

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.4.439
JCCT 2019-11-55

지하철 1~4호선 내진성능 평가절차 및 보강방향

Seismic Performance Evaluation Procedure and Reinforcement Direction of Subway Lines 1~4

장원락*, 정지승**

Won-Rak Jang*, Jee-Seung Chung**

요약 본 논문에서는 도시철도 내진설계 기준에 의거하여 내진설계가 되지 않은 기존 구조물에 대해서 2010년 4월부터 2013년 10월까지 시행된 지하철 1~4호선에 대해 내진성능 평가방안을 연구하였고, 2012년 12월부터 2018년 12월 까지 시행한 내진성능 보강공사 실시설계를 통하여 내진보강이 필요한 시설물에 대한 내진성능 보강방향에 대해 정리 하였다. 평가결과 1~4호선 141.5km 중 53.2km(총 사업비 3,220억원)가 내진보강이 필요한 것으로 검토 되었으며, 최종적으로 2020년까지 지진규모 6.5에 견딜 수 있게 내진율 100% 확보를 목표로 하고 있다. 본 논문은 향후 도시철도의 내진성능을 평가하고 보강하기 위한 기초 연구자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 도시철도, 내진성능, 내진보강

Abstract In this paper, the seismic performance evaluation of the subway lines 1~4 conducted from April 2010 to October 2013 for the existing structures that were not seismically designed based on the seismic design criteria of urban railways was studied. The detailed design of seismic reinforcement for the facilities requiring seismic reinforcement was summarized through the detailed design of the seismic reinforcement construction conducted from March to December 2018. As a result of the evaluation, 53.2km (total project cost of 322 billion won) of 141.5km of Lines 1~4 were considered to require seismic reinforcement, and finally, the company aims to secure a 100% earthquake-proof rate to withstand earthquake-scale 6.5 by 2020. This paper can be used as basic research data to evaluate and reinforce seismic performance of urban railways in the future.

Key words : Urban railway, Seismic performance, Seismic reinforcement

1. 서 론

1. 개요

우리나라는 지진발생 확률이 매우 낮은 지역으로 분

류 되어져 1980년대 중반까지 원자력발전소 구조물과 같은 특수 구조물에 대해서만 내진설계를 수행 하였으며, 일반 토목 및 건축 구조물의 설계시에는 내진설계의 개념을 도입하지 않았다. 그러나, 1980년 후반 건축

*정회원 서울교통공사 토목1사업소 대학원생
**정회원 동양대학교 건설공학과 정교수(교신저자)
접수일: 2019년 9월 23일, 수정완료일자: 2019년 10월 24일
게재확정일자: 2019년 10월 29일

Received: September 23, 2019 / Revised: October 24, 2019
Accepted: October 29, 2019
*Corresponding Author: jj5080@naver.com
Dong Yang Univ., Korea

물에 대한 내진설계 기준이 제정되어 건축물의 설계에는 지진하중에 해당하는 등가 횡방향력의 영향을 고려한 해석이 시작되었으며, 1990년에 들어서면서 토목구조물에도 내진설계의 개념이 도입되어 일반 토목구조물의 설계에도 내진설계를 수행하도록 설계기준에 명시되었다.

우리나라는 1978년 홍성지진 이후 댐(1979년), 터널(1985년), 건축물(1988년) 등에 내진설계가 도입되었으며, 1992년에는 도로교 표준시방서에서도 점차적으로 도입되어 1996년에 제정된 「도로교 표준시방서」 이후로 본격적으로 적용하기 시작하였고, 도시철도에서는 2005년에 본격적으로 도입되었다. 또한, 국내에서는 2009년 지진재해대책법 시행령(소방방재청 2009년)을 계기로 내진설계가 적용되지 않은 구조물에 대한 내진보강을 추진하고 있다.

서울교통공사 1~4호선도 1974~1994년 이전에 개통된 시설물로 내진설계가 미적용된 구조물이다. 따라서 서울교통공사에서는 내진설계 되지 않은 기존 지하구조물에 대해서 지속적인 내진성능 평가를 수행하고 있으며, 이에 2010년 4월부터 2013년 10월까지 시행된 지하철 1~4호선 지하 BOX 내진성능 상세평가 및 보강방안 수립용역을 바탕으로 하여 내진성능을 확보하지 못한 구조물에 대해서 변경된 설계기준을 바탕으로 내진보강 설계를 위한 내진검토를 수행하고 있다. [1]

본 논문에서는 도시철도 내진설계 기준에 의거한 지하철 1~4호선 내진성능 보강공사 실시설계(1~3차) 결과를 검토, 분석하였다.

