

지중 박스구조물의 지진시 거동 해석

Numerical Analysis for Buried Box Structures during Earthquake

박 성 진*

오 병 현**

강 보 순***

황 성 춘***

Park, Sung-Jin

Oh, Byung-Hyun

Kang, Bho-Sun

Hwang, Seong-Chun

ABSTRACT

Numerical analysis of slope stability is presented using seismic displacement, response seismic coefficient, and earthquake response analysis methods. In seismic displacement and response seismic coefficient methods, horizontal static seismic force is considered as 0.2g while vertical static seismic force is not considered in analysis. For earthquake response analysis, Hachinohe-wave is applied. It is found from result that analysis using response seismic coefficient method is much more conservative than that using seismic displacement method. Also, analysis result using earthquake response analysis method is somewhat less conservative about 25% when compared with that using seismic displacement method.

1. 서론

건축 구조물 이외의 토목 구조물은 대부분이 장대 선형구조물로서 지중에 매설되어 있는 경우가 적지 않다. 따라서, 지중에 매설되어진 이들 구조물의 지진시 거동은 지반의 변위에 지배되고, 관성력에 대한 영향은 비교적 적기 때문에 이들의 지진시 거동을 평가하기 위한 방법으로 응답변위법이 주로 사용되고 있다. 응답 변위법의 적용에 있어서는 우선 구조물의 지진 하중을 자연지반의 지진시의 변위를 1차원 파동전달해석 혹은 FEM 등의 동적 해석에 의해 계산하고, 그것을 지반스프링을 개재시킨 구조물에 정적으로 작용시키는 것에 의해 단면력 등을 계산한다. 부재 관성력과 동수압은 필요에 따라 정하고, 시간에 관계없이 일정한 크기로 정적인 상태로 작용시킨다. FEM과 집중질량계를 사용한 해석을 수행한다면, 지반의 변형율, 구조물과 지반의 상대변위 그리고 구조물의 진동을 정확히 구하는 것이 가능하다. 그러므로 구조물이 불균질 지반이나 지층이 급변하는 곳에 위치하여 상대변위의 검토가 중요하다고 판단되는 경우나 새로운 형식의 구조물로 그 진동특성을 간단히 추정하기 어려운 경우에는 구조물과 지반을 일체로 하여 FEM 등으로 해석하는 것이 좋다. 지진 발생이 빈번한 일본을 포함한 외국에서는 지중 구조물의 내진 설계를 위해

* 창원대학 토목환경과 겸임교수

** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

*** 경주대학교 토목공학과 전임강사

**** 경주대학교 토목공학과 전임강사

여러 가지 방법들이 제안되어 있다. 특히 매설관로를 주대상으로 하여 지하석유 저장시설, LNG저장탱크, 침매 터널 등과 같은 여러 가지 구조물별로 내진 해석 지침이 제안되어 있다. 하지만, 우리나라에서는 위에서 언급한 것과 같은 지중 구조물에 대한 내진 해석 기법에 대한 지침이 거의 전무한 형편이며, 또한 이 분야의 연구 성과도 거의 없는 실정이라고 해도 과언이라고는 할 수 없다.

따라서, 본 논문에서는 일반적으로 지중 구조물의 내진 해석에 이용되어지는 여러 해석 기법들을 비교 검토하여 앞으로의 지중 구조물의 내진 해석에 있어서 하나의 방향을 제시하고자 시도해 보았다.

2. 지중 구조물의 내진 설계법

2.1 해석 방법

지중 구조물의 지진시 거동에 관한 해석적 연구는 파동론 등에 의한 연구, 유한 요소법, 다질점계 진동 모델에 의한 연구로 분류할 수 있고, 매설관로와 같은 선형 지중 구조물에 관해서는 파동론을 이용한 해석이 많다. 해석은 탄성영역으로 한정되지만 매설관과 주변지반의 동적 상호작용을 규명하는 데에는 유용하며, 이들의 연구로부터 매설관로는 대개 주변지반과 같은 모양으로 진동하는 것, 신축변형에 의한 변형율이 곡선변형에 의한 변형율보다 탁월한 것 등 실물의 매설관로에서 지진관측으로 얻어진 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 또한, FEM을 이용하는 경우, 모델의 경계조건의 처리가 가장 큰 문제중의 하나이며, 동시에, 해석할려고 하는 지중 구조물보다 충분히 떨어져 있는 주위 지반을 포함하여 해석영역을 설정하는 것이 중요하다.

