

대공간 경기장 건축물의 내진성능평가

Seismic Performance Evaluation of Spatial Stadium Structure



이준호*
Lee, Joonho

1. 서론

2016년 9월 12일 경상북도 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진에 이어 2017년 11월 15일 포항시 북구 지역에서 규모 5.4의 지진이 발생하였다. 포항 지진으로 인해 인명 피해 92명, 이재민 약 1,020명이 발생하였고 사유 시설물 31,000개소, 공공 시설물 644개소가 피해를 입은 것으로 집계되었다¹⁾. 대표적인 피해 유형은 <Fig. 1>과 같이 학교 구조물 단주 파괴, 노후화된 아파트 구조물 붕괴, 필로티 공공주택의 비틀림 파괴이며, 한반도는 더 이상 지진 안전지대가 아님이 증명되었다. 이에 정부는 2016년 내진설계 의무 대상을 2층 이상 또는 연면적 200m² 건축물로 확대하고, 2018년 지진 안전 시설물 인증제의 민간 확대 및 지진·화산 재해 대책법 등 다양한 정책을 신설하였다. 그러나 2017년 10월 국토교통부에서 조사한 전체 건축물의 내진성능 확보율은 709만동 중 56만동인 7.9%에 불과하며 민간 건축물은 20.4%, 공공시설물의 경우 55.7%이다. 국내

대공간 경기장 중 30%는 내진설계가 반영되지 않아 내진보강이 시급하다.

본 기사에서는 한국시설안전공단이 발간한 “기존 건축물의 내진성능평가 및 향상요령(2013)”을 소개하고 제시된 가이드라인에 따라 예제 경기장 구조물의 내진성능을 평가하였다. 또한 비선형 동적해석을 통해 상부 트러스 구조의 안전성을 평가하였다.



(a) Short column



(b) Apartment



(c) Housing pilotis

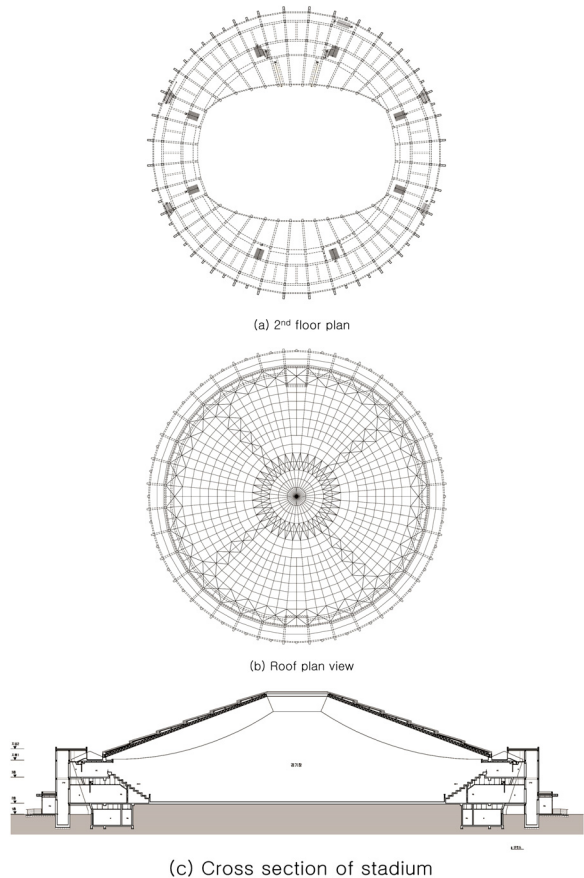
<Fig. 1> Earthquake damages

* 메트로티엔씨(주) 연구소장
Metro Total Construction

2. 기존 건축물 내진성능평가

국내 내진설계기준은 1988년 제정된 이후 현재 KBC-2016이 적용되고 있다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 국내 내진성능 확보율이 낮으며 정확한 내진성능평가를 통한 보강이 필요한 실정이다. 한국시설안전공단에 의해 2004년 발간된 “기존 건축물의 내진성능평가 및 향상요령”은 성능기반평가 개념을 반영하여 2013년에 개정되었다. 개정안은 예비평가, 1단계 상세평가, 2단계 상세평가로 구성되며 구조해석에 조직 채움벽을 반영하도록 제시하고 있다²⁾.

