

BOX형 지하구조물의 내진설계 기준 확립을 위한 해석기법 개발

Development of the Modified Seismic Coefficient Method to Establish Seismic Design Criteria of Buried Box Structures.

박성우*, 이대우**, 임윤목***, 김문겸****
Park Sung Woo, Lee, Dae Woo, Lim, Yun Mook, Kim, Moon Kyum

ABSTRACT

In this study, the modified seismic coefficient method for seismic analysis of buried box structures is developed for practical purpose. The loading coefficient in the modified seismic coefficient method is determined from the results of the response displacement analysis. In the developed method, adequate velocity response spectrum in accordance with soil condition is also needed for seismic design of buried box structures. In order to investigate applicability of the modified seismic coefficient method, various analyses are performed with different parameters such as depth of base rock, height and width of box, buried depth, and value of standard penetration test. Results from the modified seismic coefficient method are compared with those of the response displacement method in terms of the maximum bending moment and the location of it. From the comparison, it is shown that the feasibility of the modified seismic coefficient method for seismic analysis of buried box structures.

1. 서론

지하구조물의 지진에 대한 해석방법으로는 크게 등가정적해석법, 응답변위법 및 동적해석법이 있다. 일반적으로 지하구조물을 해석할 때 동적 영향을 정적으로 충분히 고려한 응답변위법으로 해석할 것을 권하고 있으며 구조물의 겉보기 중량이 주변 지반보다 큰 경우에만 등가정적해석법을 사용하고 있다. 국내의 경우 지하구조물의 지진해석을 실무에 적용함에 있어서 적용이 복잡하고 어려운 응답변위법의 사용보다는 비교적 간편하게 지진해석을 할 수 있는 등가정적해석법 사용하여 내진설계를 수행하고 있다^[1]. 그러나 등가정적해석법은 동적인 효과를 고려하지 못하고 있어 정확한 해석을 하기 어려우므로 실무에서 적용이 용이하고 설계의 합리성을 갖춘 수정된 등가정적해석법을 사용하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 실용적인 수정등가정적해석법의 제안을 위해 응답변위법과 등가정적해석법으로 지반의 종류, 기반암의 깊이, 구조물의 매설위치와 구조물의 크기를 변화시키며 지하구조물의 해석을 수행하도록 한다. 이와 같은 두 가지 방법의 해석결과를 비교하여 응답변위법의 정확도를 유지하며 계산상 실용성이 있는 수정등가정적해석법을 제안하고자 한다.

* 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 동아건설
*** 연세대학교 토목공학과 조교수, 정회원
**** 연세대학교 토목공학과 교수, 정회원

2. 기존의 BOX형 구조물의 지진해석방법

2.1 등가정적해석법

구조물이 단단하고 강체에 가까울 경우 다시 말하면 구조물의 고유주기가 지진동의 고유주기보다 짧은 경우에는 그 구조물은 지반과 일체가 되어 운동한다. 구조물에 작용하는 지진력을 평가하여 구조물에 생기는 응력, 변형을 해석하기 위한 여러 가지 해석방법 중에서 가장 간단한 것이 등가정적해석법이다. 일반적으로 등가정적해석법은 지상구조물의 지진해석을 위해서 제안된 방법으로서 등가정적해석법에서 지진력이란 지진동의 가속도가 구조물에 적용되어 가속도에 구조물의 질량을 곱한 힘을 말한다. Mononobe-Okabe는 지상구조물에 적용하던 등가정적해석법을 옹벽과 같이 지반에 접해있는 구조물의 지진해석을 위해 변형시켰다. 지하구조물의 경우 그림 1에서와 같이 Mononobe-Okabe가 제안한 동적주동토압은 측벽에 재하되고, 이 때 지진토압의 합력인 P_{AE} 는 구조물 측벽에 작용한다.

