

지진하중에 대한 지하철구조물의 비선형 시간영역해석

Nonlinear Time-Domain Analysis of Underground Subway Structure Subjected to Seismic Loadings

김재민* 이중건**
Jae-Min Kim Joong-Geon Lee

ABSTRACT

This paper presents results of nonlinear analyses for underground structures including both the soil-structure interaction and nonlinear behavior of concrete material. For this purpose, a hybrid method is employed, in which a dynamic analysis technique for a linear soil-structure interaction system and a general purpose FE program are combined in hybrid and practical manners. A couple of nonlinear analyses are carried out for framed structures in multi-layered half space soil medium. The yielding of concrete structure is considered by a multi-linear stress-strain relationship. The numerical results suggest that ductile design for the intermediate columns in the underground framed structure is substantially important in aseismic design.

1. 서론

본 연구에서는 1995년 효고현 남부 지진시 피해를 입은 고베의 가미사와 지하철 역사^[1]를 대상으로 시간영역에서 동적해석을 수행하고 이를 실제 지진피해 양상과 비교 분석하였다. 아울러 국내 3층 지하철 역사 구조물과 본선 박스 구조물에 대한 비선형 지진응답해석을 수행하여 지하철 구조물의 파괴모우드에 대해 고찰하였다. 본 연구에서는 지진응답의 시간이력해석을 위하여 지반-구조물 상호작용 (SSI) 효과를 고려한 KIESSI-2D^[2]와 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS^[3]를 연계한 복합법을 사용하여 지진응답해석을 수행하였다.

2. 지반-구조물 상호작용의 비선형 동적해석법

지반-구조계의 비선형 지진해석을 위하여 실용적인 목적으로 개발된 복합법^[4]을 사용하였다. 이 방법에서 수행하는 비선형해석 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}_{ss} \ddot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{C}_{ss} \dot{\mathbf{u}}_s + \mathbf{K}_{ss} \mathbf{u}_s + \mathbf{r}_s^{non}(t) = -\mathbf{M}_{sb} \ddot{\mathbf{u}}_b - \mathbf{C}_{sb} \dot{\mathbf{u}}_b - \mathbf{K}_{sb} \mathbf{u}_b \quad (1)$$

여기서 하첨자 s는 구조물과 근역지반, b는 근역지반과 원역지반의 경계면을 나타낸다. 식 (1)의

* 여수대학교 건설환경공학부 조교수, 정회원
** 현대건설 사원, 정회원

해는 범용 유한요소해석 S/W 를 사용하여 구할 수 있다. 이때 식 (1)의 우변에 있는 경계면에서 상호작용 응답을 미리 알아야 하는데, 이 값들은 등가선형화기법을 사용한 지반-구조물 상호작용 해석용 S/W 를 사용하여 미리 구한다.

3. 철근콘크리트 구조물의 비선형 해석모형

3.1 철근콘크리트 슬래브

본 연구에서는 철근콘크리트 슬래브의 비선형거동을 고려하기 위하여 철근 및 콘크리트의 응력-변형도 관계를 그림 1 과 같이 이상화하였다. 이로부터 철근콘크리트 슬래브의 비선형 모멘트-곡률관계를 구할 수 있다. 그리고 본 연구에서는 구조물의 전체적인 거동을 간편하게 파악하기 위해 철근콘크리트 슬래브를 그림 2 와 같이 Tri-linear 형태의 균질 비선형재료로 근사하였다. 이 때, 균질재료의 항복점(ϵ_1, f_1)은 실제 슬래브의 비선형 모멘트-곡률관계와 일치하도록 정하였다^[5].