평가할 예제 구조물은 1984년 완공된 종합경기장 시설물이며 4층 철근콘크리트 구조물이다(Fig. 2). 연면적 5,000m² 이상 운동시설의 중요도는 1이므로 내진 1등급이며 요구되는 성능수준은 2,400년 재현 주기 지진의 2/3 수준의 지진하중에 대해 인명 안전(Life Safety, LS)이다. 지역계수는 0.14, 지반조건은 Sd이다.



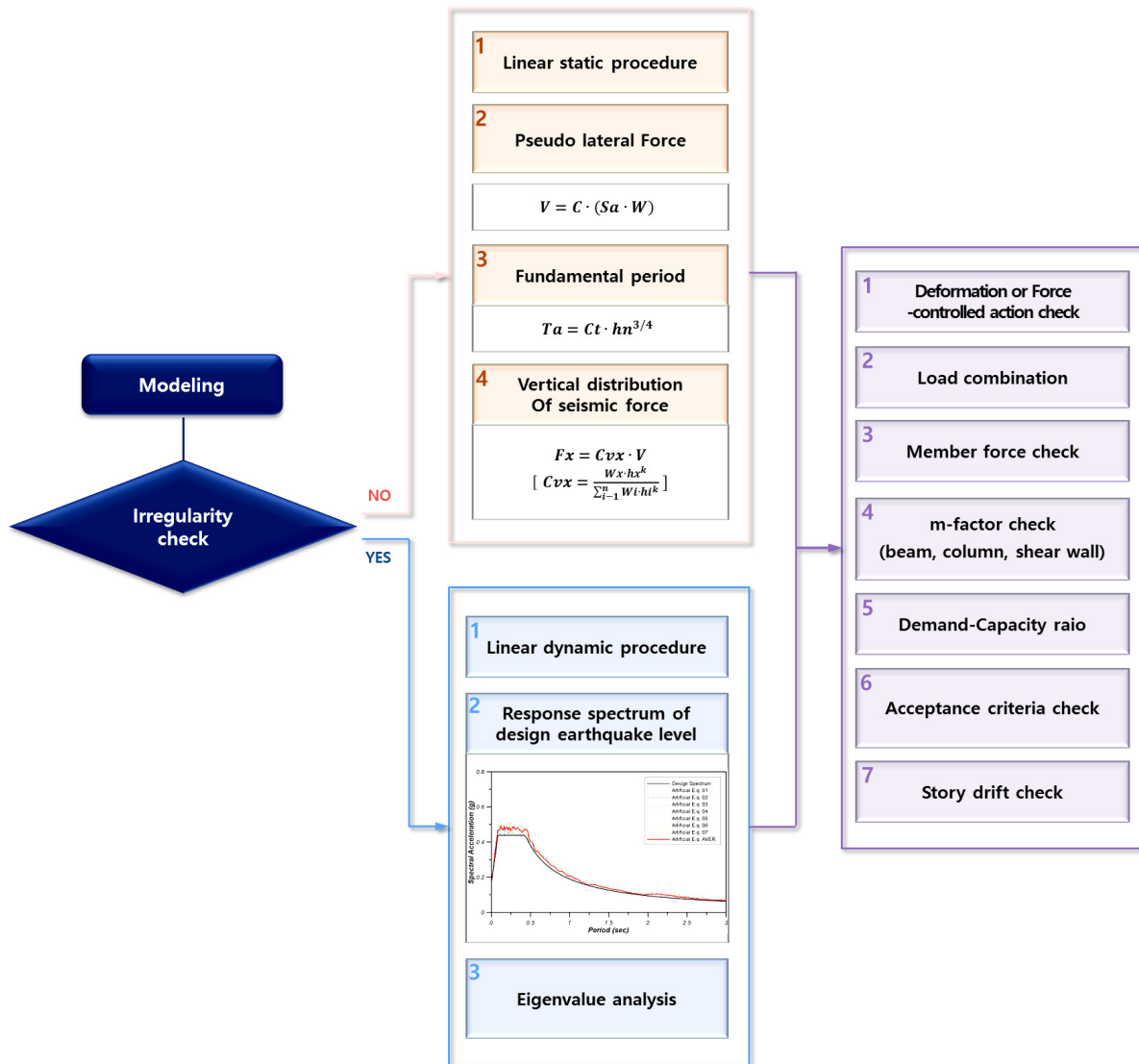
〈Fig. 2〉 Spatial stadium structure

2.1 예비평가 및 1단계 상세평가

내진성능 예비평가는 지진하중에 저항하는 층별 수직부재의 재료강도와 단면치수로부터 계산된 전단저항능력(Capacity)과 단주기 설계스펙트럼 가속도(S_{DS})에 의한 요구량(Demand)의 비율(DCR)로 계산된다. 수직부재는 휨파괴되는 부재와 전단지배형 부재로 구분하여 휨지배형 수직부재는 연성능력($D_{\mu} = 2.0$)을 고려하여 평가한다. 그러나 예비평가는 평면과 입면의 비정형성이 없는 10층 이하 구조물에 적용가능하며 보강 유·무는 1단계, 2단계 상세평가에서 결정되므로 실무에서는 거의 수행하지 않는다.

1단계 상세평가는 대상 구조물의 구조해석 모델링을 통해 탄성해석 결과를 토대로 부재별 강도 측면에서 성능기반평가를 수행한다. 1단계 상세평가 결과 목표성능을 만족하지 못할 경우 2단계 상세평가를 수행한다. 평가 대상 건축물의 범위에 따라 선

형정적해석절차(Linear static procedure) 혹은 선형동적해석절차(Linear dynamic procedure)를 수행한다. LSP는 주기산정식에 의한 의사 지진력을 이용하며, LSD의 경우 유효강성이 고려된 고유치해석 결과에 의한 지진하중을 이용하여 평가한다. 