1        | 29281       | 1.00E-02     | 0.35            |
|                  | 2        | 8719        | 1.00E-01     |                 |
|                  | 3        | 7054        | 1.00E+00     |                 |
|                  | 4        | 4654        | 1.00E+01     |                 |
|                  | 5        | 2623        | 1.00E+02     |                 |
|                  | 6        | 1319        | 1.00E+03     |                 |
|                  | $\infty$ | 139         | -            |                 |

Table 2. Material properties of each layer

| Layer             | Young's modulus (MPa) | Poisson's ratio | Dry unit weight ( $\text{kN/m}^3$ ) | K   | n   | $R_f$ | c (kPa) | $\phi$ (deg) |
|-------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------------|-----|-----|-------|---------|--------------|
| Base              | 294                   | 0.3             | 23.0                                | -   | -   | -     | -       | -            |
| Subbase           | 196                   | 0.3             | 22.0                                | -   | -   | -     | -       | -            |
| Subgrade          | 12.3                  | 0.3             | 18.0                                | -   | -   | -     | -       | -            |
| Bedding           | 19.6                  | 0.3             | 21.9                                | -   | -   | -     | -       | -            |
| Backfill Material | -                     | 0.3             | 19.7                                | 440 | 0.4 | 0.85  | 28      | 34           |

Table 3. Dimensions and material properties of concrete pipe

| Internal diameter (mm) | Wall thickness (mm) | Young's modulus (MPa) | Poisson's ratio | $f'_c$ (MPa) | $f'_t$ (MPa) |
|------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|--------------|--------------|
| 609.6                  | 76.2                | $2.4 \times 10^4$     | 0.2             | 27.6         | 3.05         |

는 도로단면과 매설관 주변으로 나눌 수 있다. 먼저 도로단면의 표층인 아스팔트콘크리트의 20°C에서의 선형 점탄성 물성치(Im 등 2012)는 Table 1과 같으며, 그 아래층과 매설관 주변흙에 대한 물성값은 Table 2에 나타났다.

또한, 수치해석에 사용된 콘크리트 관은 ASTM C 76에 공시된 크기와 물성치이며 아래 Table 3과 같다. Table 3에서  $f'_c$ 와  $f'_t$ 는 콘크리트의 최대 압축강도와 최대 인장강도를 나타낸다.

### 2.3 하중조건

매설관의 매설이 끝난 후 도로포장 하에서 관의 거동을 분석하기 위해 매설관과 같은 방향의 차량 하중이 적용되었다. 본 연구에 사용된 차량은 Fig. 4와 같은 트럭으로 최대 접지압은 988kPa이 적용되었다.

### 3. 해석 결과

도로포장체 하부에 매설된 매설관의 건전성을 평가하기 위하여 매설 깊이에 따른 매설관의 거동과 그 주변 흙의 응력분포를 살펴보았다. Fig. 5는 매설관과 주변 흙의 상호작용을 고려한 매설관 깊이에 따른 콘크리트 매설관과 주변흙 사이에서 발생한 응력을 나타내고 있다. 매설관의 깊이가 깊어질수록 발생하는 응력이 작음을 알 수 있으며, 천단(crown)에서 가장 큰 응력이 발생하며 매설관의 상부 어깨면을 따라 점점 감소하여 스프링 라인에서 소멸됨을 알 수 있다. 같은 원리로 매설관의 인버트에서 발생된 응력이 하부 어깨면을 따라 점점 감소하여 스프링 라인에서 소멸됨을 알 수 있다.

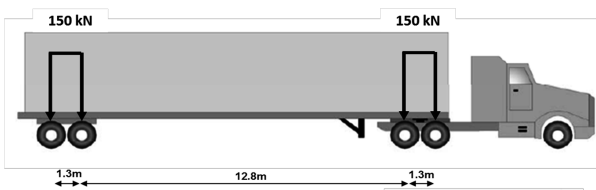


Fig. 4. Illustration of Class 9 truck

Fig. 6은 매설 깊이가 다른 두 개의 콘크리트 매설관의 바깥쪽과 안쪽에서 발생하는 후프응력 (hoop stress)을 보여주고 있다. 그림에서 점선과 실선만으로 표시된 것이 H/D=2이며, 심볼과 함께 표시된 것이 H/D=4이다. 세로축은 매설관의 각 지점에서 발생된 후프응력을 나