2.2 내진 설계법과 설계 지진 외력

지중구조물의 내진설계법으로는 진도법, 응답변위법, 동적응답 해석법이 있지만 일반적으로는 가장 쉽게 접근되는 방법이 진도법과 응답 변위법이다. 진도법은 횡단면의 내진계산에 적용하는 경우가 많으며 구조물위의 상재 토괴와 지진시의 토압을 외력으로서 고려한다.

지반변위에 의한 내진설계법 즉, 응답변위법은 최근 지중구조물의 내진설계에서 많이 사용되고 있다. 응답변위법을 적용하는 경우에 큰 문제는 지반변위를 어떻게 입력할 것인가 하는 것이다.

수평면내에서는 정현파형 및 표충지반 연직면 내에서는 1/4 정현파형을 사용하고 있다. 그림과 같은 변위분포는 표면파의 전달 또는 실체파의 경사 입사를 가정하고 실무설계를 위해서는 간략화 작업이 필요하다. 지반변위의 연직방향 분포는 다음 식과 같다.

$$U_h(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v T_s K_h \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (2-1)$$

여기서, $U_h(z)$: 지표면에서의 심도 $z(m)$ 에서의 수평방향의 변위진폭 (m)

T_s : 표충지반의 고유주기 (s)

K_h : 내진계산상의 기반면에 대한 설계수평진도

H : 표충지반의 두께 (m)

S_v : 단위진도당 응답속도 (m/s)

예를 들어 일본의 「석유파이프라인 기술기준」, 「수도설계 내진설계지침·해설」 및 「공동구 설계지침」에서는 그림 1에 표시한 스펙트럼이, 「가스도관 내진설계지침」에서는 그림 2에 표시한 스펙트럼을 이용한다.

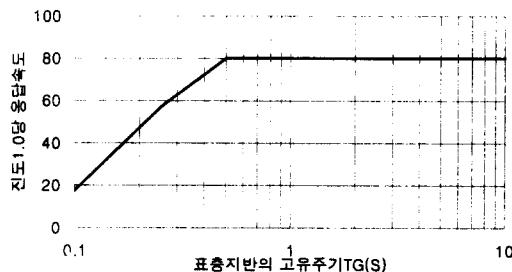


그림 1 수도시설 내진설계지침·해설 등에
의한 설계용 속도응답 스펙트럼

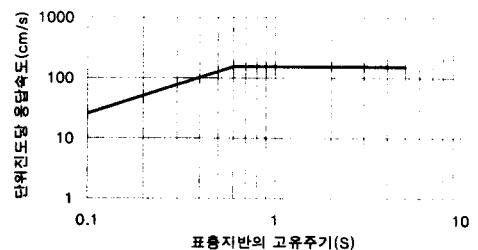


그림 2 가스도관 내진설계지침에 의한
설계용 속도응답 스펙트럼

수평방향의 파장 L 에 대해서는, 전술한 기준·지침에서는 2가지 방법이 제안되었다. 하나는 석유파이프라인, 수도시설, 공동구의 기준·지침에 들어 있는 것으로, 표충지반과 기반의 지진동에서 가장 탁월한 파동의 파장의 조화평균을 아래 식으로 계산한다.

$$L = \frac{2 L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (2-2)$$

$$L_1 = V_{DS} T_s = 4H, \quad L_2 = V_{BS} T_s \quad (2-3)$$

여기서, V_{DS} : 표충지반의 전단파속도 (m/s)

V_{BS} : 기반의 전단파속도 (m/s)

T_s : 표충지반의 고유주기 (s)

H : 표충지반의 두께 (m)

위 식에서 분명한 것은, 설계용의 파장 L 은 기반 및 표충지반을 전파하는 전단파의 파장 L_1, L_2 의 조화평균값으로서 구해진다.

