지중 RC 도시지하철도 구조물의 내진설계

(A Seismic Design of RC Underground Subway Structure)

정재평* 임동원** 이성로*** 김 우****
Jeong, Jae Pyoung Im, Tong Won Lee, Seong Lo Kim, Woo

ABSTRACT

This Paper presents dynamic analysis of underground R/C Subway Structure , subjected to seismic actions. Earthquakes brought serious damage to RC subway Structure. For studying the collapse mechanism of underground RC Subway Structure, seismic response of a subway station is simulated in using FEM program SAP2000 of two-dimension based on the path dependent RC elastic model, soil foundation and interfacial models. The shear failure of intermediate vertical columns is found to be the major cause of the structural collapse. According to FEM simulation of the failure mechanism, it is considered that the RC column would lose axial load carrying capacity after the occurrence of the localized diagonal shear cracks, and sudden failure of the outer frame would be followed. Specially, the shear stress in the middle slab reaches maximum shear capacity. So, the Structure would fail in the middle slab as a result of erasing the vertical ground motion computation.

1. 개요

지중 구조물에 대한 내진설계는 지상 구조물과 달리 지반과 구조물간의 상대가속도가 작고 피해도 작아 그 동안 지하구조물에 대한 내진설계 인식이 부족한 상태였다. 그러나, 고베지진에서 처럼 지하구조물이라고 예외 일수 없다는 상황 속에서 국내의 도심 지하철도 구조물의 내진설계는 설계기준이나 구체적인 설계방향이 확립되지 않은 상태이고, 내진설계란 단순히 도로교표준시방서 제V장 내진설계편의 철근세목 규정에 따른 배근에 그치고 있는 상황이어서, 본 연구에서는 RC 도시철도에 대한 해석적 방법제시와 설계방향을 제안하고자 한다. 해석적 방법에서는, 기존의 개략해석법 중 지반스프링 설치에 의한 의사정적해석법은 지반 상호작용에 의한 지반 관성력, 체적파(P, S Wave)와 표면파(Love, Rayleigh Wave)에 따른 파괴형태, 구조물 강성과 질량이 시간에 따라 변하는 응답(변위, 속도, 가속도)을 묘사 할 수 없기 때문에 현실성이 없으며 이를 극복하기 위해 지반모델링을 통한 다중모드 응답스펙트럼해석을 내진설계성능기준(안)('98년 건설교통부)에 따라 수행하여 그 결과에 의해 현 시방서 규정과 비교 분석하고자 한다. 또한, 직접적인 내진해석을 수행하지 않은 많은 지하철단면들은 기둥과 슬래브의 접합부에 비교적 많은 보강을 하고 있으나 기타 취약부위에 대한 보강은 미약하므로 이에 대한 내진설계 방향을 연구하고자 한다.

* 정회원, 금호엔지니어링(주) 건설기술연구소 대리
** 정회원, 광주광역시 체육청소년과 계장
*** 정회원, 목포대학교 토목공학과 교수
**** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

2. 지중 구조물의 내진특성

2.1 파괴모드 결정

지중구조물의 파괴모드는 구조물과 지반의 강성 및 재료특성에 의해 가장 취약한 파괴모드를 나타내며 파괴모드수의 선택은 실험자료나 기존 지진피해자료를 통해 일차적으로 선택할 수 있으나 설계과정에서는 질량기여도가 90%이상 참여하고 응답주기가 0.1sec 이하에 수렴하도록 지정하거나 지중구조물의 손상특성을 고려한 취약도평가를 Zion Method, SSMRP Method 및 BNL Method 등으로 수행하여 가장 가능한 파괴모드를 결정하여야 한다. 지하구조물의 파괴모드수 결정은 지진에 의한 지중상대거동을 반영하여야 하는데, 그 동안 지상구조물과 같이 기둥이나 접합부에 단면보강을 많이 하여 상대적으로 취약한 부위가 발생하는 것을 반영하는데 반듯이 필요한 과정이다.