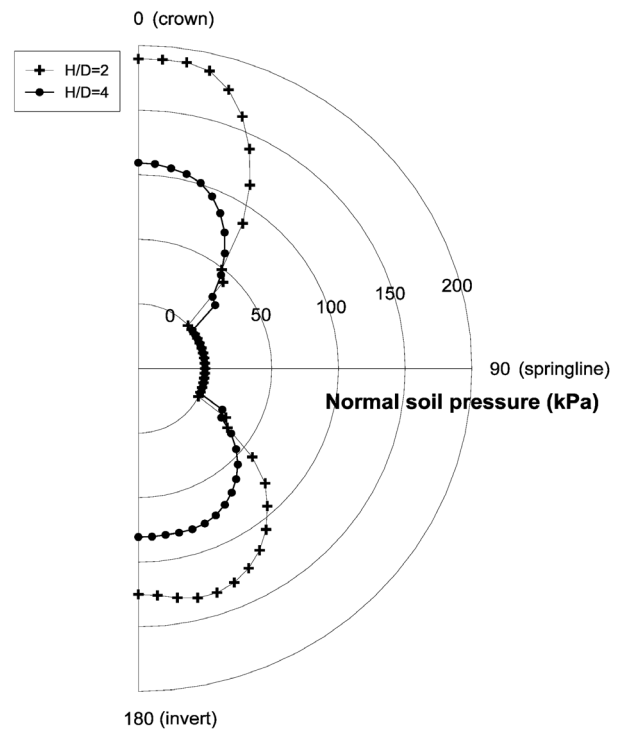


Fig. 5. Comparison of variation of normal soil pressure distributions between H/D=2 and H/D=4