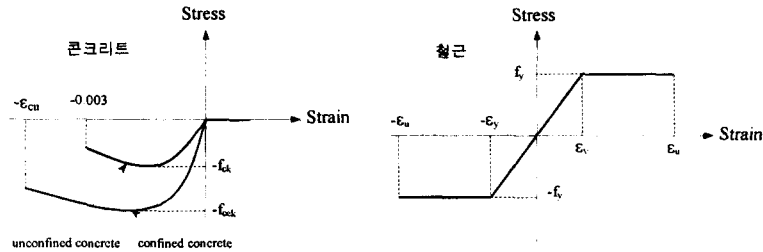


그림 1. 콘크리트와 철근의 비선형 거동

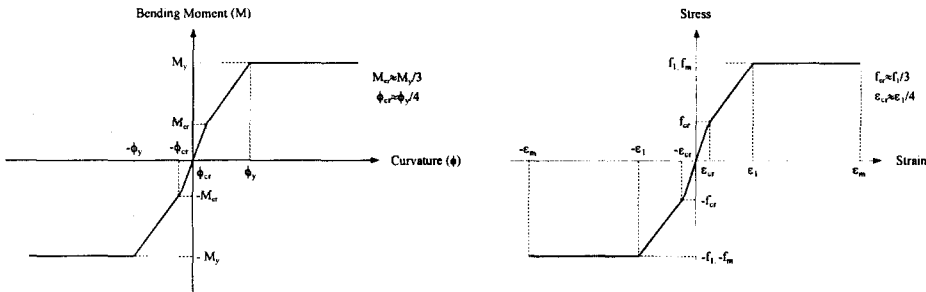


그림 2. 철근콘크리트 슬래브의 비선형 근사모델

3.2 철근콘크리트 기둥

본 연구에서는 철근콘크리트 기둥의 비선형거동을 고려하기 위해 그림 1 과 같은 철근 및 콘크리트의 응력-변형도 관계를 사용하였으며, 락철근 또는 나선철근 등에 의하여 구속된 콘크리트의 압축강도 f_{cck} 는 Mander 의 모형식^[6]을 사용하여 정했다. 이들 철근과 콘크리트의 응력-변형도 관계로부터 철근콘크리트 기둥의 휨모멘트-곡률관계를 유도할 수 있으며, 근사적으로 그림 3(a)와 같

이 나타낼 수 있다^[7]. 본 연구에서는 구조물의 전체적인 거동을 간편하게 파악하기 위해 그림 3(b)와 같이 철근콘크리트 기둥을 균일한 비선형재료로 근사하였다. 이 때, 항복점(ϵ_1, f_1), 극한상태(ϵ_m, f_m)는 Bi-linear 형태로 이상화된 실제 철근콘크리트 기둥의 비선형 모멘트-곡률관계와 일치하도록 정하였다^[9].

