지진의 특성주기를 고려한 완만한 곡선형 이력거동시스템의 비탄성 변위비

Inelastic Displacement Ratios for Smooth Hysteretic System Considering Characteristic Period of Earthquakes

송종걸^{1)*}

Song, Jong-Keol^{1)*}

¹⁾강원대학교 토목공학과

¹⁾Department of Civil Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

In order to predict inelastic displacement response without nonlinear dynamic analysis, the equal displacement rule can be used for the structures with longer natural periods than the characteristic period, T_g , of earthquake record. In the period range longer than T_g , peak displacement responses of elastic systems are equal or larger than those of inelastic systems. In the period range shorter than T_g , opposite trend occurs. In the equal displacement rule, it is assumed that peak displacement of inelastic system with longer natural period than T_g equals to that of elastic system with same natural period. The equal displacement rule is very useful for seismic design purpose of structures with longer natural period than T_g . In the period range shorter than T_g , the peak displacement of inelastic system can be simply evaluated from the peak displacement of elastic system by using the inelastic displacement ratio, which is defined as the ratio of the peak inelastic displacement to the peak elastic displacement. Smooth hysteretic behavior is more similar to actual response of real structural system than a piece-wise linear hysteretic behavior such as bilinear or stiffness degrading behaviors. In this paper, the inelastic displacement ratios of the smooth hysteretic behavior system are evaluated for far-fault and near-fault earthquakes. The simple formula of inelastic displacement ratio considering the effect of T_g is proposed.

Key words: Characteristic period, Inelastic displacement ratio, Smooth hysteretic behavior, Near-fault earthquake, Far-fault earthquake

1. 서 론

성능-기반 내진설계(performance-based seismic design)에서는 기존의 하중-기반 내진설계와는 달리 변위응답이 주요한 설계 및 내진성능 평가 인자이다. 기존의 하중-기반 내진설계는 지진하중을 결정하면 그 이후의 설계과정은 자중에 의한 설계과정과 동일하기 때문에 설계의 간편성과 편리성의 장점이 있지만 비탄성 변위응답을 정확히 예측할 수 없는 단점이 있다. 비탄성 변위응답을 정확히 평가하는 것이 성능-기반 내진설계의 가장 핵심이라고 할 수 있지만, 성능-기반 방법의 대표적인 방법인 역량스펙트럼방법과 변위계수법은 개념적으로나 간편성에서 우수한 방법이지만 아직까지는 정확성이 설계의 목적에 부합되도록 확보되지 못한 단점이 있다.

비탄성 변위비를 사용하면 탄성 변위응답으로부터 비탄성 변위응답을 간편하게 구할 수 있다. 비탄성 변위비는 성능-기반 방법중에서 변위계수법의 여러 계수 중 하나와 개념적으로 동일하다. 그러므로 비탄성 변위비에 대한 연구는 변위계수법의 정확성을 향상시키는 데 기여할 것이다. 기존의 비탄성 변위비에 대한 연구[1-4]는 단순한 형태의 분할선형 이력모델(piecewise linear hysteretic model)에 대하여 이루어졌으며, 완만한 곡선형 이력거동 모델(smooth hysteretic model)에 대한 연구는 이루어지지 않은 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 완만한 곡선형 이력거동 모델에 대한 비탄성 변위비에 대한 연구를 수행하였다. 비탄성 변위응답의 예측을 위해서는 동일 변위 법칙이 널리 사용된다. 동일 변위 법칙은 장주기 구조물에 대하여 적용되며 탄성 변위응답이 비탄성 변위응답보다 같거나 크므로 설계의 목적상 비탄성 변위응답을 탄성변위응답과 동일하다고 간주하는 방법이다. 동일 변위 법칙이 적용되는 구조물의 주기는 지진의 특성주기를 기준으로 정한다. 즉, 특성주기 이상의 주기영역에서는 동일변위법칙이 적용되며 이 규칙은 기존의 탄소성 모델이나 이선형 모델뿐만 아니라 비탄성 변

*Corresponding author: Song, Jong-Keol

E-mail: songj@kangwon.ac.kr

(Received 11 July 2012; Accepted 23 November 2012)

위험도의 크게 발생하는 강성 및 강도저하 모델에 대해서도 정확성이 우수함이 기존 연구[4]를 통해서 입증되었다.

본 연구에서는 비탄성 변위비의 평가를 위해 지진하중의 특성주기를 적용하였으며, 지진하중을 근거리 지진과 원거리 지진으로 구분하여 비탄성 변위비를 평가하였다. 비탄성 변위비의 제안식 작성을 위해서는 60개의 원거리 지진과 72개의 근거리 지진에 대한 비탄성 변위비를 구하고 이를 두 단계 비선형 회귀분석 과정을 수행하였다.