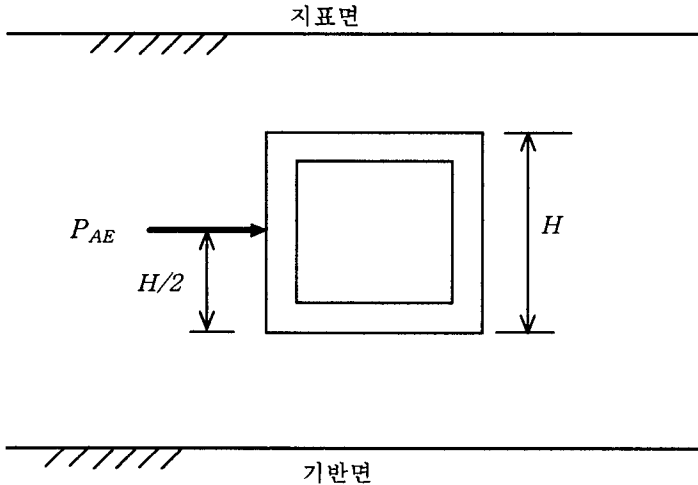


그림 1 등가정적해석법에서의 동적토압력과 작용점 위치

2.2 응답변위법

응답변위법은 지하구조물의 지진해석을 위해 지반 변위를 강제적으로 구조물에 가하여 정적으로 응력을 계산하는 방식에 근거한 지진해석법이다^[2]. 일반적으로 지하구조물의 겉보기 중량은 주변의 지반과 비교하여 가볍거나 또는 같은 정도이므로 가속도에 의한 관성의 영향이 아주 미소하다. 따라서, 지반 속에서 지하구조물을 진동시키려는 힘은 상대적으로 작아지며, 지하구조물은 주변이 지반에 의해 둘러 싸여 있기 때문에 구조물에서 주변 지반으로 빠져나가는 에너지가 크다. 지하구조물은 지반의 방사방향으로 감쇠가 매우 크기 때문에 지하구조물이 주변 지반에 대하여 상대적인 진동을 일으켰다 하더라도 자기 진동이 곧 진정된다. 그러므로 지하구조물에 생기는 응력은 관성력에 의한 영향보다 주변 지반의 상대변위에 의해 강제적으로 생겨나게 된다.

지하구조물의 대다수는 표층지반에 위치해 있으므로 주변지반의 거동에 준한 움직임을 갖는 지하구조물의 거동을 분석하기 위하여 지진에 의해 발생된 표층지반의 거동을 분석하는 것이 필요하다. 전단변형을 받는 표층의 운동방정식을 유도하기 위하여 그림 2와 같이 기반면 위에 균질한 표층이 있는 경우를 고려하였는데, 그림 2(a)에서 미소부분에 작용하는 외력은 주변전단력과 지반반력이며, 그림 2(b)는 기반면이 \ddot{u}_B 인 지반진동을 받을 때 미소부분이 받게되는 동적외력인 관성력과 감쇠력을 나타낸다. 표층의 지표면 근처의 지반움직임은 기반면으로부터 상향으로 전파되

는 전단파의 영향을 주로 받는다. 만약 지표면과 기반면, 층의 경계면이 기울어져 있다면 표층의 응답이 용이하지 않다. 그러나 각각의 면들이 평행하다면, 표층이 횡방향으로 확장되더라도 응답의 차이가 없으므로 표층은 반무한 층이 연속적으로 있다고 고려할 수 있다. 이와 같은 경우 기반의 지진동에 의해 발생한 표층의 거동은 단지 지반에 전단변형만을 일으키기 때문에 표층은 전단을 받고 있는 1차원 보로 모형화 될 수 있다.^[2]

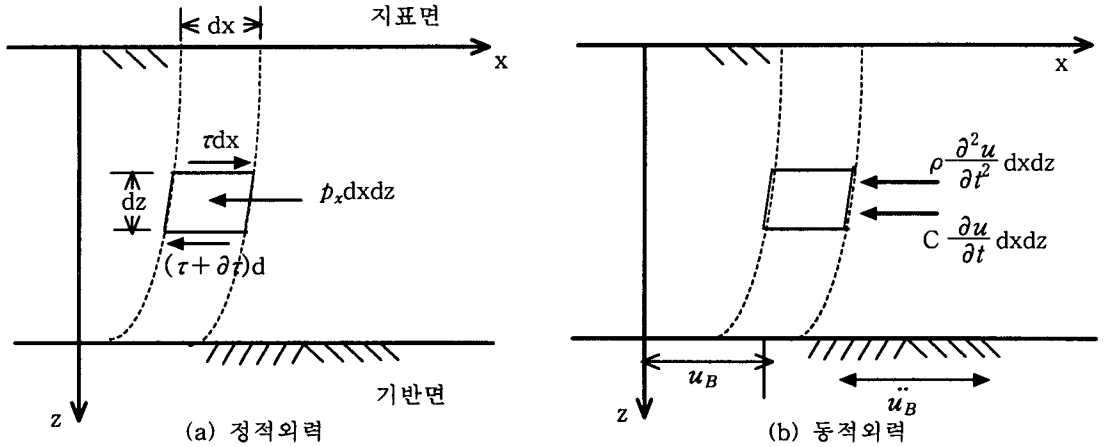


그림 2 지반의 진동

그림 2에서 지반이 x 축에 평행하게 변형될 때 미소부분의 평형방정식은 식 (1) 과 같다.