기존 건축물의 성능평가 수행 시 대상 건축물이 구체적으로 존재하고 재료 시험 및 상태 조사를 통해 불확실성을 제거할 수 있으므로 지진하중 산정 시 반응수정 계수를 적용하거나 하중저감 계수를 사용하여 부재의 강도를 낮추어 평가하지 않는다. 그러므로 변형지배 거동부재는 평균강도(Q_{CE})를 사용하며, 하중지배 거동부재는 공칭강도(Q_{CN})를 사용하여 부재의 휨 및 전단강도를 산정한다. 검토에 사용되는 하중조합은 중력하중과 지진하중이 사용된다. 그러나 하중지배 거동부재는 하중조합 생성 시 최대 비탄성 변위와 선형 탄성변위의 보정을 위한 수정계수(C)와 하중전달 감소계수(J)를 고려한다.



〈Fig. 3〉 Evaluation procedure

m-factor는 부재 양단에 작용하는 최대 모멘트를 부재의 순길이로 나눈 값과 공단안에 제시된 전단 강도 산정식과 비교하여 휨 및 전단지배를 분류하여 내진·비내진 상세 주근 배근 상태 등을 분류하여 표를 통해 즉시 거주, 인명 안전, 붕괴 방지에 해당하는 값을 산정한다. 개별 부재의 성능수준 확인 후 구조물 전체의 성능수준은 각 성능수준에 해당하는 부재의 연직하중 분담률에 따라 판정한다. 목표성능이 인명 안전인 경우 지진하중을 제외한 연직하중에 대해 즉시 거주와 인명 안전에 해당하는 부재의 연직하중 분담률이 80% 이상이면 목표 성능을 만족한다.

앞서 언급한 종합 경기장 구조물의 1단계 상세평가 결과 모든 하중조합에 대해 보와 기둥 부재의 층별 수직하중 분담률이 붕괴 수준으로 평가되어 2단계 상세평가를 수행해야 한다. 1단계 및 2단계 상세평가는 4층 이하 수직, 수평 부재만 평가하며 상부 트러스는 평가하지 평가에서 제외하였다.