2. 완만한 곡선형 이력거동모델을 이용한 비탄성 변위비

2.1 완만한 곡선형 이력거동모델

지반운동 $\ddot{w}(t)$ 를 받는 완만한 곡선형 이력거동의 비탄성 단자유도계 운동방정식[5,6]은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega_n\dot{u}(t) + \omega_n^2((1-\alpha)z(t) + \alpha u(t)) = -\frac{\omega_n^2}{C_y g} \ddot{w}(t) \quad (1)$$

여기서, $u(t)$ 는 연성도 응답이며, α 는 항복후 강성비이며, C_y 는 구조물의 자중에 대한 항복력의 비로 정의되는 항복강도계수이다. $z(t)$ 는 항복력에 대한 비탄성 저항력의 비로 정의되는 정규화된 저항력을 나타낸다.

정규화된 저항력 $z(t)$ 는 Bouc-Wen 모델[7]을 사용하는 다음의 비선형 미분방정식에 종속적인 거동을 한다.

$$\dot{z}(t) = [1 - |z(t)|^p \operatorname{sgn}(\dot{u}(t)z(t))] \dot{u}(t) \quad (2)$$

여기서, p 는 비탄성 거동의 완만도 조정지수이다. 만약에 $\dot{u}(t)z(t) > 0$ 이면 $\operatorname{sgn}(\dot{u}(t)z(t))$ 는 1이며, 반대의 경우에는 $\operatorname{sgn}(\dot{u}(t)z(t))$ 는 -1이다.

2.2 해석에 사용한 근거리 및 원거리 지진

비탄성 변위응답은 지진의 특성에 따라 큰 차이를 나타내며 특히 근거리 지진은 원거리 지진에 비하여 변위응답이 크게 나타나는 것이 일반적이다. 근거리 지진에 의한 변위응답이 크게 나타난다는 것은 근거리 지진이 구조물에 손상을 크게 유발함을 의미한다. 비탄성 변위비에 대한 지진특성을 반영하기 위하여 입력지진을 근거리 지진과 원거리 지진으로 구분하여 적용하였다. 60개의 원거리 지진과 72개의 근거리 지진의 특성[8]을 Table 1과 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 1. Far-fault ground motion records used in this study

NO.	SAC Name	Record	Earthquake Magnitude	Distance (km)	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)	T_g (sec)
1	LA07	Landers, 1992, Barstow	7.3	36	412.98	66.08	3.762
2	LA08	Landers, 1992, Barstow	7.3	36	417.49	65.68	3.055
3	LA09	Landers, 1992, Yermo	7.3	25	509.70	91.31	1.393
4	LA10	Landers, 1992, Yermo	7.3	25	353.35	60.35	1.425
5	LA45	Kern, 1952	7.7	107	141.49	24.7	1.393
6	LA46	Kern, 1952	7.7	107	156.02	24.3	3.351
7	LA47	Landers, 1992	7.3	64	331.22	40.84	0.919
8	LA48	Landers, 1992	7.3	64	301.74	25	0.504
9	SE05	West. Washington, Olympia, 1949	6.5	56	376.18	29.83	0.606
10	SE06	West. Washington, Olympia, 1949	6.5	56	345.11	34.7	1.185
11	SE07	West. Washington, Seattle Army B., 1949	6.5	80	289.19	36	0.898
12	SE08	West. Washington, Seattle Army B., 1949	6.5	80	381.26	40.93	0.877
13	SE11	Puget Sound, Wa., Olympia, 1949	7.1	80	737.82	52.35	1.528
14	SE12	Puget Sound, Wa., Olympia, 1949	7.1	80	584.52	40.04	1.493
15	SE13	Puget Sound, Wa., Federal OFC B., 1949	7.1	61	362.31	45.31	0.592
16	SE14	Puget Sound, Wa., Federal OFC B., 1949	7.1	61	297.30	35.34	0.650
17	SE15	Eastern Wa., Tacoma County, 1949	7.1	60	284.72	24.99	0.681
18	SE16	Eastern Wa., Tacoma County, 1949	7.1	60	563.47	53.32	0.713
19	SE17	Llolleo, Chile 1985	8	42	684.27	46.98	0.8
20	SE18	Llolleo, Chile 1985	8	42	657.89	37.58	0.429
21	SE19	Vinadel Mar, Chile, 1985	8	42	531.05	61.18	0.729
22	SE20	Vinadel Mar, Chile, 1985	8	42	376.88	32.92	0.696
23	SE25	1949 Olympia	6.5	56	878.23	69.65	0.606
24	SE26	1949 Olympia	6.5	56	805.68	81	1.185

