

이력모델에 따른 표준학교건물의 비탄성거동 연구

제정현¹, 김진상², 윤태호^{3*}

¹정일구조엔지니어링, ²인제대학교 건축학과, ³창원대학교 건축학부

Inelastic Behavior of Standard School Building according to Hysteresis Models

Je, Jeong Hyun¹, Kim, Jin Sang² and Yoon, Tae Ho^{3*}

¹Jeongil Structural Eng., ²Department of Architecture, Inje University

³School of Architecture, Changwon National University

요약 본 논문은 내진성능평가를 위해 사용되는 비탄성해석의 신뢰도와 정확도에 있어 결정적인 영향을 미치는 다양한 이력모델의 특성과 구조물의 내진거동에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 연구대상은 표준학교건물로서 외국의 지진 가속도와 우리나라 규준에 맞는 인공지진 가속도 3가지를 건물의 장·단변방향 평면골조에 가한 후, 다양한 이력 모델을 적용하여 2차원 시간이력해석을 수행하고 비탄성응답을 구하고 층전단력, 층간변위비, 층변위를 비교하고 힌지의 발생 상태를 분석해 이력모델이 건물의 비탄성거동에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 단변방향에서는 층전단력과 층간변위비 모두 최대값은 수정다케다모델에서, 최소값은 외국지진에 대해서는 클라프모델, 국내지진에 대해서는 강성저감 삼선형모델과 수정다케다모델에서 각각 발생하는 것으로 평가되었다. 하지만, 장변방향에서 외국지진은 강성저감 삼선형모델이, 국내지진은 수정다케다모델이 최대 층전단력을 보였고 층간변위비는 최대값은 수정다케다모델에서, 최소값은 외국지진의 경우 클라프모델에서, 국내지진의 경우 다케다모델에서 나타났다. 장변방향에서 외국지진은 층전단력과 층간변위가 클라프모델에서 안전율을 낮게 보는 반면 국내지진에서는 수정다케다모델이 안전율을 낮게 평가하는 상이한 결과가 발생했다.

Abstract The inelastic response characteristics of the standard school buildings depending on selection of hysteresis models are reviewed. Three earthquake records of El-centro, Santa-Monica, Taft and three artificial earthquake records in accordance with Korea standard are used and the inelastic response characteristics such as story shear force, story drift ratio, story displacement, hinge distribution state are reviewed with various hysteresis models. As results, story shear force is increased by maximum 60% according to hysteresis model. And Story drift ratio is increased by maximum 42% according to hysteresis model. And The result with clough model shows the maximum hinge distribution state.

Key Words : Hysteresis Model, Inelastic Behavior, Time History Analysis, Standard School Building

1. 서론

최근 기상청의 자료에 따르면 우리나라의 지진 빈도가 1977년을 기준으로 꾸준히 증가하고 있어서 지진에 대한 인식의 변화와 대비가 필요하다. 그 중에서도 시급한 것이 지진발생시 피난시설로 사용될 학교건물에 대한 내진성능에 대한 평가이다. 학교건물은 전국에 널리 분포해

있지만 상당수의 건물이 내진 규정을 적용받지 않았기 때문이다. 내진설계기준이 적용되지 않은 1988년 이전에 지어진 건물들은 지진에 대한 대비가 필요하다. 그 중에서도 재난 시 대피시설로 지정된 학교 건물의 평가는 선행되어야 한다. 그러나 학교건물 중에 초등학교 대부분과 중학교의 81%, 고등학교의 76%가 1988년 이전에 지어진 건물로써 내진 설계가 고려되지 않았다[1]. 그리고

*교신저자 : 윤태호(thyoon@changwon.ac.kr)

접수일 09년 01월 20일

수정일 09년 04월 20일

게재확정일 09년 04월 22일

1988년 내진규정이 생기고 난 이후에도 학교건물은 6층 이상, 연면적 10,000㎡이상에 대부분 속하지 않기 때문에 2005년 내진규정이 3층 이상, 연면적 1000㎡이상으로 강화되기 전까지 초등학교 5646곳, 중학교 2935곳, 그리고 고등학교 2095곳의 대부분 학교건물이 내진규정 적용을 받지 않았다. 내진 규정을 적용 받았더라도 15층 이상 아파트 및 오피스텔보다도 낮은 내진등급[2]이 적용되어 강한 지진 발생 시 피난시설로 제 역할을 할 수 있을지 의문이며 따라서 내진성능을 확인하는 것이 필요하다.

