

지중매설관로의 동적응답에 미치는 지반반력계수의 영향

Effect on Coefficient of Subgrade Reaction on Dynamic responses of Buried Pipelines

정진호* · 이광열*† · 강효섭**

Jin-Ho Jeong*, Kwang-Yeol Lee*† and Hyo-Sub Kang**

(Received 13 March 2017, Revision received 11 April 2017, Accepted 12 April 2017)

Abstract: We have examined the effect of values of subgrade reaction coefficient on the dynamic responses(displacement and strain responses) of the buried concrete pipeline of which the end boundary condition is the fixed ends. We have carried out the dynamic analysis of mode superposition method with representative values of coefficient of subgrade reaction applicable to the classified rock masses. We have found that the effect of subgrade reaction coefficient on the dynamic responses of the pipeline appears noticeable for the seismic waves having relatively high frequency and low apparent propagation velocity.

Key Words : Buried pipeline, Coefficient of Subgrade Reaction, Displacement response, (Bending)Strain response.

1. 서 론

본 연구는 지반반력계수 값이 매설관로의 동적 응답에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 매설관이 놓이는 암반상태를 풍화암, 연암, 보통암, 경암으로 분류한 후 분류된 암반에 적용 가능한 대표적인 지반반력계수 값을 입력자료로 하여 모드중첩법에 의한 동적해석을 수행하였다. 주어진 매설관 단부 경계조건은 양단고정으로 한정하였다. 축방향과 축직각 방향에 대한 매설관의 변위응답

과 (휨)변형률 응답을 구하였으며, 이들 결과로부터 지반반력계수 값이 매설관로의 동적거동에 미치는 영향을 검토하였다. 매설관은 탄성기초 위에 놓인 보로서 그리고 지진파는 정현파 형태의 지반변위로 모형화 하였다. 해석에 적용한 정현파의 전파속도(V)와 지반진동수($\bar{\omega}$)는 국내에서 적용 가능한 기능수행 지진파에 적용 가능한 범위를 고려하여 상, 하한값으로 지반운동 파장(ζ)이 62.8 m인 300 m/sec, 30 rad/sec 그리고 지반운동 파장(ζ)이 2513.3 m인 2000 m/sec, 5 rad/sec로 선정하였다.

*† 이광열(교신저자) : 동서대학교 건축토목공학부
E-mail : civklee@gdsu.dongseo.ac.kr, Tel : 051-320-1819
*정진호 : 부경대학교 토목공학과
***강효섭 부경대학교 해양공학과 박사후 연구원

*† Kwang-Yeol Lee(corresponding author) : Department of Division of Architecture & Civil Engineering, Dongseo University.
E-mail : civklee@gdsu.dongseo.ac.kr, Tel : 051-320-1819
*Jin-Ho Jeong : Department of Civil Engineering, Pukyong National University.
***Hyo-Sub Kang, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Post-doctoral researcher.

2. 암반별 지반반력계수 대표값

본 논문에 사용된 지반반력계수 값들은 지중구조물의 내진설계 지침에 제시된 암반 분류별 정적 지반물성치와 동적 지반물성치를 이용하여, 도로교 설계기준해설(2008)⁴⁾에 제시된 산정식에 의해 결정되었다. 연직방향과 수평방향의 지반반력계수는 동일하다고 가정하였으며 Table 1에 수록하였다.

Table 1 Coefficient of subgrade reaction used in the analysis

| Rock | Dynamic coefficient of subgrade reaction | |
|----------------|--|----------------------|
| | K_V (N/m^3) | K_H (N/m^3) |
| Weathered rock | 5.78E+08 | 5.78E+08 |
| Soft rock | 2.89E+09 | 2.89E+09 |
| Moderate rock | 9.64E+09 | 9.64E+09 |
| Hard rock | 1.35E+10 | 1.35E+10 |

3. 매설관로의 동적응답 해석

Table 2는 매설관로의 재료특성이다. 지진파는 단위 진폭과 각진동수($\bar{\omega}$)을 가진 정현파 형태의 지반 변위로 모형화 하였고, 겉보기 전파속도

