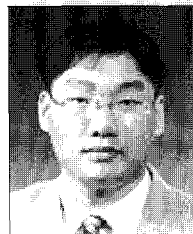


응답진도법을 사용한 지중구조물의 지진해석 소개

An Introduction of Ground Response Seismic Coefficient Method for Earthquake Analysis of Underground Structures



김재민*



김두기**

* 전남대학교 건설환경공학부 부교수

** 군산대학교 토목공학과 부교수

1. 서론

근래에 들어 지중구조물의 지진시 동적거동을 예측하는 합리적이고 실용적인 해석방법에 대한 필요성이 증대되고 있다. 일반적으로 국내 기존 내진설계기준에서 지중구조물에 대해 권장되는 간략 방법은 응답변위법(seismic deformation method)이다.^{1),2)} 이 방법은 일본에서 개발된 방법으로 오랜 기간의 연구를 통하여 해석결과의 합리성이 검증되었다고 할 수 있다.^{3),4)} 그러나 이 방법은 지반스프링상수 등을 포함하여 이 방법을 유도하기 위해 가정된 사항들로 인해, 직사각형 박스형상이 아닌 지중구조물의 경우 해석자의 이해정도에 따라 해석결과가 일관적이지 못할 수 있으며, 정밀해석 결과와 비교했을 때 종종 지중구조물의 지진응답을 과대 또는 과소평가하기도 한다.^{5),9)-10)} 응답변위법의 이러한 불규칙하거나 일관성이 부족한 결과는 인접지반의 전단변형을 관련 지중구조물의 응답으로 전환하는 과정에서 발생한다고 할 수 있다. 더욱이 지중구조물 인접지반의 비선형성 또는 굴착후 되메워진 지반의 동특성이 지중구조물의 지진성능에 큰 영향을 미치는 경우가 있으므로, 지중구조물과 인접지반을 함께 모형화한 해석방법의 사용이 점차 증가하고 있다.^{11),16)}

응답진도법(ground response seismic coefficient method)은 지진에 의해 발생하는 구조물(또는 지반)의 각 위치에서 최

대가속도가 주어질 때, 각 질점의 질량에 주어진 가속도를 곱한 값을 지진방향의 정적하중으로 작용하여 지진응답해석을 수행하는 방법으로, 지중구조물인 경우에는 구조물과 구조물 주변의 지반을 모두 모형화한 다음 깊이에 따라 부응답해석을 통해 구한 최대지반가속도(절대가속도)를 지진방향으로 작용하여 적용한다.^{2),5),6)} 응답진도법은 설계실무자를 위한 실용적이고 일관성이 있는 결과를 제공하며, 형상과 물성의 변화가 큰 지반과 지중구조물에 대해서도 신뢰성이 높은 결과를 나타낸다.^{5),6),10)-16)} 이 방법은 또한 지반조건이 급격하게 변하는 구간을 지나는 터널의 내진성능을 향상시키기 위한 지진격리설계(면진설계) 등에도 효과적으로 적용될 수 있다.¹²⁾⁻¹⁵⁾

이 기사에서는 응답진도법의 기초이론과 지중구조물의 지진해석을 통한 타당성 검증에 대한 해외자료⁵⁾를 요약하여 정리하였다.

2. 이론적 배경

대부분의 지중구조물은 인접지반과 독립적으로 거동할 수 없으며, 구조물에 작용하는 주요 외력은 인접지반의 유효동적응답에 의해 발생한다. 이러한 지중구조물의 동적 문제를 지중구조물과 인접지반으로 구성된 시스템의 준정적

상호작용(quasi-static interaction) 문제로 모형화할 수 있다.

응답진도법의 이론을 쉽게 설명하기 위하여, 먼저 그림 1과 같은 중방향 단위길이의 콘크리트 암거와 단위 폭의 균등 인접지반층으로 구성된 평면변형률상태의 2차원 시스템을 고려하자. 이 지반-구조물 시스템의 동적거동은 전단 변형이 지배적이라고 가정할 수 있다. 해석모델 바닥의 수평운동 $\ddot{z}(t)$ 를 입력으로 한 지반-구조계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{\Delta}(t)\} + [C]\{\dot{\Delta}(t)\} + [K]\{\Delta(t)\} = -[M]\{1_z\}\ddot{z}(t) \quad (1)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 시스템의 질량, 감쇠 및 강성 행렬이고, $\{\Delta(t)\}$ 는 시스템의 바닥 지반운동 $\ddot{z}(t)$ 에 대한 지반-구조계의 상대변위벡터이며, $\{1_z\}$ 는 지진입력방향과 해석모델 자유도 사이의 관계를 나타내는 상수벡터로서 계수값은 1 또는 0이다.

