

완만한 곡선형 이력거동을 이용한 강도감소계수의 평가

Evaluation of Strength Reduction Factors using Smooth Hysteretic Behavior

송종걸¹⁾

Song, Jong Keol

국문 요약 >> 구조부재와 구조시스템의 실제 비탄성 이력거동은 완만한 형태를 나타낸다. 완만한 곡선형 이력거동이 이선형 또는 분할 선형 강성저하모델 등에 비하여 실제 거동을 정확하게 나타낸다. 내진설계에서 강도감소계수는 탄성 거동만 허용한 경우에 요구되는 강도를 설계수준의 강도로 감소시키는데 사용된다. 강도감소계수에 대한 완만한 곡선형 이력거동의 영향을 근거리 지진과 원거리 지진을 받는 몇 가지 완만한 곡선형 시스템에 대하여 평가하였다. 설계 목적을 위하여 이력거동의 완만정도와 근거리와 원거리 지진으로 대변될 수 있는 지진특성을 고려하는 간단한 강도감소계수 식을 제안하였다. 본 연구의 제안식에 의한 강도감소계수가 기존의 제안식에 의해 평가된 강도감소계수보다 비탄성 응답스펙트럼 해석으로부터 직접적으로 구한 강도감소계수에 근접한 결과를 나타낸다.

주요어 강도감소계수, 완만한 곡선형 이력거동, 근거리 지진, 원거리 지진, 비탄성 응답 스펙트럼

ABSTRACT >> The actual hysteretic behavior of structural elements and systems is smooth. Smooth hysteretic behavior is more representative of actual behavior than bi-linear or piece-wise linear stiffness degrading models. The strength reduction factor in seismic design is used to reduce the elastic strength demand to design levels. In this study, the effect of smoothness on the strength reduction factor is evaluated for several smooth hysteretic systems subjected to near-fault and far-fault earthquakes. For design purposes, a simple expression of the strength reduction factor considering hysteretic smoothness and earthquake characteristics, represented as near-fault and far-fault earthquakes, is proposed. The strength reduction factors calculated by the proposed simple formulation are more similar to the factors directly obtained from inelastic response spectrum analyses than those calculated by several existing formulas.

Key words Strength reduction factor, Smooth hysteretic Behavior, Near-fault earthquake, Far-fault earthquake, Inelastic response spectrum

1. 서론

최근에 성능-기반 내진설계기법 등에 대한 연구가 활발히 진행되면서 역량스펙트럼방법(Capacity Spectrum Method)의 중요성 및 활용성이 부각되고 있는 실정이다. 역량스펙트럼방법은 지진하중의 크기를 요구도 곡선으로 나타내고 구조물의 내진성능을 능력곡선으로 나타내어서 두 곡선의 교차점을 적절하게 평가하여 구조물의 최대응답을 나타내는 성능점을 찾는 방법이다.⁽¹⁻⁴⁾ 일반적으로 지진하중의 크기를 나타내는 요구도 곡선은 탄성응답스펙트럼을 초기에

사용하지만 성능점을 찾기 위한 반복과정에서는 등가감쇠를 이용한 감소된 탄성응답스펙트럼을 요구도 곡선으로 사용하는 것이 역량스펙트럼방법의 일반적인 절차이다. 등가감쇠를 이용한 감소된 탄성응답스펙트럼은 구조물의 비탄성 응답을 등가의 선형시스템의 응답으로 구하는 방법이므로 비탄성 응답스펙트럼을 사용하는 경우 보다는 정확성이 떨어진다.⁽⁵⁾ 역량스펙트럼방법에서 요구도 곡선으로 탄성응답스펙트럼에 강도감소계수(Strength Reduction Factor)를 적용하여 비탄성 응답스펙트럼을 직접적으로 작성하여 사용하는 것이 등가감쇠를 이용한 감소된 탄성응답스펙트럼의 사용 보다는 정확한 결과를 산출한다.

비탄성 응답스펙트럼은 탄성 응답스펙트럼으로부터 강도감소계수를 이용하여 간단하게 구할 수 있다. 즉, 탄성 응답스펙트럼을 강도감소계수로 나누어주면 이것이 비탄성 응답스펙트럼이다. 현재까지의 강도감소계수에 대한 제안식은

¹⁾ 정회원·강원대학교 토목공학과 부교수
(교신저자 : songj@kangwon.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 5. 3 / 수정일 1차 : 2010. 6. 7, 2차 : 2010. 6. 9 / 게재확정일 : 2010. 6. 9)

이선형(Bilinear) 모델 혹은 강성저하(Stiffness Degrading) 모델과 같은 단순화된 형태의 분할선형 이력모델(Piecewise Linear Hysteretic Model)에 구해진 것이 대부분이다.⁽⁶⁾ 실제적인 구조물의 비탄성 이력거동은 분할선형 이력거동보다는 완만한 곡선이력거동을 나타낼 것이므로 본 연구에서는 완만한 곡선이력거동⁽⁷⁾을 이용하여 강도감소계수를 평가하였다. 강도감소계수에 대한 지진의 특성을 반영하기 위하여 근거리 지진과 원거리 지진으로 구분하여 각각 원거리 지진 48개와 근거리 지진 52개를 사용하여 평균값을 구하여 강도감소계수를 산정하였다. 완만한 곡선이력거동의 정도는 4가지로 구분하여 적용하였다. 2단계 회귀분석 과정을 통하여 근거리 및 원거리의 지진특성과 완만한 곡선형 이력거동의 특성을 반영한 강도감소계수 제안식을 작성하였다. 강도감소계수 제안식은 일반적으로 비탄성 거동의 정도를 나타내는데 가장 널리 사용되는 연성도와 구조물의 주기의 함수로 나타내었다. 연성도와 주기의 함수로 나타낸 강도감소계수가 역량스펙트럼 방법에 적용하기에 가장 합리적인 형태이다. 기존의 강도감소계수 제안식 중 연성도와 주기의 함수로 표현된 제안식과도 비교하여 정확성을 평가하였다.

2. 완만한 이력거동을 이용한 강도감소계수

2.1 완만한 이력거동의 단자유도계

지진하중에 대한 비탄성 단자유도계의 거동을 다음과 같은 비선형 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$m \ddot{r}(t) + c \dot{r}(t) + R(r(t), \dot{r}(t)) = -m \ddot{w}(t) \quad (1)$$

여기서, $r(t)$ 는 질량(m)의 밑면에 대한 상대변위이며 c 는 점성감쇠계수를 나타낸다. $R(r(t), \dot{r}(t))$ 는 비탄성 저항력을 나타낸다. $\ddot{w}(t)$ 는 지진가속도를 나타낸다. R_y 는 항복력을 나타내며 r_y 는 항복변위를 나타낸다. 강성 k 는 R_y/r_y 로서 구할 수 있다. 연성도 응답 $\mu(t)$ 를 $r(t)/r_y$ 로 정의하고 식 (1)을 mr_y 로 나눈 후 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega_n \dot{\mu}(t) + \frac{R(r(t), \dot{r}(t))}{mr_y} = -\frac{\ddot{w}(t)}{r_y} \quad (2)$$

정규화된 저항력 $z(t)$ 를 $R(t)/R_y$ 의 비로서 정의하여 식 (2)의 왼쪽에서 세번째 항을 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{R(t)}{mr_y} = \frac{R_y z(t)}{mr_y} = \frac{kr_y z(t)}{mr_y} = \omega_n^2 z(t) \quad (3)$$

여기서, ω_n 은 구조물의 고유진동수이다.

구조물의 자중에 대한 항복력의 비를 항복강도계수(Yield Strength Coefficient) C_y 로 정의하여 정리하면 다음과 같다.

$$C_y = \frac{R_y}{mg} = \frac{kr_y}{mg} = \frac{\omega_n^2 r_y}{g} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 식 (2)를 정리하면 다음과 같다.

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega_n \dot{\mu}(t) + \omega_n^2 z(t) = -\frac{\omega_n^2}{C_y g} \ddot{w}(t) \quad (5)$$

여기서, Bouc-Wen 모델⁽⁸⁾을 이용하여 정규화된 저항력 $z(t)$ 를 다음의 비선형 미분방정식에 의해 종속적인 거동을 하도록 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{z}(t) = [1 - |z(t)|^p \operatorname{sgn}(\dot{\mu}(t)z(t))] \dot{\mu}(t) \quad (6)$$

여기서, p 는 곡선이력거동의 완만한 정도를 조절하는 변수이다. p 가 작은 값을 가지면 탄성에서 항복후 강성으로 완만하게 곡선의 형태의 강성이 변하는 천이구간이 커지며, p 가 큰 값을 가질수록 천이구간이 작아지며 이선형(Bilinear) 모델과 유사하게 된다. 만약에 $\dot{\mu}(t)z(t)$ 가 양의 값을 가지면 $\operatorname{sgn}(\dot{\mu}(t)z(t))$ 는 1이며 이외의 경우에는 $\operatorname{sgn}(\dot{\mu}(t)z(t))$ 은 -1이다.