내진에 대한 평가는 기술적으로 가능하다면 실제규모의 건물로 동적실험(shaking table test)이나 가상동적실험(pseudo dynamic test)을 통하여 비선형거동을 얻는 것이 바람직하나 비용이 과다하고 복잡하며 또한 규모가 크기 때문에 실용적이지 못하다. 따라서 실험에 의한 방법보다 신뢰성이 낮음에도 불구하고 시뮬레이션이 강한 지진하의 구조물 응답예측에 유일한 실용적인 방법이 되고 있다. 이러한 시뮬레이션 연구를 위한 비탄성 응답해석에서 다양한 이력모델들이 사용되나 이러한 이력모델에 대한 비교·분석 자료가 미흡해서 해석 시 이력모델 선택에 따른 비탄성 거동응답에 대한 상이한 결과 평가에 어려움이 있었다.

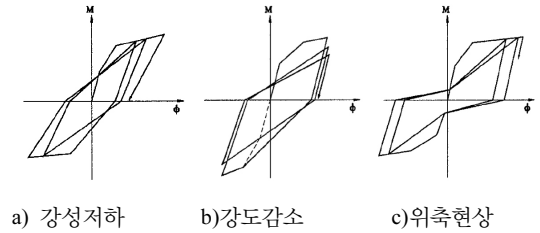
본 연구에서는 학교건물 중에서 신설학교 보급률이 높았던 1980년도 학교 교사 표준 설계로 시공된 건물을 연구 대상으로 설정하고 이들에 대하여 2차원해석을 통해 이력모델들의 선택에 따른 비탄성거동을 비선형시간이력 해석으로 비교·분석한다. 연구방법으로는 외국의 지진 가속도인 El-centro, Santa-Monica, Taft 지진 가속도와 우리나라 규준에 맞는 인공지진 가속도 3가지를 건물에 가한 후, 이력모델을 달리해 2차원 시간이력해석을 하여 최대 응답을 구하였다. 이를 바탕으로 장·단변방향으로 나누어 충전단력, 충전변위비, 충전변위를 비교하고 힌지의 발생 상태를 분석하여 구조물의 지진거동에 미치는 이력모델 별 특성을 파악하고 내진설계시 고려해야 할 점을 연구하였다.

2. 이력모델

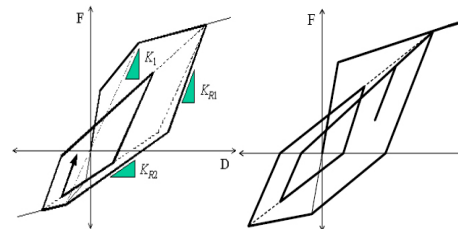
RC 구조물의 비탄성 응답해석은 부재의 강도, 강성도, 에너지 소산 특성을 나타낼 수 있는 실제적, 개념적 모델이 요구된다. 이러한 조건을 만족하는 것이 이력모델인데 현재 많은 이력모델들이 구조물의 지진해석에 사용되고 있다.

이들은 통상적으로 특정한 실험 데이터에 근거하고 있다. 따라서 이들을 실험과 다른 구조물에 적용할 때는 그

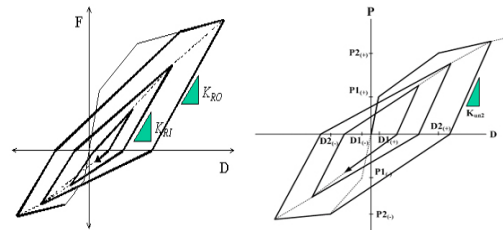
림 1과 같은 이력거동의 특성[3]과 제한사항을 충분히 인식하여야 한다.



