한국동력기계공학회지 제23권 제5호 pp. 44-50 2019년 10월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2019.23.5.044
Vol. 23, No. 5, pp. 44-50, October 2019

지하구조물의 단면력에 미치는 지반반력계수의 영향
The Effect of Coefficient of Subgrade Reaction for Section Forces of Underground Structure

정진호* · 이석준**† · 변형석***
Jin-Ho Jeong*, Seok-Jun Lee**† and Hyung-Suk Byun***

(Received 19 August 2019, Revision received 28 August 2019, Accepted 28 August 2019)

Abstract: In this study, the foundations of underground structure have been adopted as weathered rock, soft rock, moderate rock, and hard rock, and the values of coefficient of subgrade reaction for these foundations have been calculated and applied to the seismic analysis to find their effects on the section forces (displacement and bending stress responses) of the underground structure. Dynamic analysis using the mode superposition method has been carried out to analyze the sectional behaviors of the underground structure. The least displacement and bending strain responses appeared in weathered rock having the smallest value of coefficient of subgrade reaction followed by soft rock, moderate rock, and hard rock, in the order of precedence, identically to the order of their values of coefficient of subgrade reaction.

Key Words : Coefficient of Subgrade Reaction, Section Forces (Displacement and Bending Strain Responses)

1. 서 론

정 등[1]은 모드중첩법을 이용한 동적해석에서 구조물을 탄성기초 위에 놓인 보로서 모형화한 후 지반반력계수가 구조물의 동적응답에 미치는 영향을 관경 1.0 m의 콘크리트관에 대해 해석한 바 있다. 본 논문에서는 관경 8.0 m의 대형 암거에 대해 동일한 해석법을 적용할 경우 지반반력계수가 구조물 단면력에 미치는 영향을 검토하였다. 그리고 구해진 단면력이 우리나라에 적용 가능한 지진규모에 대해 안전한지의 여부를 검토하였다.

2. 해석 단면과 지반반력계수 값

Table 1은 해석에 이용된 원형 암거로서 재료특성을 나타낸다. 암거 구조물이 설치될 위치의 지반에 대한 지반반력계수는 각종 지반조사 및 시

**† 이석준(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2376-1526) : 과장, ㈜삼영기술
E-mail : anmak777@naver.com, Tel ※ 개인정보 표시제한
*정진호(ORCID:http://orcid.org/0000-0001-5721-6548) : 교수, 부경대학교 토목공학과
***변형석(ORCID:http://orcid.org/0000-0001-9062-0091) : 차장, ㈜건화

**† Seok-Jun Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-2376-1526): Section Chief, SamYoung Technology Co., Ltd.
E-mail : anmak777@naver.com, Tel.※ 개인정보 표시제한
*Jin-Ho Jeong(ORCID;http://orcid.org/0000-0001-5721-6548) : Professor, Dept. of Civil Engineering, Pukyong National Univ.,
***Hyung-Suk Byun(ORCID:http://orcid.org/0000-0001-9062-0091) : Deputy General Manager, Kunhwa Engineering&Consulting Co., Ltd.

Table 1 Material properties of the concrete culvert

Classification		Symbol (Unit)	Applied values
Concrete culvert	Average diameter	D (m)	8.0
	Thickness	t (m)	0.3
	Length	L (m)	100
	Modulus of elasticity	E_P(N/㎡)	2.07×10^{10}
	Cross-sectional area	A (㎡)	7.25
	Moment of inertia	I (m^4)	53.8656
	Mass per unit length	m(kg/m)	1.8142×10^{3}

Table 2 Dynamic coefficient of subgrade reaction used in the analysis

Classification	Static		Dynamic	
	K_H (N/m^2)	K_V (N/m^2)	K_H (N/m^2)	K_V (N/m^2)
Weathered rock	1.70E+08	1.70E+08	2.05E+08	2.05E+08
Soft rock	8.52E+08	8.52E+08	1.02E+09	1.02E+09
Moderate rock	2.84E+09	2.84E+09	3.41E+09	3.41E+09
Hard rock	3.98E+09	3.98E+09	4.77E+09	4.77E+09

험결과에 의해 얻어진 변형계수와 기초의 재하폭 등의 영향을 고려하여 정하는 것을 원칙으로 한다.