Table 2 The geometric and material properties of the pipeline

| Classification | | Symbol (Unit) | Applied value |
|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Concrete pipe | Average diameter | D (m) | 2.0 |
| | Thickness | t (m) | 0.15 |
| | Length | L (m) | 100 |
| | Modulus of elasticity | E_p (N/m^2) | 2.07×10^{10} |
| | Cross-sectional area | A (m^2) | 0.94248 |
| | Moment of inertia | I (m^4) | 0.47389 |
| | Mass per unit length | m (kg/m) | 2.0735×10^3 |

(V)로 매설관로 좌측 끝단($x=0m$)에서부터 우측($x=100m$)으로 전파된다. 파가 매설관의 전체길이를 통과한 후, 매설관은 전장에 걸쳐 동일한 크기를 가진 정현파 형태의 지진파를 받게 된다.

3.1 매설관의 변위와 (휨)변형률 산정식

관로의 각 지점 위치별로 강제진동으로 인해 발생하는 변위 및 (휨)변형률을 산정할 수 있는 식을 유도하였다. 축방향 변위응답 산정식은 Table 3에, 그리고 축직각 방향 변위응답 산정식은 Table 4에 수록하였다. Labi(1995)⁵⁾는 양단자유관로에 대해 동적응답식을 제안한 바 있다.

Table 3 Displacement and strain in axial vibration

| | | |
|------------|--------------|---|
| Fixed ends | Displacement | $v_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sin \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$ |
| | Strain | $\epsilon_A(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k\pi}{L} \cos \frac{k\pi y}{L} q_k(t)$ |

Table 4 Displacement and bending strain in transverse vibration

| | |
|---|--|
| Fixed ends, Displacement: | |
| $w_T(y,t) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \right. \\ \left. \{ \cosh(\beta_k y) - \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) - \sin(\beta_k y) \right\}$ | |
| Fixed ends, bending strain: | |
| $\epsilon_T(y,t) = \frac{D}{2} \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \beta_k^2 \left\{ \frac{\sin(\beta_k L) - \sinh(\beta_k L)}{\cosh(\beta_k L) - \cos(\beta_k L)} \right. \\ \left. \{ \cosh(\beta_k y) + \cos(\beta_k y) \} + \sinh(\beta_k y) + \sin(\beta_k y) \right\}$ | |

3.2 매설관의 지점 위치별 변위응답

정 등(2006)¹⁻³⁾은 최대 변형률을 나타내는 임계 파장이 존재하며, 임계파장까지는 변형률이 급격히 증가하고 임계파장 이후에는 감소하나 파장 200 m 이후로는 감소된 값으로 일정한 값에 수렴한다고 하였고, 이런 관점에서 각각 전파속도(V), 300 m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 30 rad/sec과 2000 m/sec, 5 rad/sec인

두 가지 정현파를 해석에 사용하였다.

3.2.1 축 방향 정상상태 변위응답

Fig. 1에서와 같이 축 방향 정상상태 변위응답은 모든 정현파에 대해서 0으로 나타나지만 관로 지점 위치별로는 변위응답이 다르게 나타나며 관로 중앙 지점을 중심으로 좌우 대칭으로 나타난다. 이는 양단구속 경계조건이 대칭임에 기인하는 것이다.

전파속도(V), 300 m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 30 rad/sec일 경우처럼 지반파장($\lambda=62.8$ m)이 짧은 경우에는 암반종류별에 대한 변위응답 거동은 경암과 보통암에서는 거의 비슷한 거동을 보이며 연암과 풍화암 순으로 변위응답 거동이 작게 나타난다. 이는 지반반력계수가 동적거동에 영향을 미친다는 의미이다. 즉 경암, 보통암에서의 축방향 변위응답이 1.0인데 비해 풍화암에서의 변위응답은 약 0.85로 나타나 약 15% 작은 변위거동이 발생한다. 이는 풍화암의 경우에는 매설관로가 지반운동과 일체화가 되지 않음으로 인해 상대적인 미끄러짐 현상이 발생함을 나타낸다. 반면에 전파속도(V), 2000 m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 5 rad/sec일 경우처럼 지반파장($\lambda=2513.3$ m)이 클 경우에는 매설관로의 정상상태 변위응답은 충분한 진동에 의해 암반의 종류에 관계없이 축방향 변위응답은 1.0으로 매설관은 지반과 일체가 되어 함께 진동함을 보이고 있다. 이로써 주어진 전파속도에 지반진동수가 낮고 지반파장이 커면 지반반력계수는 동적거동에 거의 영향이 없는 것으로 보여진다.