이 시스템에서 지중구조물이 차지하는 전체 면적에 대해 무게와 강성을 균등하게 재분배하여 구한 구조물의 감소된 비중과 강성은 일반적으로 인접지반의 비중 및 강성과 비슷하다. 따라서 이 시스템을 실제의 암거를 무시하고 지반층으로만 구성되어 있다고 가정하면, 이 문제는 균등지반의 자유장응답을 구하는 문제와 동일하다.

암거 상단(깊이 j)에서 하단(깊이 $j+1$)까지 평균전단응력(\bar{r})은 두 점 사이의 상대변위 w^j 에 비례할 것이다. 즉,

$$\bar{r} = \bar{G}Bw^j \quad (2)$$

여기서, \bar{G} 는 평균전단탄성계수이며 B 는 상대변위와 전단 변형률 사이의 관계를 나타내는 계수이다. 식 (2)와 같이 정의한 전단응력 \bar{r} 가 최고값(peak value)이 될 때의 시점을

t_m 이라 하면, 구조물 주변지반의 전단변형에 비례하는 구조물의 응력도 시점 t_m 에서 최고값을 가진다고 가정할 수 있다. 따라서 이 시점에서 시스템의 운동방정식을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$[K]\{\Delta(t_m)\} = -[M]\{\{\ddot{\Delta}(t_m)\} + \{1_z\}\ddot{z}(t_m)\} - [C]\{\dot{\Delta}(t_m)\} \quad (3)$$

여기서, 우변은 시점 t_m 일 때 전체 시스템에 작용하는 동적 하중이고, 시점은 t_m 으로 고정되었으므로, 이 식은 정적문제가 된다. 또한, 지반의 감쇠가 작아 무시할 수 있다면, 이 식을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$[K]\{\Delta(t_m)\} = -[M]\{\{\ddot{\Delta}(t_m)\} + \{1_z\}\ddot{z}(t_m)\} \quad (4)$$

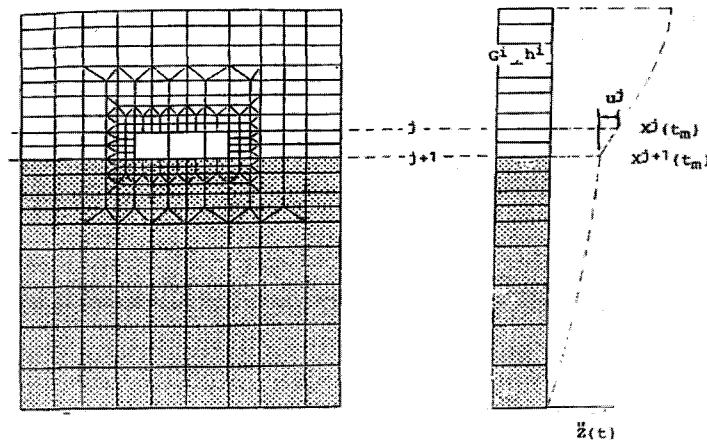
이 식의 우변에 있는 $\{\ddot{\Delta}(t_m)\}$ 은 자유장해석(free field analysis) 또는 부지응답해석(site response analysis)에 의한 상대변위(그림 1에서 X)로 근사할 수 있다. 즉,

$$\{\ddot{\Delta}(t_m)\} + \{1_z\}\ddot{z}(t_m) \approx \{\ddot{x}_{ff}^i(t_m)\} \quad (5)$$

여기서, $\{\ddot{x}_{ff}^i(t_m)\}$ 는 자유장해석을 통해 구한 시각 t_m 에서 절대가속도벡터이다. 이제 식 (4)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$[K]\{\Delta(t_m)\} \approx -[M]\{\ddot{x}_{ff}^i(t_m)\} \quad (6)$$

이 식을 사용하여 시점 t_m 에서 새로운 근사 상대변위벡터 $\{\Delta(t_m)\}$ 과 이에 대응하는 응력벡터를 구할 수 있다. 여기서 시점 t_m 에서 지반의 변형률이 비선형영역에 도달한다면, 그 시간에서 변형률 의존적인 지반특성을 추가적인 절차를 사용하면 반영할 수 있다. 이 방정식의 해를 구하는 작업은 지정된 체적력(body force)을 받는 정적 응력문제를 푸는



(a) 2차원 정적 유한요소모델 (b) 1차원 파동전파해석에 사용된 연속 자유장모델

그림 1 응답변위법의 수치모델 개요⁵⁾

것과 동일하고, 무시한 감쇠력이 충분히 작다면 원래 해와 매우 근사하다.