지반반력계수의 산정은 도로교설계기준[2](하부구조 편)의 식을 이용하거나, 또는 동적 전단계수로부터 구한 지반탄성계수와의 관계식을 이용하여 구할 수 있으며, 그 결과는 Table 2에 수록하였다.

3. 암거의 강제진동

3.1 축방향과 축직각방향의 강제진동

암거는 탄성기초 위에 놓인 보로서 모형화 되었다. 파의 전파는 좌측 끝단(t=0)에서 전파된다. 축방향 진동에서 암거의 거동을 지배하는 방정식은 식 (1)과 같다.

$$m\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial t^2}+C_A\frac{\partial v(y,t)}{\partial t}+K_A v(y,t)-E_pA\frac{\partial^2 v(y,t)}{\partial y^2} = C_A\frac{\partial v_g(y,t)}{\partial t}+K_A v_g(y,t) \quad (1)$$

Table 3 Displacement and strain in axial vibration (Larbi, 1995)

Classification		Result
Free Ends	Displacement	$v_A(y,t)=\sum_{k=1}^{\infty}\cos\frac{(k-1)\pi y}{L}q_k(t)$
	Strain	$\epsilon_A(y,t)=-\sum_{k=1}^{\infty}\frac{(k-1)\pi}{L}\sin\frac{(k-1)\pi y}{L}q_k(t)$

Table 4 Displacement and bending strain in transverse vibration(Larbi, 1995)

Classification	Result
Displacement	$w_T(y,t)=\sum_{k=1}^{\infty}q_k(t)*\left\{\frac{\sin(\beta_kL)-\sinh(\beta_kL)}{\cosh(\beta_kL)-\cos(\beta_kL)}\{\cosh(\beta_ky)+\cos(\beta_ky)\}+\sinh(\beta_ky)+\sin(\beta_ky)\right\}$
Bending Strain	$\epsilon_T(y,t)=\frac{D}{2}\sum_{k=1}^{\infty}q_k(t)\beta_k^2*\left\{\frac{\sin(\beta_kL)-\sinh(\beta_kL)}{\cosh(\beta_kL)-\cos(\beta_kL)}\{\cosh(\beta_ky)-\cos(\beta_ky)\}+\sinh(\beta_ky)-\sin(\beta_ky)\right\}$

여기서, vg(y,t) : 축방향 지반 변위

암거의 축방향 양단자유 단부 경계조건에 대한 변위($v_A(y,t)$)와 변형률($\epsilon_A(y,t)$) 산정식은 Table 3과 같다.

축직각방향 지반 변위를 갖는 암거의 거동에 대한 미분 방정식은 식 (2)와 같다.

$$m\frac{\partial^2 w(y,t)}{\partial t^2}+C_T\frac{\partial w(y,t)}{\partial t}+K_T w(y,t)+E_pI\frac{\partial^4 w(y,t)}{\partial y^4} = C_T\frac{\partial w_g(y,t)}{\partial t}+K_T w_g(y,t) \quad (2)$$

여기서, wg(y,t) : 축직각방향 지반변위

축직각방향 양단자유 단부 경계조건에 대한 변위($W_T(y,t)$), 휨변형률($\epsilon_T(y,t)$) 산정식[3]은 Table 4와 같다.

4. 암거의 동적응답

최대 변위와 (휨)변형률 발생 지점 산정을 위해 지점위치별 변위와 (휨)변형률응답을 해석하였다.

전파속도(V), 300 m/sec와 지반진동수($\overline{\omega}$), 30 rad/sec 경우에 대해 해석하였으며, 축방향 및 축직각방향 양단자유 단부 경계조건에 따른 지점위치별 변위 및 (휨)변형률응답을 나타내었다.