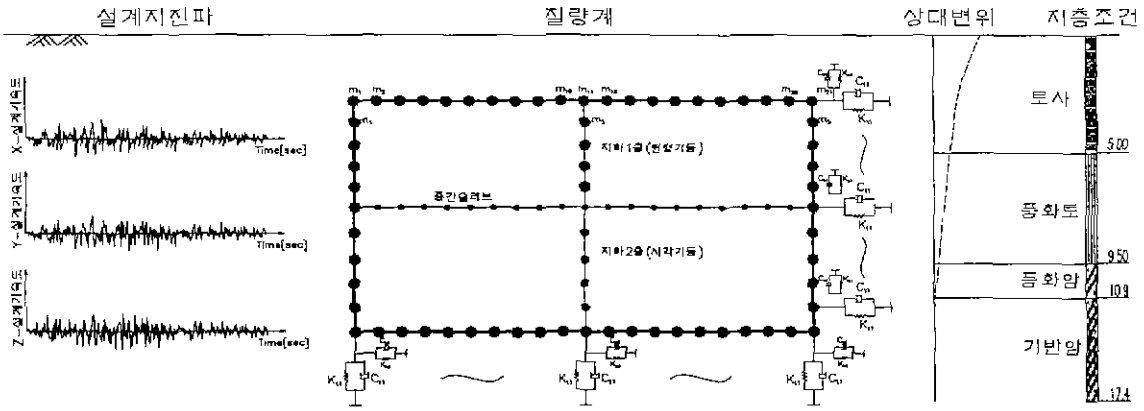


그림 1. 지진발생시 구조계

2.2 해석모델링 결정

지진발생시 구조계는 질량계와 구조물의 강성이 지층조건에 따라 전달되는 지진파 속도차와 구속력에 의해 심도 별로 상대변위가 발생한다. 따라서, 토층 성질이 급변화하는 구간이나 지하수위 변화구간, 단층, 횡습곡등을 통과하는 지하철에 대한 내진설계가 반드시 필요하다고 판단된다. 재료적 거동에 따라 탄성상태해석법 소성상태해석법으로 구분할 수 있으며 각 해석법에 따라 해석모델링이 달라 진다고 볼 수 있다. 대표적인 탄성상태해석법인 지반 스프링설치 방법은 쉽게 모델링을 구성할 수 있고, 지진동에 대한 구조물의 응답이 간단할 경우에 많이 이용되는 방법이지만, 지층별 동적토압과 관성력 산출이 쉽지 않고 구조물과 지반 경계부의 비선형거동 처리를 명확히 표현할 수 없기 때문에 제한적인 적용이 필요하며 이를 극복하기 위해서 지반을 포함한 모델링해석 방법이 필요하다.

2.3 지진하중에 따른 해석방법 결정

지중구조물에 지진하중을 재하하는 방법으로는 다음과같이 분류할 수 있다. 첫째는 해당지역에 발생하는 지진가속도의 크기 및 발생빈도를 결정하기 위해 측정된 자료를 근거로 설계지진파를 적용하는 시간이력해석 방법이 있고, 둘째 방법으로 시간에 따른 가속도 성분을 주기 영역으로 환산한 가속도성분의 스펙트럼을 구조계에 작용시켜 응답(변위, 속도, 가속도)에 따라 다중 모드(mode)를 중법을 시켜 해석하는 복합모드 응답스펙트럼해석법이 있다. 셋째 방법은 가장 간단한 방법으로 거동이 간단할 경우 단일모드로 가정하여 절점변위에 작용하중 동적하중을 정적하중으로 환산하여 적용하는 의사정적해석법이 있다. 이중 가장 확실한 시간이력해석은 설계지진파 가정에 문제가 있고 의사정적해석법은 거동이 단순한 경우에 적용할 수 있어 본 연구에서는 복합모드 응답스펙트럼 해석법을 적용한다.

