

# 역T형 옹벽의 지진시 거동특성 Part II : 입력 지진파의 영향

## Seismic Behavior of Inverted T-type Wall under Earthquake Part II : Effect of Input Earthquake Motion

이진선\*

Jin-sun Lee\*

원광대학교 토목환경공학과

Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University

### / A B S T R A C T /

Permanent deformation plays a key role in performance based earthquake resistant design. In order to estimate permanent deformation after earthquake, it is essential to secure reliable response history analysis(RHA) as well as earthquake scenario. This study focuses on permanent deformation of an inverted T-type wall under earthquake. The study is composed of two separate parts. The first one is on the verification of RHA and the second one is on an effect of input earthquake motion. The former is discussed in companion paper and the latter in this paper. In order to investigate the effect of an input earthquake motion on the permanent deformation, three bins of spectral matched real earthquake records with different magnitude, regions, epicentral distance are constructed. Parametric study was performed using the verified RHA through the companion paper for each earthquake records in the bins. The most influential parameter affecting permanent displacement is magnitude. The other parameters describing earthquake motion are not significant enough to increase permanent displacement of the inverted T-type wall except for energy related parameters(AI, CI, SEI).

**Key words:** Performance based earthquake resistant design, Response history analysis, Nonlinear numerical analysis, Spectral matching, Input earthquake motion, Retaining wall

## 1. 서론 및 연구동향

지반구조물에 대한 내진설계는 지진시 추가로 작용되는 지진력에 대하여 구조물의 손상이 일어나지 않는 것을 목표로 시작되었다. 지진시 고려되는 추가 지진력은 해당시설물에 작용할 수 있는 최대지진가속도(설계지진가속도)를 기반으로 지진계수(Seismic coefficient)로 표현되며, 이렇게 산정된 지진력을 정적 추가 하중의 형태로 구조물에 작용하는 것이 지금까지의 일반적인 내진설계방법이라 할 수 있다. 이때, 해당시설물의 설계지진가속도는 구조물의 중요도를 고려한 결정론/확률론적 지진해분석을 통해 최대가속도로 정의되며 주파수 성분, 지속시간, 진동반복횟수 등을 포함하는 지진파의 기타 특성은 일반적으로 고려하지 않는다. 이러한 내진설계절차는 유사정적설계(Pseudo-static analysis)로 알려져 있으며, 1990

년대 중반까지 세계 각국 내진설계기준의 표준으로 적용되어 왔다.

지반구조물 내진설계에 있어서 성능기반(Performance based) 내진설계의 필요성이 대두된 것은, Kobe 지진으로 알려진 1995년도 일본 효고현 남부 대지진 이후이다. 당시, 유사정적설계가 적용된 Kobe 항만시설물들의 피해사례 조사결과 대형지진에 대하여 지반구조물의 손상(잔류변위)을 억제하는 방식의 설계는 불가능하다는 판단이 이루어 졌으며, 이에 따라 일정량의 손상을 허용하는 방식으로의 설계개념 전환이 시작되었다[1]. 시설물의 성능기반 내진설계 시행을 위해서는 크게 두 가지 선형조건을 만족하여야 하는데 첫째, 시설물 이해당사자간의 성능목표에 대한 합의가 있어야 하며, 둘째 향후 발생할 수 있는 지진에 대하여 구조물의 응답을 신뢰성 있게 예측 가능하여야 한다. 구조물의 응답예측은 실험적인 기법과 해석적인 기법으로 가능하나, 실무에서 현실적으로 적용 가능한 방법은 검증된 수치해석을 이용하는 방법이다. 검증된 수치해석은 지진하중으로 인한 잔류(영구)변위가 발생할 수 있도록 액상화 현상을 포함한 지반의 동적 비선형 거동을 모사할 수 있어야 한다. 이를 위하여 동반논문[2]에서는 본 연구에

\*Corresponding author: Jin-sun Lee

E-mail: blueguy@wku.ac.kr

(Received August 27, 2015; Revised October 6, 2015; Accepted October 12, 2015)

적용된 수치해석 프로그램을 동적원심모형시험을 이용하여 검증하였다.

검증된 수치해석프로그램의 적용시 지반구조물의 잔류변위 예측을 위하여, 추가로 고려하여야 할 사항은 입력 지진파의 영향이다. 유사정적해석과는 다르게, 응답이력해석(RHA, Response History Analysis)의 경우 최대입력가속도 외 기타 지진파의 비정상특성(Non-stationary characteristics)이 잔류변위에 영향을 미치게 된다[3],[4]. 따라서, 설계응답스펙트럼을 만족시키는 지진파일지라도 잔류변위 예측 결과가 달라지는 어려움이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해서, 구조물 내진설계분야에서는 비선형해석을 위한 지진기록군(群, Bin) 조합에 따른 잔류변위 영향연구가 활발히 진행 중인 반면[5], 지반구조물의 경우 아직까지 유사연구가 진행되고 있지 않은 실정이다.