비탄성 저항력이 항복후 강성 ak 을 가진다면 식 (5)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega_n \dot{\mu}(t) + \omega_n^2((1-\alpha)z(t) + \alpha\mu(t)) = -\frac{\omega_n^2}{C_y g} \ddot{w}(t) \quad (7)$$

2.2 강도감소계수의 정의

대부분의 구조물은 강진이 발생하는 경우 비탄성 거동을 하게 된다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 구조물의 연성도 능력이 충분하다면 비탄성 거동을 허용할 경우에 요구되는 구조물의 강도는 탄성거동의 경우에 비하여 감소시킬 수 있다. 비탄성 거동을 허용하는 경우에 요구되는 강도에 대한 탄성 거동만 허용하는 경우에 요구되는 강도의 비를 강도감소계수(R_μ)로 정의하며 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

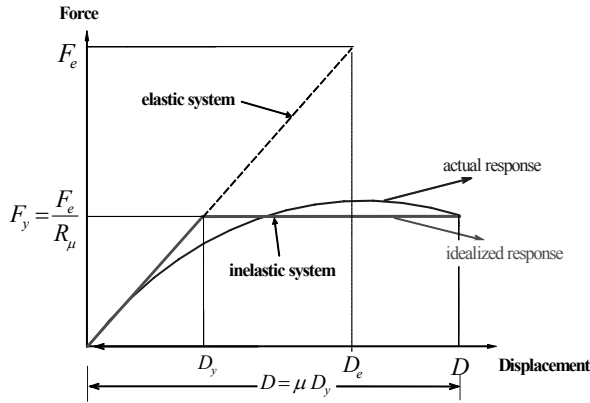
$$R_\mu = \frac{F_e}{F_y} = \frac{F_e/W}{F_y/W} = \frac{F_e/mg}{F_y/mg} = \frac{A_e}{A_y} \quad (8)$$

여기서 F_e 는 탄성거동시의 요구강도이며, F_y 는 비탄성 거동시의 요구강도이다. W 는 구조물의 자중이며 m 은 구조물의 질량이다. g 는 중력가속도이다. A_e 는 탄성응답에 대한 유사가속도 스펙트럼이며, A_y 는 비탄성응답에 대한 항복강도에

대응되는 유사가속도 스펙트럼이다.

3. 원거리 및 근거리 지진과 강도감소계수

지진하중의 특성은 원거리 지진과 근거리 지진으로 구분하여 적용하였다. 근거리 지진이 원거리 지진에 비하여 일반적으로 구조물의 변위응답을 크게 유발하며 손상을 크게 유발하는 특성이 있기 때문에 이와 같이 구분하였다. 표 1과 표 2에는 해석에 사용한 총 48개의 원거리 지진과 총 52개의 근거리 지진의 특성(규모, 진앙거리, 최대지반가속도, 최대지반속도)을 나타내었으며 SAC Steel 프로젝트 웹사이트 (http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/sacsteel/) 로부터 다운로드 받을 수 있다. 원거리 지진은 진앙거리가 25km 이상인 지진기록으로 선별하였으며 근거리 지진은 진앙거리가 10km 미만인 경우로 선별하였다. 사용된 지진의 지반조건은 단단한 지반(Stiff Soil)에 해당한다.



〈그림 1〉 비탄성 구조시스템에서 강도감소계수(R_{μ})의 정의

〈표 1〉 해석에 사용한 원거리 지진

NO.	SACName	Record	EarthquakeMagnitude	Distance(km)	PGA(cm/sec ²)	PGV(cm/sec)
1	LA07	Landers, 1992, Barstow	7.3	36	412.98	66.08
2	LA08	Landers, 1992, Barstow	7.3	36	417.49	65.68
3	LA09	Landers, 1992, Yermo	7.3	25	509.70	91.31
4	LA10	Landers, 1992, Yermo	7.3	25	353.35	60.35
5	LA45	Kern, 1952	7.7	107	141.49	24.7
6	LA46	Kern, 1952	7.7	107	156.02	24.3
7	LA47	Landers, 1992	7.3	64	331.22	40.84
8	LA48	Landers, 1992	7.3	64	301.74	25
9	SE05	West. Washington, Olympia, 1949	6.5	56	376.18	29.83
10	SE06	West. Washington, Olympia, 1949	6.5	56	345.11	34.7
11	SE07	West. Washington, Seattle Army B., 1949	6.5	80	289.19	36
12	SE08	West. Washington, Seattle Army B., 1949	6.5	80	381.26	40.93
13	SE11	Puget Sound, Wa., Olympia, 1949	7.1	80	737.82	52.35
14	SE12	Puget Sound, Wa., Olympia, 1949	7.1	80	584.52	40.04
15	SE13	Puget Sound, Wa., Federal OFC B., 1949	7.1	61	362.31	45.31
16	SE14	Puget Sound, Wa., Federal OFC B., 1949	7.1	61	297.30	35.34
17	SE15	Eastern Wa., Tacoma County, 1949	7.1	60	284.72	24.99
18	SE16	Eastern Wa., Tacoma County, 1949	7.1	60	563.47	53.32
19	SE17	Llolleo, Chile 1985	8	42	684.27	46.98
20	SE18	Llolleo, Chile 1985	8	42	657.89	37.58
21	SE19	Vinadel Mar, Chile, 1985	8	42	531.05	61.18
22	SE20	Vinadel Mar, Chile, 1985	8	42	376.88	32.92
23	SE25	1949 Olympia	6.5	56	878.23	69.65
24	SE26	1949 Olympia	6.5	56	805.68	81
25	SE27	1965 Seattle	7.1	80	1722.40	122.23
26	SE28	1965 Seattle	7.1	80	1364.70	93.48
27	SE29	1985 Valpariso	8	42	1605.50	110.23
28	SE30	1985 Valpariso	8	42	1543.50	88.17
29	SE31	1985 Valpariso	8	42	1246.2	143.57
30	SE32	1985 Valpariso	8	42	884.43	77.26

〈표 1〉 해석에 사용한 원거리 지진(계속)