만약 (원래는 암거와 공동으로 구성되었지만 등가지반으로 치환된) 지반의 일부를 다시 암거와 공동으로 치환한다면, w^j 는 암거의 상단면과 하단면 사이의 최대상대변위와 동일하다. 만약 이 새롭게 치환된 자유장 지반시스템을 푼다면, 암거로 치환된 부분이 최대응력에 도달했을 때 이 시스템의 응력상태를 구해야만 하며, 이 방법은 지반에 둘러싸인 암거의 최대응력상태를 근사적으로 예측한다.

앞서 1층 암거와 암거를 둘러싼 균일지반 모델을 고려했지만, 동적 응답문제에 대한 앞의 근사를 다층 암거와 다층 지반 시스템에 확장할 수도 있다. 지중구조물에 의해 치환된 지반의 일부분이 암거의 상단면과 하단면사이의 최대상대변위를 나타낼 때의 시점인 t_m 을 정의하기 위한 조건을 1층 암거와 층상지반에 대해 유도해 보자. $G^i(t)$, $e^i(t)$ 및 h^i 를 전단계수, 전단변형률 및 i 번째 지반층의 두께라고 할 때, 깊이 j 에서 $j+1$ 사이 지반의 전단변형률에너지 $U^j(t)$ 는 다음과 같다.

$$U^j(t) = \sum_{i=j}^{j+1} \frac{1}{2} G_i(t) e_i^2(t) h_i \quad (7)$$

여기서, 인접지반에 의한 최대에너지가 관심 영역에 최대 변형 또는 응력을 발생한다고 가정한다. 만약 암거가 균등 지반으로 둘러싸여 있다면, $G_i(t) = G(t)$, $e_i(t) = e(t)$ 및 $h_i = h$ 이므로, $U^j(t)$ 는 $w^j = e(t)h$ 일 때, 즉, 깊이 j 에서 $j+1$ 사이의 상대변위가 최고가 될 때 최고가 된다. 조금 더 일반적인 다층암거 또는 다층 지반에 대해, 지반의 전단변형률에너지가 최대가 될 때, 지반에서 최대응력상태가 발생될 것이다. 따라서 암거와 지반의 일반적인 합성 시스템의 경우는(즉, 암거는 1층 또는 다층이고, 지반은 균등 또는 층상인 경우는) 앞서 1층암거와 균일지반의 경우에 대해 설명한 해석적 절차를 따라 전단변형률에너지를 최대화하여 풀 수 있다.

응답진도법에 의한 지진응답해석절차를 요약하면 다음과 같다.

- [1] 그림 1(a)에 보인 암거를 표준 유한요소절차를 따라 2차원 모델로 이상화한다. 수평층으로된 체눈(mesh)의 최대 높이는 SSI 해석 SW와 같은 코드에서 사용하는 해석과 유사하게 결정하고, 지반영역의 수평 및 수직 크기는 암거를 둘러싼 응력의 재분배에 의해 영향을 받는 산란 파동전파를 고려하여 결정한다. 지반영역의 수평 크기는 일반적으로 구조물 측벽으로부터 구조물 높이(H)의 3배 이상 되도록 한다. 그리고 지반영역의 수직 크기는 기반암까지 모델링하며 기반암의

모델링 깊이는 구조물 반폭(B, 구조물의 전체 폭 = 2B)의 2배 이상 되도록 한다. 지반영역의 측면경계조건은 수평롤러조건으로 하며 바닥면은 고정한다.