$$\left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial z} dz\right) dx - \tau dx - p_x dx dz = 0 \quad (1)$$

여기서 τ 는 전단응력, p_x 는 지반반력이다. 전단응력 τ 가 비틀림 각에 비례하고, 전단탄성계수가 G 이면, $\tau = G \frac{\partial u}{\partial z}$ 로 표현할 수 있으며, 여기서 u 는 지반의 변위를 말한다. 이때 비감쇠자유진동을 고려하고 지반의 변위 u 를 깊이와 시간의 함수로 분리하여 $u(z, t) = U(z) \cdot q(t)$ 라 놓고 식 (1)을 다시 쓰면 다음식과 같다.

$$\rho U \frac{\partial^2 q}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} q \quad (2)$$

여기서 \ddot{q} / q 를 $-w^2$ 이라 하면, 면 식 (3)과 같은 미분방정식이 유도된다.

$$U'' + \left(\frac{w}{v_s}\right)^2 U = 0 \quad (3)$$

여기서 v_s 는 전단파속도이며, $v_s = \sqrt{G/\rho}$, w 는 표층지반의 고유진동수다. 식 (3) 의 미분방정식을 만족하는 고유진동수 w 는 다음과 같다.

$$w = \frac{(2m-1)\pi}{2} \frac{v_s}{H} \quad (m=1, 2, \dots) \quad (4)$$

여기서 H 는 표층의 깊이를 의미한다. 식 (3)의 미분방정식을 풀면 식 (5) 와 같은 지반의 진동모드를 구할 수 있다.

$$U_m(z) = \cos\left\{(2m-1)\frac{\pi z}{2H}\right\} \quad (m=1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

여기서 m 은 진동모드의 차수이며, 지반의 경우는 1차모드가 가장 중요하므로 $m=1$ 에 대하여 시간의 함수인 $q(t)$ 를 고려한 방정식을 풀면 식 (6)과 같이 지반에서 발생하는 최대변위 u_{max} 을 구할 수 있다.

$$u_{max}(z) = \frac{2}{\pi^2} S_v T \cos\left(\frac{\pi z}{2H}\right) \quad (6)$$

여기서 T 는 표층의 고유주기, H 는 표층의 깊이, S_v 는 지진동으로 인한 속도응답을 의미한다. 식 (6) 은 전단변형을 받는 지반의 변위를 나타내며 지반 수평방향 변위의 깊이방향 분포는 기반면에서의 변위는 0 이며 지표면에서의 변위는 최대값을 갖는다.

3. 등가정적해석법과 응답변위법의 비교

지진해석방법으로 제안된 등가정적해석법과 응답변위법으로 임의의 BOX형 지하구조물에 대하여 지진해석을 수행하였을 때 다음의 그림 3과 같은 결과를 얻는다. 그림 3은 매설깊이와 표층깊이의 변화에 따라서 BOX 구조물의 측벽에 발생하는 최대모멘트의 변화를 나타낸 것이다. 해석결과 등가정적해석법은 표층깊이와 매설깊이의 위치에 관계없이 일정한 값을 갖지만 응답변위법은 매설깊이가 일정할 때 표층깊이가 깊어질수록 모멘트 응답이 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 표층깊이가 깊어질수록 지진동으로 인한 구조물의 상대변위가 작아져서 수평지진하중이 작아지며, 표층의 주기가 작아져서 주면전단력이 감소하기 때문이다. 또한, 표층의 깊이가 일정할 때 매설깊이가 얕을수록 상대변위와 표층주기가 작아지기 때문에 지진하중 감소로 인한 BOX 구조물에 발생하는 모멘트 응답은 작아진다. 등가정적해석법의 경우 매설깊이가 얕을수록 응답변위법과 유사한 해석치를 갖지만 구조물의 매설깊이를 고려하지 못하는 해석방법임을 알 수 있다.