3. 동적해석

3 1 정거장구조물의 동적해석

지하구조물의 내진설계 방법으로 제시된 스프링설치방법과 지반모델링 해석법을 그림 2와 그림 3과 같이 설정하여 각기 지반에 작용하는 설계지진력을 적용할 경우 나타나는 거동을 살펴보면 두 해석모두 중간슬래브의 강성이 작아 표 1과 같이 MODE SHAPE의 변위가 상대적으로 크게 발생하며, 스프링설치방법은 동적토압과 관성력을 산정하는 과정이 필요하며 심도별 지중변위 차에 의한 거동은 수평방향의 지반스프링에 의해 좌우되어 지반과 구조물의 상대변위를 고려할 수 없었다. 지반모델링 해석법은 모델링의 Mesh 유효폭(Be)과 심도깊이(He)에 대한 결정을 하기 위한 선행모델링을 수행한 후 허용범위 오차내에 수렴할 때로 Be와 He를 결정하여야 한다. 구조물과 지반의 경계조건과 사용요소(element)의 선택은 상대거동을 탄성상태와 소성상태로 구분할 수 있는데, 압축력만 받고 인장력을 받지 못하는 지반의 특성을 고려할 수 있는 비선형요소(Gap Element)를 적용할 수 있고, 지반System으로 Kelvin 모델과 Maxewll 모델을 사용할 수 있으나, 대부분 점착력(c)이 작다고 가정하여 스프링 k만을 적용하는 경우가 많다. 본 연구에서는 지반과 구조물경계요소를 3Node로 적용하는방법과 압축스프링(Ks)를 적용하는 방법을 적용하였고, 구조물의 요소선택은 우각부와 기둥접합부, 중간슬래브등 응력거동이 복잡하다고 예상되는 구간에 삼각형요소(3 node)를 사용하고 기타부분에는 사각형요소(4-node)를 설정하였다. 또한, 지반의 모델링은 적응적세분할기법(adaptive mesh Design)으로 설계하였고, 형상비(a/b)는 5이하로 설정하였다.