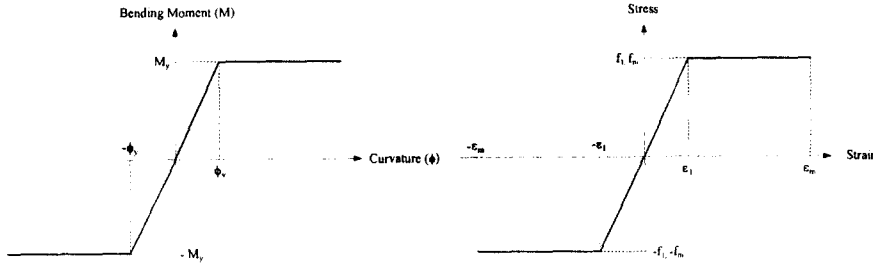


그림 3. 철근콘크리트 기둥의 비선형 근사모델

4. 예제해석 및 토의

4.1 일본 고베시 지하철 역사 구조물의 비선형 지진해석

4.1.1 구조물 제원 및 입력지진

일본 고베시에 위치한 가미사와 지하철 역사의 대표적 단면에 대하여 2차원 지진응답해석을 수행하고 구조물의 파괴모드를 고찰하였다. 이 지하철 역사는 1995년 1월 고베시를 강타한 효고현 남부 대지진시 상부기둥과 하부기둥에 전단파괴가 집중적으로 발생하여 구조물의 파괴를 초래하였으며, 이 역사의 파괴모드에 관한 연구가 수행된 바 있다^[11]. 이 역사 구조물은 그림 5와 같이 직사각형 철근콘크리트 박스형식으로 구성되어 있으며, 2개의 직사각형 단면 내부기둥이 슬래브를 지지하고 있다. 이 기둥의 종방향(지하철 주행방향) 설치간격은 5m 이고, 기둥의 단면폭은 상부기둥에 대해서는 1.4m, 하부기둥에 대해서는 1.5m 이다. 콘크리트 설계기준 압축강도는 250kgf/cm^2 , 탄성계수는 23GPa, 포아송비는 0.2, 밀도는 $2,400\text{kg/m}^3$ 이며 지반의 물성치는 표 1 과 같다.

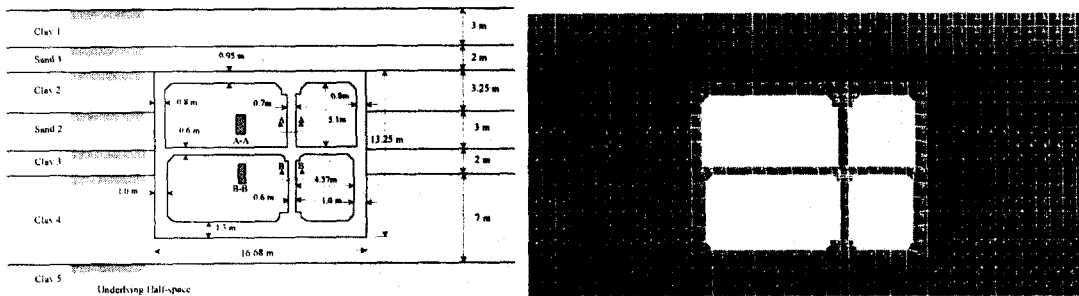


그림 5. 일본 고베시 가미사와 지하철 역사구조물 예제

표 1. 일본 고베시 가미사와 지하철 역사구조물 주변 지반의 물성치

지층	전단파속도 (m/sec)	질량밀도 (kg/m ³)	이력감쇠비 (%)	포아송비
Clay 1	205	1,800	2.0	0.45
Sand 1	246	2,000	2.0	0.45
Clay 2	257	2,000	2.0	0.45
Sand 2	229	2,000	2.0	0.45
Clay 3	301	2,000	2.0	0.45
Clay 4	345	2,000	2.0	0.45
Clay 5	411	2,000	2.0	0.45

본 예제의 통제운동으로 사용된 지진파는 1995년 1월 일본 고베시의 효고현 남부 대지진시 Port Island 에서 측정된 가속도기록으로서 그림 6 과 같으며 최대 가속도는 0.56g 이다. 본 연구에서는 지진이 수직으로 입사하는 평면 SV 파에 의하여 발생되었다고 가정한 후, 지진의 크기는 그림 6 의 통제운동이 원역지반의 지표면에서 응답이라고 가정하여 정하였다.

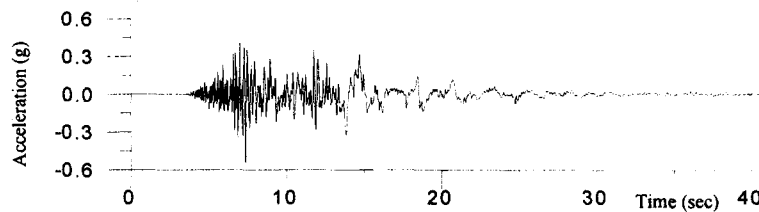


그림 6. 가미사와 지하철 역사구조물 지진해석에 사용된 가속도의 시간이력 (PGA=0.56g)

4.1.2 해석모형 및 해석결과

ANSYS 에서 사용한 유한요소는 8 절점 PLANE82 이며, KIESSI-2D 와 ANSYS 에서 사용한 유한 요소체형상은 그림 5 와 같다. 그리고 철근콘크리트 슬래브와 철근콘크리트 기둥을 등방 비선형 재료로 근사하였으며, 철근콘크리트 슬래브의 항복점과 극한상태는 각각 $\epsilon_1=0.00129$, $f_1=418.4kgf/cm^2$, $\epsilon_m=0.0129$, $f_m=418.4 kgf/cm$, 기둥의 항복점과 극한상태로서 $\epsilon_1=0.0021$, $f_1=128.4kgf/cm^2$, $\epsilon_m=0.021$, $f_m=128.4kgf/cm^2$ 를 사용하였다.