[그림 1] 이력응답의 주요한 특징



(a)강성저감 삼선형(DT)(b) Clough Type(CT)



(c) Takeda Type(TT) (d) Modified Takeda Type(MT)

[그림 2] 대표적인 일축힌지 이력모델

비선형 이력모델은 단면 혹은 재료의 특성에서 파악할 수 있는 항복강도, 강성 및 강도의 저감정도를 지진하중과 같은 반복하중을 받는 경우에 어떠한 방식으로 변화하는가를 평가함으로써 정의할 수 있다. 하중과 변형에 대한 이동경로를 지정하기 위하여 일반적으로 하중의 재하/loading), 제하(unloading), 재재하(reloading)의 상태를 고려한다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 철근 콘크리트 구조물에 사용되는 대표적인 이력모델 4가지를 선택하여 적용하였다.

3. 해석모델

해석 대상 건물은 건설부에서 1980년에 공고한 표준

학교설계도 (건설부 공고 제130호, 1980년 10월 28일)에 의하여 건설된 학교건물이다.

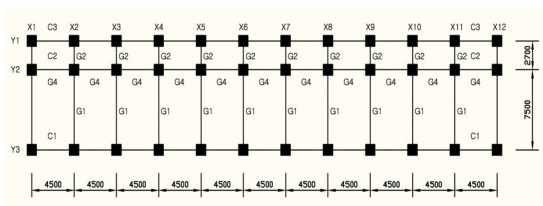
우리나라의 내진설계는 1988년 처음으로 내진설계기준이 마련된 이후 시작되었으므로 그 이전에 지어진 초중고 건물은 내진설계의 적용을 하지 않았다. 1988년 내진규정이 생기고 난 이후에도 내진설계의 대상은 6층 이상, 연면적 10,000㎡이상으로 한정되어 초중고학교건물은 이러한 범주에 대부분 속하지 않기 때문에 내진설계의 대상에 포함되지 못하였다. 그러나 이 기간에 지어진 학교건물은 초중고를 합쳐 10,000여동이 넘어 매우 많은 수의 학교건물이 지진에 대한 대비책이 없이 재난에 노출되어 있는 실정이다.

이후 2005년 내진규정이 강화되어 3층 이상, 연면적 1000㎡이상으로 확대되어 초중고학교건물의 대부분이 내진설계대상에 포함되기 시작했으나, 내진 설계의 중요도 등급적용에 있어서 15층 이상 아파트 및 오피스텔보다도 낮은 내진등급[2]이 적용되었다. 그러므로 강한 지진 발생 시 지진을 견디기에 적절한 구조설계와 시공이 되고 있는지와 재난시의 긴급피난시설로 제 역할을 할 수 있을지에 대해서는 확신하기 힘들며 따라서 이러한 학교건물에 대하여 내진성능을 명확히 확인하고 검증하는 것이 필요하다.

3.1 해석 방법

구조형식은 순 라멘RC구조이며, 층고는 3.3m인 편복도형 4층 교사건물로서 평면도는 그림 3과 같고, 사용된 기둥과 보의 단면리스트는 각각 그림 4, 그림 5와 같다 [4].

수직하중[5]은 일반적인 학교의 하중기준을 적용하였고, 콘크리트 설계기준강도는 18MPa, 철근강도는 240MPa를 적용하였으며, 지진하중은 건축구조설계기준(대한건축학회,2005)을 적용하였으며, 조적벽과 콘크리트의 노후화는 무시하였다.