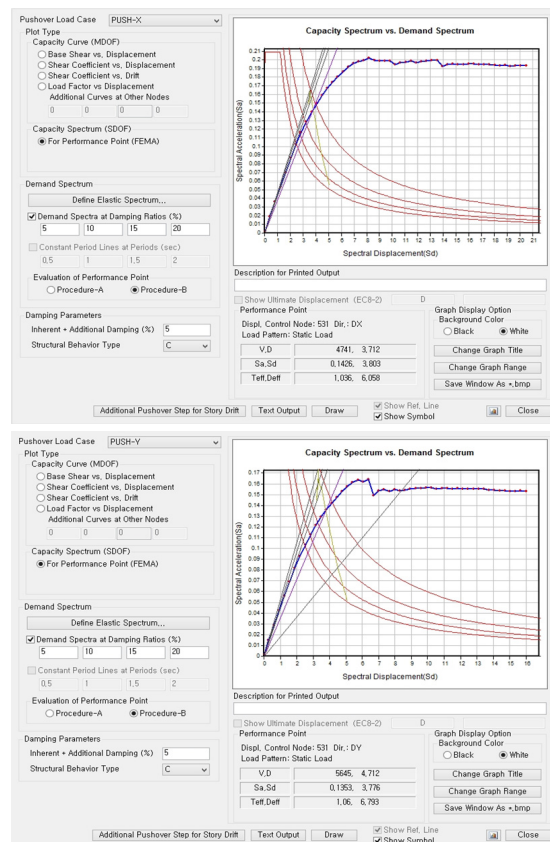
2.2 2단계 상세평가

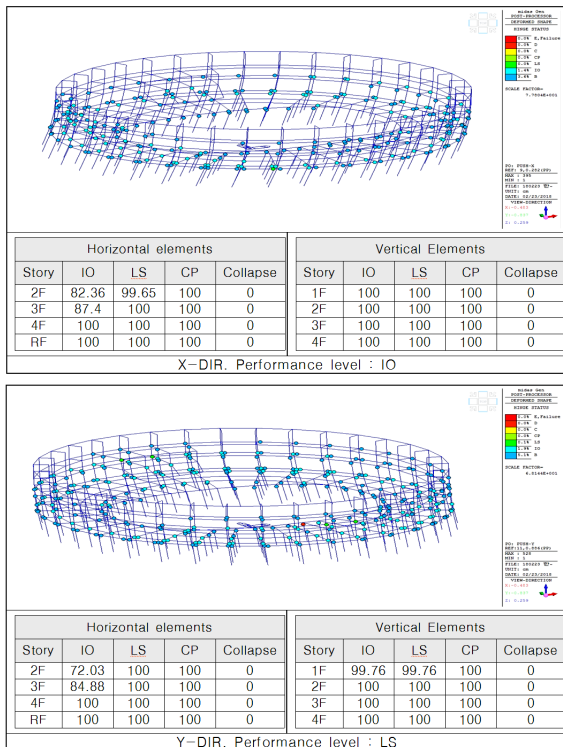
2단계 내진성능 상세평가는 비선형 정적해석 (Pushover analysis) 방법을 사용하여 부재의 연성도 및 변형능력을 고려하여 평가한다. 개별 부재의 재료비선형 거동특성을 정의한 후 횡변위를 점차적

〈Table 1〉 1단계 상세평가 결과

LCB	Floor	Horizontal element					Vertical element				
		IO	LS	CP	Collapse	P.L.	IO	LS	CP	Collapse	P.L.
LCB1	1F	76.89	85.97	87.53	12.47	LS	36.67	37.7	71.39	28.61	Collapse
LCB1	2F	59.75	71.65	79.81	20.19	Collapse	46.32	47.6	83.06	16.94	CP
LCB1	3F	63.86	78.76	82.49	17.51	CP	76.12	76.12	88.97	11.03	CP
LCB1	4F	91.61	100	100	0	IO	80.94	80.94	84.5	15.5	IO
P.L.							Collapse				
P.L.							Collapse				
LCB10	1F	75.2	86.42	87.41	12.59	LS	36.31	36.31	72.5	27.5	Collapse
LCB10	2F	57.49	71.29	76.65	23.35	Collapse	41.83	41.83	81.87	18.13	CP
LCB10	3F	68.34	80.21	82.66	17.34	LS	75.03	75.03	87.53	12.47	CP
LCB10	4F	91.48	100	100	0	IO	99.29	99.29	100	0	IO
P.L.							Collapse				
P.L.							Collapse				
LCB16	1F	80.89	85.22	87.65	12.35	IO	37.47	38.56	66.46	33.54	Collapse
LCB16	2F	56.19	71.74	78.09	21.91	Collapse	36.11	36.11	81.99	18.01	CP
LCB16	3F	68.7	80.76	84.28	15.72	LS	68.78	68.78	87.67	12.33	CP
LCB16	4F	92.28	100	100	0	IO	100	100	100	0	IO
P.L.							Collapse				
P.L.							Collapse				