Table 1. Continued

NO.	SAC Name	Record	Earthquake Magnitude	Distance (km)	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)	T_g (sec)
25	SE27	1965 Seattle	7.1	80	1722.40	122.23	1.528
26	SE28	1965 Seattle	7.1	80	1364.70	93.48	1.493
27	SE29	1985 Valpariso	8	42	1605.50	110.23	0.8
28	SE30	1985 Valpariso	8	42	1543.50	88.17	0.429
29	SE31	1985 Valpariso	8	42	1246.2	143.57	0.729
30	SE32	1985 Valpariso	8	42	884.43	77.26	0.696
31	SE33	Deep Interplate (simulation)	7.9	65	781.31	93.54	1.637
32	SE34	Deep Interplate (simulation)	7.9	65	634.36	66.82	0.729
33	SE35	1978 Miyagi-oki	7.4	66	595.07	91.27	0.681
34	SE36	1978 Miyagi-oki	7.4	66	768.62	123.63	1.08
35	BO01	Simulation, hanging wall	6.5	30	121.97	7.55	0.382
36	BO02	Simulation, hanging wall	6.5	30	72.93	8.45	1.425
37	BO03	Simulation, foot wall	6.5	30	141.37	11.22	0.348
38	BO04	Simulation, foot wall	6.5	30	109.65	2.08	0.746
39	BO13	Saguenay, 1988	5.9	96	196.5	6.44	0.34
40	BO14	Saguenay, 1988	5.9	96	284.44	9.79	0.356
41	BO15	Saguenay, 1988	5.9	98	513.58	22	0.241
42	BO16	Saguenay, 1988	5.9	98	243.68	5.72	0.230
43	BO17	Saguenay, 1988	5.9	118	179.47	12.82	0.65
44	BO18	Saguenay, 1988	5.9	118	222.98	11.18	0.182
45	BO19	Saguenay, 1988	5.9	132	172.96	10.11	0.782
46	BO20	Saguenay, 1988	5.9	132	267.23	18.12	0.429
47	BO21	Simulation, foot wall	6.5	30	309.99	19.57	1.3
48	BO22	Simulation, foot wall	6.5	30	357.04	24.66	0.481
49	BO23	Simulation, foot wall	6.5	30	328.67	20.89	1.6
50	BO24	Simulation, foot wall	6.5	30	235.26	16.49	1.131
51	BO25	Simulation, foot wall	6.5	30	284.46	25.42	0.579
52	BO26	Simulation, foot wall	6.5	30	302.80	24.18	0.696
53	BO33	Saguenay, 1988	5.9	96	562.33	18.44	0.34
54	BO34	Saguenay, 1988	5.9	96	768.21	28.03	0.356
55	BO35	Saguenay, 1988	5.9	98	1475.10	63.19	0.241
56	BO36	Saguenay, 1988	5.9	98	699.90	16.44	0.235
57	BO37	Saguenay, 1988	5.9	118	514.13	36.73	0.65
58	BO38	Saguenay, 1988	5.9	118	638.76	32.04	0.182
59	BO39	Saguenay, 1988	5.9	132	495.52	28.98	0.782
60	BO40	Saguenay, 1988	5.9	132	765.61	51.93	0.429
Average					536.51	44.38	0.906

Table 2. Near-fault ground motion records used in this study

NO.	SAC Name	Record	Earthquake Magnitude	Distance (km)	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)	T_g (sec)
1	LA01	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	452.03	62.4	2.161
2	LA02	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	662.88	59.9	0.857
3	LA03	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	4.1	386.04	83	2.786
4	LA04	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	4.1	478.65	48.19	3.762
5	LA05	Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5	1.2	295.69	89.2	2.722
6	LA06	Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5	1.2	230.08	47.44	3.2