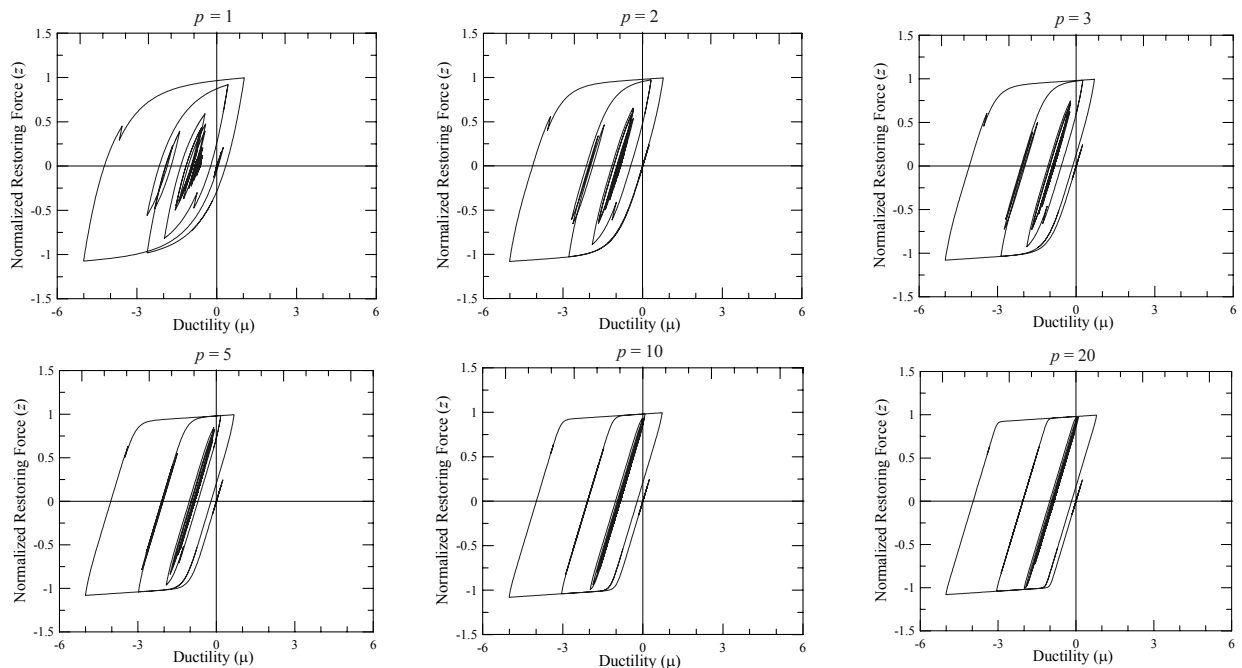
NO.	SACName	Record	Earthquake Magnitude	Distance(km)	PGA(cm/sec ²)	PGV(cm/sec)
31	SE33	Deep Interplate(simulation)	7.9	65	781.31	93.54
33	BO01	Simulation, hanging wall	6.5	30	121.97	7.55
32	SE34	Deep Interplate(simulation)	7.9	65	634.36	66.82
34	BO02	Simulation, hanging wall	6.5	30	72.93	8.45
35	BO03	Simulation, foot wall	6.5	30	141.37	11.22
36	BO04	Simulation, foot wall	6.5	30	109.65	2.08
37	BO15	Saguenay, 1988	5.9	96	513.58	22
38	BO16	Saguenay, 1988	5.9	96	243.68	5.72
39	BO17	Saguenay, 1988	5.9	118	179.47	12.82
40	BO18	Saguenay, 1988	5.9	118	222.98	11.18
41	BO19	Saguenay, 1988	5.9	132	172.96	10.11
42	BO20	Saguenay, 1988	5.9	132	267.23	18.12
43	BO35	Saguenay, 1988	5.9	98	1475.10	63.19
44	BO36	Saguenay, 1988	5.9	98	699.90	16.44
45	BO37	Saguenay, 1988	5.9	118	514.13	36.73
46	BO38	Saguenay, 1988	5.9	118	638.76	32.04
47	BO39	Saguenay, 1988	5.9	132	495.52	28.98
48	BO40	Saguenay, 1988	5.9	132	765.61	51.93

〈표 2〉 해석에 사용한 근거리 지진

NO.	SACName	Record	Earthquake Magnitude	Distance(km)	PGA(cm/sec ²)	PGV(cm/sec)
1	LA01	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	452.03	62.4
2	LA02	Imperial Valley, 1940, El Centro	6.9	10	662.88	59.9
3	LA03	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	4.1	386.04	83
4	LA04	Imperial Valley, 1979, Array #05	6.5	4.1	478.65	48.19
5	LA05	Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5	1.2	295.69	89.2
6	LA06	Imperial Valley, 1979, Array #06	6.5	1.2	230.08	47.44
7	LA13	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	664.93	95.55
8	LA14	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	644.49	80.95
9	LA17	Northridge, 1994, Sylmar	6.7	6.4	558.43	80.19
10	LA18	Northridge, 1994, Sylmar	6.7	6.4	801.44	118.93
11	LA19	North Palm Springs, 1986	6	6.7	999.43	68.27
12	LA20	North Palm Springs, 1986	6	6.7	967.61	103.83
13	LA21	1995 Kobe	6.9	3.4	1258.00	142.7
14	LA22	1995 Kobe	6.9	3.4	902.75	123.16
15	LA23	1989 Loma Prieta	7	3.5	409.95	73.76
16	LA24	1989 Loma Prieta	7	3.5	463.76	136.91
17	LA27	1994 Northridge	6.7	6.4	908.70	130.49
18	LA28	1994 Northridge	6.7	6.4	1304.10	193.53
19	LA29	1974 Tabas	7.4	1.2	793.45	71.05
20	LA30	1974 Tabas	7.4	1.2	972.58	138.83
21	LA37	Palos Verdes(simulated)	7.1	1.5	697.84	177.44
22	LA38	Palos Verdes(simulated)	7.1	1.5	761.31	194.04
23	LA39	Palos Verdes(simulated)	7.1	1.5	490.58	85.5
24	LA40	Palos Verdes(simulated)	7.1	1.5	613.28	169.3
25	LA51	Parkfield, 1966, Cholame 5W	6.1	3.7	765.65	42.59
26	LA52	Parkfield, 1966, Cholame 5W	6.1	3.7	619.36	36.87
27	LA55	North Palm Springs, 1986	6	9.6	507.58	36.72
28	LA58	San Fernando, 1971	6.5	1	226.54	27.08
29	NF01	Tabas, 1978	7.4	1.2	882.85	110.04

〈표 2〉 해석에 사용한 근거리 지진(계속)

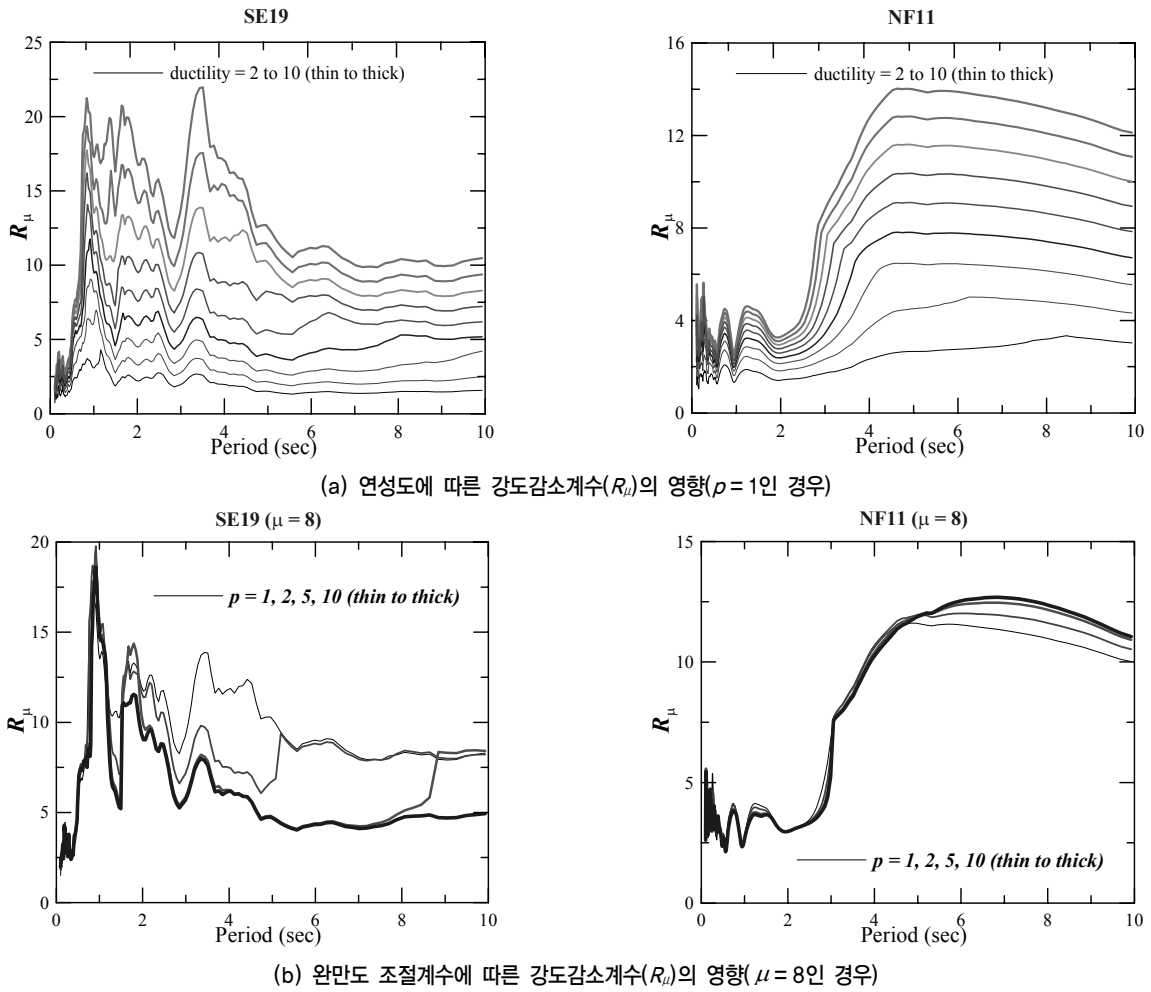
NO.	SACName	Record	Earthquake Magnitude	Distance(km)	PGA(cm/sec ²)	PGV(cm/sec)
30	NF02	Tabas, 1978	7.4	1.2	958.67	105.83
31	NF03	Loma Prieta, 1989, Los Gatos	7	3.5	703.84	172.84
32	NF04	Loma Prieta, 1989, Los Gatos	7	3.5	449.36	91.06
33	NF05	Loma Prieta, 1989, Lex. Dam	7	6.3	672.86	178.62
34	NF06	Loma Prieta, 1989, Lex. Dam	7	6.3	362.95	68.63
35	NF07	C. Mendocino, 1992, Petrolia	7.1	8.5	625.6	125.77
36	NF08	C. Mendocino, 1992, Petrolia	7.1	8.5	642.24	92.96
37	NF11	Landers, 1992	7.3	1.1	699.62	136.04
38	NF12	Landers, 1992	7.3	1.1	783.89	70.26
39	NF15	Nothridge, 1994, Olive View	6.7	6.4	718.16	122.19
40	NF16	Nothridge, 1994, Olive View	6.7	6.4	583.79	53.9
41	NF17	Kobe, 1995	6.9	3.4	1067.2	160.17
42	NF18	Kobe, 1995	6.9	3.4	563.99	72.35
43	NF19	Kobe, 1995, Takatori	6.9	4.3	771.1	173.79
44	NF20	Kobe, 1995, Takatori	6.9	4.3	416.11	63.69
45	SE01	Long Beach, Vernon CMD Bldg.	6.5	1.2	170.55	51.45
46	SE02	Long Beach, Vernon CMD Bldg.	6.5	1.2	132.70	27.36
47	SE09	North Palm Springs, 1986	6	6.7	576.45	39.38
48	SE10	North Palm Springs, 1986	6	6.7	558.10	59.89
49	SE21	1992 Mendocino	7.1	8.5	741.13	145.24
50	SE22	1992 Mendocino	7.1	8.5	476.22	62.39
51	BO05	New Hampshire, 1982	4.3	8.4	564.78	13.22
52	BO06	New Hampshire, 1982	4.3	8.4	309.51	12.76