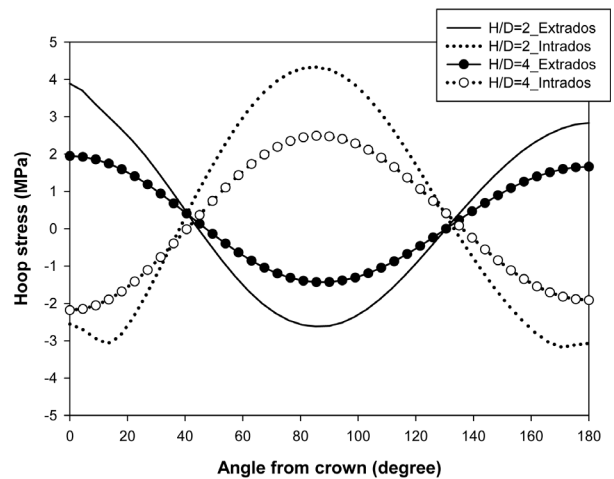


Fig. 6. Comparison of hoop stresses between H/D=2 and H/D=4

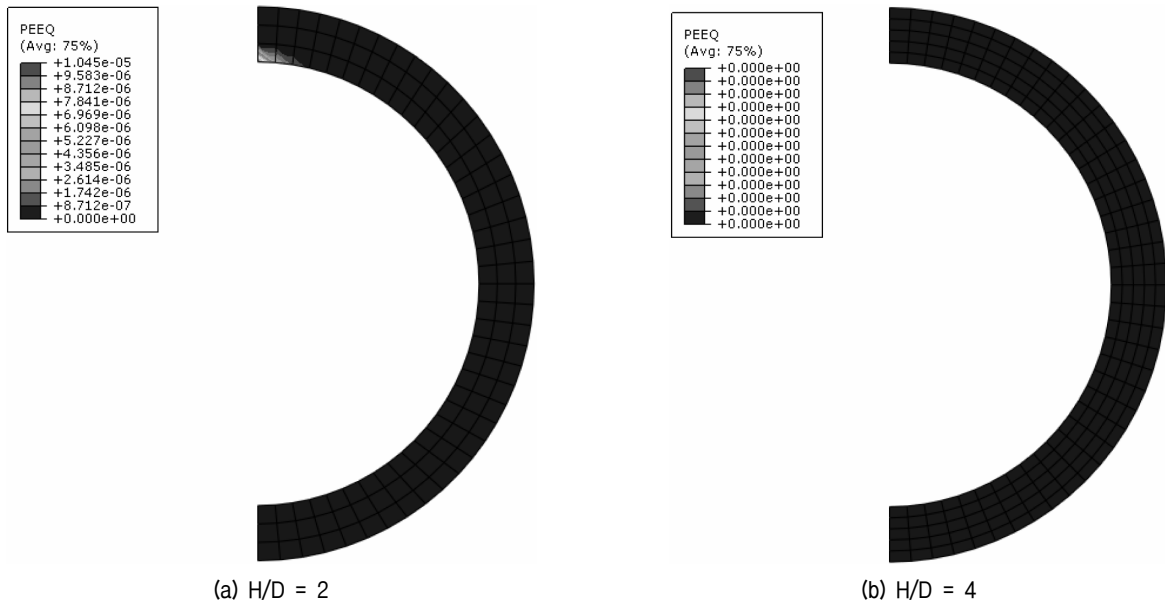


Fig. 7. Plastic strains

타내고 있으며, 가로축은 천단 ( $0^\circ$ )에서 인버트 ( $180^\circ$ )까지를 나타내고 있다. 콘크리트 매설관에서 인장응력이 발생하는 곳은 천단과 인버트의 안쪽 면(intrados) 그리고 스프링라인의 바깥쪽(extrados)이다. 앞에서 설명한 바와 같이 본 연구에 사용된 콘크리트 관의 최대 인장응력은 3MPa이며, 최대 인장응력에 도달한 이후 연화현상을 보여주고 있다. 이러한 연화현상은 미세 균열이 발생했음을 의미하며 인장응력이 0이 될 때를 완전균열로 규정하였다. 그림에서 H/D=2인 경우, 천단에서 최대 인장응력(3MPa)에 도달하여 연화현상(softening)이 일어남을 볼 수 있다. 반면, H/D=4의 경우는 최대 인장응력에 미치지 못함을 알 수 있다. 이는 H/D=2의 경우 콘크리트 매설관에서 미세 균열이 발생하여 진행됨을 알 수 있다.

Fig. 7은 콘크리트 매설관의 소성변형을 보여주고 있는데, H/D=2의 경우는 천단의 안쪽 벽에서 소성변형이 발생했음을 알 수 있고, H/D=4는 소성변형이 발생되지 않았음을 알 수 있다. 또한, H/D=2에서 발생된 소성변형의 정도를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 콘크리트 매설관의 주요 지점인 천단, 인버트, 그리고 스프링라인에서 각각 발생된 소성변형을 보여주고 있다. 그림과 같이 천단, 인버트, 스프링라인 순으로 변형이 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 콘크리트 매설관의 균열 순서 또한 천단과 인버트 그리고 스프링라인에서 발생할 것으로 추정해 볼 수 있다.

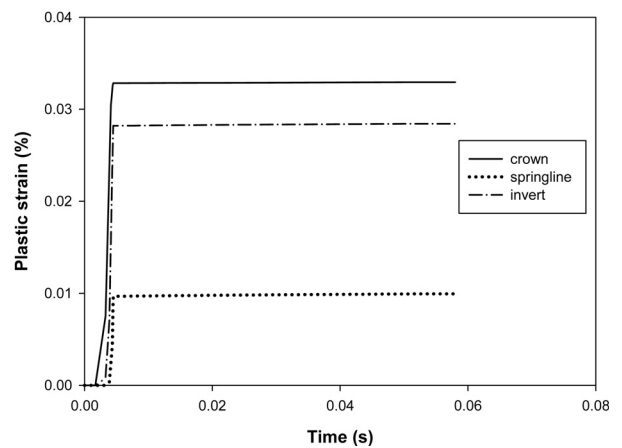


Fig. 8. Plastic strains at crown, springline, and invert when H/D=2

#### 4. 결론

본 논문은 차량 하중을 받는 도로포장체 아래에 매설된 매설관의 거동과 그 건전성을 평가해보았다. 이를 위하여 비선형 탄소성 모델을 이용하여 매설관 주변흙의 거동을 보다 정밀히 살펴보았으며, 손상 모델을 이용하여 매설관의 균열을 알아보았다. 또한 매설관의 깊이를 다르게 하여 설계단계에서의 매설관 깊이를 결정할 수 있는 근거를 제시하였다. 결과로는 다음과 같이 정리할 수 있다.