Table 2. Continued

NO.	SAC Name	Record	Earthquake Magnitude	Distance (km)	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)	T_g (sec)
7	LA13	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	664.93	95.55	0.579
8	LA14	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	644.49	80.95	0.696
9	LA15	Northridge, 1994, Rinaldi RS	6.7	7.5	523.30	98.72	1.031
10	LA16	Northridge, 1994, Rinaldi RS	6.7	7.5	568.58	100.27	1.33
11	LA17	Northridge, 1994, Sylmar	6.7	6.4	558.43	80.19	2.37
12	LA18	Northridge, 1994, Sylmar	6.7	6.4	801.44	118.93	1.563
13	LA19	North Palm Springs, 1986	6	6.7	999.43	68.27	0.429
14	LA20	North Palm Springs, 1986	6	6.7	967.61	103.83	1.27
15	LA21	1995 Kobe	6.9	3.4	1258.00	142.7	0.857
16	LA22	1995 Kobe	6.9	3.4	902.75	123.16	0.919
17	LA23	1989 Loma Prieta	7	3.5	409.95	73.76	0.764
18	LA24	1989 Loma Prieta	7	3.5	463.76	136.91	2.851
19	LA27	1994 Northridge	6.7	6.4	908.70	130.49	2.37
20	LA28	1994 Northridge	6.7	6.4	1304.10	193.53	1.563
21	LA29	1974 Tabas	7.4	1.2	793.45	71.05	0.764
22	LA30	1974 Tabas	7.4	1.2	972.58	138.83	4.631
23	LA37	Palos Verdes (simulated)	7.1	1.5	697.84	177.44	2.851
24	LA38	Palos Verdes (simulated)	7.1	1.5	761.31	194.04	2.786
25	LA39	Palos Verdes (simulated)	7.1	1.5	490.58	85.5	0.54
26	LA40	Palos Verdes (simulated)	7.1	1.5	613.28	169.3	2.016
27	LA41	Coyote Lake, 1979	5.7	8.8	578.34	69.65	0.919
28	LA42	Coyote Lake, 1979	5.7	8.8	326.81	26.79	1.425
29	LA43	Imperial Valley, 1979	6.5	1.2	140.67	42.46	2.722
30	LA44	Imperial Valley, 1979	6.5	1.2	109.45	22.59	3.2
31	LA51	Parkfield, 1966, Cholame 5W	6.1	3.7	765.65	42.59	0.348
32	LA52	Parkfield, 1966, Cholame 5W	6.1	3.7	619.36	36.87	0.492
33	LA53	Parkfield, 1966, Cholame 8W	6.1	8	680.01	31.39	1.031
34	LA54	Parkfield, 1966, Cholame 8W	6.1	8	775.05	32.46	0.409
35	LA55	North Palm Springs, 1986	6	9.6	507.58	36.72	0.877
36	LA56	North Palm Springs, 1986	6	9.6	371.66	25.46	1.08
37	LA57	San Fernando, 1971	6.5	1	248.14	21.78	1.3
38	LA58	San Fernando, 1971	6.5	1	226.54	27.08	1.361
39	NF01	Tabas, 1978	7.4	1.2	882.85	110.04	0.764
40	NF02	Tabas, 1978	7.4	1.2	958.67	105.83	4.525
41	NF03	Loma Prieta, 1989, Los Gatos	7	3.5	172.84	172.84	2.851
42	NF04	Loma Prieta, 1989, Los Gatos	7	3.5	449.36	91.06	2.851
43	NF05	Loma Prieta, 1989, Lex. Dam	7	6.3	672.86	178.62	1.08
44	NF06	Loma Prieta, 1989, Lex. Dam	7	6.3	362.95	68.63	0.681
45	NF07	C. Mendocino, 1992, Petrolia	7.1	8.5	625.6	125.77	0.419
46	NF08	C. Mendocino, 1992, Petrolia	7.1	8.5	642.24	92.96	0.373
47	NF11	Landers, 1992	7.3	1.1	699.62	136.04	4.032
48	NF12	Landers, 1992	7.3	1.1	783.89	70.26	0.162
49	NF15	Northridge, 1994, Olive View	6.7	6.4	718.16	122.19	2.37
50	NF16	Northridge, 1994, Olive View	6.7	6.4	583.79	53.9	0.504
51	NF17	Kobe, 1995	6.9	3.4	1067.2	160.17	0.898
52	NF18	Kobe, 1995	6.9	3.4	563.99	72.35	1.27
53	NF19	Kobe, 1995, Takatori	6.9	4.3	771.1	173.79	1.213
54	NF20	Kobe, 1995, Takatori	6.9	4.3	416.11	63.69	1.213

Table 2. Continued

NO.	SAC Name	Record	Earthquake Magnitude	Distance (km)	PGA (cm/sec ²)	PGV (cm/sec)	T_g (sec)
55	SE01	Long Beach, Vernon CMD Bldg.	6.5	1.2	170.55	51.45	2.722
56	SE02	Long Beach, Vernon CMD Bldg.	6.5	1.2	132.70	27.36	3.2
57	SE09	North Palm Springs, 1986	6	6.7	576.45	39.38	0.429
58	SE10	North Palm Springs, 1986	6	6.7	558.10	59.89	1.27
59	SE21	1992 Mendocino	7.1	8.5	741.13	145.24	0.819
60	SE22	1992 Mendocino	7.1	8.5	476.22	62.39	0.713
61	SE23	1992 Erzincan	6.7	2	593.6	123.97	2.786
62	SE24	1992 Erzincan	6.7	2	529.06	116.85	2.016
63	BO05	New Hampshire, 1982	4.3	8.4	564.78	13.22	0.429
64	BO06	New Hampshire, 1982	4.3	8.4	309.51	12.76	0.409
65	BO07	Nahanai, 1982	6.9	9.6	86.29	3.75	0.898
66	BO08	Nahanai, 1982	6.9	9.6	81.18	5.65	3.275
67	BO09	Nahanai, 1982	6.9	6.1	59.48	7.35	0.729
68	BO10	Nahanai, 1982	6.9	6.1	72.23	7.72	0.528
69	BO27	Nahanai, 1985 Station 1	6.9	9.6	246.99	10.74	0.898
70	BO28	Nahanai, 1985 Station 1	6.9	9.6	232.37	16.16	3.275
71	BO29	Nahanai, 1985 Station 1	6.9	6.1	170.20	21.03	0.729
72	BO30	Nahanai, 1985 Station 1	6.9	6.1	206.67	22.08	0.528
Average					546.36	79.65	1.579