으로 증가시키면서 지붕층 변위와 밑면 전단력의 관계를 산정하고, 성능점(Performace point)에서 발생한 부재의 응력 및 변형 정도가 목표 성능을 만족하는지 여부를 판단한다. 성능점의 산정은 ATC-40 혹은 FEMA 440에 제시된 능력 스펙트럼법(Capacity spectrum method)을 주로 사용한다. 예비 비선형 정적해석을 수행하고 1차 성능점에서 도출된 전단력과 축력비를 이용하여 부재의 변형능력 및 허용 수준을 재입력 후 성능점을 산정한다. 예제 구조물의 2단계 상세평가 결과 X방향 및 Y방향 모두 성능점이 형성되며 성능점에서의 수직하중 분담률 평가 결과 X방향은 즉시 거주, Y방향은 인명 안전으로 평가되었다. 성능점에서 층간변위는 X방향은 0.53%, Y방향은 0.72%로 산정되어 목표성능(인명 안전; 1%)을 만족한다. 결론적으로 목표 성능수준인 2,400년 재현주기 지진의 2/3 수준의 지진하중에 대해 인명 안전을 만족하므로 추가적인 내진 보강이 필요 없는 것으로 평가된다.





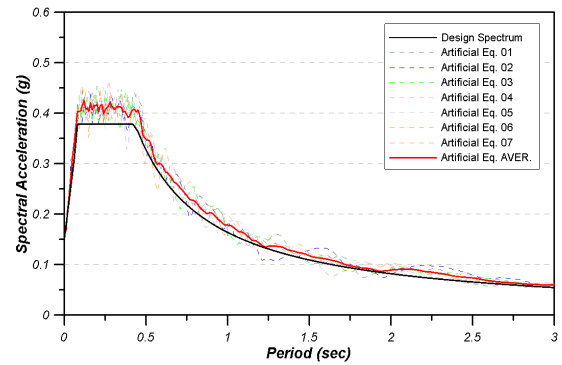
〈Fig. 4〉 Pushover analysis results

그러나 1단계 및 2단계 상세평가에서 상부 트러스는 하중으로 치환되어 수행되었으므로 비선형 동적해석을 통해 상부 트러스를 포함한 전체 구조물의 구조 안정성을 검토하였다.

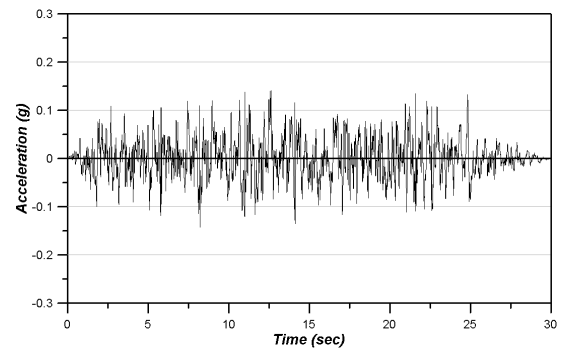
2.3 비선형 동적해석

비선형 동적해석은 Perform 3D³⁾를 이용하였고 철근 콘크리트와 상부 철골 트러스 부재의 비선형 물성치는 공단안에 의해 입력하였다. 해석을 위한 지진파는 반응수정 계수와 중요도 계수가 적용되지 않은 설계 스펙트럼에 비율 조정된 인공지진파를 생성하여 적용하였다. 지질 조사에 의한 부지응답 해석은 생략하였다. 상부 트러스는 강막을 고려하지 않고 해석을 수행하였다.