〈그림 2〉 LA18(Northridge, Sylmar, 1994) 지진가속도에 대한 곡선형 이력거동의 완만도 조절계수(p)의 영향(주기 $T_n = 1.0\text{sec}$, 최대변위연성도 $\mu = 5$, 항복후 강성비 $\alpha = 0.02$, 감쇠비 $\xi = 0.05$ 를 적용한 경우)

LA18(Northridge, Sylmar, 1994) 지진가속도 기록에 대하여 2.1절에서 설명한 완만한 곡선형 이력거동의 단자유도 계에 대한 힘-변위 관계관계를 완만도 조절계수(p)가 1, 2,

3, 5, 10, 20이 되도록 변화시켜가며 적용하여 그림 2에 비교하여 나타내었다. 이 경우에 힘-변위 관계는 연성도가 5가 되도록 항복강도를 조절하여 적용하였으며, 단자유도계



〈그림 3〉 연성도($\mu=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$)와 완만도 조절계수($p=1, 2, 5, 10$)에 따른 강도감소계수의 영향(원거리 지진으로는 SE19와 근거리 지진으로는 NF11을 선택하여 적용)

의 주기(T_n)는 1초, 항복후 강성비(a)는 0.02, 감쇠비(ξ)가 0.05를 사용하여 구하였다. 그림 2로부터 완만도 조절계수(p)의 값이 작을수록 이력거동이 완만하게 되며 완만도 조절계수가 커지면 이선형(Bilinear) 거동과 유사하게 됨을 알 수 있다. 강도감소계수에 대한 이력거동의 완만정도의 영향을 분석하기 위하여 완만도 조절계수는 1, 2, 5, 10이 완만도의 영향을 평가하기에 적절하다고 판단되어 4개의 경우를 대표적으로 선택하였다. 실제구조물의 완만한 곡선형 이력거동은 완만도 조절계수(p)가 1~3인 범위에 대부분 속할 것으로 판단된다.

그림 3에는 9개의 연성도($\mu=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$)와 4개의 완만도 조절계수($p=1, 2, 5, 10$)에 따른 강도감소계수의 영향을 특정한 하나의 지진에 대하여 비교하여 나타내었다. 사용한 하나의 대표적인 지진기록으로 원거리 지진은 SE19와 근거리 지진은 NF11을 선택하여 적용하였다. 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 연성도가 증가할수록 강도감소계수는 큰 값을 나타낸다. 그러나 강도감소계수는 지진의 특

성에 따라서 주기에 따라 민감하게 변화되는 경향을 나타낼 수 있다. 일반적으로 주기가 0에 가까울 경우에는 강도감소계수는 1에 가까운 값을 나타내며 장주기의 영역(그림 3(a)에서는 5초 이상의 주기영역)에서는 연성도에 가까운 값을 나타낸다. 원거리 지진인 SE19에 대해서는 0.5~4초 사이의 구간에서 상대적으로 큰 강도감소계수를 나타내며 근거리 지진인 NF11에 대해서는 4~10초 사이의 구간에서 상대적으로 큰 강도감소계수를 나타냄을 알 수 있다. 그림 3(b)에는 완만도 조절계수(p)에 따른 강도감소계수의 영향을 분석하였는데 SE19 지진기록에 대해서는 2~8초 영역에서 완만도 조절계수가 커질수록 강도감소계수가 작아지는 경향을 나타내며, NF11 지진기록에 대해서는 5~10초 주기영역에서 완만도 조절계수가 커질수록 강도감소계수도 증가하는 경향을 나타낸다. 대표적인 하나의 지진기록에 대한 강도감소계수는 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 연성도가 증가하면 증가하는 경향을 나타내지만 그림 3(b)에 나타난 완만도 조절계수(p)의 영향은 특정한 경향을 나타내

지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 분석은 특정한 지진기록에 대한 분석이므로 일반적인 강도감소계수의 특성을 나타낸다고 하기에 부족하므로 명확한 강도감소계수의 특성을 분석하기 위해서는 표 1과 표 2에 나타난 많은 개수의 지진가속도 기록들에 대한 강도감소계수의 평균값을 구하여 분석하여야 한다.

4. 강도감소계수의 제안식 작성을 위한 회귀분석 및 기존 제안식과의 비교

일반적으로 강도감소계수는 하나의 지진에 대해서는 지진특성에 따라서 민감하게 변하므로 여러 개의 지진의 평균값을 사용하여야 경향을 파악할 수 있다. 본 연구에서는 강도감소계수에 대한 제안식을 작성하기 위하여 지진의 특성은 근거리 및 원거리로 구분하여 적용하고 비탄성 거동의 정도는 연성도로 고려하였으며 비탄성 이력거동의 형태는 완만도 조절계수를 변수로 고려하였다. 제안식 작성을 위한 강도감소계수의 회귀분석은 일반적으로 두 단계를 거치는 과정으로 수행하였다. 첫번째 단계는 특정한 연성도에 대하여 주기와 강도감소계수의 관계를 작성하고 이를 가정된 제안식을 사용하여 회귀분석한다. 첫번째 단계에서 가정한 강도감소계수의 제안식은 주기를 함수로 하여 식 (9)와 같이 가정하였으며 연성도에 따라서 계수 a, b, c 는 회귀분석된다. 식 (9)와 같이 가정한 이유는 계산된 강도감소계수와 가장 유사한 형태의 곡선을 표현할 수 있는 수식이기 때문이다.

$$R_{\mu} = a \ln(1+T_n) + bT_n + c \quad (\text{for near-fault}) \quad (9)$$

두번째 단계는 첫번째 단계에서 분석한 계수 a, b, c 를 연성도와와의 관계로 각각 나타내어 회귀분석한다. 즉, 계수 a, b, c 를 연성도의 함수로 나타낸다. 다양한 완만도 조절계수에 대해서는 위의 과정을 완만도 조절계수를 변화시켜가며 반복하여 적용하면 된다. 본 연구에서는 강도감소계수의 제안식을 근거리와 원거리 지진으로 구분하고 완만도 조절계수 p 는 1, 2, 5, 10을 사용하여 총 8가지 경우의 제안식을 제시하였다.