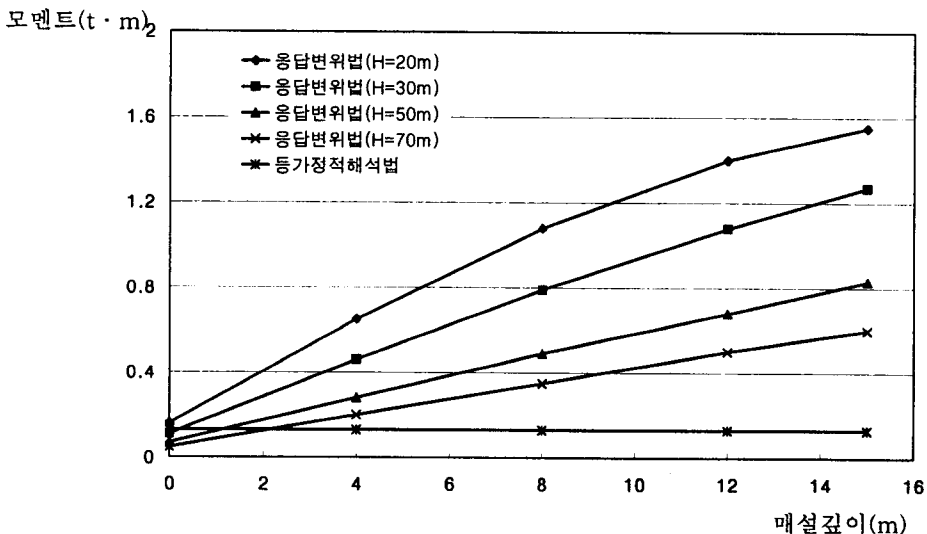


그림 3 매설깊이에 따른 모멘트 비교

4. 수정등가정적해석법 제안

등가정적해석법으로 제안된 Mononobe-Okabe 방법으로 BOX형 지하구조물에 대하여 지진해석을 수행하면 해석결과는 동적해석과 차이를 보인다. 이것은 등가정적해석법을 사용하여 지하구조물을 해석할 때 옹벽구조물에 적용하는 Mononobe-Okabe의 동적도압이 지하구조물의 특성을 고려하지 못하기 때문이다. 따라서 등가정적해석법에 의한 해석의 실용성을 갖고 응답변위법 정도

의 정확한 응답을 얻을 수 있는 실용적인 해석법인 수정등가정적해석법을 제안하고자 한다. 수정 등가정적해석법을 제안하기 위해서 지하구조물의 지진응답에 영향을 주는 여러 변수들에 대한 해석이 수행되어야 하는데 변수로는 지반강성을 대표하는 N치, 표층깊이, 지하구조물의 매설깊이와 지하구조물 크기 등을 선정하였다.

수정등가정적해석법을 제안하기 위해서는 등가정적해석법의 하중분포인 집중형 하중분포로부터 그림 4와 같이 역삼각형 하중과 주면전단력을 가지는 하중분포로 제안하였는데 이는 여러 가지 하중 형태에 대한 비교를 통하여 응답변위법에 의한 모멘트도와 유사한 모멘트도를 갖는 하중 분포를 택한 것이다. 표 1과 같이 N치가 10, 20, 30에 대하여 표층깊이, 매설깊이, 구조물의 높이를 변화시키면서 해석을 수행하였다. 모든 지반조건과, BOX형 구조물에 적용할 수 있는 지진력식을 제안하기 위해서는 모든 경우에 대하여 해석을 수행하여야 하므로 제안된 식은 표층깊이는 100m 이하, BOX의 폭은 6m이하, 매설깊이는 15m 이하, 축벽의 높이는 6m이하인 일반적인 BOX형 구조물에 적용할 수 있도록 제안하였다.