콘크리트 매설관과 주변 흙 사이의 상호작용을 고려하여 발생한 응력은 천단부분에서 가장 크게 나타나며, 흙의 아칭 효과에 따라 스프링라인으로 가면서 점점 감

소함을 알 수 있었다. 인버트에서 발생한 응력 또한 현치(haunch) 부분을 지나 스프링라인에서 감소하고 있다. 발생하는 응력의 양은 매설관의 깊이가 얕을수록 크게 나타남을 알 수 있다.

콘크리트 매설관에 발생하는 인장 후프응력은 매설관 깊이가 H/D=2인 경우 최대치에 이르러 연화거동이 발생하여 미세 균열이 진행되었으며 H/D=4인 경우에는 최대 인장응력에 이르지 못함을 알 수 있다. 이는 본 연구결과를 바탕으로 매설관의 깊이는 최소한 H/D=2 이상이어야 한다고 판단된다.

H/D=2인 경우 균열의 발생 정도는 천단, 인버트, 그리고 스프링라인 순서로 나타났으며, 가장 큰 문제가 되는 천단 부분의 보강을 위해서 천단 위에 쿠션 역할을 하여 하중을 흡수할 수 있는 패드등을 설치하는 방안을 고려할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야학문후속세대양성 프로그램의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사로 드립니다(과제번호 2012R1A6A3A01039330).

## 참고문헌 (References)

1. Lee, D-S, Sang, H-K, and Kim, K-Y (2002), "Behavior of underground flexible pipes subject to vehicle load", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.4, pp.65-73. (in Korean)
2. ABAQUS User's Manual Version 6.8 (2008), Hibbt, Karlsson & Sorenson, Inc., Pawtucket, R. I.
3. Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.96, SM 5, pp.1629-1653.
4. Im, S., Ban, H., Kim, Y., and Park, S. (2012), "Comparison between a 3-D finite element pavement model and the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for asphalt pavements", *Advances in*

- Transportation Geotechnics II*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Transportation Geotechnics, pp.704-709.
5. Lee, J. and Fenves, G. L. (1998), "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.124, No.8, pp.892-900.
6. Liedberg, S. (1991), *Earth pressure distribution against rigid pipes under various bedding condition*, Ph. D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
7. Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S., and Onat, E. (1989), "A plastic-damage model for concrete", *International Journal of Solids Structures*, Vol.25, No.3, pp.299-326.
8. Marston, A. and Anderson, A. O. (1913), *The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe*, Bulletin 31, Iowa State College.
9. McGrath, T. J. (1998), *Pipe-soil interactions during backfill placements*, Ph. D. Thesis, University of Massachusetts, Amherst, MA.
10. Mohardb, M., Kulak, G. L., Elwi, A., and Murry, D. W. (2001), "Testing and analysis of steel pipe segments", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.127, No.5, pp.408-417.
11. Pettibone, C. H. and Amster, K. H. (1967), "Distribution of soil pressure on concrete pipe", *Journal of Pipeline Division*, ASCE, Vol.93, No.2, pp.85-102.
12. Potts, D. M. and Zdravkovic, L. (1999), *Finite element analysis for geotechnical engineering: theory and applications*, Thomas Telford limited.
13. Sargand, S. M. and Hazen, G. A. (1998), *Field verification of standard installation (SIDD) method for concrete pipe*, Ohio University, Ohio Research Institute for Transportation and the Environment, Civil Engineering Department.
14. Shmulevich, I., Galili, N., and Foux, A. (1985), "Soil stress distribution around buried pipe", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol.112, No.5, pp.481-493.
15. Spangler, M. G. (1941), *The design of flexible pipe culvert*, Bulletin 153, Iowa State College.
16. Todeschini, C. E. Bianchini, A. C., and Kesler, C. E. (1964), "Behavior of concrete columns reinforced with high strength steels", *ACI Journal*, Proceeding, Vol.61, No.5, pp.710-716.
17. Zarghamee, M. S. and Fok, K. L. (1990), "Analysis of prestressed concrete pipe under combined loads", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.116, No.7, pp.2022-2039.

Received : September 5<sup>th</sup>, 2013

Revised : September 30<sup>th</sup>, 2013

Accepted : December 12<sup>th</sup>, 2013