3.2.2 축 직각방향 정상상태 변위응답

Fig. 2는 축 직각방향 정상상태 변위응답을 나타낸 것으로서 축방향 변위응답에서와 같이 전파속도(V), 300 m/sec에서는 지반반력계수의 영향이 나타난다. 정현파의 특성에 관계없이 변위응답은 관로 중앙지점을 중심으로 좌우 대칭으로 나타난다. 양단고정 조건에 대해서 전파속도(V)에 관계없이 최대 변위점이 2~3개가 나타남을 보이고 있다. 이는 양단 단부 구속조건이 대칭 구조물에서 진동모드가 공진 발생 때까지 중첩됨에 따라 나타나는 진동현상의 특성에 기인하는 것으로 보여진다.

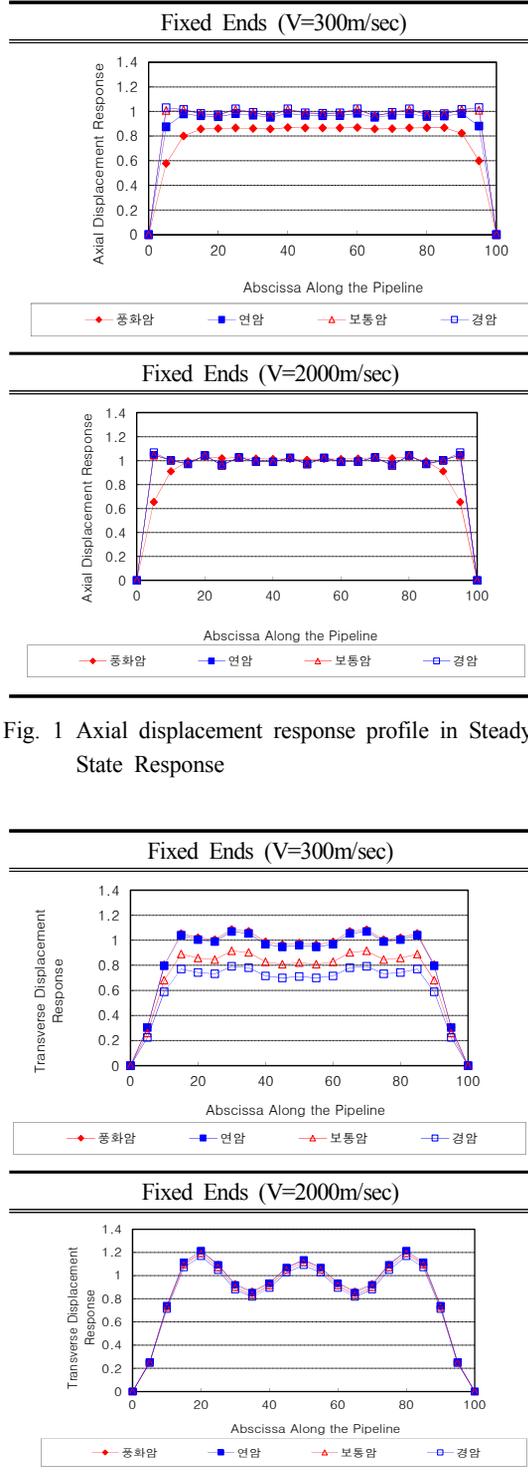


Fig. 1 Axial displacement response profile in Steady State Response

Fig. 2 Transverse displacement response profile

3.2.3 매설관의 지점위치별 (휨)변형률 응답

Fig. 3은 축방향 휨 변형률, Fig. 4는 축직각방향 휨 변형률을 나타낸 그림으로서 파가 진행함에 따라 정상상태 (휨)변형률은 관로 중심에 대해서 좌우 대칭으로 나타나며 양단 지점(x=0 m와 100 m)에서 변위는 구속됨으로 인해 변형률은 최대응답을 보이게 된다.