[그림 3] 내진진단 대상건물의 평면도(단위:mm)

	1층	2층	3층	4층
C ₁ 350 X 500	12 - D19 2 - D16 	8 - D19 2 - D16 	좌동	좌동
C ₂ 350 X 400	12 - D19 2 - D16 	8 - D19 2 - D16 	6 - D19 2 - D16 	좌동
C ₃ 350 X 350	8 - D16 	좌동	좌동	좌동

[그림 4] 기둥 단면 리스트

	외단부	중앙부	내단부
1-aG ₁ 350 X 600	4 - D19 2 - D22 	2 - D19 	4 - D19 2 - D22
1-aG ₂ 350 X 450	4 - D19 	4 - D19 	2 - D19
1-aG ₄ 250 X 450	2 - D19 	5 - D19 	2 - D19

[그림 5] 보단면 리스트

3.2 입력지진

지진하중은 부지에서 예측된 시간이력을 사용하는 것이 원칙이지만 필요시에는 다음과 같은 3가지 경우를 이용함으로써 구조물에 대한 비선형 시간이력해석을 수행할 수 있다.

- 1) 고려되는 지반의 특성과 유사한 3개 가속도 시간이력을 이용하고 최대응답으로 설계
- 2) 고려되는 지반의 특성과 유사한 7개 가속도 시간이력을 이용하고 평균응답으로 설계
- 3) 성능목표에 해당하는 응답스펙트럼과 잘 부합하는 인공 가속도 시간이력 이용

본 연구에서는 위 3가지 방법 중에 1)과 3)방법을 선택하여 지진파를 설계해 시간이력해석을 하였다. 방법 1)에

서는 널리 알려진 El-centro 가속도, Northridge 가속도, Taft 가속도 3가지를 적용하여 해석하였다.

방법 3)에서는 건설교통부 고시 건축구조설계기준 (대한건축학회, 2005)에 제시된 표 2의 내용을 바탕으로 하여 그림 6의 설계응답스펙트럼과 가장 부합되도록 생성하여 그림7과 같이 3개의 인공지진 가속도 시간이력을 적용하였다[6].

표준응답스펙트럼의 지진 가속도를 다음 식에 적용해 현행기준으로 전환하여 현행기준에 맞는 지진가속도를 생성하였다.

$$S_{DS} = 2.5C_a \quad (1)$$

$$S_{D1} = C_v \quad (2)$$

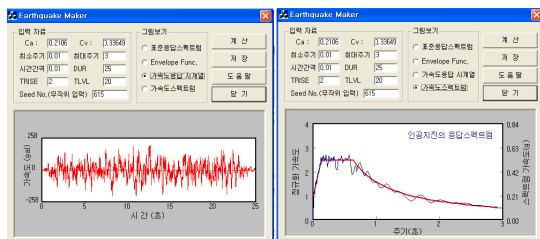
[표 1] 외국 지진 가속도 특성

	방향 (Deg)	Peak(g)	지속시간 (Sec)
1940, El Centro Site	270	0.3569	53.72
1994, Northridge, Santa Monica	0	-0.3703	59.98
1952, Taft, Lincoln School	69	-0.1557	54.38

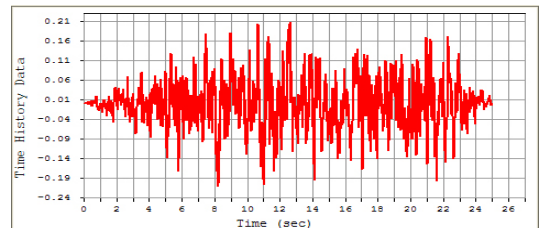
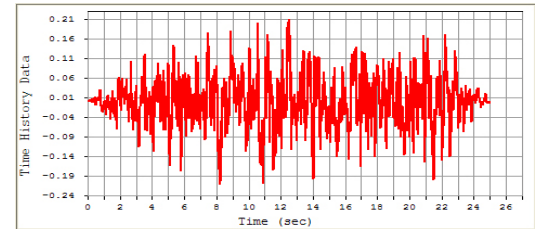
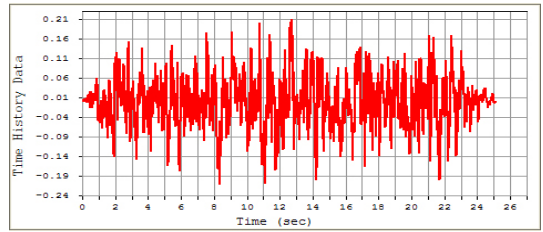
[표 2] 지진 가속도 생성시의 가정