2. 시설현황

현재 서울교통공사에서 운영, 관리하고 있는 지하철 1~4호선 현황은 다음과 같다.

표 1. 연장 및 정거장 현황
Table 1. Extension and Station Status

division	sub Total	Line 1	Line 2	Line 3	Line4	
extension(km)	146.8	9.9	62.2	41.4	33.3	
Station	120	10	50	34	26	
Platform type	Relative	82	8	40	17	17
	Island expression	38	2	10	17	9
Platform form	Straight	55	4	25	14	12
	curve	65	6	25	20	14
Tunnel type platform	8	-	1	3	4	

표 2. 구조물 현황 및 연장

Table 2. Structure Status and Extension

(단위 : m)

division	sub Total	Line 1	Line 2	Line 3	Line4	
sum	146,816	9,891	62,150	41,406	33,369	
ground	sub Total	6,622	1,213	3,837	878	694
	ground	2,927	642	2,285	0	0
	U-Type	2,544	571	1,108	552	313
	Retaining wall	1,151	0	444	326	381
Underground	sub Total	115,144	8,678	43,062	37,665	25,739
	Box	83,233	8,678	34,900	21,491	18,164
	Tunnel	31,911	0	8,162	16,174	7,575
Elevated Structure	sub Total	25,050	0	15,251	2,863	6,936
	Elevated	19,137	0	12,063	1,583	5,491
	Bridge	5,913	0	3,188	1,280	1,445

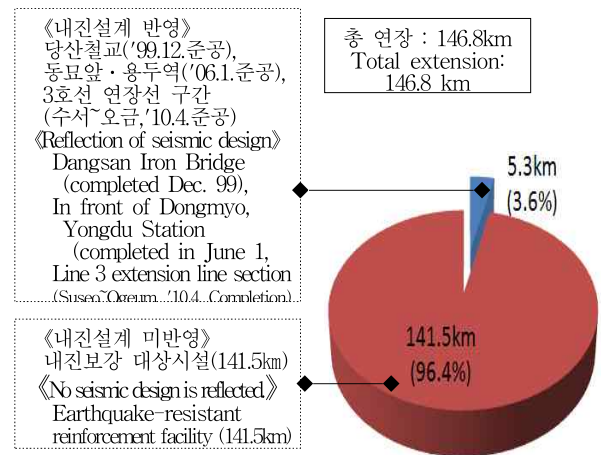
II. 내진보강 추진방향

1. 내진설계 현황

현재 운영중인 지하철 1~4호선의 내진설계는 관련 법 및 규정 제정 이전에 건설(1974년~1994년)되어 전체 연장 대비 96.4%(141.5km)에 내진설계가 반영되지 않았다.

그림 1. 지하철 1~4호선 내진설계 현황

Figure 1. Seismic Design Status for Subway Lines 1~4



2. 내진보강 계획

서울교통공사에서는 건설당시 내진설계가 반영되지 않은 연장에 대해서는 2007년부터 2013년 기간 동안 내진성능 확보 여부를 위한 평가용역을 실시하였으며 내진성능보강 단계별 추진계획은 다음과 같다.

- 2007년 6월~2007년 12월 : 서울교통공사 1~4호선 내진성능 예비평가
- 2009년 3월~2010년 9월 : 서울교통공사 2~4호선 고가, 교량 내진성능 상세평가
- 2009년 10월 : 지진재해대책법 시행령
- 2010년 4월~2011년 6월 : 서울교통공사 2~4호선 지하구조물 내진성능 상세평가(1차)
- 2011년 6월~2012년 6월 : 서울교통공사 2~4호선 지하구조물 내진성능 상세평가(2차)
- 2012년 12월~2013년 10월 : 서울교통공사 1~4호선 지하구조물 내진성능 상세평가(3차)
- 2012년 12월~2013년 10월 : 서울교통공사 2~4호선 지하구조물 내진성능보강공사 실시설계(1차)
- 2016년 10월~2017년 11월 : 서울교통공사 3~4호선 지하구조물 내진성능보강공사 실시설계(2차)
- 2016년 11월~2017년 11월 : 서울교통공사 1~2호선 지하구조물 내진성능보강공사 실시설계(2차)
- 2018년 4월~2018년 12월 : 서울교통공사 1~4호선 지하구조물 내진성능보강공사 실시설계(3차)