일시적 응답은 암거의 전장을 통과하기 전에 나타나는 동적응답으로 정의된다. 이것은 파가 암거의 전장을 통과할 때까지 계속된다. 또한 암거가 정상상태에 도달하기 전에 몇 개의 진동을 받을 만큼 충분한 시간을 가지며 일시적 응답의 지속 시간보다 높은 진동수를 가진 지반 거동에서

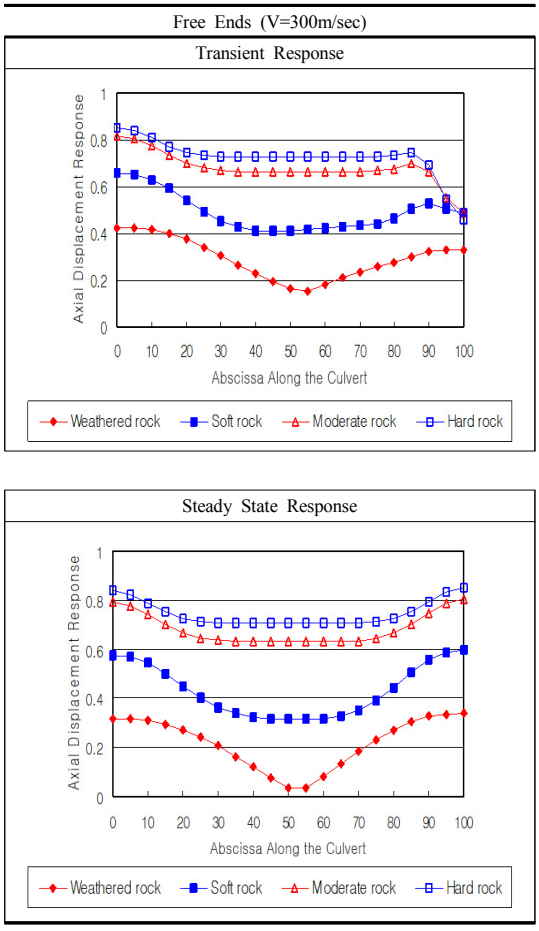

Fig. 1 Axial displacement response profile

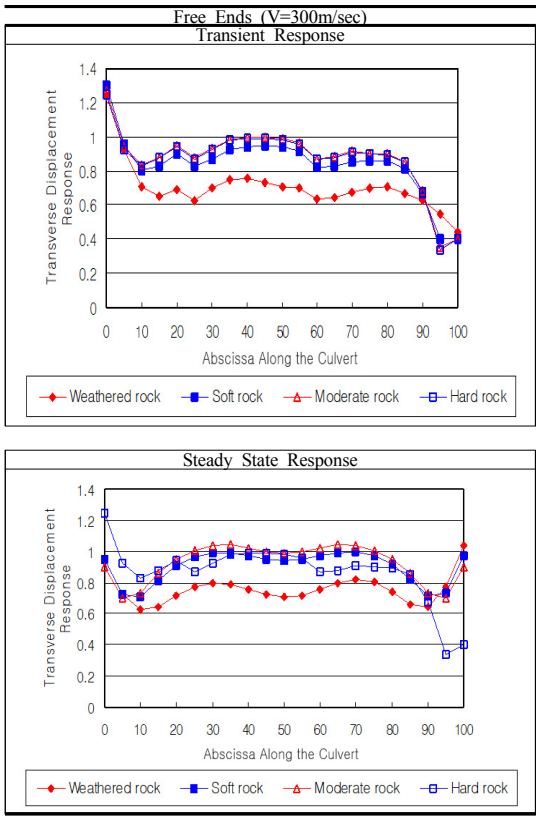

Fig. 2 Transverse displacement response profile

더욱 뚜렷하게 나타난다. 그리고 정상적 응답은 파가 암거의 전장을 통과한 후, 정현파 하중이 지속적으로 가해지는 상태의 동적응답을 정상상태 응답이라고 정의된다.

4.1 암거의 지점위치별 변위와 (휨)변형률 응답

양단자유 단부 경계조건에 대해 암거의 축방향과 축직각방향에 대해서 해석하였으며 해석에 적용된 파의 특성으로서는 전파속도(V)=300 m/sec, 지반진동수($\overline{\omega}$)=30 rad/sec, 파장(λ)=62.83 m)인 경우에 대해 첫 번째 모드에서 산정된 감쇠비(ζ_1) 80%를 적용하였다. 이 해석의 결과는 Fig. 1~2에 나타내었다.