- [2] 암거를 무시하고, 2차원 모델과 같은 동일한 층 패턴을 갖는 그림 1(b)에 보인 1차원 지반기둥을 SHAKE에서 사용되는 등가선형방법에 의해 자유장 지반응답을 수행한다. 각 층의 시간 의존적인 변위와 가속도 응답을 수렴된 지반특성값과 함께 저장한다.
- [3] 식 (7)에 시간의존적인 전단변형률에너지 $U^j(t)$ 를 암거의 상단면과 하단면 내에 놓인 시간의존적인 변위, 수렴된 전단계수 및 각 층의 두께를 사용하여 계산하고, 이 에너지가 최대가 되는 시간 t_m 을 구한다. 해석의 편의를 위하여 구조물 상단과 하단 사이의 상대변위가 최고가 되는 시점을 t_m 으로 정할 수도 있다. 시점 t_m 에서의 응답가속도분포를 지반기둥의 전체 깊이 대해 취하고, 정적해석에서 체적력에 대한 입력 자료로 사용하기 위해 각 층의 지반응답진도(ground response seismic coefficient)로 변환한다.
- [4] 절차 [1]에서 준비한 2차원 정적 유한요소모델에서, 절차 [2]에서 구한 수렴된 지반계수, 절차 [3]에서 유도한 질량과 지진계수를 사용하여, 정적 유한요소해석에 의해 체적력이 작용하는 응력해석문제를 푼다. 시간 t_m 에서의 암거의 응력상태를 근사적인 최대응력상태로 간주한다.

3. 예제해석 사례

3.1 1층 암거

1층 다연(multi-cell) 콘크리트 암거를 인접지반에 상대적인 다양한 설치조건하에서 응답진도법을 사용하여 지진해석하였고, 그 결과를 FLUSH-VB로 구한 정밀지진해석 결과와 비교하였다(그림 2 ~ 그림 4, 표 1). 실험과 (FLUSH-VB에 의한) 수치해석으로 구한 동적거동은 서로 거의 일치한다는 Tohma 등(1985)에 의한 비교 연구의 결과를 참조할 때, 응답진도법의 타당성을 검증할 수 있었으며, 응답진도법의 결과와 비교함으로써 응답진도법의 효율성과 신뢰성을 검증할 수 있었다.

3.2 대규모 지중구조물

응답진도법을 사용하여 대규모 지중구조물에 대해 강지에 대한 지진해석을 수행한 후, 그 결과를 정밀지진해석인 FLUSH-VB를 사용하여 구한 결과와 비교하였다. 응답진도법을 사용하여 구한 콘크리트 라이닝 벽체의 응력분포는 정밀해석결과와 1% 미만의 오차를 나타냈다(그림 5 ~ 그림 8).

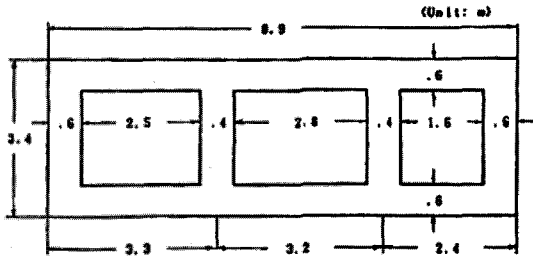


그림 2 1층 다연 콘크리트 암거모델⁵⁾

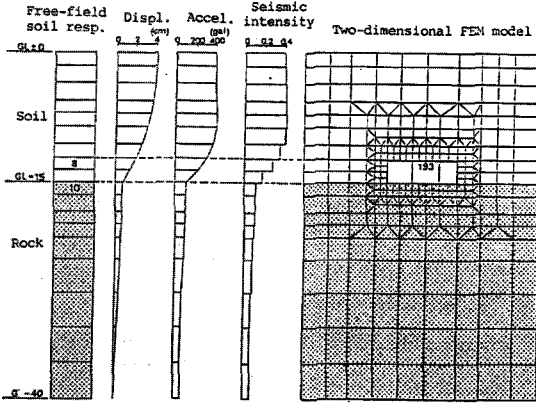


그림 3 자유장 지반응답해석, 2차원 유한요소 동적해석 및 응답진도해석을 위한 수치모델⁵⁾
(하부경계는 80m 깊이에 있고, 상위 40m 깊이만 그림에 나타냄)