본 논문에서는 동반논문[2]에서 검증된 수치해석기법을 기반으로 입력 지진군의 선택에 따른 역T형 옹벽의 잔류변위 영향정도를 검토하고자 한다. 사용된 입력지진군은 우리나라 내진설계에서 목표로 하는 지진규모( $M_L$ ) 5.1~6.5범위의 외국 실지진 계측기록. 현재 확보 가능한 국내 계기지진기록 중 지진규모( $M_L$ ) 4.5이상의 계측자료, 그리고 동일규모의 외국 계측기록을 우리나라 등재해 스펙트럼(UHS, Uniform Hazard Spectrum)을 만족시킬 수 있도록 수정하여 사용하였다. 다만, 최근 연구에서 확률론적 지진재해분석(PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis)으로 구축된 UHS상 특정 주기의 가속도 값은 단일 지진파형이 아닌 여러 지진파형의 에너지의 합으로 도출된 결과이므로, 등재해 스펙트럼으로부터 직접 지진파를 분해하는 것은 과다설계를 유발할 수 있다는 문제가 제기되어 일부 설계기준에서는 조건부중간치스펙트럼(CMS, Conditional Mean Spectrum)이 제안되어 적용되고 있으나[6], 본 논문에서는 이 부분에 대한 검토는 논외로 한다.

## 2. 지진기록의 선정

내진설계시 지진하중은 시설물 사용기간 내 올 수 있는 가장 큰 진도의 지진(MCE, Maximum Credible Earthquake)을 예측하여 사용하는 것이 가장 이상적인 방법이라 할 수 있다. 하지만, 현실점에서 지진예측관련 기술수준은 이를 실제 적용할 수 있을 정도에 도달하지 못한 것은 주지의 사실이다. 따라서, 현재까지는 알려진 활성단층자료와 거리감쇠식을 이용한 결정론적 지진재해분석(DSHA, Deterministic Seismic Hazard Analysis)

또는 확률론적 지진재해분석(PSHA)을 적용하는 것이 일반적인 방법이다. 이러한 지진재해분석을 통해 산출된 결과물은 단일 지진파형이 아닌 발생 가능한 여러 지진파의 영향을 반영하여 작성된 것으로, 실제 성능기반내진설계를 위한 입력지진으로 사용하기 위해서는 개별지진으로 분해(Deaggregation)하는 과정이 필수적이다. 현재 적용되고 있는 분해과정은 조사된 활성단층과 해당지역에서 확정된 거리감쇠식을 이용하여 향후 발생가능한 지진의 규모와 진앙거리를 만족하는 실지진 기록을 선정하는 방법으로 진행된다[7].

지진활동이 활발한 국가에서는 설계기준에 RHA를 위한 지진기록 선정 방법이 구체적으로 규정되어 있다. Eurocode 8[8, 9], ASCE Standard 7-05[10]와 4-98[11], FEMA규정[12], New Zealand Standards[13], Italian Code[14], Greek Seismic Code[15]에서는 프로젝트 대상 부지의 지진발생 조건이 고려된 인공지진 또는 실지진기록을 사용하도록 규정하고 있다. 단, New Zealand 기준은 실지진 기록만을 사용하도록 한다. 또한, ASCE 기준(1개 기록 사용가능)을 제외하면 모두 설계스펙트럼을 만족시키는 3개 이상의 지진기록을 적용토록 하며 7개 이상의 지진기록을 사용시 해석결과(구조물 응답)의 중간값을 적용할 수 있도록 규정하였다.

우리나라의 경우 현재 내진설계기준에서 목표로 하고 있는 규모 ( $M_L$  5.1~6.5)에 상응하는 유의미한 계기지진계측기록이 존재하지 않고, 활성단층의 정확한 위치와 단층형태에 대한 조사가 이루어지지 않은 관계로 Deaggregation이 사실상 불가능 하다고 할 수 있다. 또한, 우리나라 시설물별 내진설계기준에서 목표로 하는 지진가속도 범위(0.07~0.154g)와 설계 지진규모( $M_L$  5.1 ~ 6.5)는 활성단층 조사기반 지진재해분석으로 도출된 수치가 아님에 따라 목표 가속도가 발생하기 위해서는 진앙거리가 거의 0에 수렴하는 모순이 발생하게 된다[16]. 따라서, 본 논문에서 지진계측기록의 선정은 진앙거리에 대한 제한을 두지 않고 선정을 실시하였으며, 목표설계지진규모( $M_L$  5.1 ~ 6.5)에 대해서는 외국의 지진기록을 포함하는 임의의 지진기록군을 선정하여 아래와 같은 지진 조합을 구성하였다.