전과속도(V), 300 m/sec와 2000 m/sec일 경우 발생하는 축방향 휨 변형률을 비교하면 Fig. 3에서와 같이 양단 고정단에서는 비슷하게 발생하나 관로 각 지점별에서는 전과속도 300 m/sec일 때가 더 큰 변형률이 나타난다. 이는 주어진 관로 길이에 대해 진행파의 파장이 미치는 영향으로 보인다. 반면에 암반종류에 따른 휨 변형률은 거의 비슷한 거동으로 나타난다. 이는 지반반력계수가 휨 변형률에 미치는 영향이 미소함을 의미한다. 축직각방향 휨 변형률도 Fig. 4에서와 같이 아주 미소량이 발생하며 지반반력계수의 영향은 거의 없는 것으로 보인다.

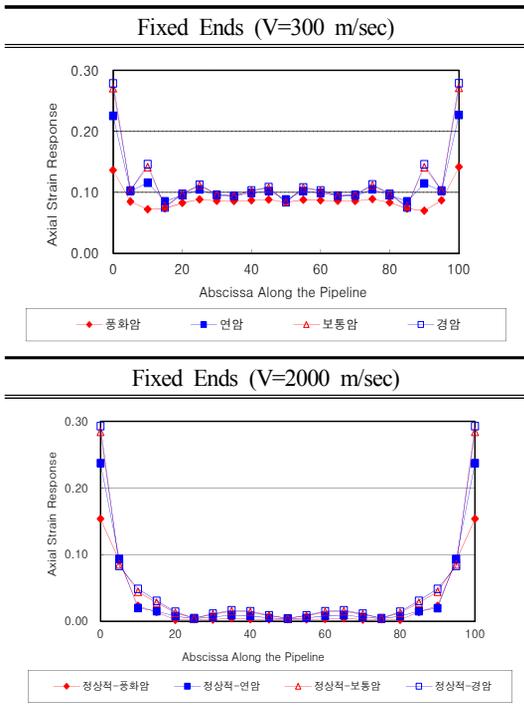


Fig. 3 Axial strain response profile in steady state

현재까지 지반반력계수가 매설관로의 동적응답에 미치는 인자를 검토해 본 결과, 지반진동수가 높고 다시 말해, 지반운동 파장이 짧을 경우, 정상상태 응답에서 지반반력계수가 동적응답(변위응답, (휨)변형률 응답)에 영향을 미치지만 지반진동수가 낮을 경우(지반운동 파장이 긴 경우)에는 지반반력계수는 동적응답에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

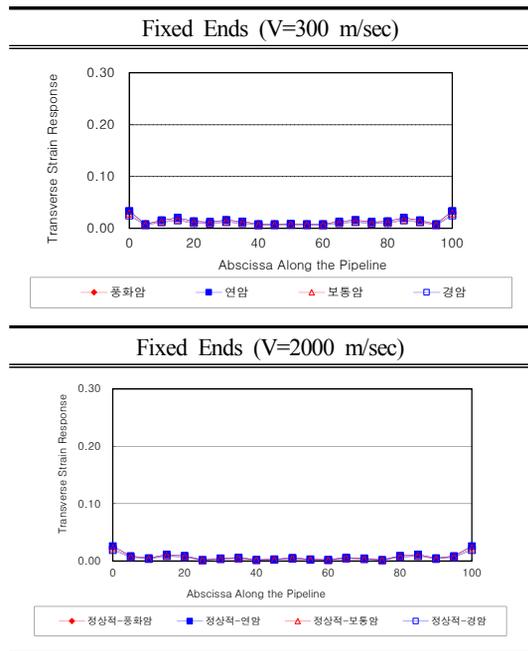


Fig. 4 Transverse bending strain response profile

4. 모드 중첩법 해석결과 검증

본 연구에 사용한 모드 중첩법 동적해석의 정확성을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 국내에서 적용하는 기능수행수준의 인공지진파를 이용하여 Ogawa 등(2001)이 제시한 변형률과 비교를 하였다. Fig. 6은 기능수행수준 지진파의 변위응답 스펙트럼을 나타낸 그림이다.