2.3 특성주기와 비탄성 변위응답과의 관계

지진의 특성주기(T_g)는 입력에너지 스펙트럼의 최대값에 대응되는 주기로 정의되며[4], Fig. 1에는 특성주기의 계산 예를 근거리 지진인 LA21 가속도기록에 대하여 나타내었다. 지진의 특성주기(T_g)와 비탄성 변위응답의 관계는 밀접한 연관이 있음을 동일변위법칙의 예[4]에서도 알 수 있다. 특성주기보다 긴 주기를 가지는 구조물의 비탄성 변위응답은 탄성 변위응답보다 같거나 작게 나타난다. 그러나 특성주기 보다 짧은 주기를 가지는 구조물의 비탄성 변위응답이 탄성 변위응답 보다 크게 나타난다. 이와 같은 경향은 입력에너지 스펙트럼의 형상으로부터 개념적으로 설명될 수 있다. 일반적으로 강한 지진에 의해 구조물의 거동이 탄성에서 비탄성으로 변하게 되면 구조부재의 손상 등의 원인으로 강성이 감소하면서 이로 인해 구조물의 진동주기는 길어지게 된다. 특성주기 보다 짧은 주기영역에서는 지진에 의한 탄성거동에서 비탄성 거동으로의 전환에 따른 주기 증가에 따라서 입력에너지가 일반적으로 증가되기 때문에 비탄성 변위응답도 증가되며, 특성주기 보다 긴 주기영역에서는 주기 증가에 따라서 입력에너지가 감소되는 경향 때문에 비탄성 변위응답이 탄성 변위응답 보다 작게 나타나는 것이다. 그러므로 입력에너지 스펙트럼의 최대값에 대응되는 주기로 정의되는 특성주기는 동일변위법칙이 적용되는 장주기 영역의 기준 값으로 사용하기에 적합하다.

해석에 사용한 모든 입력지진에 대하여 입력에너지 스펙트럼을 작성하고 최대입력에너지에 대응되는 특성주기를 구하여 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 특성주기 T_g 는 근거리 지진이나 원거리 지진의 구분에 상관없이 개별지진에 대하여 상당한 편차(대략 0.18 sec ~ 3.76 sec 범위)를 가지며 다양한 분포를 나타내고 있다. Table 1에 나타난 60개의 원거리 지진의 T_g

Fig. 1. Characteristic period, T_g , for LA21 record using input energy spectrum

의 평균은 0.906 sec이며 Table 2에 나타난 72개의 근거리 지진의 T_g 의 평균은 1.579 sec이다. 근거리 지진의 T_g 가 원거리 지진에 비하여 평균적으로 0.67 sec 정도 길다는 것을 알 수 있다. 근거리 및 원거리 지진에 대한 입력에너지 평균스펙트럼(Fig. 2에서 Mean)과 평균 더하기 표준편차 스펙트럼(Fig. 2에서 Mean+σ)을 Fig. 2에 나타내었다. 근거리 지진 및 원거리 지진을 대표하는 특성주기를 구하기 위하여 평균 더하기 표준편차 스펙트럼의 최대값에 대응되는 주기를 특성주기로 구하였으며, 근거리 지진에 대해서는 1.24 sec이고 원거리 지진에 대해서는 0.73 sec 이다. Table 1과 Table 2에 나타난 특성주기의 평균은 개별지진의 특성주기에 대한 평균이므로 Fig. 2에 나타난 특성주기와는 구하는 방식에 따른 차이가 있으므로

Fig. 2. Characteristic period, T_g , using mean or mean plus one standard deviation input energy spectra for near- and far-fault earthquakes

Fig. 3. Comparison of maximum displacements of elastic systems and those of inelastic systems with several ductility ratios ($\mu=1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$)

특정한 경향을 나타내지는 않는다. 그러므로 특성주기는 개별지진에 대하여 구하는 것이 합리적이라고 판단된다.

비탄성 변위응답에 대한 T_g 의 영향을 나타내기 위하여, LA21 지진기록 ($T_g=0.857$ sec)에 대하여 탄성변위와 연성도에 따른 비탄성 변위를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 특성주기 보다 짧은 주기영역에서 비탄성 변위는 탄성변위보다 큰 값을 나타내며 그 정도는 연성도가 클수록 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 특성주기 이상의 주기영역에서 비탄성 변위는 탄성 변위 보다 작은 값을 나타내며 연성도에 따른 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

2.4 특성주기와 비탄성 변위비와의 관계

비탄성 변위비는 기존의 많은 연구자[1-4]에 의해 연구되었으며, 비탄성 변위비를 이용하면 탄성 변위로부터 비탄성 변위를 비탄성 시간이력해석을 수행하지 않고도 쉽게 평가할 수 있기 때문에 내진설계 목적 등으로 간편한 식들이 제안되었다. 기존의 비탄성 변위비 제안식은 분할 선형 모델에

대하여 이루어진 것이 대부분이므로 본 연구에서는 실제적인 구조물의 거동을 나타내기 보다 적절한 완만한 곡선형 이력모델을 사용하여 비탄성 변위비를 평가하였다.