지역계수 (A)	0.11
지반계수	1.0
지반종류	SD
SDs (단주기 설계스펙트럼 가속도)	3.6MA = 0.5267
SD1 (주기1초의 설계스펙트럼 가속도)	2.3MA = 0.3365

※ M=1.33(이 경우 스펙트럼 가속도의 크기는 재현주기 2400년에 대한 2/3 수준의 극한하중임)



[그림 6] 인공지진파



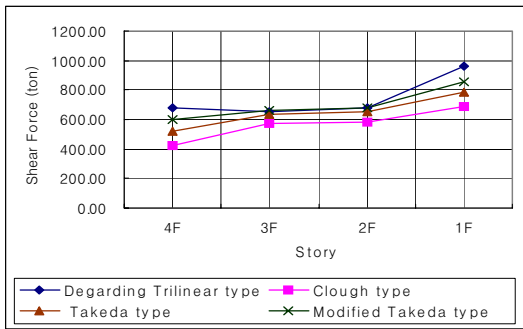
[그림 7] 인공지진가속도 이력

4. 해석결과 비교

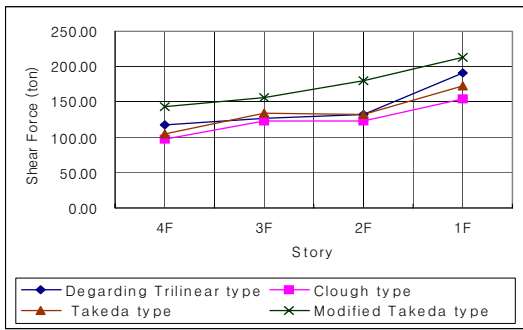
다양한 지진하중에 대하여 표준학교건물의 지진응답을 해석하고 그 최대응답을 상호비교함으로써 이력모델의 특성을 분석하고자 한다.

4.1 외국 지진가속도 사용시

층전단력의 경우 그림 8에 나타낸 바와 같이 장변방향에서는 1F,2F,4F에서 강성저감 삼선형선택 시 가장 큰 전단력을 나타냈고, 전 층에서 Clough Type선택 시 가장 낮은 전단력을 나타냈고 그 비율이 최고 60% 차이가 났다. 그리고 단변방향에서는 전체 층에서 Modified Takeda Type선택 시 가장 큰 전단력을 나타냈고, Clough Type선택 시 가장 낮은 전단력을 나타냈다. 그 비율이 최고 46% 차이가 났다.



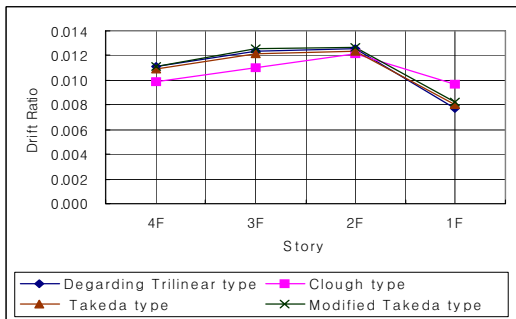
(a) 장변방향



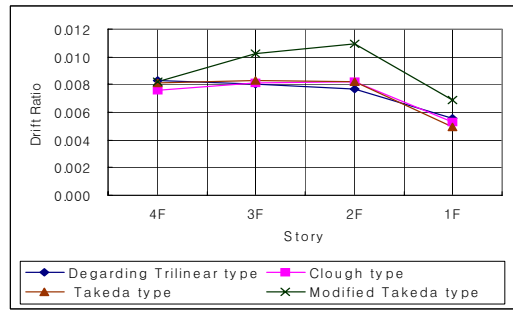
(b) 단변방향

[그림 8] 층 전단력의 비교

층간변위비의 경우 그림 9에 도시한 바와 같이 장변방향에서는 2~4F에서 Modified Takeda Type 선택 시 가장 큰 층간변위비를 나타냈고, 2~4F에서 Clough Type 선택 시 가장 낮은 층간변위비를 나타냈다. 그 비율은 14% 차이가 났다. 단변방향에서는 1~3F에서 Modified Takeda Type 선택 시 가장 큰 층간변위비를 나타냈고, 1F에서는 Takeda Type, 2~3F에서는 강성저감 삼선형, 4F에서는 Clough Type 선택 시 가장 낮은 층간변위비를 차이가 났다. 그 비율은 최고 42% 차이가 났다.