제안식을 구하는 과정은 대표적으로 표 2에 나타난 근거리 지진에 대하여 완만도 조절계수 p 가 1인 경우에 대하여 구하여 그림 4~7에 나타내었다. 첫 번째 단계의 회귀분석의 예로 총 9개의 연성도($\mu = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$)에 대하여 강도감소계수를 주기의 함수로 그림 4에 나타내었으며 이를 식 (9)에 가정된 제안식을 사용하여 회귀분석하여 계

수값 a, b, c 를 구하여 그림 4에 회귀분석 식으로 나타내었다. 점이 포함된 가는 실선이 해석된 강도감소계수의 평균값이며 굵은 실선은 해석된 값을 회귀분석하여 구한 곡선이 다. 연성도가 2일 경우에 결정계수(R^2)는 0.923이며 연성도가 커질수록 결정계수도 증가하여 연성도가 10일 경우에는 결정계수가 0.98로서 식 (9)을 사용한 회귀분석이 비교적 정확하다고 할 수 있다.

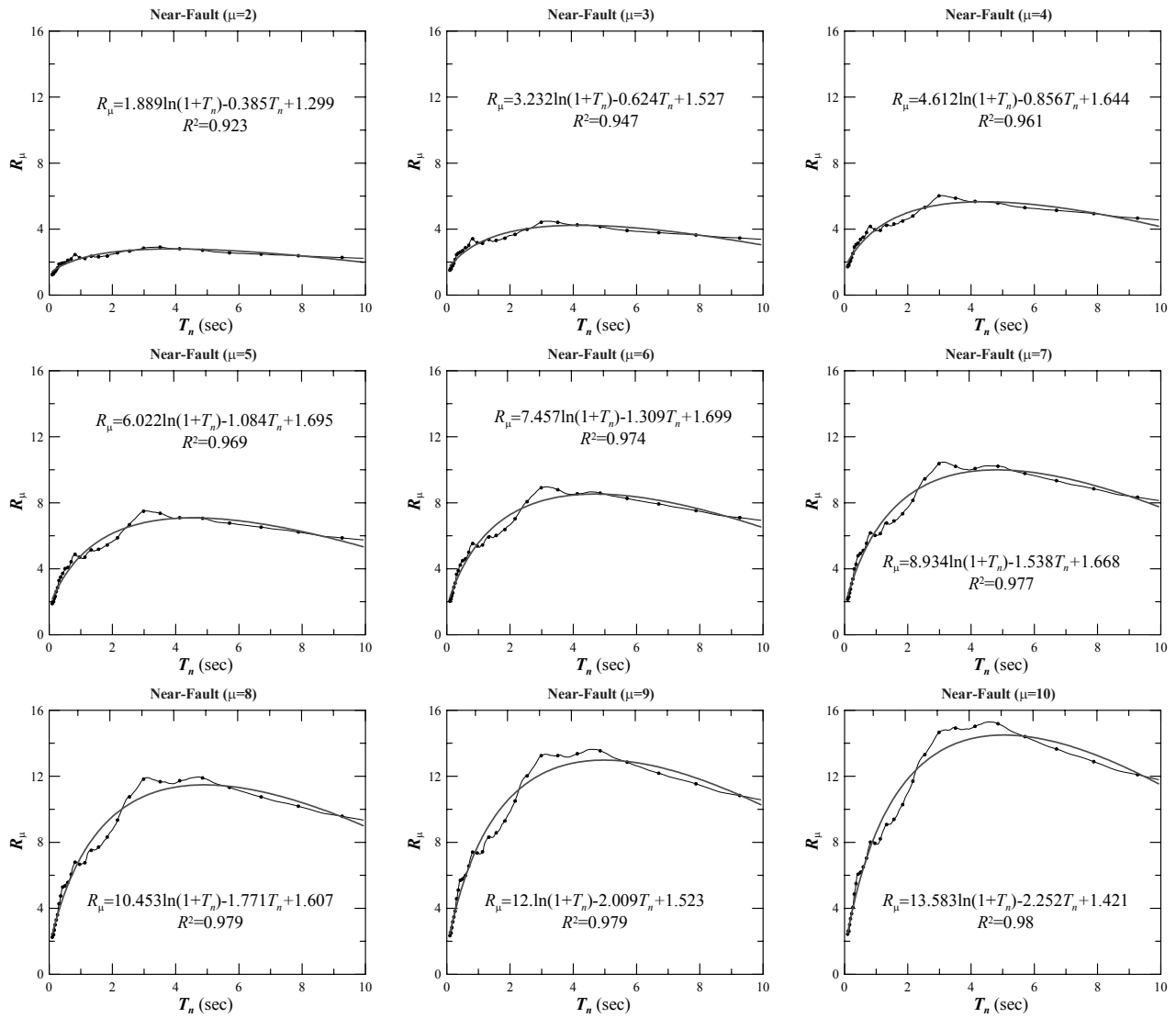
그림 4에서 구한 주기에 대한 강도감소계수의 회귀분석된 계수값 a, b, c 를 연성도에 대하여 그림 5에 점을 포함한 실선으로 나타내었다. 이 과정이 두번째 단계의 회귀분석과정이다. 계수 a, b, c 와 연성도의 관계를 회귀분석하여 구한 식을 그림에 함께 표시하였다. 계수 a 와 b 는 직선식으로 구할 경우 결정계수(R^2)가 0.999가 된다. 계수 c 는 직선식으로 회귀분석 되지 않고 그 값의 편차가 크지 않으므로 평균값 (1.565)을 구하여 적용하였다.

계수 c 를 평균값(1.565)으로 가정할 경우에 실제 계수 c 와는 그림 5에 나타난 바와 같이 다소 차이가 있으므로 계수 c 를 평균값으로 고정시킨 후에 회귀분석을 추가적으로 한번 더 수행하여 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 최종적인 회귀분석결과는 계수 a 는 $1.461\mu - 1.191$ 로서 그림 5의 회귀분석 결과와 동일하고 계수 b 는 $-0.234\mu + 0.092$ 로서 그림 5의 회귀분석결과와 약간의 차이를 나타내며 결정계수가 0.992로 다소 낮아졌으나 절대적인 값은 아직 크므로 회귀분석식의 정확성은 우수하다고 할 수 있다.

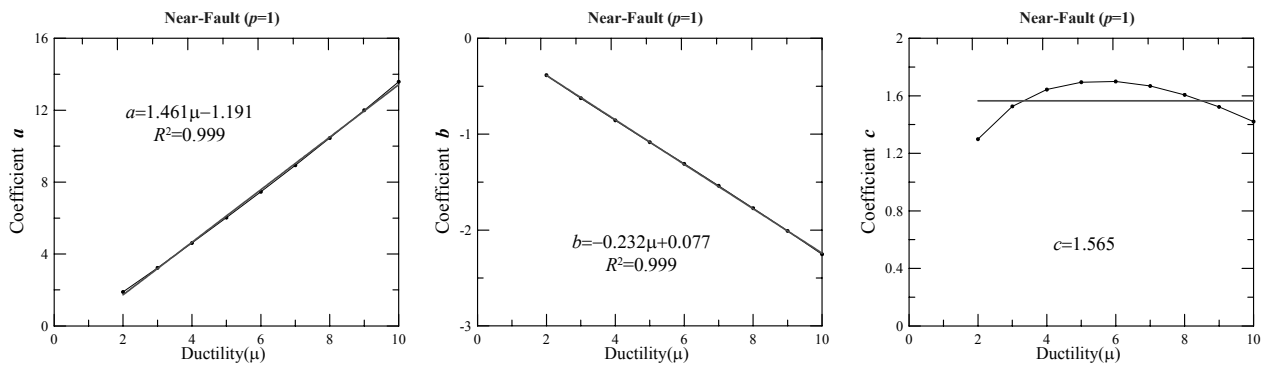
원거리 지진에 대하여 그림 4~5에 나타난 과정과 동일한 과정으로 강도감소계수를 구하고 이를 식 (9)를 이용하여 회귀분석하였으나 정확성이 확보되지 않았다. 식 (9)를 원거리 지진에 적용할 경우 정확성이 떨어지는 원인은 원거리 지진에 대한 강도감소계수는 주기가 2초보다 짧은 영역에서 근거리 지진의 강도감소계수보다 대략 30~40%정도 큰 값을 가지기 때문이다. 원거리 지진에 대한 회귀분석의 정확성을 향상하기 위하여 제안식을 식 (10)과 같이 수정하여 적용하였다. 식 (10)을 적용하여 원거리 지진에 대한 강도감소계수의 회귀분석할 경우에는 정확성이 충분히 확보되었다.