「가스도관 내진설계지침」의 고압가스도관의 내진계산에서는 파장 L 을 다음과 같이 규정한다.

$$L = V T_s \quad (2-4)$$

여기서, L : 지표면에 연하는 방향의 지진동의 파장 (m)

V : 지진동의 전파속도

T_s : 표충지반의 고유주기

위 식에서 지진동의 전파속도는, 과거의 관측사례의 하한값은 그림 3에서 정하여 진다. 그러나, 여기에서 표시된 지표면에 연하는 전파속도 안에는 전파방향 등을 무시하고 측정된 것도 포함하고 있어, 필요로 하는 전파속도의 측정 데이터를 제안하기 위해서는, 이후의 관측 데이터의 축적에서는 수정하는 것이 필요하다. 표충지반의 고유주기 T_s 는, 지반을 n 개의 지층으로 나눈다. 층의 두께 H_i 와 전단파속도 V_{si} 를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

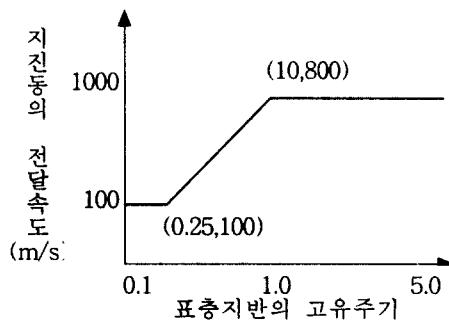


그림 3 지진동의 전달속도

$$T_s = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{H} \quad (2-5)$$

또는,

$$T_s = \frac{4H}{V_s}, \quad V_s = \sum_{i=1}^n V_{si} \frac{H_i}{H} \quad (2-6)$$

3. 해석 모델링

각 해석법에 대한 해석코드는 다음과 같으며, 모델링은 그림-4, 그림-5, 그림-6, 그림-7과 같이 실시하였다.

- ◆ 응답변위법, 응답진도법 = GALKINS
- ◆ 등가정적해석법 = AFIMEX(sanc)
- ◆ 동적해석 = AFIMEX(samba)

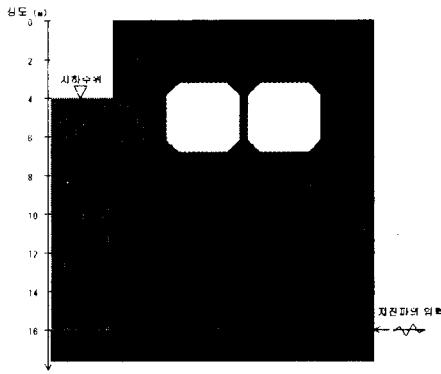


그림 4 응답변위법의 모델링도
(지반스프링을 간이법으로 산출한 경우)

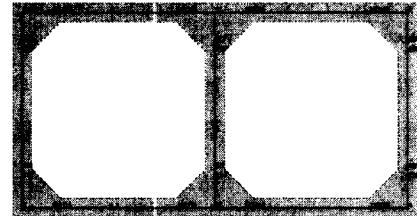


그림 5 응답변위법의 구조물의
모델링도

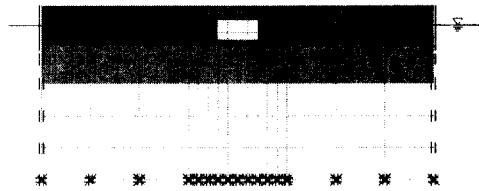


그림 6 등가정적해석 법에 적용한 모델도

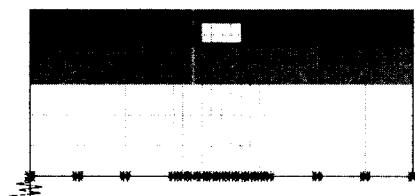


그림 7 동적해석에 적용한 모델도

해석에 적용한 물성값은 다음 표와 같다.

표 1 응답변위법에 적용한 지반정수

토층분류	감쇠정수초기치	단위체적중량(t/m^3)	포아송비	점착력(t/m^2)	내부마찰각($^\circ$)
매립토	0.03	1.75	0.4	0	20
풍화토	0.03	1.80	0.35	0	30
풍화암	0.03	2.20	0.25	0	45
연암	0.03	2.50	0.2	200	45

표 2 등가정적해석 및 동적해석에 적용한 지반정수

토층분류	탄성계수(t/m^2)	단위체적중량(t/m^3)	포아송비	점착력(t/m^2)	내부마찰각($^\circ$)
매립토	1000	1.75	0.4	0	20
풍화토	5000	1.80	0.35	0	30
풍화암	100000	2.20	0.25	0	45
연암	1000000	2.50	0.2	200	45

표 3 지중구조물의 물성값

	단성계수 (t/m^2)	단면2차모멘트 (m^4)	단면적 (m^2)	단위체적중량 (t/m^3)
상부	2000000	0.00533	0.7	2.45
양끝 벽	2000000	0.00533	0.4	2.45
하부	2000000	0.00533	0.7	2.45
중간 벽	2000000	0.00533	0.4	2.45

정적해석에서 지반의 수평진도는 $0.2g$ 를 적용하였으며, 동적해석에서는 Hachinoha파(최대가속도: $196gal$)를 적용하였다.