동일연성도 응답스펙트럼에 대한 비탄성 변위비(inelastic displacement ratio) A_μ 는 다음과 같이 정의된다.

$$A_\mu = \frac{\max|r_{in}|}{\max|r_e|} \quad (3)$$

여기서, $\max|r_{in}|$ 는 비탄성 시스템의 최대변위를 나타내며, $\max|r_e|$ 는 탄성 시스템의 최대변위를 나타낸다.

비탄성 변위비를 10개의 연성도($\mu=1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$)에 대하여 Fig. 4에 나타내었다. 비탄성 변위비의 특성을 고주파의 경우와 특성 주기로 정규화한 경우에 대하여 비교하여 나타내었다. Kobe(LA21) 지진에 대해서는 비탄성 변위비가 0.8초 이상의 주기 구간에서는 1보다 작은 값을 나타내고, Loma Prieta(NF03) 지진에 대해서는 3초 이상의 주기영역에 대해서 비탄성 변위비는 1보다 작은 값을 가진다. 특성주기로 정규화한 경우(T_n/T_g)에는 이 값이 1보다 큰 영역에서는 A_μ 가 1보다 작은 값을 가진다. 그러므로 특성주기로 정규화하여 비탄성 변위비를 나타내는 것이 회귀 분석을 통하여 간편한 제안식을 작성하는 데 유리하며 정확성이 우수하다고 할 수 있다. 일반적으로 비탄성 변위비는 연성도에 비례하여 크게 나타나며 주기가 짧을수록 큰 값을 나타낸다.

3. 회귀분석에 의한 특성주기를 반영한 비탄성 변위비 간편식

비탄성 변위비에 관한 간편식은 탄성 거동의 경우에 해당하는 연성도인 $\mu=1$ 인 경우에는 A_μ 가 1의 값을 가지는 조건을 만족하도록 식 (4)와 같은 형태로 제안하였다. 이 식은 Fig. 4에 나타난 것처럼 비탄성 변위비가 연성도에 민감하게 영향을 받으므로 연성도의 함수로 정의하였다.

Fig. 4. Comparison of inelastic displacement ratios corresponding to T_n and T_n / T_g

Fig. 5. First-step of nonlinear regression analysis of A_μ considering characteristic period (case of near-fault earthquakes, $p=1$ and $\mu=3, 6, 9$)

$$A_\mu = (\mu-1)\Phi + 1 \quad (4)$$

주기함수 T_n/T_g 를 함수로 하는 비탄성 변위비 제안식의 함수 Φ 는 식 (5)와 같이 정의하였다.

비탄성 변위비에 대한 간편식은 지진의 특성주기로 정규화된 경우에 대하여 제안하였다. 구조물의 고유주기를 지진의 특성주기를 나눈 정규화된

$$\Phi = \frac{a}{\sqrt{1+T_n/T_g}} + \frac{b}{(1+T_n/T_g)^c} \quad (5)$$

2단계 비선형 회귀분석 과정의 예로서 근거리 지진과 완만도 조정지수 $p=1$ 인 경우에 회귀분석과정을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 회귀분석에 사용한 연성도는 10개($\mu = 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$)이나 Fig. 5에는 3개의 연성도($\mu = 3, 6, 9$)의 경우만 대표적으로 나타내었다. 연성도가 3일 경우에 결정계수(R^2)는 0.966이며 연성도가 커질수록 결정계수도 증가하여 연성도가 9일 경우에는 결정계수가 0.99로서 식 (4)와 식 (5)를 사용한 회귀분석이 비교적 정확하다고 할 수 있다. Fig. 6에서 계수 c 값은 연성도의 변화에 상관없이 대략 4의 값을 나타내고 있으므로 c 값을 4로 고정하고 회귀분석하여 계수 a, b 를 연성도의 함수로서 구하였다. Fig. 5에서 T_n/T_g 가 1에 가까운 영역에서 비탄성 변위비 A_μ 가 1보다 작게 나타났다가(최저점이 약 0.7정도) T_n/T_g 가 1 이상이 되면 A_μ 도 1에 근접한 값을 나타낸다. 이는 특성주기 부근에서 비탄성 변위응답이 탄성변위 응답보다 가장 작게 나타남을 의미한다.