4.1.1 지점위치별 변위응답

Fig. 1은 전파속도(V) = 300 m/sec, 지반진동수($\overline{\omega}$) = 30 rad/sec에 대한 양단자유 단부 경계조건

에 따른 지점위치별 축방향 변위응답을 나타낸 것이며, Fig. 2는 같은 조건에 대해서 축직각방향 변위응답을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 일시적 응답의 경우 파의 전달이 암거 전장을 통과하지 못하고 있는 상태라 100 m 지점은 시작점인 0 m 단부에서보다 변위응답이 낮게 산정되며 정상적 응답에서는 단부 양끝에서 최대 변위응답을 보이며 암거 중간지점에서 낮은 변위응답 거동을 보인다. 이러한 경향은 지반반력계수값의 크기에 관계없이 동일한 경향을 보이지만 지반반력계수값이 가장 작은 풍화암에서 최저변위응답을보이며 지반반력계수 값이 커지는 순서인 연암, 보통암 그리고 경암 순으로 높은 변위응답을 나타낸다.

4.1.2 지점위치별 변형률응답

Fig. 3은 축방향 양단자유 암거에 대한 변형율 응답을, Fig. 4는 축직각 방향에 대한 변형율 응답

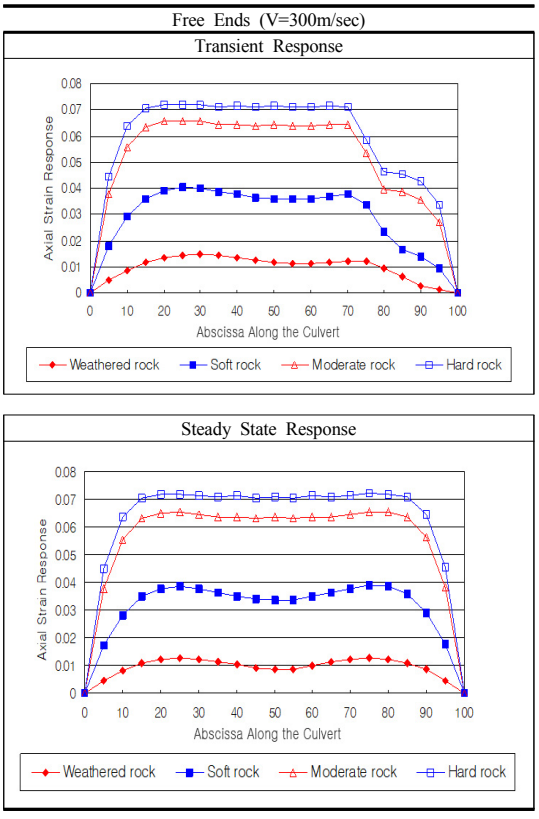

Fig. 3 Axial strain response profile

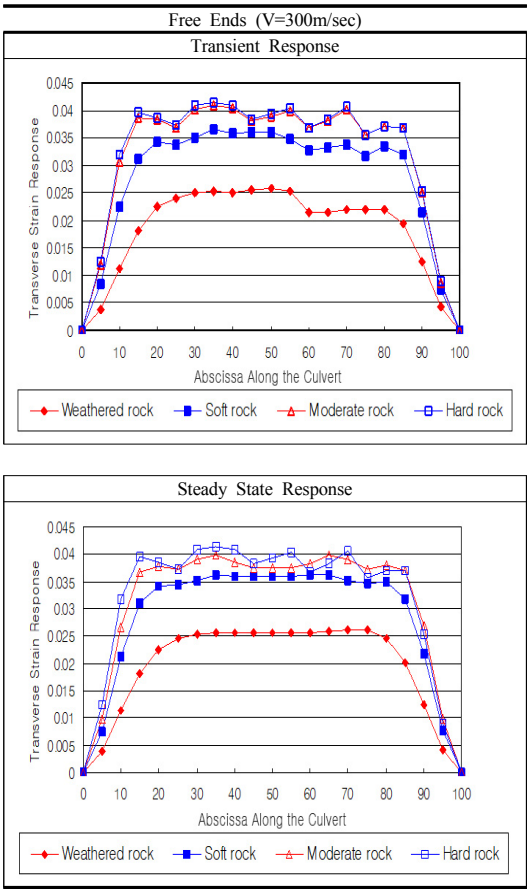

Fig. 4 Transverse bending strain response profile

을 보인다. 양단 끝단부는 자유단이므로 변형율은 0으로 나타나며 전구간에 걸쳐 각 지점별 변형율 응답이 다르게 나타난다. 일시적응답에서 100 m 지점의 끝단은 낮은 변형율을 보이는데, 이는 아직 파의 전달이 암거 전장을 통과하지 못함에 기인하며 정상적응답에서는 축방향과 축직각방향에 대해 모두 중앙에 대한 대칭을 이루는 것으로 보인다. 실무에서 실용상 중앙부분의 변형율로 설계함이 권장되는 이유가 된다.