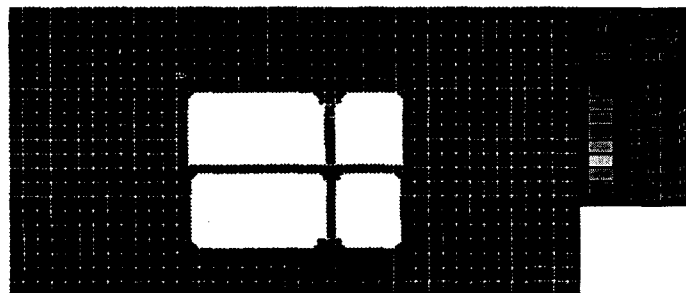


그림 7. 가미사와 지하철 역사 구조물의 최대 잔류변형도 (t=14.67 초)

철근콘크리트 구조물의 비선형성을 고려하여 시간영역에서 비선형 지진응답해석을 수행한 결과, 그림 7과 같이 구조물의 상부 중간기둥에서 최대 잔류변형(residual strain)이 발생하였다. 이 잔류변형도는 구조부재의 손상정도를 평가하는 기준이 된다¹¹⁾. 이 결과로부터 이 구조물은 지진에 의하여 중간기둥의 상단과 하단에 비선형 거동에 의한 잔류변형이 많이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 아울러 잔류변형의 분포형태가 그림 7에 나타나듯이 전단파괴가 추가되며, 이 구조물의 1995년 효고현 남부 대지진에 의한 실제 파괴현상¹¹⁾과 매우 유사하다.

4.2 국내 지하철 3층 역사 구조물의 비선형 지진해석

4.2.1 구조물 제원 및 입력지진

본 연구에서는 국내 지하철구조물 중 그림 8과 같은 3층 역사 구조물에 대하여 비선형 지진응답해석을 수행하였다. 이 역사 구조물의 콘크리트 설계기준 압축강도는 210kgf/cm^2 이며, 지반의 물성치는 현장 지반조사로부터 얻어진 N치 등을 참조하여 표 2와 같이 정하였다. 그리고 역사 구조물의 기둥 종방향(지하철 주행방향) 설치간격은 5m이며, 기둥은 원형기둥으로서 단면폭은 3층 기둥에 대해서는 1.0m, 1층 및 2층 기둥에 대해서는 1.3m이다.

해석에 사용된 통제운동은 암반에 대한 국내 내진설계기준 설계응답스펙트럼¹¹⁾으로부터 인공 지진이력을 작성한 후 최대 지반가속도가 0.50g가 되도록 조정하였다. 시간이력은 그림 9와 같으며 강진지속시간은 10초로 하였다. 본 예제에서도 앞의 가미사와 지하철 역사와 마찬가지로 지진이 수직으로 입사하는 SV 파에 의하여 발생하는 것으로 가정하였으며, 통제운동을 자유장 지반의 지표면에 입력하여 지진해석을 수행하였다.