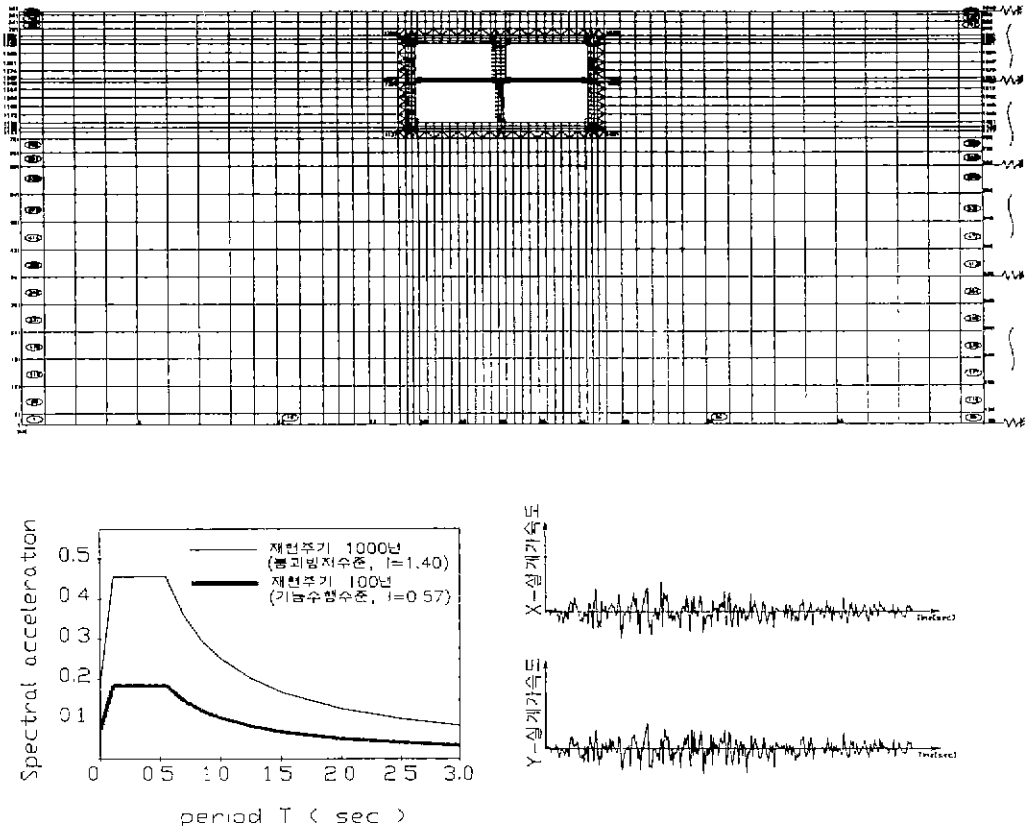


그림 2. 구조해석 모델링 및 설계지진파

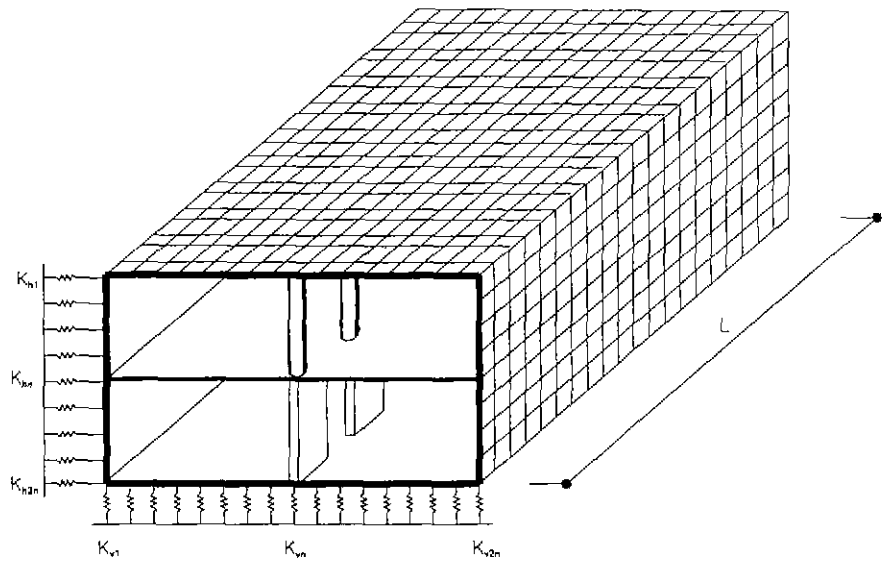
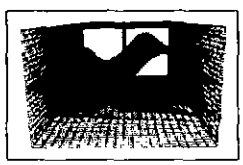
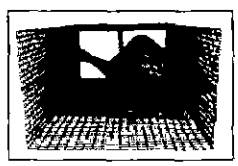
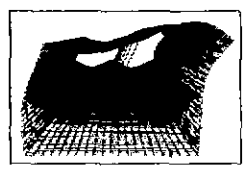
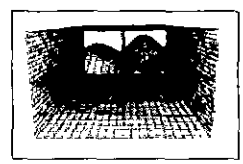
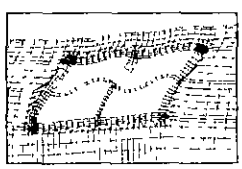
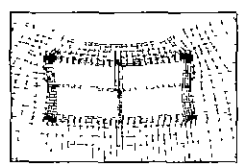
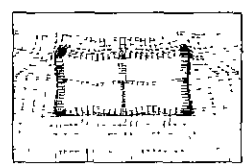


그림 3. 지반스프링설치 모델링

표 1. MODE SHAPE

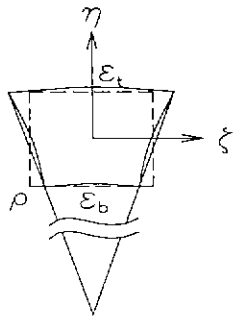
지 반 스 프 링 설 치 해 석			
MODE 1	MODE 2	MODE 3	MODE 4
			
T=0.1071 sec	T=0.1019 sec	T=0.0982 sec	T=0.0938 sec
지 반 모 델 링 에 의 한 해 석			
MODE 1	MODE 2	MODE 3	MODE 4
			
T=0.2844 sec	T=0.2539 sec	T=0.2199 sec	T=0.2124 sec

3.2 해석방법에 따른 거동분석

두해석 방법은 지반의 상대거동을 반영하는 차이 때문에 모든 거동결과 다르게 나타났으나, 이를 실험을 통하지 않고 해석에 의한 방법으로 검증하지 못하는 상황속에서, 스프링에 의한 모델링은 지반과 병행한 설치를 제외하고는 지중의 상대변위차를 고려한 동적토압과 관성력을 표현할 수가 없어 표 1에서 보듯이 주기가 작게 발생하고 동적거동이 작게 묘사되었으며, 그 동안 적용되어온 개략해석 차원에서 적용된 스프링 설치 후 의사정적하중을 재하하는 방법은 동적거동의 특성을 잘 반영하지 못한다고 판단된다.