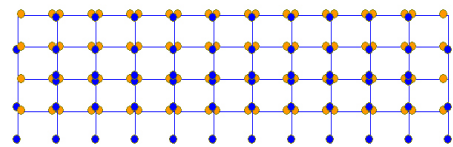
(a) 장변방향



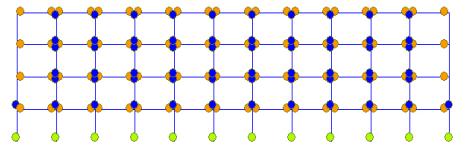
(b) 단변방향

[그림 9] 층간변위비의 비교

소성힌지발생분포는 Clough Type 선택 시 기둥부분의 힌지 발생이 다른 세 이력모델보다 더 많이, 더 빨리 발생하는 것으로 평가되었다.



(a) El-centro 지진



(b) Taft 지진

[그림 10] Clough 모델 사용시 힌지분포

[표 3] 외국지진가속도를 사용한 시간이력해석 결과

해석 방법	평가방법	평가	1F	2F	3F	4F
2D	장 변 방 향	Story Shear Force	max DT	DT	MT	DT
		min CT	CT	CT	CT	
	Story Drift Ratio	max CT	MT	MT	MT	
		min MT	CT	CT	CT	
	Story Displacement	max CT	CT	MT	MT	
		min DT	DT	TT	CT	
단 변 방 향	Story Shear Force	max MT	MT	MT	MT	
		min CT	CT	CT	CT	
	Story Drift Ratio	max MT	MT	MT	DT	
		min TT	DT	DT	CT	
	Story Displacement	max MT	MT	MT	MT	
		min TT	TT	TT	TT	

※ 이력모델을 다음과 같이 표기함.

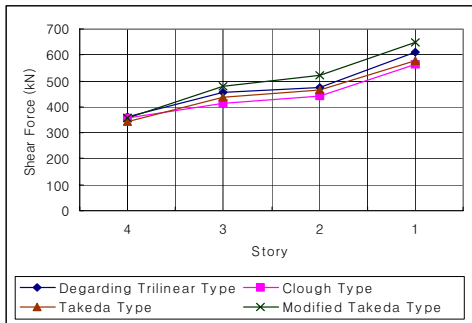
DT: Degarding Trilinear Type TT: Takeda Type
CT: Clough Type MT: Modified Takeda Type

4.2 인공지능가속도를 사용한 경우

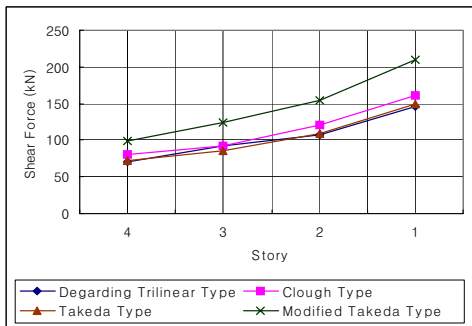
층전단력의 경우 그림 11에서 보이는 바와 같이 장변 방향에서는 1F, 2F, 3F에서 Modified Takeda Type 선택 시 가장 크고, 1F, 2F, 3F에서 Clough Type 선택 시 가장 낮은 전단력을 나타냈다. 그 비율은 최고 18% 차이가 났다. 단변방향에서는 전 층에서 Modified Takeda Type 선택 시 가장 크며, 강성저감 삼선형 선택 시 가장 낮은 전단력을 나타냈다. 그 비율은 최고 45% 차이가 났다.