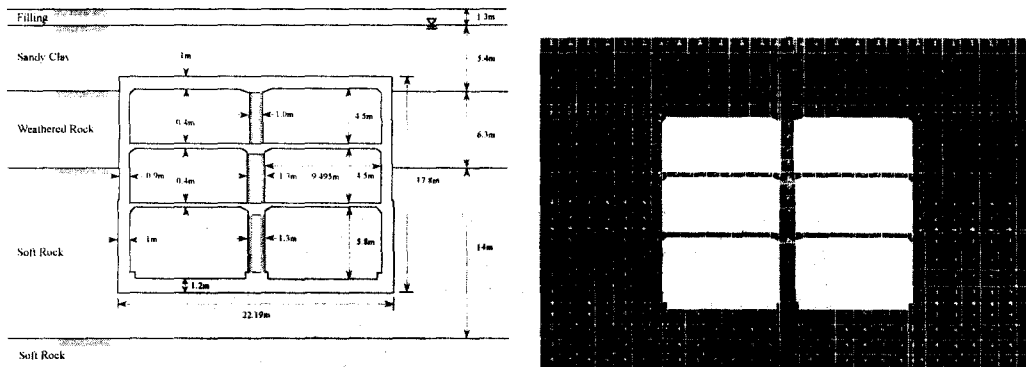


그림 8. 3층 지하철 역사구조물 예제

표 2. 3층 지하철 역사구조물 주변지반의 물성치

지층	전단파속도 (m/sec)	질량밀도(kg/m ³)	이력감쇠비 (%)	포아송비
Filling	67	1,800	2.0	0.30
Sandy Clay	175	2,000	2.0	0.45
Weathered Rock	246	2,100	2.0	0.45
Soft Rock	548	2,100	2.0	0.30

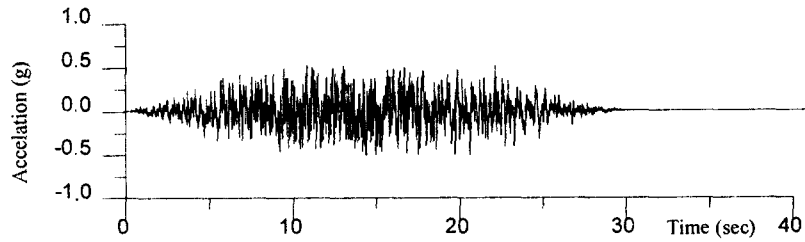


그림 9. 국내 지하철구조물의 지진해석에 사용된 입력지진 가속도 (PGA=0.50g)

4.2.2 해석모형 및 해석결과

KIESSI-2D 와 ANSYS 해석을 위하여 사용한 유한요소체눈은 그림 8 과 같다. 그리고 철근콘크리트 슬래브와 철근콘크리트 기둥을 등방 비선형 재료로 근사하였으며, 철근콘크리트 슬래브의 항복점과 극한상태는 $\epsilon_1=0.00129$, $f_1 = 350kgf/cm^2$, $\epsilon_m=0.0129$, $f_m = 350kgf/cm^2$ 이며, 기둥의 항복점과 극한상태는 $\epsilon_1=0.0021$, $f_1 = 91kgf/cm^2$, $\epsilon_m = 0.021$, $f_m = 91kgf/cm^2$ 로 근사하였다.

본 예제 구조물에 대하여 통제운동의 최대 지반가속도가 0.14g 인 경우 지진응답해석을 수행하였으나, 구조물의 비선형 거동이 발생하지 않았다. 그러나 통제운동의 최대 지반가속도가 0.5g 인 경우 비선형 거동이 뚜렷하게 관찰되었으며, $t=16.94$ 초일 때 그림 10 과 같이 상부 중간기둥에서 최대 잔류변형이 발생하였다.

따라서 이 예제 구조물의 경우 지진에 의하여 상부 중간기둥에 전단파괴가 발생할 수 있으므로, 이에 대한 보강이 구조물의 내진성 확보를 위하여 가장 중요할 것으로 판단된다. 아울러 그림 10 으로부터 지반강성의 변화가 큰 위치(Weathered Rock 영역)에서 지반의 상대변위가 커지게 되어, 그 곳에 위치한 구조물의 응력이 커짐을 알 수 있다.