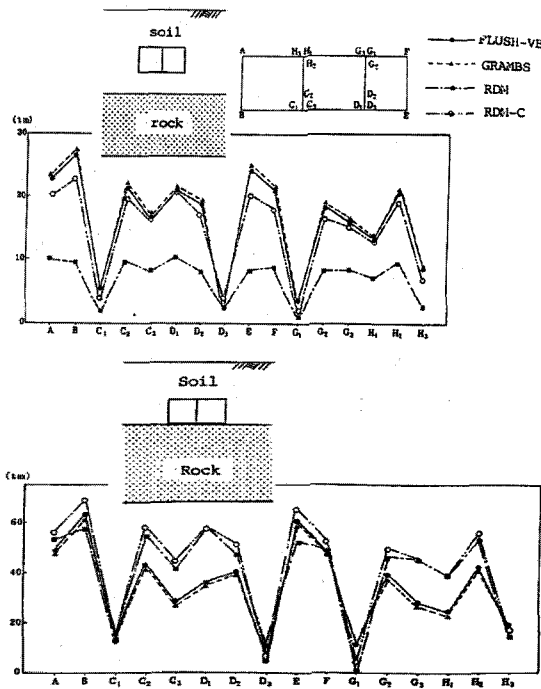


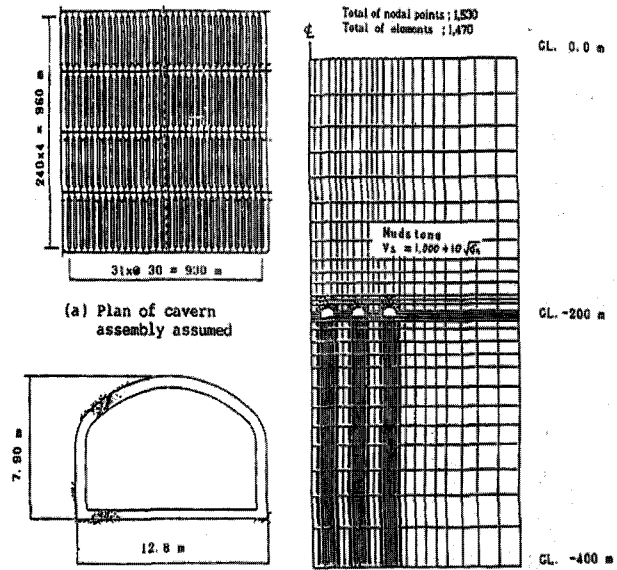
그림 4 다양한 해석방법에 따른 Model-2와 Model-9의 단모멘트 분포의 비교⁵⁾

(정밀해석=FLUSH-VB, 응답진도법=GRAMBS, 응답변위법=RDM, RDM-C; 국내 시방서에서 사용하고 있는 응답변위법은 RDM-C와 유사함)

표 1 암거의 해석모델과 설치조건에 따른 해석 경우⁵⁾

		(Unit: m)			
		Ld= 2.75	Ld= 15.0	Ld= 27.75	Ld= 40.0
Ls	Ls/L	Ld/L= .069	Ld/L= .375	Ld/L= .694	Ld/L=1.00
40.0	1.00	MODEL - 1	MODEL - 2	MODEL - 3	MODEL - 4
		MODEL - 5	MODEL - 6	MODEL - 7	Regard
27.8	.694	MODEL - 8	MODEL - 9		

Notes: L : Total depth of model
Ld: Embedment depth of duct
Ls: Depth of surface soil
--- denotes soft rock layer



(b) Cross-section of cavern (c) Plane strain finite modeling of representative caverns with concrete lining wall of 50 to 70 cm thickness

그림 5 FLUSH 및 응답변위법에 의한 해석을 위한 유한요소해석모델⁵⁾

4. 맺음말

이 기사에서는 지중구조물의 지진응답해석을 위한 등가 정적해석법의 하나인 응답진도법의 기초이론과 해석절차에 대해 간단히 소개하였다. 이 방법은 구조물뿐만 아니라 구조물 주변지반도 유한요소를 이용하여 모델링해야 하므로 국내에서 많이 사용하고 있는 응답변위법에 비해 해석 비용이 다소 증가할 수 있다. 그러나 유한요소법에 익숙한 엔지니어라면 직사각형 단면뿐만 아니라 임의 단면에 대한 지진응답해석에도 응답진도법을 사용하여 일관성 있는 해석정확도를 얻을 수 있다. 더욱이 응답진도법을 사용하면 구조물 및 구조물 주변 지반 또는 경계조건의 비선형성을