평가결과, 1~4호선 141.5km 중 53.2km(총 사업비 3,220억원)가 내진보강이 필요한 것으로 검토됐다. 내진보강 대상인 1~4호선 53.2km에 대해서는 2011년부터 2014년까지는 시비 598억원을 선 투자해 2013년 3월부터 단계적으로 추진중에 있다. 2015년부터는 국비보조금 40%를 지원받아 19.7km를 완료했고, 지진발생시 영향이 가장 큰 지상교량 20.2km도 18년 완료하였으며, 나머지 지하터널 33.0km 구간은 '16.1월부터 단계적으로 진행되고 있으며, 최종적으로 2020년까지 지진규모 6.5에 견딜 수 있게 내진율 100% 확보를 목표로하고 있다.

III. 내진성능 평가

1. 내진성능 평가절차 및 분류

도시철도 내진설계 기준에 따른 지하철 본선 BOX와 정거장의 내진성능 평가는 응답변위법을 기본 해석법으로 적용하였고, 일부 응답변위법 N.G 발생구간과 상세평가가 필요한 구간은 시간이력해석법과 모멘트-곡률해석법으로 내진성능 재평가를 수행하였다. [2], [3], [7]

내진성능 평가절차에 따라 평가된 구조물의 내진성능 분류는 다음과 같다.

그림 2. 내진성능 평가결과에 따른 내진성능 분류
 Figure 2. Seismic Performance Classification by Seismic Performance Evaluation Results



내진성능 평가결과에 따른 CASE별 내진성능 분류는 다음과 같다.

- CASE-1 : 탄성범위 내에서 구조물의 내진성능 확보됨 ($M_u < \phi M_n$)
- CASE-2 : 소성거동이 발생하나 붕괴방수지준의 내진성능은 확보됨 ($M_u > \phi M_n > M_u/\mu$)
- CASE-3 : 소성능력을 고려해도 구조물의 내진성능이 부족함 ($\phi M_n < M_u/\mu$)

2. 내진성능 평가결과

2012년 12월부터 2018년 12월까지 서울교통공사에서 발주하여 실시한 지하철 1~4호선 지하구조물 내진성능보강공사 실시설계를 수행한 결과는 다음과 같다.

표 5. 지하철 2~4호선 지하구조물 내진성능 보강공사 실시설계(1차) 결과

Table 5. Seismic Performance Reinforcement for Underground Structures of Subway Lines 2 ~ 4

division	Target facility		Earthquake Reinforcement Target				Seismic Reinforcement Target Ratio (%)	
	section	extension (km)	section	extension (km)	Reinforcement point			
					Lack of bending performance	Lack of shear performance		
Final	Line 2	35	3.3	25	2.0	21	128	60.6
	Line 3	6	0.3	2	0.3	-	24	100.0
	Line 4	16	1.0	7	0.8	-	94	80.0
	sub Total	57	4.9	34	3.1	21	246	63.3
	station	Line 2	6	1.2	3	0.6	21	24
Line 3		1	0.2	1	0.2	2	-	100.0
Line 4		2	0.5	-	-	-	-	-
sub Total		9	1.9	4	0.8	23	24	42.1
Retaining wall		Line 2	3	0.25	-	-	-	-
	Line 3	1	0.10	-	-	-	-	-
	Line 4	2	0.15	-	-	-	-	-
	sub Total	6	0.50	-	-	-	-	-
	sum	72	7.30	38	3.9	44	270	53.4

표 6. 지하철 2~4호선 지하구조물 내진성능 보강공사 실시설계(2차) 결과

Table 6. Seismic Performance Reinforcement for Underground Structures of Subway Lines 2 ~ 4

division	Target facility		Earthquake Reinforcement Target				Seismic Reinforcement Target Ratio (%)	
	section	extension (km)	section	extension (km)	Reinforcement point			
					Lack of bending performance	Lack of shear performance		
Final	Line 1	14	1,513	-	-	-	-	-
	Line 2	6	739	-	-	-	-	-
station	Line 1	2	413	2	413	-	2	100.0
	Line 2	2	420	-	-	-	-	-
sum	24	3,085	2	413	-	2	13.4	