5. 해석결과 검증 및 구조물 안전성 검토

5.1 변위응답 스팩트럼

본 논문에 사용된 내진설계의 붕괴방지수준과

Table 5 Determinant factors for analysis

Performance objective	Collapse preven -tion level (Return period 1000 yrs.)	Operating level (Return period 100 yrs.)
Sismic class	Sismic class Ⅰ	
bed rock	S_B (Moderate rock)	
Sismic region	Ⅰ	
Sismic zone factor(Z)	0.11	
Importance factor(I)	1.40	0.57
Sismic coefficient(C_a)	0.11	0.11
Sismic coefficient(C_v)	0.11	0.11

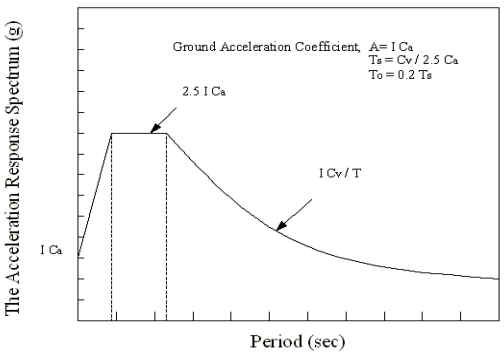

Fig. 5 Standard design response spectrum

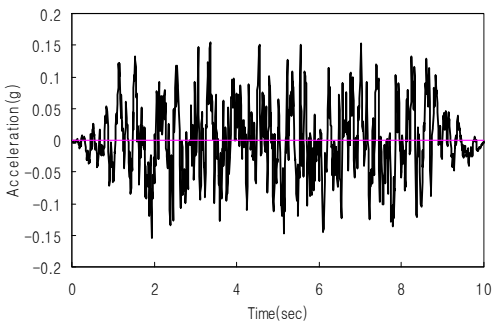

Fig. 6 Acceleration-Time graph for collapse prevention level earthquake

기능수행수준의 지진파를 생성하기 위한 표준설계응답스팩트럼 결정인자는 Table 5에 수록하였고, 이들 결정인자를 통해 표준설계응답스팩트럼(Fig. 5)을 작성한 후 인공지진파 생성 프로그램인 SIMQKE를 사용하여 S_B지반에서 0.01초 시간간격의 10초, 최대가속도 0.154 g을 만족하는 붕괴방지수준 지진기록(Fig. 6)과 최대가속도 0.063 g을 만족하는 기능수행수준 지진기록(Fig. 7)을 해석에 적용하였다. SDOF 프로그램을 통해 내진설계의 붕괴방지수준, 기능수행수준 지진의 변위응답 스펙트럼은 Fig. 8～Fig. 9에 나타내었다.