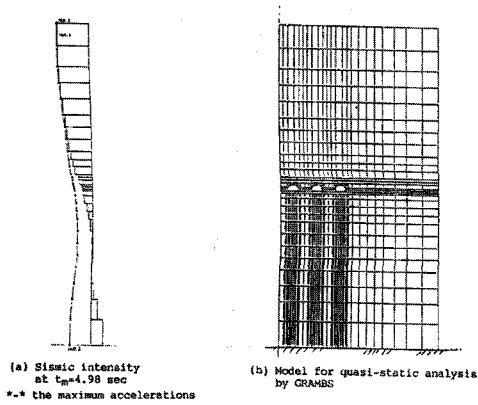


그림 6 진도와 응답진도법의 준정적해석 모델⁵⁾

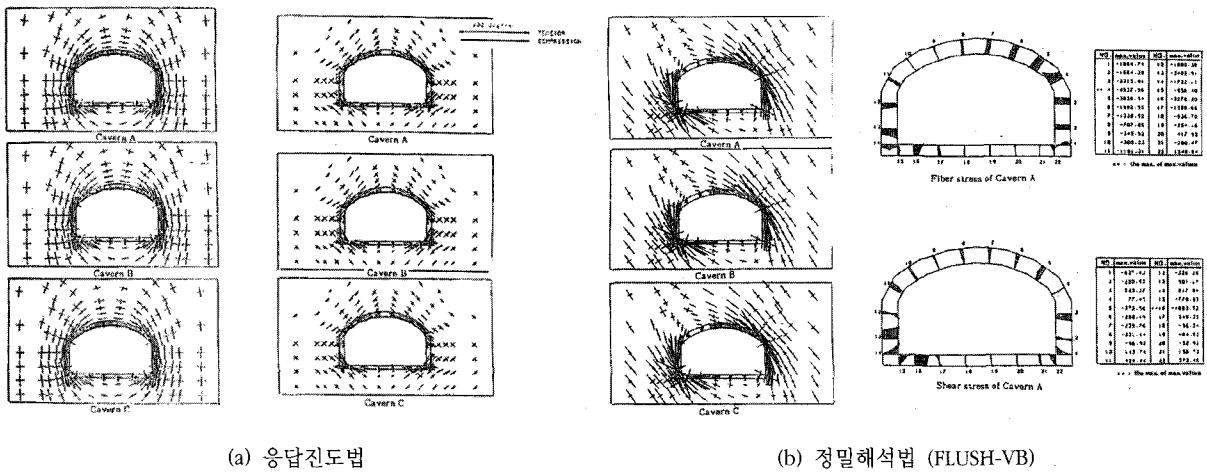


그림 7 지반과 지중구조물의 주응력 분포⁵⁾

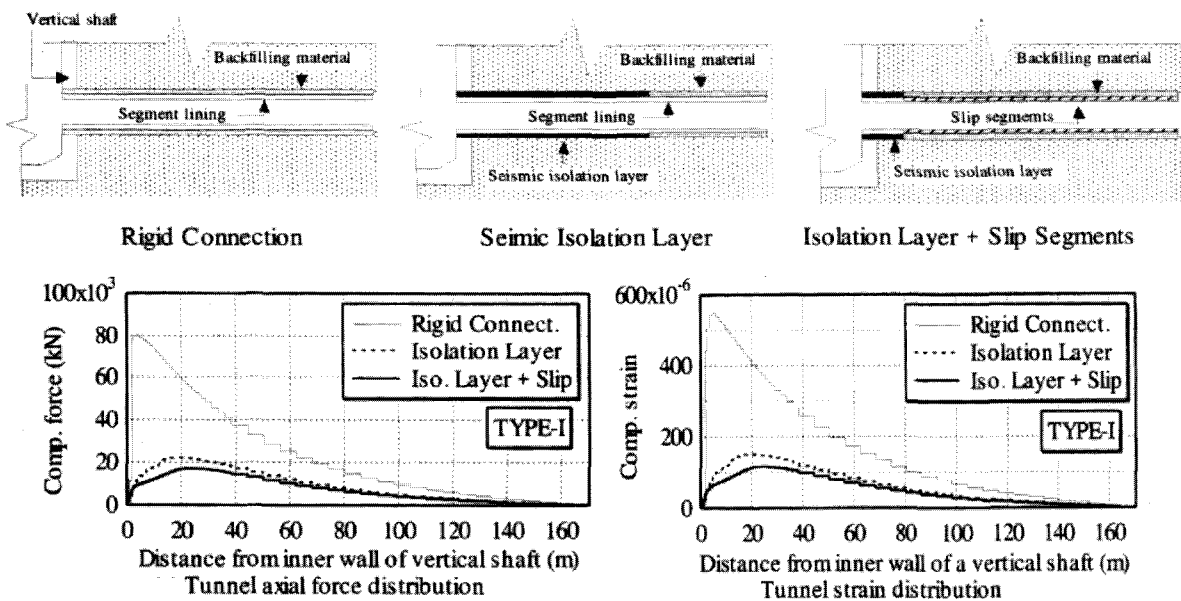



그림 8 터널의 지진격리층 도입에 따른 터널 연결부의 응력 감소 효과¹⁵⁾

효과적으로 표현할 수 있으므로, 향후 비정형 단면인 지중 구조물의 내진설계 및 성능기반내진설계에 응답진도법이 활발하게 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

1. 한국지진공학회, 도시철도 내진설계기준, 건설교통부, 1999
2. 건설교통부, 지하공동구 내진설계기준, 2004. 6
3. Luo, X., Murooa, Y. and Nishimura, A., "Verifying adequacy of the seismic deformation method by using real examples of earthquake damage", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 1, 2002, pp. 17-28
4. Kawashima, K., "Seismic analysis of underground structures", *Journal of Disaster Research*, Vol. 1, No.3, 2006
5. Katayama, Ikuo, *Studies on Fundamental Problems in Seismic Design Analyses of Critical Structures and Facilities*, 1990
6. Katayama, I. et. al, "Proposal of the "Response Seismic Coefficient Method" a practical quasi-static analysis method for structures buried underground", *Fortieth Annual Technical Conference of the JSCE*, Part 1, 1998, pp. 737-738 (in Japanese)
7. Katayama, I., Adachi, M., Shimada, M., and Tsuzuki, T., *On the practical analysis method for design analysis of buried structures*, 19th Annual Meeting of Japan Society of Soil and Foundation, Abstracts, pp. 1445-1448, June, 1984 (in Japanese)
8. Katayama, I., Adachi, M., Shimada, M., Tsuzuki, T., and Seshimo, Y., *A quasi-static analysis method for buried structures - A proposal of "Response Acceleration Method"*, Abstracts, 40th Annual Meeting of Japan Society of Civil Engineers, Part 1, pp. 737-738, Sept., 1985 (in Japanese)