트러스의 층간변위는 하부 층고의 평균값과 유사한 높이를 설정하여 총 7개의 층간변위를 다음 그림에 표현하였다. 지진파 1개의 해석시간이 약 30시간이 소요되어 본 기사에서는 X방향과 Y방향에 대한 1개 지진파의 결과만 게재하였다. 고유치 해석



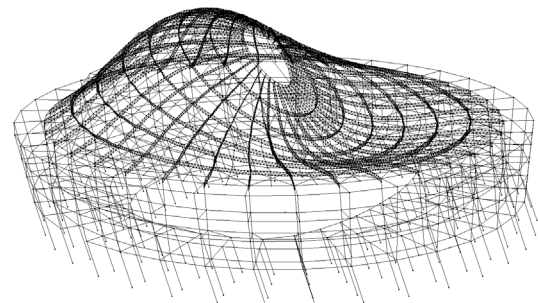
(a) Design spectrum



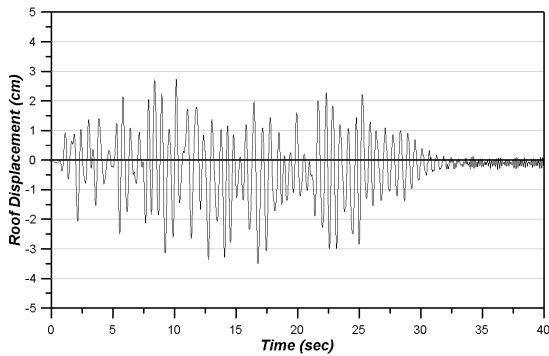
(b) Time history of earthquakes

〈Fig. 5〉 Artificial earthquakes used in nonlinear dynamic analysis

결과 1차 모드의 경우 비틀림이며 2차 모드는 아래 그림과 같이 상부 트러스의 처짐 변위가 발생한다. 지붕층 변위의 경우 최대 3.5cm 발생하였고 층간변위는 1층 기둥에서 최대 0.53%가 발생하였다. 그러나 트러스 부분도 층간변위가 최대 0.48%가 발생하여 지붕 트러스도 해석에 포함하여 내진성능을 검토해야 한다.



〈Fig. 6〉 2nd mode shape of stadium structure



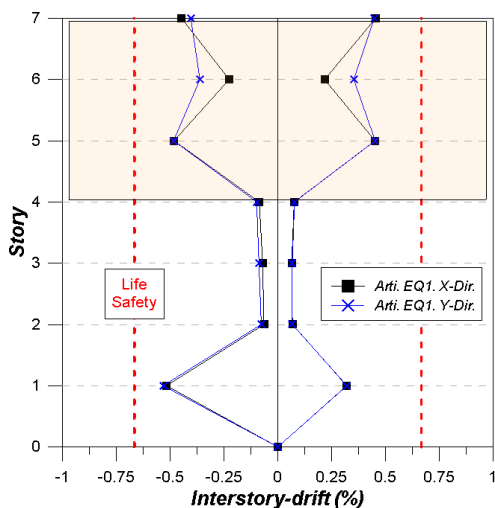
〈Fig. 7〉 Roof displacement

3. 결론

2017년 12월에 ‘MIDAS Gen 2018 V865’에 앞서 소개한 기존 건축물 내진성능평가 전용 모듈이 추가되면서 많은 구조기술자들이 손쉽게 해석을 수행할 수 있게 되었다. 공단안을 이용하여 대공간 구조물의 내진보강을 수행할 경우 상부 트러스는 하중으로 치환하여 하부 구조에 대해 평가하는 방법이 주로 관행처럼 사용되고 있다. 이는 비선형 동적 해석을 위한 모델링과 해석에 많은 시간이 소요되기 때문이다. 예제 구조물에서 살펴본 바와 같이 2단계 상세평가 결과 보강이 필요 없는 경우도 상부 트러스의 검토가 반드시 필요하다.

References

1. Kwon, H. K., “Actual situation of earthquake countermeasures from Pohang earthquake”, Journal of KISTEK, Korea Infrastructure Safety Corporation, Vol. 49, No.1, pp.1~8, 2017
2. You, E. J., Kim, T. W., Lee, S. H., & Kim, S. J., “Seismic Evaluation of Existing Buildings”, Journal of SIVIC, Korea Society of Seismic Isolation Vibration Control, Vol.13, No.1, pp.13~32, 2011
3. Computer and Structures, Inc. PERFORM User Guide ver 4, CSI: Berkeley, CA. ; 2006.



〈Fig. 8〉 Story drift ratio