- (1) Bin #1 : 국내 계기지진 계측기록 중 상위규모 기록 ( $M_L$  4.8 ~ 5.2, 암반노두 계측자료)
- (2) Bin #2 : 국외 계기지진 계측기록 중 규모 ( $M_L$  4.5 ~ 5.3, 암반노두 계측자료)
- (3) Bin #3 : 국외 계기지진 계측기록 중 규모 ( $M_L$  5.6 ~ 6.3, 암반노두 계측자료)

**Table 1.** Set of the domestic strong motion records with rock outcrop ( $M_L$  4.8~5.2) from KMA(Korea Meteorological Administration) database - BIN#1

No.	Event Date	Epicenter	Nearest Rock Outcrop Station	Epicentral Dist. (km)	PGA (g) (Direction)	$M_L$
1	2003/3/20	35.00N 124.60E	HUK2 34.69N 125.45E	37.4	0.0116 (EW)	4.9
2	2003/3/30	37.80N 123.70E	BRD 37.98N 124.71E	91.5	0.0019 (NS)	5.0
3	2004/5/29	36.80N 130.20E	ULJ2 36.70N 129.41E	71.4	0.0053 (NS)	5.2
4	2007/1/20	37.68N 128.59E	DGY2 37.69N 128.67E	7.5	0.1254 (NS)	4.8
5	2013/4/21	35.16N 124.56E	HUK2 34.69N 125.45E	96.7	0.0017 (NS)	4.9
6	2013/5/18	37.68N 124.63E	DEI 37.26N 126.10E	138.4	0.0054 (NS)	4.9
7	2014/4/1	36.95N 124.50E	GBI 36.63N 125.56E	101.0	0.0067 (NS)	5.1

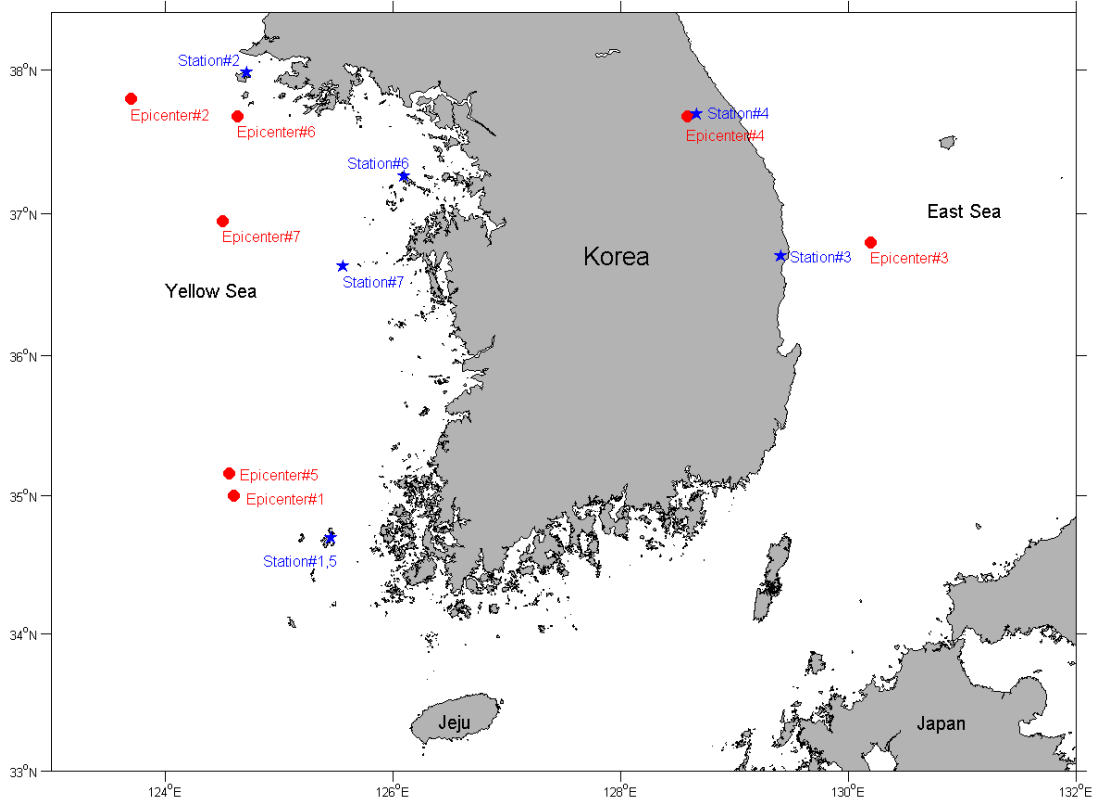


Fig. 1. Location of epicenters and corresponding rock outcrop stations for the domestic strong motions(Bin #1) since instrumental recording is commenced