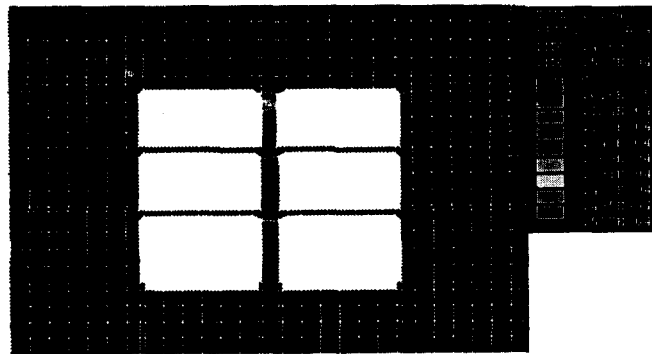


그림 10. 3층 지하철 역사구조물의 최대 잔류변형도 ($t=16.94$ 초)

4.3 국내 지하철 본선 박스구조물의 비선형 지진해석

4.3.1 구조물 재원 및 입력지진

이 본선 박스구조물의 기둥 종방향(지하철 주행방향) 설치간격은 5m 이고, 기둥의 단면폭은 1.6m 이며, 2 개의 직사각형 단면 내부기둥이 슬래브를 지지하고 있다. 그리고 해석에 사용된 통제운동은 앞의 예제와 같이 최대 지반가속도가 0.5g 인 인공지진파를 사용하였다. 지진입력도 앞의 예제에서와 같이 수직으로 입사하는 SV 파로 가정하였다.

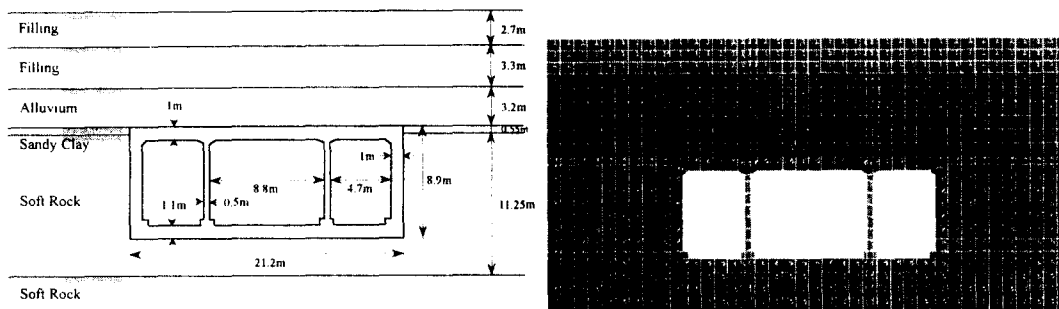


그림 11. 지하철 본선 박스구조물 예제

표 3. 지하철 본선 박스구조물 주변 지반의 물성치

지층	전단파속도 (m/sec)	질량밀도 (kg/m ³)	이력감쇠비 (%)	포아송비
Filling	198	1,800	2.0	0.30
Filling	204	1,900	2.0	0.45
Alluvium	258	2,000	2.0	0.45
Sandy Clay	340	2,000	2.0	0.45
Soft Rock	540	2,100	2.0	0.30

4.3.2 해석모형 및 해석결과

본 예제의 유한요소해석모형은 그림 11 과 같고, 철근콘크리트 슬래브의 항복점과 극한상태는 $\epsilon_1=0.00129$, $f_1=210 \text{ kgf/cm}^2$, $\epsilon_m=0.0129$, $f_m=210 \text{ kgf/cm}^2$, 기둥의 항복점과 극한상태는 $\epsilon_1=0.0021$, $f_1=67 \text{ kgf/cm}^2$, $\epsilon_m=0.021$, $f_m=67 \text{ kgf/cm}^2$ 를 사용하였다.