표 7. 지하철 2~4호선 지하구조물 내진성능 보강공사 실시설계(3차) 결과

Table 7. Seismic Performance Reinforcement for Underground Structures of Subway Lines 2 ~ 4

division	Target facility		Earthquake Reinforcement Target				Seismic Reinforcement Target Ratio (%)	
	section	extension (km)	section	extension (km)	Reinforcement point			
					Lack of bending performance	Lack of shear performance		
Final	Line 1	46	3,632	33	3,156	112	-	86.9
	Line 2	219	11,582	137	8,509	530	-	73.5
	Line 3	94	5,955	39	2,870	254	-	48.2
	Line 4	187	10,002	120	6,452	620	-	64.5
station	Line 1	2	415	2	415	4	-	100.0
	Line 2	19	3,741	8	1,685	17	-	42.1
	Line 3	18	3,690	8	1,640	18	-	44.4
	Line 4	14	2,870	6	1,230	18	-	42.9
sum	599	41,887	353	25,957	1,573	-	61.9	

IV. 내진성능 보강방향 검토

1. 구조물 붕괴방지를 고려한 보강방향

내진성능 평가결과에 따른 CASE별 내진성능 보강 방향을 요약하면 다음과 같다.

- 실시설계 2~3차는 최초로 시행된 1차 용역에 적용된 설계기준을 검토하여 최신 설계기준 적용 및 전문가 설계자문 의견 참조 등 구조해석 수행을 위한 재

평가 기준을 수립하였으며

- 실시설계 2~3차는 구조물의 내진성능 평가를 ① 구조 해석적인 부분과 ②설계적인 부분(구조세목)으로 구분하여 검토하였으며, 응답변위법 등을 통한 구조 해석적인 부분은 문제가 없는 것으로 검토되었다.

- 그러나 건설당시 내진설계 기준이 없어 (도시철도 내진설계 기준 제정 : '05년) 현행 철도설계기준에서 요구하는 횡방향 구속 철근의 기준을 만족하지 못하고 있으며,

- 건설 후 45년이 지난 1~4호선은 긴 공용년수로 시설물이 열화되어 지진, 충격 활하중 등에 대한 내하력이 감소하였으며, 지하구조물의 붕괴메커니즘상 벽체 또는 슬래브에서부터 발생한 소성 힌지가 단계적으로 증가하여 마지막으로 기둥부 전단파괴로 이어지는 바 지진 안전성 확보를 위해서는 기둥보강이 필요한 것으로 검토되었다.

2. 지장물을 고려한 보강방향

본선 구간은 토목 및 설비 분야가 공동으로 심야 현장조사를 수행하여 해당분야의 모든 지장물을 직접 조사한다. 이에 따라 내진보강 공사가 필요한 구간에 설치된 지장물에 대해서는 해당 설비분야에서 이설계획을 수립하고, 토목분야에서는 지장물 이설 완료를 가정하고 보강계획을 수립한다.

정거장 구간은 지장물의 외관상 형태를 전수 조사하여 보강공사가 즉시 가능한 기둥과 보강 공사를 위한 지장물 이설이 경미한 기둥, 보강 공사를 하기 위해서는 설비분야의 검토가 필요한 기둥, 그리고 비내력벽에 매립된 기둥과 계단부에 매립이 되어 있는 기둥으로 구분한다. 이 중, 즉시 공사가 가능한 기둥과 지장물 이설공사가 경미한 기둥, 설비분야의 검토가 필요한 기둥 및 비내력벽에 매립되어 있는 기둥에 대해서는 보강공사를 시행하는 것으로 계획하고, 계단부에 매립되어 있는 기둥에 대해서는 보강을 미시행하는 것으로 구분하였고 CASE별 내진보강 방향은 다음과 같다.

- 1) CASE-1(보강 미시행) : 슬래브, 벽체, 중앙기둥 등 모든 부재가 탄성범위 내에서 내하력 확보
- 2) CASE-2(중앙기둥에 대한 연성보강 시행) : 슬래브, 벽체의 일부 부재에서 탄성범위 내에서는 내하력이 부족하지만 연성도로 나눈 부재력으로 검토 시에는 내하력 만족

- 소성변형 발생으로 부재의 건전도 다소 상실
 - 경제성과 시공성을 우선하는 보강방안 수립이 필요
- 3) CASE-3(해당부재 강성보강 시행, 중앙기둥에 대한 연성보강 시행) : 슬래브, 벽체의 일부 부재에서, 연성도로 나눈 부재력으로 검토시에도 내하력 부족
- 경제성과 시공성보다 안전성을 우선하는 보강방안 필요
 - 내하력 부족한 부재는 지장물 이설후 최대한 보강 시행
 - 지장물 이설 불가시 차순위 위험부재에 강성보강 시행

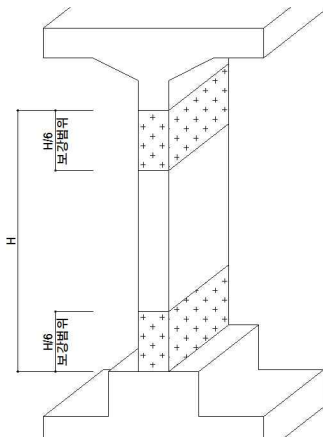
또한 정거장 기둥의 보강 방향은 다음과 같다.