Fig. 5와 Fig. 6에 나타낸 두 단계 비선형 회귀분석과정을 두 개의 지진 그룹인 근거리 지진과 원거리지진, 6개의 완만도 조절계수에 대하여 수행하여 총 12경우의 회귀분석을 수행하여 제안식의 계수 a, b, c 를 구하여 최종적으로 Table 3에 나타내었다.

Fig. 7에는 식 (5), 식 (6)과 Table 3을 이용한 제안식에 의한 A_μ 를 실제 지진기록들에 의해 계산된 A_μ 와 비교하여 나타내었다. 제안식에 의한 A_μ

와 실제 계산된 A_μ 가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 A_μ 는 연성도가 증가할수록 크게 나타나며, T_n/T_g 가 1보다 작은 경우에는 A_μ 는 1보다 큰 값을 나타내고 주기가 작은 수록 A_μ 는 큰 값을 가지며, T_n/T_g 가 1보다 큰 경우에는 A_μ 는 1보다 작은 값을 나타냄을 알 수 있다.

A_μ 에 대한 완만도 조정지수 p 의 영향을 분석하기 위하여, μ 가 7인 경우에 대하여 p 가 1, 2, 5, 10인 네가지 경우에 대하여 A_μ 를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 완만도 조정지수가 작을수록 힘-변위 관계의 완만정도가 크게 나타나는 경우인데, Fig. 8을 통하여 p 가 작을수록 A_μ 가 크게 나타남을 알 수 있으며, 대략적으로 $p=1$ 인 경우가 $p=10$ 인 경우에 비하여 5% 정도 큰 A_μ 값을 가짐을 알 수 있다.

근거리 지진에 대한 변위증폭비로 정의하고 원거리 지진에 대한 변위 증폭비로 정의할 경우에 대한 의 비를 구하면 근거리 지진이 원거리 지진에 비하여 변위증폭비가 어떻게 나타나는지를 알 수 있으며 이 A_μ^{NF}/A_μ^{FF} 를 계산하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)에는 구조물의 고유주기(T_n)에 대하여 이 A_μ^{NF}/A_μ^{FF} 를 나타내었는데 대략 2초보다 짧은 주기 영역에서는 A_μ^{NF}/A_μ^{FF} 가 대략 1~1.6 사이의 값을 가진다. 이는 근거리 지진이 원거리 지진에 비하여 비탄성 변위비가 1~1.6배 정도 크게 나타남을 의미한다. 또한 연성도가 증가할수록 이러한 차이는 증가하는 경향을 나타냄을

Fig. 6. Second-step of nonlinear regression analysis of A_μ considering characteristic period (case of near-fault earthquakes, $p=1$, $\mu=1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$, and $c=4$)

Table 3. Coefficients to compute A_μ with constant ductility for smooth hysteretic model (case of T_n / T_g)

Earthquakes	Smoothness (p)	a	b	c
Near-Fault	1	$-0.329/\ln(\mu)+0.117$	$0.854/\ln(\mu)+0.268$	4
	2	$-0.291/\ln(\mu)+0.105$	$0.517/\ln(\mu)+0.394$	4
	5	$-0.197/\ln(\mu)+0.067$	$0.24/\ln(\mu)+0.514$	4
	10	$-0.145/\ln(\mu)+0.045$	$0.135/\ln(\mu)+0.564$	4
	20	$-0.114/\ln(\mu)+0.031$	$0.087/\ln(\mu)+0.586$	4
	100	$-0.065/\ln(\mu)+0.026$	$0.008/\ln(\mu)+0.684$	4
Far-Fault	1	$-0.35/\ln(\mu)+0.138$	$1.212/\ln(\mu)+0.303$	5
	2	$-0.321/\ln(\mu)+0.131$	$0.751/\ln(\mu)+0.454$	5
	5	$-0.228/\ln(\mu)+0.101$	$0.388/\ln(\mu)+0.583$	5
	10	$-0.165/\ln(\mu)+0.076$	$0.238/\ln(\mu)+0.643$	5
	20	$-0.119/\ln(\mu)+0.055$	$0.149/\ln(\mu)+0.683$	5
	100	$-0.067/\ln(\mu)+0.0003$	$0.05/\ln(\mu)+0.788$	5

Fig. 7. Comparison of A_μ estimated by the proposed regression equation and A_μ calculated from numerical analysis for various displacement ductility ratios (case of T_n / T_g and $p=1$)

Fig. 8. Effect of smoothness (p) on A_μ (case of T_n / T_g and $\mu=7$)

Fig. 9. Comparison of A_μ^{NF} / A_μ^{FF} for various ductility ratios (A_μ^{NF} = inelastic displacement ratio of far-fault earthquakes, A_μ^{FF} = inelastic displacement ratio of near-fault earthquakes, $p=1$)

알 수 있다. 그러나 주기가 2초부터 긴 주기영역에서는 반대로 $A_{\mu}^{NF}/A_{\mu}^{FF}$ 가 대략 0.85에서 0.95의 값을 나타낸다. 이는 원거리 지진의 변위증폭비가 근거리지진의 변위증폭비 보다 1.05~1.18배 정도 크게 나타남을 의미한다. 결론적으로 2초보다 짧은 주기영역에서는 근거리 지진의 비탄성 거동에 의한 변위증폭이 원거리 지진보다 크게 나타나고 2초 이상의 주기영역에서는 반대의 경향이 나타남을 의미하는 것이다.