본 예제에 대해서도 최대 지반가속도가 0.14g 인 경우에 대하여 지진응답해석을 수행하였으나, 최대 지반가속도가 0.14g 일 경우에는 비선형 거동이 발생하지 않았다. 그러나 최대 지반가속도가 0.5g 인 경우 그림 12 와 같이 $t=16.88$ 초일 때 상부 중간기둥에서 최대 잔류변형이 발생하였다. 그림 12 에 나타난 바와 같이 이 예제 구조물에서도 중간기둥의 상부와 하부에 비선형 변형이 집중적으로 발생하였으며, 본선 박스구조물의 콘크리트 외부골조 및 슬래브는 지진에 대하여 비교적 안전함을 알 수 있었다. 이로부터 지하철 본선 박스구조물에 대해서는 중간기둥 단부에 대하여 충분한 연성을 갖도록 설계하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.

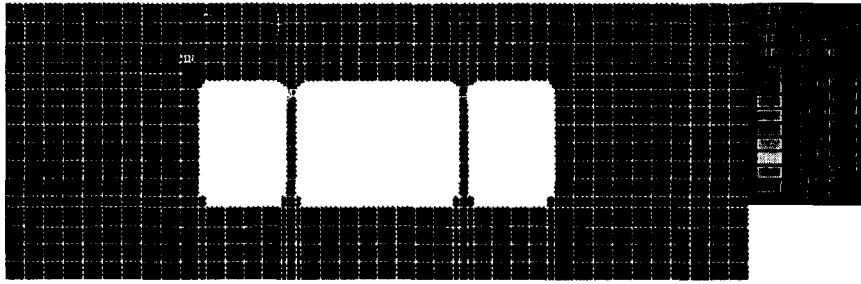


그림 15. 지하철 본선 박스구조물의 최대 잔류변형도 ($t=16.88$ 초)

5. 결론

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용효과를 고려한 선형해석 S/W 인 KIESSI-2D 와 비선형해석 유한요소해석 S/W 인 ANSYS 를 연계한 복합법을 사용하여, 고베 지진시 피해를 입은 고베시의 가미사와 지하철 역사와 국내 3층 지하철 역사 및 본선 박스구조물을 대상으로 비선형 지진응답해석을 수행하였다. 해석결과, 가미사와 지하철 역사에 대한 해석결과가 지하철 역사의 상부 중간기둥에서 전단파괴가 집중적으로 일어난 실제 피해상황과 매우 유사하여 본 연구결과가 합리적임을 알 수 있었다. 그리고 국내 3층 지하철 역사와 본선 박스구조물에 대한 비선형 지진응답해석 결과, 상부층 또는 지반의 강성이 급격하게 변하는 높이의 중간기둥에서 비선형변형이 집중되는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. An, X. and Maekawa, L. (1997), "Failure Analysis of Underground RC Frame Subjected to Seismic Actions," *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE*, V-36, No. 571, pp. 251-267.
2. 김재민, 윤정방, 김두기 (2000), "유한요소와 무한요소를 사용한 2차원 선형 지반-구조물계의 지진응답해석법," *한국전산구조공학회 논문집*, 제13권, 제2호, pp. 231-244.
3. SAS IP, Inc. (1996), "ANSYS Users Manual," Release 5.6.
4. 김재민, 최준성, 이종세 (2000), "지반-구조물 상호작용의 비선형 시간영역해석을 위한 실용적 복합기법," *한국지진공학회 추계학술발표회 논문집*, 제4권, 제2호, pp. 132-139.
5. 정연주, 유영찬 (2000), "소성거동을 고려한 RC구조물의 간략화 해석모델에 관한 연구," *한국전산구조공학회 논문집*, 제13권, 제3호, pp. 361-371.
6. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. (1988), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
7. Paulay, T. and Priestley, M.J.N. (1992), "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings," *John Wiley & Sons, Inc., New York*.
8. Seyed, M. (1992), "User's Manual for COLx, Colum Ductility Program," *Caltrans, CA*.
9. 이종건 (2001), "지반-구조물 상호작용을 고려한 2차원 지하구조물의 비선형 지진해석," 석사학위논문, 여수대학교.
10. 한국지진공학회, 한국건설기술연구원 (1997), "내진설계기준연구(II)," *건설교통부*.