층간변위비는 그림 12와 같이 장변방향에서는 전 층에서 Modified Takeda Type 선택 시 가장 크고, 전 층에서 Takeda Type 선택 시 가장 낮았다. 그 비율은 23% 차이가 났다. 단변방향에서는 전 층에서 Modified Takeda Type 선택 시 가장 크게 나타났고, 1~2F에서는 강성저감 삼선형, 3F에서는 Takeda Type, 4F에서는 Clough Type 선택 시 가장 낮은 층간변위비를 나타내었고, 그 비율이 최고 54% 차이가 났다.

하지만, 인공지능가속도를 사용한 응답특성은 외국지진의 경우보다 일관성을 보이는데, 이것은 외국지진이 서로 다른 지역에서 발생한 독립적인 지진인데 반하여 인공지능은 동일한 지반특성과 응답스펙트럼을 기반으로 하는 지진기록이기 때문인 것으로 분석된다.

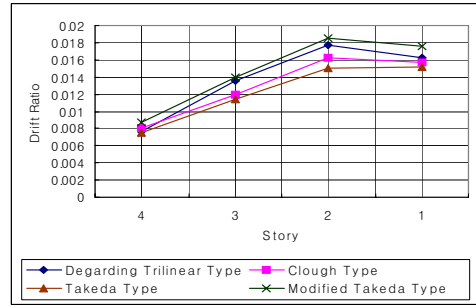


(a) 장변방향

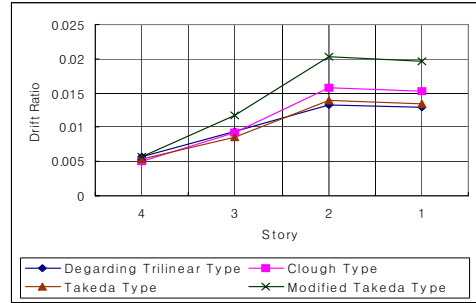


(b) 단변방향

[그림 11] 층 전단력의 비교



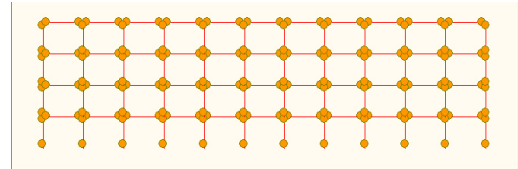
(a) 장변방향



(b) 단변방향

[그림 12] 층간변위비의 비교

소성힌지발생분포는 이력모델선택과 관계없이 최종소성힌지 발생분포는 비슷하게 발생하는 것으로 평가되었다.



[그림 13] Modified Takeda모델 사용시 힌지분포

[표 4] 인공지능가속도를 사용한 시간이력해석 결과

해석 방법	평가방법	평가	1F	2F	3F	4F	
2D	장변방향	Story Shear Force	max	MT	MT	MT	DT
			min	CT	CT	CT	TT
	Story Drift Ratio	max	MT	MT	MT	MT	
		min	TT	TT	TT	TT	
	Story Displacement	max	MT	MT	MT	MT	
		min	TT	TT	TT	TT	
단변방향	Story Shear Force	max	MT	MT	MT	MT	
		min	DT	DT	TT	DT	
	Story Drift Ratio	max	MT	MT	MT	MT	
		min	DT	DT	TT	CT	
	Story Displacement	max	MT	MT	MT	MT	
		min	DT	DT	DT	DT	