Ogawa 등(2001)은 지진파를 수평방향으로 정형파 형태의 파가 전파된다고 가정하여 최대 지반 변형률(ϵ_G)과 지반과 매설관의 변위비를 나타내

는 변환계수(α_0)를 사용하여 축방향 변형률(ϵ_s)을 산정하는 식 (2)를 제안하였다.

$$\epsilon_G = \frac{2\pi}{L} U_h \quad (1)$$

여기서, L : 파장(L_a), U_h : 지반 변위

$$\epsilon_s = \alpha_0 \times \epsilon_G \quad (2)$$

여기서, $\alpha_0 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L_a}\right)^2}$

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{EA}}$$

L_a : 매설관 축방향으로 전파되는 파의 파장

λ_1 : 축방향 지반반력계수

E : 콘크리트관의 탄성계수

A : 관의 단면적

본 해석에 이용한 전파속도(V), 2000 m/sec 지반진동수($\bar{\omega}$), 5 rad/sec의 정현파에 대한 주기는 1.25 sec이며 지반운동 파장은 2513.3 m이다. 따라서 Fig 4.2로부터 주기 1.25 sec일 때 최대 지반변위(U_h)는 0.009102 m이므로 최대 지반변형률은 식 (1)을 이용하고, 변환계수는 식 (2)를 이용하여 산정되며 따라서 주기 1.25 sec일 때 매설관의 최대 축방향 변형률(ϵ_s)은 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \alpha_0 \times \epsilon_G = 0.9998 \times 2.28 \times 10^{-5} \\ &= 2.28 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

본 해석에 이용한 모드 중첩법에 의한 풍화암 기초지반의 양단고정 매설관의 중앙부 축 변형률 산정 결과는 Table 6과 같다. 계산 근거는 풍화암에 대해, 양단자유 단부조건을 가진 매설관의 변형률은 Table 5에서와 같이 0.00293로 산정되었다. 따라서 실제 매설관의 변형률은 여기 주기 1.25 sec에 해당하는 지반변위를 곱함으로써 산정되며, $0.00293 \times 0.009102 = 2.67 \times 10^{-5}$ 이 된다. Table 6은 주기 1.25 sec($V=2000$ m/sec, $\bar{\omega}=5$ rad/sec)와 0.21 sec($V=300$ m/sec, $\bar{\omega}=30$ rad/sec)인 정현파로부터 양단고정 매설관로 중앙지점 위치에서 본 해석으

로 산정된 축방향 변형률을 이용한 값과 Ogawa 등(2001)⁶⁾이 제시한 식에 의해 산정된 변형률 값을 수록하여 비교하였다. 이 표에서 알 수 있듯이 양단고정 매설관로의 중앙부($x=50$ m)에 대한 축방향 변형률은 거의 비슷한 결과를 보이고 있어 정확성을 검증할 수 있다고 하겠다.

Table 5 Maximum (bending) strain profile

| | | |
|-----------------------|----------------|--------------|
| Classification | | V=2000 m/sec |
| | | x=50 m |
| Axial strain response | Weathered rock | 0.00293 |

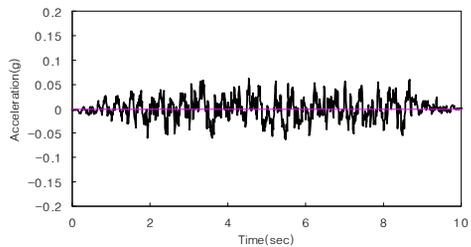


Fig. 5 Acceleration record of operating level for artificial earthquake

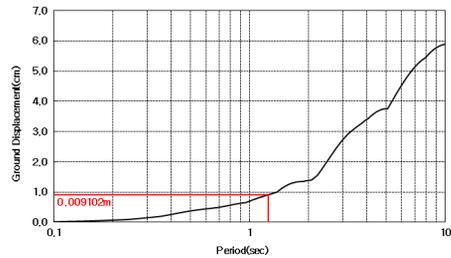


Fig. 6 Displacement response spectrum of operating level for artificial earthquake