$$R_{\mu} = a \ln(T_n) + bT_n + c \quad (\text{for far-fault}) \quad (10)$$

근거리 지진에 대해서는 식 (9)를 적용하여 4개의 완만도 조절계수에 따른 회귀분석을 하였고, 원거리 지진에 대해서는 식 (10)을 적용하여 4개의 완만도 조절계수 따른 회귀분석을 수행하여 각각 제안식의 계수 a, b, c 를 구하여 최종적으로 표 3에 나타내었다. 계수 a, b 는 연성도의 함수로 정의



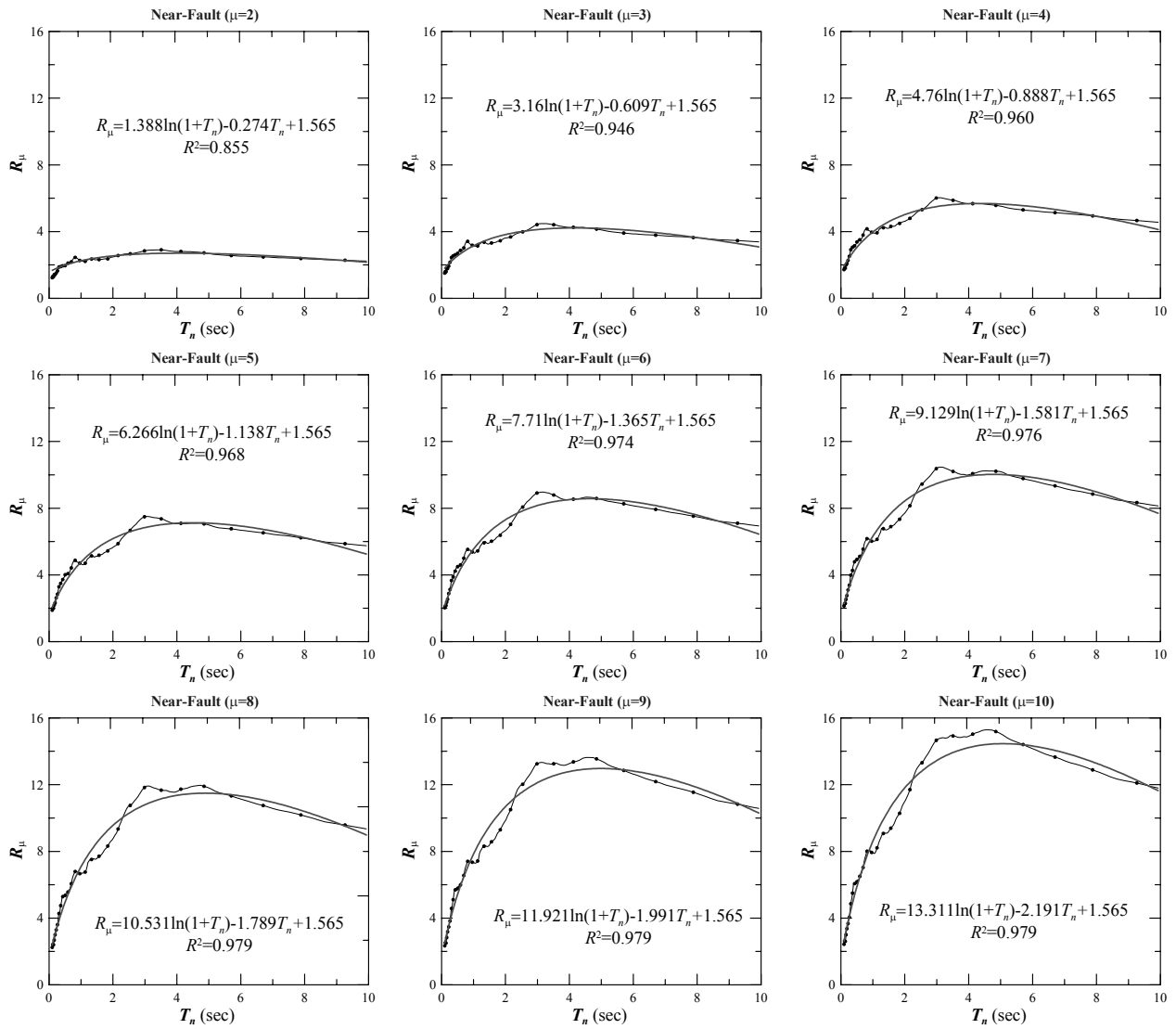
〈그림 4〉 근거리 지진에 대한 일정연성도 강도감소계수 R_μ 의 첫 번째 단계 비선형 회귀분석(완만도 조절계수 $\rho=1$, 연성도 $\mu=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$).



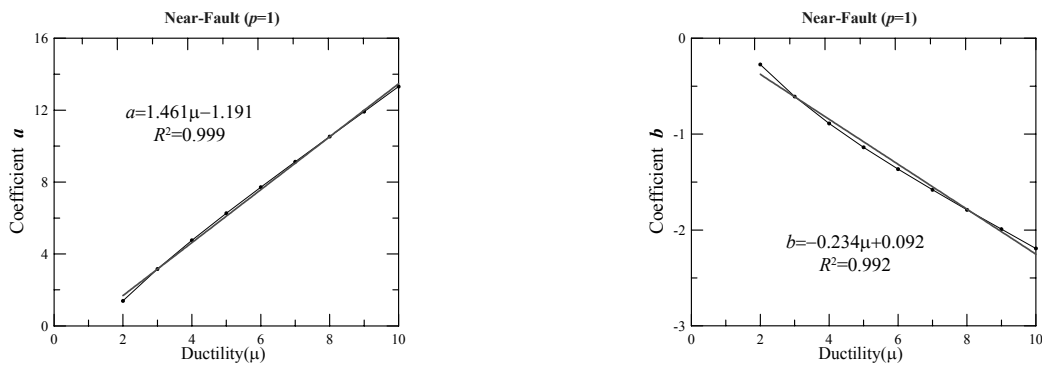
〈그림 5〉 근거리 지진에 대한 일정연성도 강도감소계수 R_μ 의 두번째 단계 비선형 회귀분석(완만도 조절계수 $\rho=1$, 연성도 $\mu=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$).

가 되었다. 그러나 계수 c 는 근거리 지진에서는 상수값으로 정의되었고 원거리 지진에 대해서는 연성도의 함수로 정의되었다.

식 (9), 식 (10)과 표 3을 이용하여 제안식에 의한 강도감소계수를 계산하여 비탄성 응답스펙트럼해석으로부터 구한 강도감소계수와 비교하였다. 그림 8(a)는 강도감소계수에



〈그림 6〉 계수 c 를 평균값으로 고정시킨후 수행한 R_μ 의 첫번째 단계 비선형 회귀분석(완만도 조절계수 $p=1$, 연성도 $\mu=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$).



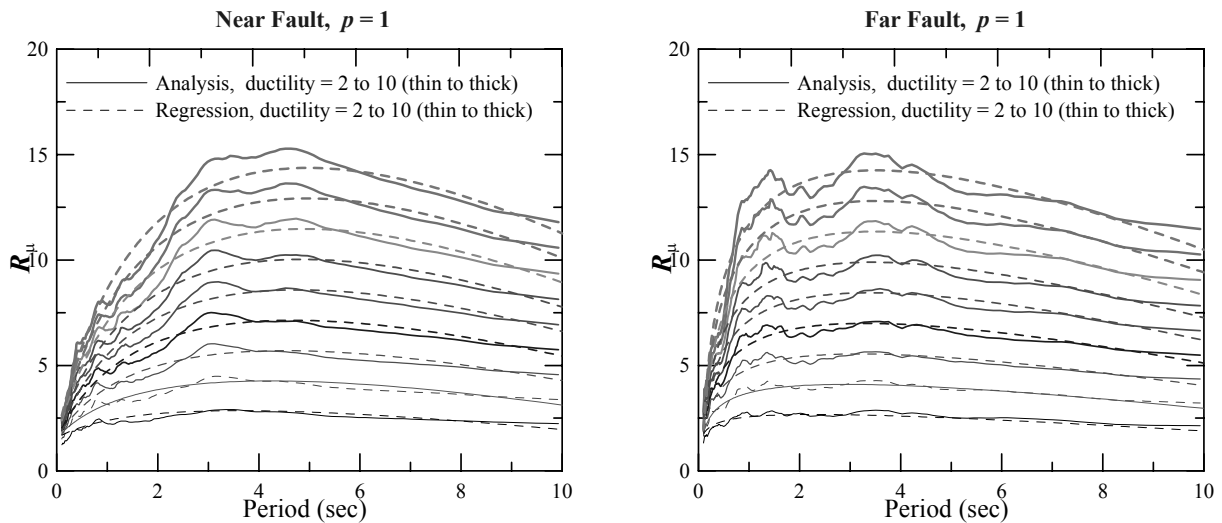
〈그림 7〉 계수 c 를 평균값으로 고정시킨후 수행한 R_μ 의 두번째 단계 비선형 회귀분석(완만도 조절계수 $p=1$, 연성도 $\mu=2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$).