표 1 수정지진력식 제안을 위해 해석을 수행한 범위

N치	10, 20, 30
표층깊이(m)	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
매설깊이(m)	0, 3, 6, 9, 12, 15
BOX높이(m)	2, 4, 6

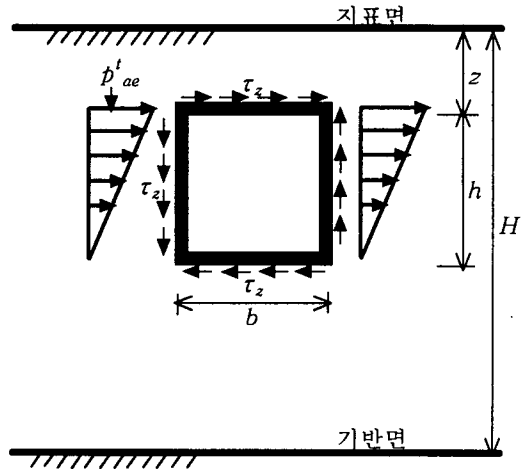


그림 4 수정된 지진하중

이와 같은 수정등가정적해석법에 의한 해석결과와 응답변위법에 의한 해석결과를 일치시키면서 다음의 표 2와 같이 표층의 N치가 각각 10, 20, 30 일 때의 수정등가정적 해석법의 하중을 제안하였다. 여기서 p'_{ae} 는 표층깊이 H , 구조물의 높이 h , 구조물의 깊이 z 를 변수로 갖는 구조물 상단의 수평지진토압력이며 구조물 하단은 0으로 하였다. 주면전단력은 표층깊이와 매설깊이만의 함수로 이루어진 계산식으로 제안하여 구조물의 네 변에 작용시켰다.

표 2 N치에 대한 수정 지진 하중식

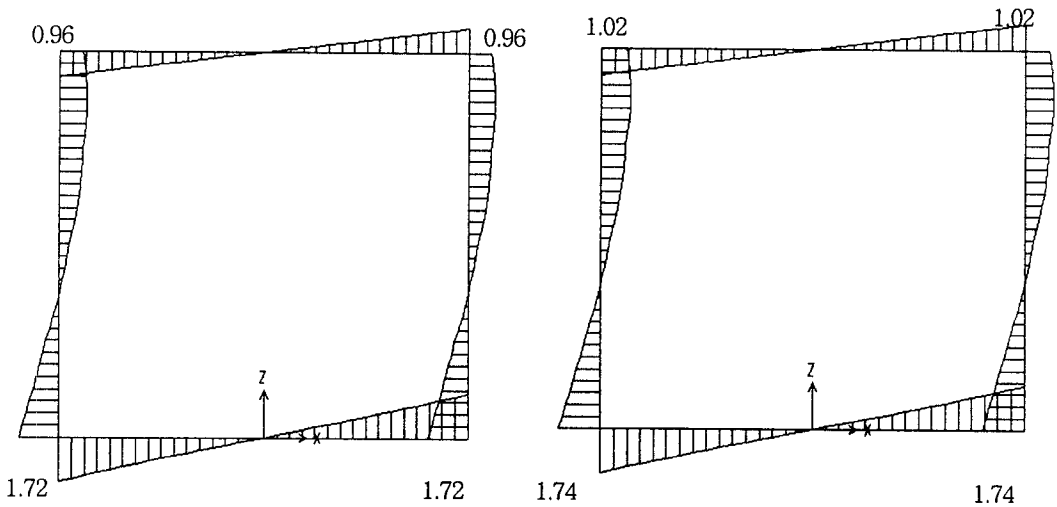
	N=10	N=20	N=30
p'_{ae}	$a(p'_{ae} + p''_{ae})$	$a(p'_{ae} + p''_{ae})$	$a(p'_{ae} + p''_{ae})$
a	$-0.031h^2 + 0.35h + 0.24$	$-0.03h^2 + 0.33h + 0.25$	$0.001h^2 + 0.28h + 0.44$
p'_{ae}	$10.20P_{AE}H^{-1.00}$	$13.18P_{AE}H^{-0.92}$	$2.00P_{AE}H^{-0.88}$
p''_{ae}	$(0.001z + 14.0)K_{AE}\gamma zH^{-0.90}$	$(-0.49z + 25.3)K_{AE}\gamma zH^{-0.85}$	$(-1.15z + 42.2)K_{AE}\gamma zH^{-0.84}$
τ_z	$0.18ze^{-0.022H} + 5.0H^{-1.67}$	$0.22ze^{-0.020H} + 5.8H^{-1.60}$	$0.25ze^{-0.019H} + 4.8H^{-1.52}$

표 2에서 음영으로 처리된 p'_{ae} 와 τ_z 가 각각 그림 5에서의 수평력과 주면전단력이 된다. 이와 같이 제안된 수정등가정적해석법의 해석식의 검증에 위하여 표 3에 제안한 바와 같이 임의의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 선택된 범위는 앞에서 언급하였듯이 표층의 N치는 30 이하, 표층의 깊이는 100m 이하, 매설깊이는 15m 이하, 구조물의 폭과 높이는 각각 6m 이하이다.