Table 6 Comparison of axial strains for V=2000 m/sec, $\bar{\omega}=5$ rad/sec(T=1.25 sec)

| | |
|-----------------------|-----------------------|
| Ogawa et al | Fixed ends |
| | x=50 mm |
| 2.28×10^{-5} | 2.67×10^{-5} |

5. 결 론

1) 축방향 변위응답 :

전파속도(V), 300 m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 30 rad/sec일 경우와 같이 지반파장($\lambda=62.8$ m)이 짧은 경우에는 경암과 보통암에서는 거의 비슷한 거동을 보이며 연암과 풍화암 순으로 변위응답 거동이 작게 나타남으로써 지반반력계수가 동적거동에 영향을 미침을 알 수 있다. 즉 경암, 보통암에서의 축방향 변위응답이 1.0인데 비해 풍화암에서의 변위응답은 약 0.85로 나타나 약 15% 작은 변위거동이 발생한다.

반면에 전파속도(V), 2000 m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 5 rad/sec일 경우와 같이 지반파장($\lambda=2513.3$ m)이 클 경우에는 암반의 종류에 관계없이 축방향 변위응답은 1.0으로 매설관은 지반과 일체가 되어 함께 진동함을 보이고 있다. 이로써 주어진 전파속도에 지반진동수가 낮고 지반파장이 커면 지반반력계수는 동적거동에 거의 영향이 없는 것으로 나타난다.

2) 축직각방향 변위응답:

전파속도(V), 300 m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 30 rad/sec일 경우와 같이 지반파장($\lambda=62.8$ m)이 짧은 경우에는 암 종류별로 변위거동이 상이하게 나타나 지반반력계수의 양향이 있음을 보이고 있다. 반면에 전파속도(V), 2000 m/sec, 지반진동수($\bar{\omega}$), 5 rad/sec일 경우와 같이 지반파장($\lambda=2513.3$ m)이 클 경우에는 지반반력계수의 영향은 없는 것으로 나타난다. 파가 진행함에 따라 관로 내에서 최대 변위점이 2, 3개씩 나타나는 현상은 대칭 구조물에서 진동모드가 공진 시까지 중첩됨에 따라 나타나는 진동현상의 특성에 기인하는 것으로 보여진다.

3) (휨)변형을 응답

축 방향과 축 직각방향 휨 변형율은 파가 진행함에 따라 관로 중심에 대해서 좌우 대칭으로 나타나며 양단 지점($x=0$ m와 100 m)에서 변위가 구속됨으로 인해 변형율은 최대응답을 보인다. 기초지반

의 암반 종류에 관계없이 거의 비슷한 휨 변형률 거동을 보이므로 지반반력계수의 영향은 휨 변형률에 대해선 미미한 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

References

1. J. H. Jeong, D. H. Jung, B. G. Lee and B. H. Park, 2005, "Analysis of Seismic Response of the Buried Pipeline with Pipe End Conditions", Korean Geotechnical Society, No. 2, Special Publication, Vol. 21. No. 5, pp. 33-43.
2. J. H. Jeong, B. G. Lee, J. Y. Shin, B. H. Jang and B. H. Park, 2005, "Dynamic Behavior of a Buried pipeline with Fixed-Free Ends", Korean Society of Civil Engineerings, Vol. 25, No. 1C, pp. 15-25.
3. J. H. Jeong, S. B. Kim, D. H. Jung and K. Y. Lee, 2006, "Development of Curve Fitted Equations for Dynamic Behavior of Various Buried Pipelines", Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 10, No. 4, pp. 25-33.
4. Korean society of civil engineers, Korea Bridge Design & Engineering Research Center, 2008, "Commentary of Korean Highway Bridge Design Code".
5. A. Larbi. (1995), "Earthquake Resistance of Buried Pipelines", Ph.D. Thesis, Drexel University, pp. 23-43.
6. Y. Ogawa, and T. Koike, 2001, "Structural design of buried pipelines for severe earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 21, pp. 199-209.