대한 연성도의 영향을 근거리 및 원거리 지진으로 구분하여 나타내었다. 제안식에 의한 강도감소계수가 해석에 의한 강도감소계수와 잘 일치하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 연성도가 클수록 강도감소계수는 이에 비례하여 증가하는 특

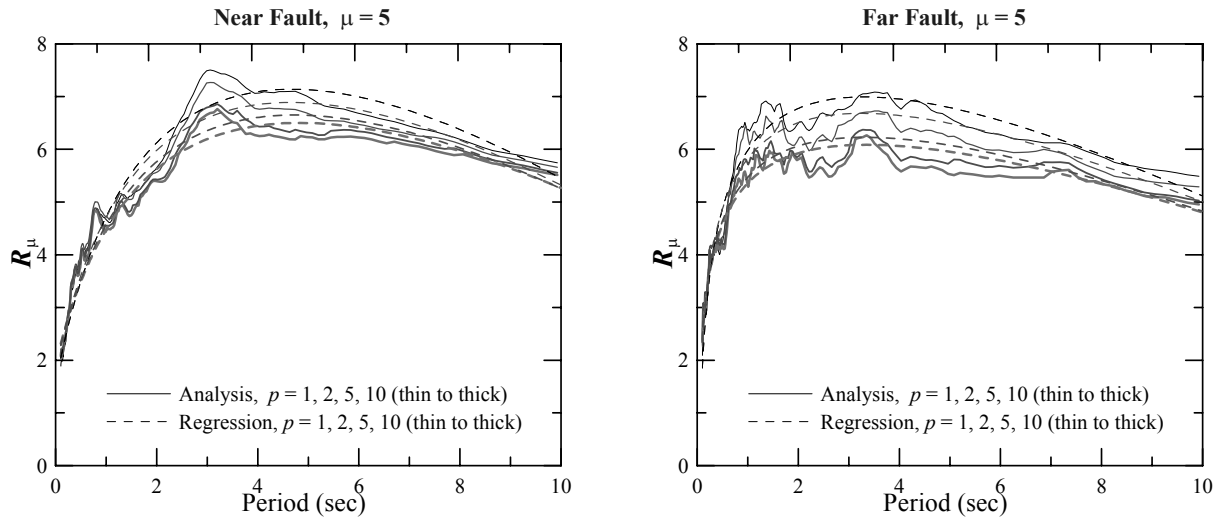
성을 나타내며, 2초 보다 작은 주기영역에서는 원거리 지진의 경우가 근거리 지진에 비하여 큰 값의 강도감소계수를 나타낸다. 그림 8(b)에는 완만도 조절계수(p)에 따른 강도감소계수의 영향을 근거리 및 원거리 지진으로 구분하여 나타

〈표 3〉 완만한 곡선이력모델을 이용한 동일연성도 강도감소계수 R_μ 제안식의 계수값

지진특성에 따른 제안식	Smoothness (p)	a	b	c
$R_\mu = a \ln(1 + T_n) + b T_n + c$ (근거리 지진의 경우)	1	$1.461\mu - 1.191$	$-0.234\mu + 0.092$	1.565
	2	$1.444\mu - 1.665$	$-0.228\mu + 0.155$	1.849
	5	$1.421\mu - 1.91$	$-0.221\mu + 0.197$	1.876
	10	$1.381\mu - 2.011$	$-0.211\mu + 0.215$	1.93
$R_\mu = a \ln(T_n) + b T_n + c$ (원거리 지진의 경우)	1	$0.538\mu - 0.655$	$-0.145\mu + 0.108$	$1.286\mu + 0.17$
	2	$0.516\mu - 0.819$	$-0.139\mu + 0.153$	$1.255\mu + 0.093$
	5	$0.475\mu - 0.853$	$-0.126\mu + 0.169$	$1.181\mu + 0.026$
	10	$0.458\mu - 0.855$	$-0.121\mu + 0.176$	$1.152\mu + 0.029$



(a) 연성도에 따른 강도감소계수의 영향 비교($p=1$ 로 고정)

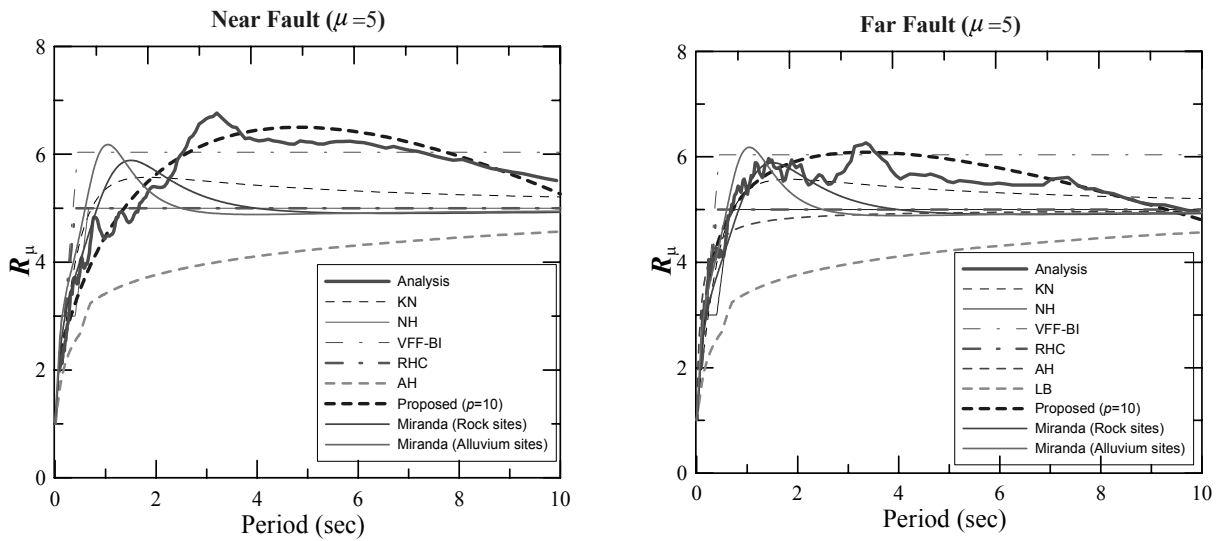


(b) 완만도 조절계수에 따른 강도감소계수의 영향 비교($\mu=5$ 로 고정)

〈그림 8〉 비탄성 응답스펙트럼 해석과 회귀분석에 의한 강도감소계수 제안식과의 비교

내었다. 완만도 조절계수가 큰 값을 가질수록 강도감소계수는 작아지는 특성을 나타낸다. 다시 말하면, 비탄성 이력거동의 형상이 완만한 형태에서 분할선형 모델인 이선형 형태에 가까워질수록 강도감소계수는 작아지는 경향을 나타낸다. 다르게 표현하면 곡선형 이력거동의 특성인 완만도가

증가할수록 강도감소계수는 증가하는 특성을 나타낸다. 완만도에 따른 강도감소계수의 차이는 주기가 2초~6초의 범위에서 크게 발생하며 완만도가 증가할수록 10~15% 정도의 강도감소계수 증가를 나타낸다. 근거리 지진보다는 원거리 지진의 경우가 완만도에 따른 강도감소계수의 차이가 보



〈그림 9〉 본 연구에서 제안한 강도감소계수(proposed)와 기존의 강도감소계수 제안식(KN, NH, VFF-BI, RHC, AH, Miranda)과의 비교($\mu = 5$)

다 크게 나타난다.