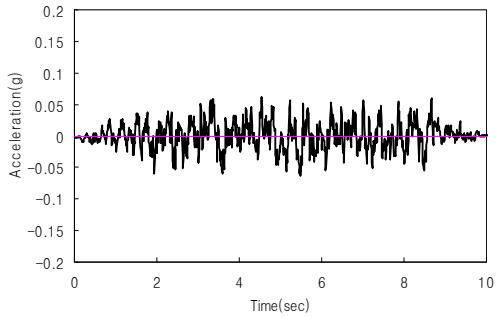

Fig. 7 Acceleration-Time graph for operating level earthquake

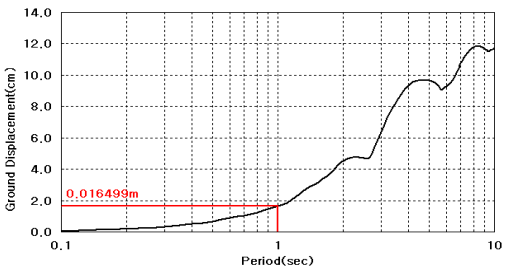

Fig. 8 Displacement response spectrum of collapse prevention level earthquake

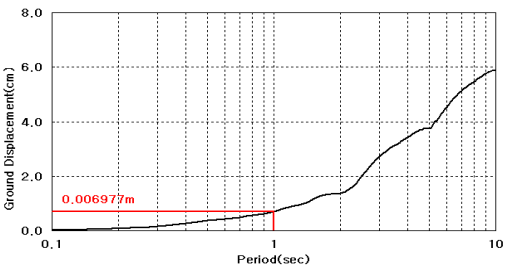

Fig. 9 Displacement response spectrum of operating level earthquake

5.2 암거구조물의 축방향, 축직각방향의 응력 평가

암거 축방향에 대한 모드중첩법 해석 결과 Fig. 3에서와 같이 풍화암지반의 양단자유 단부 경계조건을 가진 암거의 변형율은 50 m 중앙지점을 기준으로 할 때 0.011611로 산정되었다. 따라서 붕괴방지수준의 지진파에 대한 실제 암거의 변형율은 주기 1 sec에 해당하는 지반변위(0.016499)를 곱해줌으로써 산정되며[4] 다음과 같이 식 (3)과 같다.

$$\epsilon = 0.011611 \times 0.016499 = 0.000192 = 1.92 \times 10^{-4} \quad (3)$$

연암, 보통암, 경암 지반에 대해서도 동일한 방법으로 실제 암거의 변형율을 구할 수 있으며, 축방향 붕괴방지수준 시 변형률은 Table 6과 같고 축방향 기능수행수준시의 변형률은 Table 7에 수록한 바와 같다. 암거 축직각방향에 대한 모드중첩법 해석 결과, Fig. 4에서와 같이 풍화암지반의 양단자유 단부 경계조건을 가진 암거의 변형율은 50m 중앙지점을 기준으로 할 때 0.025471로 산정되었다. 따라서 붕괴방지수준의 지진파에 대한 실제 암거의 변형율은 주기 1 sec에 해당하는 지반변위(0.016499, Fig. 8)를 곱해줌으로써 산정되며 다음과 같이 식 (4)와 같다.

Table 6 Axial bending strain for collapse prevention level earthquake

Classification	Point	Axial strain	Ground displace -ment	Strain of culvert	Bending stress (N/m^2)
Weathered rock	50 m	0.011611	0.016499	1.92×10^{-4}	3.97×10^{6}
Soft rock	50 m	0.036065	0.016499	5.95×10^{-4}	12.3×10^{6}
Moderate rock	50 m	0.064067	0.016499	1.06×10^{-3}	2.19×10^{7}
Hard rock	50 m	0.071255	0.016499	1.18×10^{-3}	2.44×10^{7}

Table 7 Axial bending strain for operating level earthquake

Classification	Point	Axial strain	Ground displace -ment	Strain of culvert	Bending stress (N/m^2)
Weathered rock	50 m	0.011611	0.006977	8.10×10^{-5}	16.77×10^{5}
Soft rock	50 m	0.036065	0.006977	2.52×10^{-4}	5.22×10^{6}
Moderate rock	50 m	0.064067	0.006977	4.47×10^{-4}	9.25×10^{6}
Hard rock	50 m	0.071255	0.006977	4.97×10^{-4}	10.29×10^{6}

Table 8 Transverse bending strain for collapse prevention level

Classification	Point	Axial strain	Ground displace -ment	Strain of culvert	Bending stress (N/m^2)
Weathered rock	50 m	0.025741	0.016499	4.25×10^{-4}	8.79×10^{6}
Soft rock	50 m	0.036023	0.016499	5.94×10^{-4}	12.29×10^{6}
Moderate rock	50 m	0.038970	0.016499	6.43×10^{-4}	13.31×10^{6}
Hard rock	50 m	0.039250	0.016499	6.48×10^{-4}	13.41×10^{6}