표 3 수정지진하중식의 검증을 위한 입력자료

case	표층깊이 (m)	매설깊이 (m)	BOX높이 (m)	BOX폭 (m)
1	61	1	3.2	3.5
2	79	3	5.2	1
3	85	5	4.2	1.7
4	48	7	2.2	2.5
5	58	9	2.2	2.5
6	27	6	3.2	5.5
7	43	12	6.2	1.7
8	56	15	5.2	4.5
9	39	8	6.2	3.5

위의 표에서 제안한 임의의 경우에 대하여 응답변위법과 수정등가정적해석을 실시하였으며 두 지진해석법으로부터 비교한 응답은 구조물의 측벽 하부에서 발생하는 최대모멘트로서 수정지진하중을 적용하여 지진해석을 수행하였을 때 구조물 전체에 대하여 그림 5와 같이 응답변위법과 유사한 모멘트 응답을 구할 수 있었다. 그림 6은 해석을 수행한 결과로서 x축은 case 번호이고 y축은 Box의 측벽에 발생한 모멘트, 두 막대그래프 위의 숫자는 백분율로 표시한 두 해석방법의 오차를 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 응답변위법과 수정등가정적해석법의 오차는 약 10%정도로써 제안된 수정등가정적해석법이 비교적 정확한 해석치를 갖는다는 것을 알 수 있다.

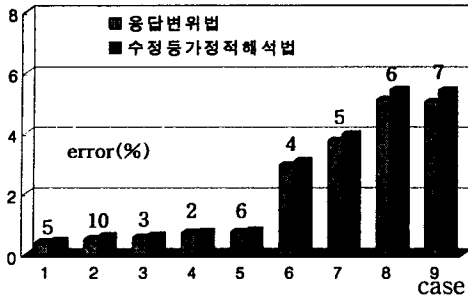


(a) 응답변위법에 의한 휨모멘트도

(b) 수정등가정적해석법에 의한 휨모멘트도

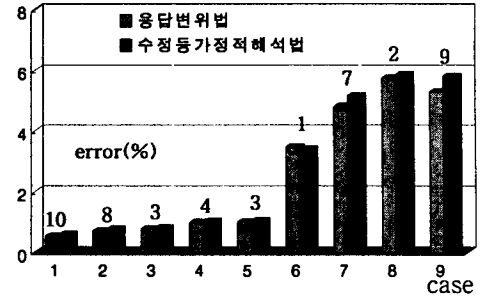
그림 5 사용된 지진해석법에 의한 휨모멘트도

휨모멘트(t · m)



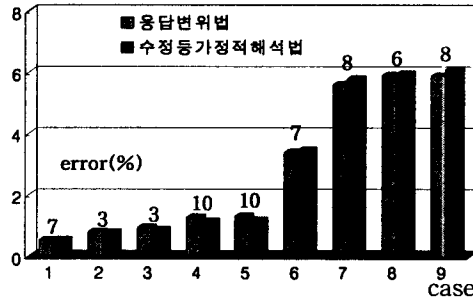
(a) N=10

휨모멘트(t · m)



(b) N=20

휨모멘트(t · m)



(c) N=30

그림 6 N=10, 20, 30에 대한 해석결과 비교

5. 다층해석

4장에서는 지반을 단층이라고 가정하여 해석을 수행하였지만 실제의 지반은 다층이므로 본 절에서는 제안된 식을 다층지반으로 확장 할 수 있는 방법을 제안하였다. 응답변위법에서 지진하중을 계산하기 위해서는 지반의 주기는 중요한 요소이므로, 본 연구에서는 식 (7)과 같이 단층에 대하여 제안된 지진력식에 구조물이 매설된 지반의 주기와 전체 표층지반의 주기와와의 관계가 고려된 함수를 첨가시킴으로서 다층지반의 영향이 고려된 지진하중을 제안하여 다층지반에 대한 해석을 가능하게 하였다.