9. JSCE, *Study on the evaluation of foundation - The study on the standardization of evaluation methodology of foundation*, 1984
10. Tohma, J. et al, *Model experiment of sea water intake duct of nuclear power plant*, *Denryoku doboku*, No. 197, pp. 36-44, July, 1985 (in Japanese)
11. Tsuneco, O. and Kenichi, Y., "Simplified analysis based on non-linear seismic coefficient method for sew age facilities", *Nippon Koei Technical Forum*, Vol. 9, 2000 (in Japanese)
12. Unjoh, S., Hoshikuma, J., Nagaya, K. and Suzuki, T., "Development of seismic isolation technology for underground structures and the application", *Proc. of the 32th Joint Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources Panel on Wind and Seismic Effects*, 2001, pp. 239-252
13. Unjoh, S., Hoshikuma, J., Nagaya, K. and Suzuki, T., "", *Proc. of the 32th Joint Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources Panel on Wind and Seismic Effects*, 1998, pp. 211-223
14. Shahidia, A.R. and Vafaeianb, M., "Analysis of longitudinal profile of the tunnels in the active faulted zone and designing the flexible lining (for Koohrang-III tunnel)", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 20, No. 3, 2005, pp. 213-221
15. Suzuki, T., Takatori, I., Okada, I. and Hagiwara, R., "New seismic isolation design for urban tunnels in consideration of slip and its application to an actual shield-driven tunnel", *Congress Proceedings CD-ROM, AITES - ITA Downunder 2002, 28th World Tunnel Congress, Sydney, Australia, 2002*
16. Ariman, T. and Muleski, G.E., "A review of the response of buried pipelines under seismic excitations", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 9, No. 2, 2006, pp. 133-152 

[담당 : 김두기, 편집위원]