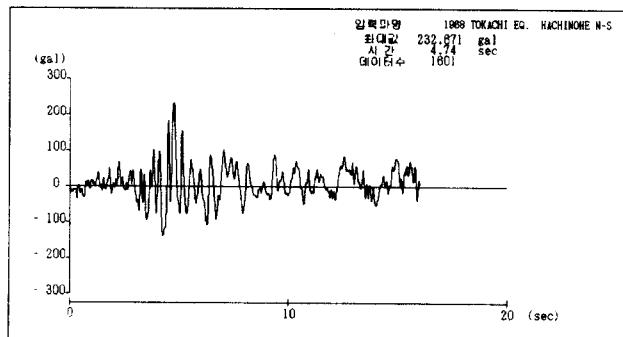
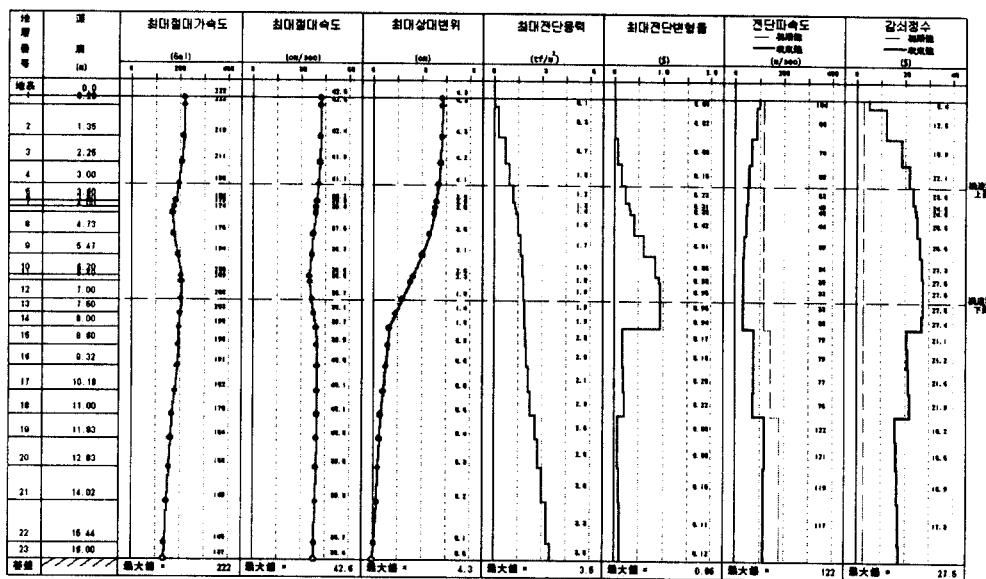


그림 8 지진동의 원파형

4. 해석결과

4.1 지반에 대한 최대응답값

최대응답치의 심도별 분포
1968 TOKACHI EQ. HACHINOHE N-S



4.2 응답변위법(지반스프링을 간이법으로 산출한 경우)

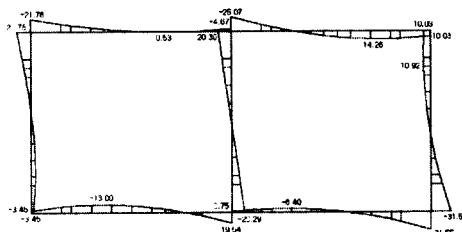


그림 9 모멘트도

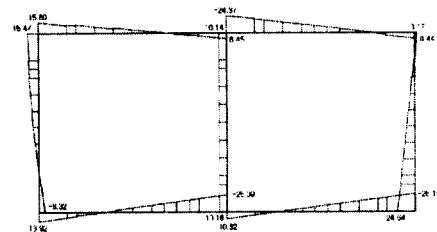


그림 10 전단력도

4.3 응답변위법(지반스프링을 FEM으로 산출한 경우)