Table 9 Transverse bending strain for operating level earthquake

Classification	Point	Axial strain	Ground displacem ent	Strain of culvert	Bending stress (N/m^2)
Weathered rock	50 m	0.025741	0.006977	1.80×10^{-4}	3.73×10^{6}
Soft rock	50 m	0.036023	0.006977	2.51×10^{-4}	5.19×10^{6}
Moderate rock	50 m	0.038970	0.006977	2.72×10^{-4}	5.63×10^{6}
Hard rock	50 m	0.039250	0.006977	2.74×10^{-4}	5.67×10^{6}

$$\epsilon = 0.025471 \times 0.016499 = 0.000425 = 4.25 \times 10^{-4} \quad (4)$$

연암, 보통암, 경암 지반에 대해서도 동일한 방법으로 실제 암거의 변형율을 구할 수 있으며 축직각방향 붕괴방지수준시 변형율은 Table 8과 같고 축직각방향 기능수행수준시의 변형율은 Table 9와 같다.

풍화암 지반에서 축방향 양단자유 경계조건의 경우 붕괴방지 수준에 대한 콘크리트 암거의 작용 휨응력은 실제 암거의 변형율(1.92×10^{-4})에 콘크리트의 탄성계수($2.07\times10^{10}\,N/m^2$)를 곱해줌으로써 산정되며 다음과 같이 식 (5)와 같다.

$$\sigma = 1.92\times10^{-4}\times2.07\times10^{10}\,N/m^2 = 3.97\times10^{6}\,N/m^2 \quad (5)$$

암거 두께 0.3 m를 기준으로 하여 축방향의 양단자유 경계조건에 대하여 응력평가를 실시한 결과, 내진설계의 붕괴방지수준과 기능수행수준 모두에 대해 풍화암<연암<보통암<경암의 순서로 큰 응력이 나타났으며, 판정 기준인 허용압축응력, $23.5\times10^{6}\,N/m^2$보다 낮은 응력으로 산정되어 모두 안전한 상태를 보인다.

6. 결 론

1) 일시적응답과 정상상태응답의 동적거동은 지반반력계수 값의 크기에 관계없이 같은 경향의 거동을 보이지만 지반반력계수 값이 가장 작은 풍화암에서 최저 변위응답을 보이고 지반반력계수값이 커지는 순서인 연암, 보통암, 그리고 경암 순으로 높은 변위가 나타난다. 이러한 전체적인 거동은 양단자유 단부 경계조건을 갖인 지하암거의 축방향과 축직각방향 모두에서 비슷한 경향으로 나타난다.

2) 양단자유 단부 경계조건을 가진 암거의 축방향과 축직각방향에 대한 변형율응답은 양단자유단에서는 0인 즉, 변형이 발생하지 않으나 각 거리별 지점들에 대해서는 변형율이 다르게 나타난다. 지반반력계수 값의 크기에 따라 뚜렷한 변형율 응답이 나타나며, 특히 정상적응답에서의 변형율 응답이 좌우 대칭적인 거동으로 나타나는 현상을 통해 실무에서 암거 중앙지점에서의 변형율로 구조물 안전성을 검토하는 것이 효율적이라 판단된다.

3) 구조물의 기초지반을 풍화암, 연암, 보통암 그리고 경암으로 간주하여 이들 지반에 대한 지반반력계수값을 산정하여 모드중첩법에 의한 동적해석을 수행한 결과, 중약진의 지진하중에 대해서 붕괴방지수준과 기능수행수준 모두에 대해서 안전한 결과로 나타났다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

J. H. Jeong; Conceptualization. S. J. Lee; Formal analysis. H. S. Byun; Writing review & editing.

References

1. J. H. Jeong, K. Y. Lee and H. S. Kang, 2017, "Effect on Coefficient of Subgrade Reaction on Dynamic Responses of Buried Pipelines", Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 83-89. (https://doi.org/10.9726/kspse.2017.21.2.083.)
2. Korean society of civil engineers, Korea Bridge Design & Engineering Research Center, 2008, "Commentary of Korean Highway Bridge Design Code".
3. A. Larbi, 1995, "Earthquake Resistance of Buried Pipelines", Ph. D. Thesis, Drexel University, pp. 23-43.
4. Y. Ogawa and T. Koike, 2001, "Structural design of buried pipelines for severe earthquake", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 21, pp. 199-209.