Fig. 9(b)에는 구조물의 주기를 특성주기로 나누어 정규화한 경우 (T_n/T_g)에 대하여 $A_{\mu}^{NF}/A_{\mu}^{FF}$ 를 나타내었다. $A_{\mu}^{NF}/A_{\mu}^{FF}$ 값이 0.8~1.1 사이의 값을 나타내며 T_n/T_g 에 대하여 특정한 경향이 없이 불규칙한 특성을 나타낸다. 또한 $A_{\mu}^{NF}/A_{\mu}^{FF}$ 값에 대한 연성도의 영향도 크지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

근거리 및 원거리 두 지진그룹에 대하여 완전한 곡선형 이력거동을 사용하여 특성주기를 고려하여 비탄성 변위비를 구하여 비교, 분석하였으며 이를 회귀분석하여 제안식을 작성하였다. 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 비탄성 변위비를 간단하게 평가하기 위한 제안식은 $\mu=1$ 인 경우에 $A_{\mu}=1$ 의 값을 가지도록 정의하였으며 이는 탄성거동시에는 비탄성 변위비가 항상 1인 것을 반영하기 위함이다. 지진의 특성주기의 영향을 반영하도록 특성주기로 정규화된 주기 (T_n/T_g)의 함수로 A_{μ} 의 제안식을 2단계 비선형 회귀분석과정을 통하여 제안하였다. 제안된 식은 근거리 지진과 원거리 지진의 특성을 구분하여 반영하며 6개의 완만도 조정지수($p=1, 2, 5, 10, 20, 100$)에 대하여 제안하였다.
- 2) 구조물의 고유주기(T_n)가 대략 2초보다 짧은 주기영역에서는 대하여서는 근거리 지진에 대한 비탄성 변위비(A_{μ}^{NF})가 원거리 지진에 대한 비탄성 변위비(A_{μ}^{FF})보다 대략 1~1.6배 큰 값을 나타낸다. 이러한 경향은 연성도가 증가할수록 크게 나타난다. 구조물의 고유주기(T_n)가 대략 2초보다 긴 주기영역에서는 근거리 지진에 대한 비탄성 변위비(A_{μ}^{NF})가 원거리 지진에 대한 비탄성 변위비(A_{μ}^{FF})보다 대략 0.85~0.95배 작은 값을 나타낸다.
- 3) 구조물의 주기를 입력지진의 특성주기로 나누어 정규화한 경우(T_n/T_g)에 대하여 구한 $A_{\mu}^{NF}/A_{\mu}^{FF}$ 값이 0.8~1.1 사이의 값을 나타내며 T_n/T_g 에 대하여 특정한 경향이 없이 불규칙한 특성을 나타낸다. 이러한

$A_{\mu}^{NF}/A_{\mu}^{FF}$ 값에 대한 연성도의 영향도 크지 않음을 알 수 있다.

- 4) 비탄성 변위비는 성능-기반 방법중에서 변위계수법의 여러 계수 중 하나와 개념적으로 동일하다. 그러므로 본 연구에서 제안한 비탄성 변위비의 간편식은 변위계수법의 정확성을 향상시키는데 기여할 것이다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0010930).

/ REFERENCES /

1. Chopra AK, Chintanapakdee C. Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: Single-degree-of-freedom bilinear systems, *Journal of Structural Engineering*, 2004;130(9): 1309-1319.
2. Ruiz-Garcia J, Miranda E. Inelastic displacement ratios for evaluation of structures built on soft soil sites, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006;35:679-694.
3. Ruiz-Garcia J, Miranda E. Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003;32:1237-1258.
4. Song JK, Pincheira JA. Spectral Displacement Demands of Stiffness- and Strength-Degrading Systems, *Earthquake Spectra*, 2000;16(4): 817-851.
5. Song JK. Effect of smooth hysteretic behavior for inelastic response spectra, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 2010;14(1):1-9.
6. Song JK, Gavin HP. Effect of hysteretic smoothness on inelastic response spectra with constant-ductility, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2011;40:771-788.
7. Peng BF, Conte JP. Statistical insight into constant-ductility design using a non-stationary earthquake ground motion model, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997;26:895-916.
8. SAC Joint Venture Steel Project Phase 2 [internet]. Pasadena, California: Woodward-Clyde Federal Services; Suites of Earthquake Ground Motions for Analysis of Steel Moment Frame Structures; 1997 Mar 21; Available from: http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/sacsteel/