- 1) 즉시보강 : 내진보강 공사가 즉시 가능한 기둥
 - 2) 경미한 이설후 보강 : 내진보강 공사를 위하여 경미한 지장물 이설이 필요한 기둥
 - 3) 설비분야 검토후 보강 : 내진보강 공사를 위하여 설비분야 검토가 필요한 기둥
 - 4) 비내력벽에 매립 기둥 : 비내력벽에 매립되어 시공중 벽체의 임시철거가 가능한 기둥
 - 5) 계단부에 매립 기둥 : 공사중 승객이용 불가로 인한 민원발생 우려로 임시철거 곤란
- 위 사항중 1)~4)의 보강방향은 즉시보강 시행이고 5) 계단부에 매립 기둥은 보강 미시행으로 하였다.

3. 기둥부 연성보강 범위

기둥부 연성보강 범위는 ‘철도설계기준 8.8.8(3) 기둥’에서 명시하는 단부구역(기둥의 최대치수, 기둥 순높이의 1/6, 450mm중 가장 큰 값)으로 하되, 지하철 구조물 내의 종방향 강성이 큰 사각 기둥은 기둥의 최대 단면치수를 폭 방향만 적용하는 것으로 한다. [5], [6]

그림 3. 기둥부 연성보강 범위
 Figure 3. Column stiffening range



4. 기둥 연성 보강량 산정방안

기둥 연성보강에 대한 보강량은 설계기준에서 요구하는 내진상세 횡방향 철근량과 동일한 수준의 연성능력을 확보할 수 있도록 보강량을 산정한다.

표 10. 기둥 연성 보강량 산정방법
 Table 10. Calculation Methods for Column Duct Reinforcement

STEP 1	<p>횡방향 철근이 없는 경우의 연성도 산정 Calculation of ductility in the absence of transverse bars</p>
STEP 2	<p>소요 횡방향 철근을 만족하는 경우의 연성도 산정 Calculation of ductility when satisfying required transverse bars</p>
STEP 3	<p>필요한 연성도 산정 Calculation of required ductility</p> $\mu_{req} = \mu_2 - \mu_1$
STEP 4	<p>보강재의 종류 및 보강공법에 따라 필요한 연성도(μ_{req}) 이상이 확보되는 보강량 산정 Calculation of the amount of reinforcement that secures the required ductility (μ_{req}) or more according to the type of reinforcement and the reinforcement method</p>

IV. 결 론

본 논문에서는 도시철도 내진설계 기준에 의거한 내진설계가 되지 않은 기존 구조물인 지하철 1~4호선 내

진성능 보강공사 실시설계(1~3차) 결과 내진보강이 필요한 시설물에 대한 내진성능 보강방향에 대해 정리하였다.

평가결과, 1~4호선 141.5km 중 53.2km(총 사업비 3,220억원)가 내진보강이 필요한 것으로 검토됐다. 실시설계 수행결과 내진보강 대상 비율은 1차 53.4%, 2차 13.4%, 3차 61.9% 로 나타났다.

서울교통공사에서는 최종적으로 2020년까지 지진규모 6.5에 견딜 수 있게 내진을 100% 확보를 목표로하고 있으며, 본 논문은 향후 도시철도의 내진성능을 평가하고 보강하기 위한 기초 연구자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Republic of Korea, Ministry of Land, Earthquake Resistance Design Regulations for Subway Structures, 2017
- [2] ASCE, Dynamic and Static Design Considerations for Underground Chambers, 1983
- [3] AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, 16th ed, 1996
- [4] Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, 1995.
- [5] Republic of Korea, Ministry of Land, Design Criteria for Railroad : Bridges, 2013.
- [6] British Standard, Eurocode 2 part 1-1 : Design of Concrete Structures, 2004.
- [7] Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea Vol. 10, No. 2, Development of Site Classification System and Modification of Design Response Spectra considering Geotechnical Site Characteristics in Korea (II), 2006.