$$p_{ae}^v = p_{ae}^t \cdot \left(\frac{T_g^t}{T_g^s} \right), \quad \tau_z^v = \tau_z \cdot \left(\frac{T_g^t}{T_g^s} \right) \quad (7)$$

여기서, p_{ae}^t 와 τ_z 는 구조물이 매설된 지반의 N치를 사용하여 계산된 지진하중이며, p_{ae}^v 는 다층지반에서 수평지진하중, τ_z^v 는 다층지반에서 주면전단력이다. 또한 T_g^t 는 표층전체에 대한 지반의 주기이며, T_g^s 는 구조물이 매설된 지반의 고유주기이다. 식 (7)의 검증을 위하여 첫째 층 10m, 둘째 층 15m, 셋째 층 15m 로 구성된 표층을 가정하였다. 첫째 층에 매설깊이 5m, 폭 3.5m, 높이 3m 인 BOX형 지하구조물에 대하여 각층의 N치를 표 4와 같이 10 에서 30까지 변화시키며 해석을 수행하였으며, 응답변위법에 의한 결과와 식 (7)로부터 계산된 지진하중을 사용한 해석결과를 그림 7에 나타내었다. 다층지반에 대한 해석결과 수정지진하중식을 다층으로 확장시킨 방법은 응답변위법과 5% 미만의 오차를 보이므로 제안식을 다층지반에 대하여 적용할 수 있음을 확인하였다.

표 4 다층지반 N치의 변화

1	10	10	20
2	10	10	30
3	10	20	10
4	10	20	20
5	10	20	30
6	10	30	10
7	10	30	20
8	10	30	30

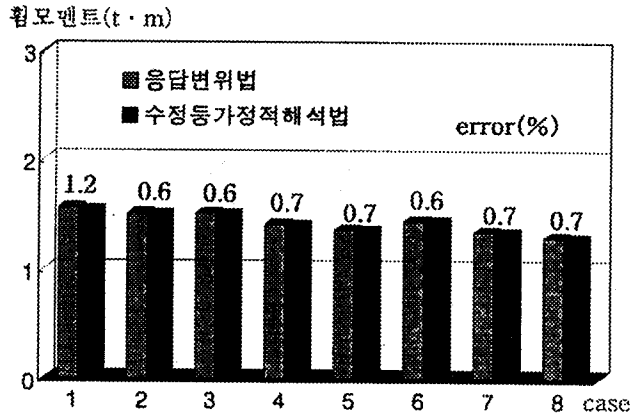


그림 7 다층지반에 대한 해석결과 비교

6. 결론

본 연구에서는 현재사용중인 등가정적해석법의 합리성을 파악하기 위하여 응답변위법과 비교하였고, 비교적 정확한 해석방법인 응답변위법을 이용하여 실용성과 정확성을 갖는 수정등가정적해석법을 제안하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 제안된 수정등가정적해석법을 이용하여 지반의 N치가 10, 20, 30 인 경우에 대해 해석을 수행하였고 응답변위법의 해석결과와 비교하였다. 그 결과 최대 휨모멘트의 값이 10% 내의 오차를 보이므로 제안된 수정등가정적해석법이 비교적 정확한 해석방법임을 알 수 있었다.
- (2) 제안된 수정등가정적해석법을 사용하여 다층지반에 확장 적용하여 해석을 수행한 결과 응답변위법의 해석결과와 잘 일치하므로 제안된 해석법이 다층지반에도 적용이 가능함을 보였다.

감사의 글

이 연구는 지진공학연구센터(KEERC)의 “라이프라인 내진기법 개발” 연구 내용의 일부이며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. 대한주택공사(1999) 내진설계지침
2. Kawashima(1996) 地下構造物の耐震設計
3. Idriss, I.M. and Seed, H.B.(1968), "Seismic Response of Horizontal Soil Layers," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, pp1003-1031
4. Kawashima, K., Sugita, H., and Nakajima, T.(1992), "Seismic Design Method of Underground Parking Garage Structures" 5th US-Japan Workshop on Earthquake Disaster Prevention for Lifeline Systems, pp.73-90
5. Okamoto, S., Introduction to Earthquake Engineering
6. 해양수산부(1999) 항만 및 어항시설의 내진설계표준서