강도감소계수는 식 (8)에 정의된 바와 같이 탄성거동시의 요구강도를 비탄성 거동시의 요구강도로 나눈 값을 의미한다. 기존의 분할선형모델 대신 완만한 곡선형 이력거동을 강도감소계수에 적용함으로써 구조시스템에 요구되는 강도는 감소한다고 할 수 있다. 결과적으로 완만한 곡선형 이력거동을 적용하는 것이 실제적인 거동에 보다 가까운 거동을 반영하면서도 부재단면을 줄일 수 있는 경제적인 설계가 되도록 함을 의미한다. 동일한 연성도 능력하에서 강도감소계수가 큰 값을 나타내는 경우가 요구되는 강도를 작게 반영하여도 되기 때문에 경제적으로 유리한 설계가 가능하게 한다. 이상화된 이선형 모델을 사용하여 구조물의 비탄성 설계를 하는 경우는 실제 구조물의 거동과 유사한 완만한 곡선형 이력거동의 경우보다는 강도감소계수를 과소평가하게 함으로 요구강도를 보수적으로 평가하게 한다.

단순화된 형태의 분할선형 이력모델에 대하여는 여러 연구자들에 의해 강도감소계수가 제안되었다. 대표적인 제안식으로는 Arias와 Hidalgo(AH)⁽⁹⁾, Krawinkler와 Nassar(KN)⁽¹⁰⁾, Lai와 Biggs(LB)⁽¹¹⁾, Newmark와 Hall(NH)⁽¹²⁾, Riddel, Hidalgo와 Cruz(RHC)⁽¹³⁾, Vidic, Fajfar와 Fischinger(VFF)⁽¹⁴⁾, Miranda⁽¹⁵⁾ 등의 제안식이 있으며 각 제안식의 명칭은 연구자의 이름의 첫자를 조합하여 괄호안에 나타낸 바와 같이 본 논문에서 표기하였다. 기존의 제안식에 의한 강도감소계수와 본 연구에서 제안한 강도감소계수를 그림 9에 근거리 및 원거리 지진으로 구분하여 비교하였다. 기존의 제안식 중에서는 근거리 지진에 대해서는 VFF-BI식(VFF식중 Bilinear 모델에 대한 제안식을 의미)이 실제 지진가속도 기록의 응답스펙트럼해석 결과에 가장 근접한 결과를 나

타내며, 원거리 지진에 대해서는 KN식이 가장 근접한 결과를 나타낸다. Miranda⁽¹⁵⁾가 제안한 식은 지반의 조건을 암반과 충적토(Alluvium Site)로 구분하여 나타내었다. Miranda 제안식은 주기가 0~3초인 구간에 대해서만 회귀분석하여 구한 식이기 때문에 3초 이후의 주기영역에서는 본 연구의 해석결과와는 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. Miranda의 제안식 중 암반에 대한 식이 원거리 지진의 경우의 해석결과와 3초까지의 주기영역에서 잘 일치하는 결과를 나타냄을 알 수 있다.

본 연구의 제안식이 기존 제안식에 비하여 실제 지진가속도 기록들의 비탄성 응답스펙트럼해석에 의한 결과와 가장 잘 일치하는 결과를 나타냄을 알 수 있다. 이는 기존의 제안식은 근거리와 원거리 지진으로 지진특성을 구분하지 않고 있기 때문에 지진의 특성에 관계없이 동일한 강도감소계수를 적용하기 때문이며, 또한 기존의 제안식이 본 연구와 같은 다양한 지진가속도 기록을 포함하는 것이 아닌 소수의 제한된 지진가속도 기록만을 사용하여 평가되었기 때문으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 완만한 곡선형 이력거동에 대한 비선형 응답스펙트럼을 구하고 이로부터 강도감소계수를 연성도의 함수로서 회귀분석하여 제안식을 작성하였다. 제안식에서 지진의 특성은 근거리 지진과 원거리 지진으로 구분하여 구하였으며 곡선형 이력거동의 완만도는 4가지 경우로 구분하여 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존 강도감소계수의 평가에 널리 사용된 분할 선형모델 보다는 본 연구에 사용된 완만한 곡선형 이력거동 모델이 실제적인 구조물의 거동을 보다 정확하게 나타내는데 유리하므로 기존의 강도감소계수 제안식 보다 정확성이 향상된 강도감소계수의 평가가 가능하다. 강도감소계수는 일반적으로 구조물의 주기와 연성도에 민감하게 영향을 받음으로 본 연구의 제안식도 주기와 연성도의 함수로서 강도감소계수 제안식을 나타내었다.
2. 강도감소계수에 대한 곡선이력거동의 완만정도의 영향은 연성도의 영향 보다는 민감도가 작지만 대략 15% 이내의 범위에서 강도감소계수의 증가에 대한 영향을 주고 있음을 알 수 있다.
3. 곡선형 이력거동의 변수인 완만도가 증가할수록 강도감소계수는 증가하는 특성을 나타낸다. 완만도에 따른 차이는 주기가 2초~6초의 범위에서 크게 발생하며 10~15% 정도의 증가를 나타낸다. 근거리 지진보다는 원거리 지진의 경우가 완만도에 따른 강도감소계수의 차이가 보다 크게 나타난다.
4. 강도감소계수는 탄성 설계응답스펙트럼으로부터 비탄성 설계응답스펙트럼을 비탄성 해석을 직접적으로 수행하지 않고 쉽게 평가하기 위하여 사용되며, 이를 사용하면 역량스펙트럼방법에서 소요 스펙트럼(Demand Spectrum)을 간단하게 구할 수 있다. 본 연구의 강도감소계수 제안식을 역량스펙트럼 방법에 적용한다면 실제구조물의 완만한 이력거동을 보다 정확하게 반영하므로 해석결과의 정확성이 향상되리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 송종걸, “역량스펙트럼 방법을 이용한 다자유도 교량의 비탄성 지진응답 평가,” 대한토목학회 논문집, 제 24권, 제 3A호, 541-550, 2004.
2. 송종걸, 남왕현, 정영화, “횡하중 분포의 영향을 고려한 다경간 교량의 내진성능 평가를 위한 비탄성 정적해석,” 대한토목학회 논문집, 제 25권, 제 6A호, 1163-1176, 2005.
3. 송종걸, 남왕현, 정영화, “등가단자유도 방법의 영향을 고려한 다경간 교량의 내진성능 평가를 위한 비탄성 정적해석,” 대한토목학회 논문집, 제 26권, 제 3A호, 473-484, 2006.
4. 송종걸, 장동휘, 김학수, 정영화, “철근콘크리트 벽체구조물에 대한 등가단자유도 방법 및 등가 감쇠비 산정방법에 따른 역량스펙트럼해석,” 한국전산구조공학회 논문집, 제 21권, 제 2호, 169-187, 2008.
5. Chopra, A.K. and Goel, R.K. (1999) Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: SDF systems, Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.
6. 송종걸, 김학수, “근거리 및 원거리 지진에 대한 비선형 구조물의 강도감소계수 산정,” 대한토목학회논문집, 제 27권, 제 3A호, 321-337, 2007.
7. 송종걸, “비탄성 응답스펙트럼에 대한 완만한 곡선형 이력거동의 영향,” 한국지진공학회 논문집, 제 14권, 제 1호, 1-9, 2010.
8. Peng B.F., Conte J.P., “Statistical insight into constant-ductility design using a non-stationary earthquake ground motion model,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 895-916, 1997.
9. Hidalgo, P.A., and Arias, A., “New Chilean code for earthquake-resistant design of buildings,” *Proc. 4th U.S. Nat. Conf. Earthquake Engrg.*, Palm Springs, California, Vol. 2, 927-936, 1990.
10. Krawinkler, H., and Nassar, A. A., “Seismic design based on ductility and cumulative damage demands and capacities,” *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Elsevier Applied Science, 1992.
11. Lai, S.-P., and Biggs, J.M., “Inelastic response spectra for aseismic building design,” *J. Struct. Div., ASCE*, Vol. 106, No. ST6, 1295-1310, 1980.
12. Newmark, N.M., and Hall, W.J., “Seismic design criteria for nuclear reactor facilities,” *Report No. 46, Building Practices for Disaster Mitigation*, National Bureau of Standards, U.S. Department of Commerce, 209-236, 1973.
13. Riddel, R., Hidalgo, P., and Cruz, E., “Response modification factors for earthquake resistant design of short period structures,” *Earthquake Spectra*, Vol. 5, No. 3, 571-590, 1989.
14. Vidic, T., Fajfar, P., and Fischinger, M. “A procedure for determining consistent inelastic design spectra,” *Proc. Workshop on Nonlinear Seismic Analysis of RC Structures*, Bled, Slovenia, 1992.
15. Miranda, E. “Site-dependent strength-reduction factors,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 12, 3503-3519, 1993.