3.3 모멘트와 곡률 상관관계

요소에 발생하는 변형률(strain)에 의해 모멘트와 곡률간의 유도 방정식을 그림 4와 같이 유도할 수 있으며, 이는 상하연의 변형률을 중립축에 비례한다는 가정하에 곡률을 산정하고 모멘트를 산정 할 수 있다. 응력과 변형률에 따라 변화하는 탄성계수 함수와 단면2차모멘트로 부터, 콘크리트응력(σ_c)이 허용응력($\fallingdotseq 2.0\sqrt{f_{ck}}$)보다 크면 균열단면2차모멘트로 가정할 수 있고 작다면 인장강성증강효과(Tension Stiffening Effect)를 고려한 모멘트를 산출할 수 있다.



$\varepsilon_t > \varepsilon_b$ 일때

$$\kappa = \frac{1}{\rho}$$

$$\kappa \fallingdotseq \left[\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t - \varepsilon_b} - \frac{1}{2} \right] t$$

t : 부재두께

$$-M = E \cdot I \cdot \kappa$$

그림 4. 모멘트와 곡률 간의 관계

3.4 정거장 단면의 내진해석 결과

지표면으로부터 심도가 깊을수록 상대변위는 작아지며, 지층의 구속력 작용하는 심도에서 가장 큰 단면력이 발생한다. 따라서 지중심도가 고정구속력이 강한 암층이하에서는 발생부재력이 상대적으로 작아지고 암층과 표층경계의 지하1층 상부기둥이 지층 조건에 따라 더 큰 발생력이 작용할 수 있다. 따라서, 심도와 지층의 물성치에 따른 내진설계가 필요하며, 하중전달률이 많은 기둥에 전단응력이 과다하게 발생하고 있고 이로 인해 지진시 전단파괴가 발생 할 만큼의 하중이 작용하므로 이에 대한 보강이 반드시 필요하나, 현재 국내설계에는 이에 대한 검토가 수행되지 못하고 있다.

표 2. 정거장 기둥구조물의 내진해석 결과

구 분	발생 응력	콘크리트 허용응력	검 토 내 용	비 고
상부 원형 기둥 220×60cm c.t.c 5.0m	휨 : 전단 : 축력 : 39.9**	4.11** (kgf/cm²) (=0.25$\sqrt{f_{ck}}$)	A_v,필요= $\frac{(\tau-\tau_c)\cdot b\cdot s}{\sigma_{sa}} = \frac{(39.9-4.11)\cdot 106\cdot 15}{1800}$ = 31.61 cm²	시방서규정 (도교시, p814) $A_{sh}=0.30\ a\ h_c \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y}[\frac{A_g}{A_c}-1]$ = 10.58cm² (사각기둥 환산)
하부 사각 기둥 ϕ120cm c.t.c 5.0m	9.76** (kgf/cm²)	4.11** (kgf/cm²) (=0.25$\sqrt{f_{ck}}$)	A_v,필요= $\frac{(\tau-\tau_c)\cdot b\cdot s}{\sigma_{sa}} = \frac{(9.76-4.11)\cdot 220\cdot 15}{1800}$ = 10.36 cm²	$A_{sh}=0.30\ a\ h_c \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y}[\frac{A_g}{A_c}-1]$ = 29.16cm²
지하2층 벽체	417.5*** (ton)	1432.8*** (ton)	F.S($\phi P_n/P_u$)=3.43	사용철근(휨,전단)으로 안전
상부Slab 단부	1234*** (ton)	1536.2*** (ton)	F.S($\phi P_n/P_u$)=1.24	사용철근(휨,전단)으로 안전
중간Slab 단부	64.50*** (ton)	73.9*** (ton)	T=40cm 일 때 → F.S($\phi P_n/P_u$)=0.87 T=50cm 일 때 → F.S($\phi P_n/P_u$)=1.15	휨, 전단력 고려시 슬래브 두께 부족
하부Slab 단부	463.5*** (ton)	1680.9*** (ton)	F.S($\phi P_n/P_u$)=3.63	사용철근(휨,전단)으로 안전