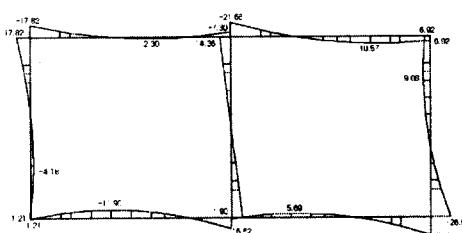


그림 11 모멘트도

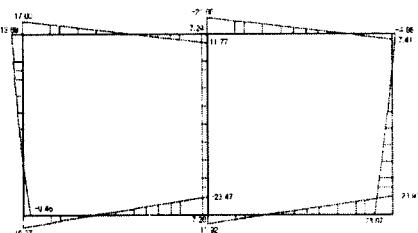


그림 12 전단력도

4.4 응답변위법(FEM)

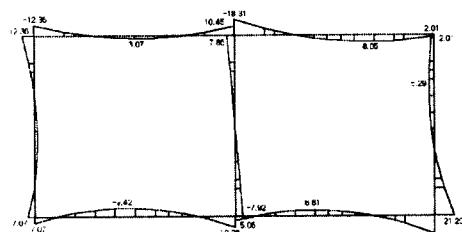


그림 13 모멘트도

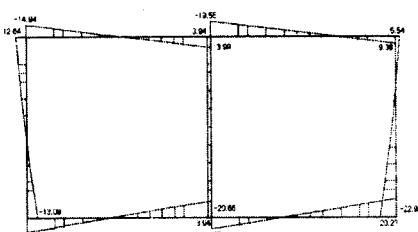


그림 14 전단력도

4.5 응답진도법(FEM)

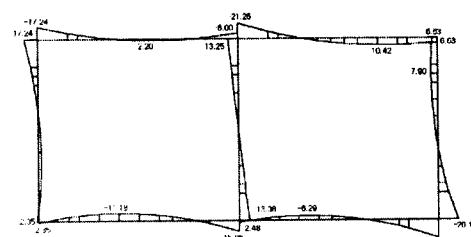


그림 15 모멘트도

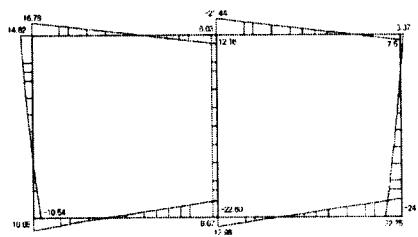


그림 16 전단력도

구조물에 발생하는 모멘트와 전단력의 최대값은 우측벽 하단에서 발생하였으며, 그 크기는 다음 표에서와 같이 산출되었다.

표 4 FEM해석 결과

해석 법	최대 휨 모멘트($t \cdot m$)	최대 전단력(t)
응답변위법(지반스프링을 간이법으로 산출)	-31.55	-26.15
응답변위법(지반스프링을 FEM으로 산출)	-26.91	-23.93
응답변위법(FEM)	-21.20	-22.92
응답진도법(FEM)	-26.12	-24.80
등가정적해석법	-22.40	-15.60
동적해석	-25.90	-24.50

5. 결론

본 논문에서는 응답변위법, 응답진도법 그리고 지진응답법 등으로 해석을 실시하여 그 결과를 산출하였다. 응답변위법과 응답진도법에서는 수평진도 0.2g를 적용하였고, 지진응답해석에서는 Hachinoha파(최대가속도: 196gal)를 적용하였다. 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1. 해석 결과 지반 스프링을 간이법으로 산출한 경우의 응답 변위법의 최대 휨 모먼트 및 최대 전 단력이 제일 큰 값을 나타내고 있어, 실제 지중 구조물의 내진 설계에 있어서 구조물의 강성을 과대 평가함을 알 수 있었다.
2. 등가정적 해석법에 의한 최대 휨 모먼트 및 최대 전단력은 제일 적은 값을 나타내어 지중 구조 물의 강성을 과소 평가할 우려가 있음을 알 수 있었다.

참고문현

1. 川島一彦(1997), 地震構造物の 耐震設計, 鹿島出版會
2. 池田俊雄(1999), 地盤と 構造物, 鹿島出版會
3. 土木學會(1989), 動的解析と 耐震設計(地震動・動的物性)
4. 박성우, 이대우, 임윤목, 김문겸(2000), BOX형 지하구조물의 내진설계 기준 확립을 위한 해석기 법 개발, 한국지진공학회
5. 해양 수산부(1999), 항만 및 어항 시설의 내진 설계 표준서