5. 결론

본 연구는 이력모델선택에 따른 기존학교건물의 비탄성응답특성에 관한 연구로써 외국의 지진 가속도인 El-centro, Santa-Monica, Taft 지진 가속도와 우리나라 규준에 맞는 인공지진 가속도 3가지를 건물에 가한 후, 이력모델을 달리해 2차원 시간이력해석을 하여 최대응답을 구하였다. 이를 바탕으로 장·단변방향으로 나누어 층전단력, 층간변위비, 층변위를 비교하고 힌지의 발생 상태를 분석해 이력모델선택에 따른 기존학교건물의 비탄성거동을 연구 하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 층전단력 - 장변방향에서는 외국 지진 가속도에서 Degarding Trilinear Type이 크게 나왔고 국내 지진 가속도에서는 Modified Takeda Type이 크게 나왔다. 그리고 Clough Type이 외국 지진 가속도와 국내 지진 가속도 모두 전체적으로 작게 나왔다. 그 비율이 최고 60%, 18%씩 차이가 났다. 그리고 단변방향에서는 Modified Takeda Type선택 시 외국 지진 가속도와 국내지진가속도에서 모두 크게 나타났다. 외국 지진 가속도에서는 Clough Type선택 시 낮은 전단력이 나타났고 국내 지진 가속도에서는 Degarding Trilinear Type 선택 시 낮은 전단력이 나타났다. 그 비율이 최고 46%, 45% 차이가 났다.
- (2) 층간변위비 - 장변방향에서는 층간변위비가 Modified Takeda Type 선택시 외국 지진 가속도와 국내 지진 가속도에서 전체적으로 모두 크게 나타났고, 국외 지진 가속도에서는 Clough Type이 작게 나왔고 국내 지진 가속도에서는 Takeda Type이 작게 나왔다. 그 비율이 최고 14%, 23%씩 차이가 났다. 그리고 단변방향에서는 층간변위비가 Modified Takeda Type 선택 시 외국 지진 가속도와 국내 지진 가속도에서는 대체적으로 모두 크게 나타났고, 외국 지진 가속도와 국내가속도에서 모두 Degarding Trilinear Type, Takeda Type, Clough Type이 작게 나타났다. 그 비율이 최고 42%, 54% 차이가 났다.
- (3) 최종소성힌지발생분포 - 외국의 지진가속도를 사용해서 해석 시에는 최종소성힌지발생분포가 Clough Type선택 시 기둥부분에 힌지 발생이 다른 세 이력모델보다 더 많이, 더 빨리 발생하는 것으로 평가되었다. 하지만 국내 규정에 따른 지진 가속도를 사용해서 해석 시에는 최종소성힌지발생분포가 비슷하게 나타나는 것으로 평가되었다.

- (4) 시간이력해석을 통한 내진설계시 안전을 고려 3개의 지진파를 사용해 최대값으로 설계한다. 하지만 이력모델의 선택에 따라서도 안전율의 변화가 생기는데 여기에 대한 고려가 되지 않고 있다. 여기에 대해서도 합리적인 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 이력모델 선택에 따른 비탄성응답의 차이에 대한 초기연구로서 향후 중층 및 고층건물에 대하여 연구가 필요하다고 사료된다. 또한, 앞으로 이력모델의 선택에 따른 기존학교건물의 내진성능 평가까지 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 강성국의 6인, “2005년도 교육통계조사 및 자료집 발간 사업보고서, 한국교육개발원, 2005.12
- [2] 대한건축학회, 건축구조설계기준, 2005
- [3] 김충호, 김태현, “3-직선 이력모델을 사용한 교량의 비선형 해석”, 경성대학교
- [4] 이강석, 신기영, 최규진, 최창식, 이리형, “국내 현존학교 건물의 내진성능평가 및 내진 보강에 관한 연구”, 한양대학교 건축학과
- [5] 박한석, “노후화된 초등 교육시설물의 내진성능평가에 관한 연구”, 경기대학교 대학원 건축공학과 석사학위논문, 1999.
- [6] 권오순, Eqmaker - 인공지진 생성프로그램 Earthquake maker, 한국해양 연구소

제 정 현(Jeong-Hyun Je)

[정회원]



- 2005년 2월 : 창원대학교 건축공학과(공학사)
- 2007년 2월 : 창원대학교 건축공학과(공학석사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 정일구조 ENG

<관심분야>
건축구조, 내진설계

김진상 (Jin-Sang Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학사)
- 1989년 8월 : 서울대학교 건축학과(공학석사)
- 1997년 8월 : 서울대학교 건축학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 건축학과 부교수

<관심분야>
건축구조, 내진설계

윤태호 (Tae-Ho Yoon)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 건축공학과 교수

<관심분야>
건축구조, 내진설계