4. 결론

지중 RC 도시철도는 대부분이 지하구조물로 지진시 지반과 지하구조물의 상대적인 거동이 미소하다고 알려져 있으나, 지층의 변화가 심한 구간, 액상화 발생 가능성이 높은 사질토 구간 등 지진시 동적거동에 취약한 지반이 존재하는 구간은 미소한 지진에 의해서도 취약지반의 영향으로 구조물에 큰 영향이 발생할 수 있다. 지진 영향이 클 것으로 예상되는 구간에 지하철 구조물에 대해 내진해석이 반드시 필요하며, 설계기준 상에 철근배근에 대한 구체적인 배근세목이 명기되지 않아 지상구조물의 기준을 그대로 도입함으로써 나타나는 문제를 방지하기 위해 대표단면에 대해 내진해석을 수행하는 것이 바람직하다고 판단된다. 본 연구의 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 지하철 정거장의 단면에 지진하중을 적용할 경우, 정거장 중간기둥과 슬래부의 접합부에 전단력이 가장 크게 발생하였으며, 이를 방지하기 위해서 기둥의 횡방향구속철근과 기둥과 슬래브 접합부에 철근보강이 반드시 필요하며. 상대변위가 큰 지하1층 기둥의 횡방향 구속철근 필요량이 도로교 표준시방서의 $A_{sh}=0.30\ a\ h_c \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y}[\frac{A_g}{A_c}-1]$ 규정보다 큰 결과를 보였다. 따라서, 도로교표준시방서에 제시된 횡방향띠철근 제안식은 단순히 단면에 대한 최소기준치이므로 내진해석에 의한 부재력을 사용하여 계산한 횡방향 구속철근량 이상을 배치하는 것이 바람직하다고 판단된다.

2) 일반적인 지중 RC 도시철도 정거장 구조물의 기둥과 접합부는 충분한 철근보강을 하는 경우가 많아 부재 강성이 상대적으로 취약한 중간슬래브(두께 40cm)에 지반이 지진동에 취약 할 경우, 전단과 축력에 단면보강이 취약하여 이에 대한 보강이나 단면두께 증가가 필요하다고 판단된다.

3) 본선과 정거장 구조물의 일반부재(슬래브 및 벽체)에 발생하는 응력은 허용응력 이하로 발생하지만 국부적인 집중응력이 과대하게 나타나는 기둥 접합부와 우각부에 대해서 우각부 보강철근과 헌치에 연하는 철근의 배치가 필요하다고 판단된다.

4) 지하구조물에 적용하는 동적해석은 지반과 상호작용을 고려하여 해석해야 되며, 근사적으로 적용하는 스프링설치 방법은 타당하지 않다고 사료된다. 이는 지중거동이 지반모델링해석 결과 보다 작게 나타나며, 특히 지반 스프링의 강성계가 시간별 변화를 반영하지 못하기 때문이다.

5) 지반과 구조물의 경계는 기하학적 비선형해석을 하였으나, 재료는 탄성모델을 근거로 해석하여 좌굴과 붕괴를 판단하는 비선형거동 해석과, 기둥에 배치할 철근세목 기준을 제시 할 수 있는 연구가 필요하다.

5. 감사의 글

본 연구는 광주도시철도 1호선 2단계 실시설계 과정에서 검토된 것으로 도움을 주신 분들께 고마움을 전합니다.

6. 참고문헌

1. 도로교표준시방서, 건설부, 1996
2. 콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 1995.6
3. 구조물의 내진설계 기법, 한국전산구조공학회, 1992 2
4. SEISMIC DESIGN AND RETROFIT MANUAL FOR HIGHWAY BRIDGES, U.S Dept. of Transportation, 1986
5. A. A. Stamos, D.E. Beskos "Dynamic Analysis of Large 3-D Underground structures by the BEM", Earthguake Engineering and Structural Dynamic, 1995, VOL 24 pp 917-934
6. 이상덕,최수일,구자갑, 안정된 지하구조물의 설계와 시공, 새론,1994
7. 광주도시철도 1호선 2단계 1-6공구 종합보고서, 광주광역시, 1999