## 2.1 우리나라 계기지진 계측기록의 선정 : Bin #1

지진 규모가 작음에도 불구하고 국내 계기지진 계측기록을 포함한 이유는 입력지진파의 선택에 있어서 중요한 진원거리 및 단층 파괴형태에 따른 지진파형의 특성을 반영하기 위해서, 비록 규모가 작다 하더라도 향후 규모가 큰 지진이 발생할 경우 비교적 유사한 지진파 파형을 나타낼 가능성이 높기 때문이다. 이렇게 선정된 국내 지진기록은 Table 1과 같으며, 진앙과 계측지점의 위치는 Fig. 1, 시간이력과 응답스펙트럼은 Fig. 2(a)(c)에 나타내었다. 지진기록의 선정은 진앙으로부터 가장 가까운 암반노두 계측기를 선정하였으나, 2007년 발생한 규모 4.8의 지진을 제외하고는 모든 계측지점이 진앙으로부터 상당한 거리에 위치하는 관계로 최대지진가속도는 매우 작은 값을 나타내고 있다. 지진파의 주파수 대역은 비슷한 규모의 외국 지진계측기록과 비교시 상대적으로 단주기 성분을 많이 함유하고 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 2(c), Fig. 3(c)). 이러한 단주기 에너지대역의 분포로 인하여 거리에 따른 지진에너지의 감쇠는 매우 빠르게 발생하는 특징을 나타낸다.

선정된 지진기록군(群)은 국내내진설계기준의 UHS(지진구역 I, 재현주기 500년, 보포암( $S_B$ )지반)을 목표로 스펙트럼 매칭을 실시하였다. 스펙트럼 매칭에 사용된 소프트웨어는 이탈리아 Seismosoft사의 Seismomatch Ver 2.1.2이며, 사용된 스펙트럼매칭 기법은 RSPMatch로 잘 알려진 시간영역 Wavelet추가기법을 사용하고 있다[16].

Fig. 2(b)에 스펙트럼 매칭이 완료된 지진파의 시간이력을 함께 도시하

였으며, Fig. 2(d)는 스펙트럼 매칭결과이다. Wavelet추가기법 적용시 스펙트럼매칭 과정에서 상대적으로 장주기 성분의 에너지가 보강되었으나, 최대 가속도 발생시점, 주기, 에너지분포와 같은 지진파의 비정상특성은 비교적 유지 가능한 것을 알 수 있다. 또한, 주기 2초 이하에서 스펙트럼 매칭된 지진기록군(Bin #1)의 중간값(Mean)은 목표스펙트럼과 거의 일치하는 것을 알 수 있다(Fig. 2(d)).

## 2.2 외국 계기지진 계측기록의 선정-I : Bin #2

다음의 지진기록군은 국내지진계측기록과 유사한 지진규모범위의 외국기록이다. 지진기록의 선정은 우선 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research Center)에서 제공하는 NGA(Next Generation Attenuation Relationship for Western US)-West2 데이터베이스를 이용하여 2.1 절에서 설명한 국내내진설계기준의 UHS와 가장 유사한 지진기록을 선정하였다. 선정기록은 미국 캘리포니아 암반노두 계측기록으로 제한하였다. 선정 과정에 있어서 Bin #1과 마찬가지로 단층파괴형태에 대한 제한을 두지는 않았다. 선정된 지진기록을 Table 2에 수록하였다. Bin #1과 유사한 규모의 지진임에도 불구하고 상대적으로 장주기 에너지 성분을 많이 포함하고 있으며(Fig. 2(c)), 지진의 주기는 큰 차이를 나타내지 않는다(Fig. 3(a)). 이렇게 선정된 기록을 Bin #1과 동일한 방법으로 스펙트럼 매칭을 실시한 결과를 Fig. 3(b)(d)에 수록하였다. 원본 지진기록의 장주기 성분으로 인하여 매칭된 스펙트럼 중간값의 일치도는 Bin #1에 비하여 더 높게 나타난다.

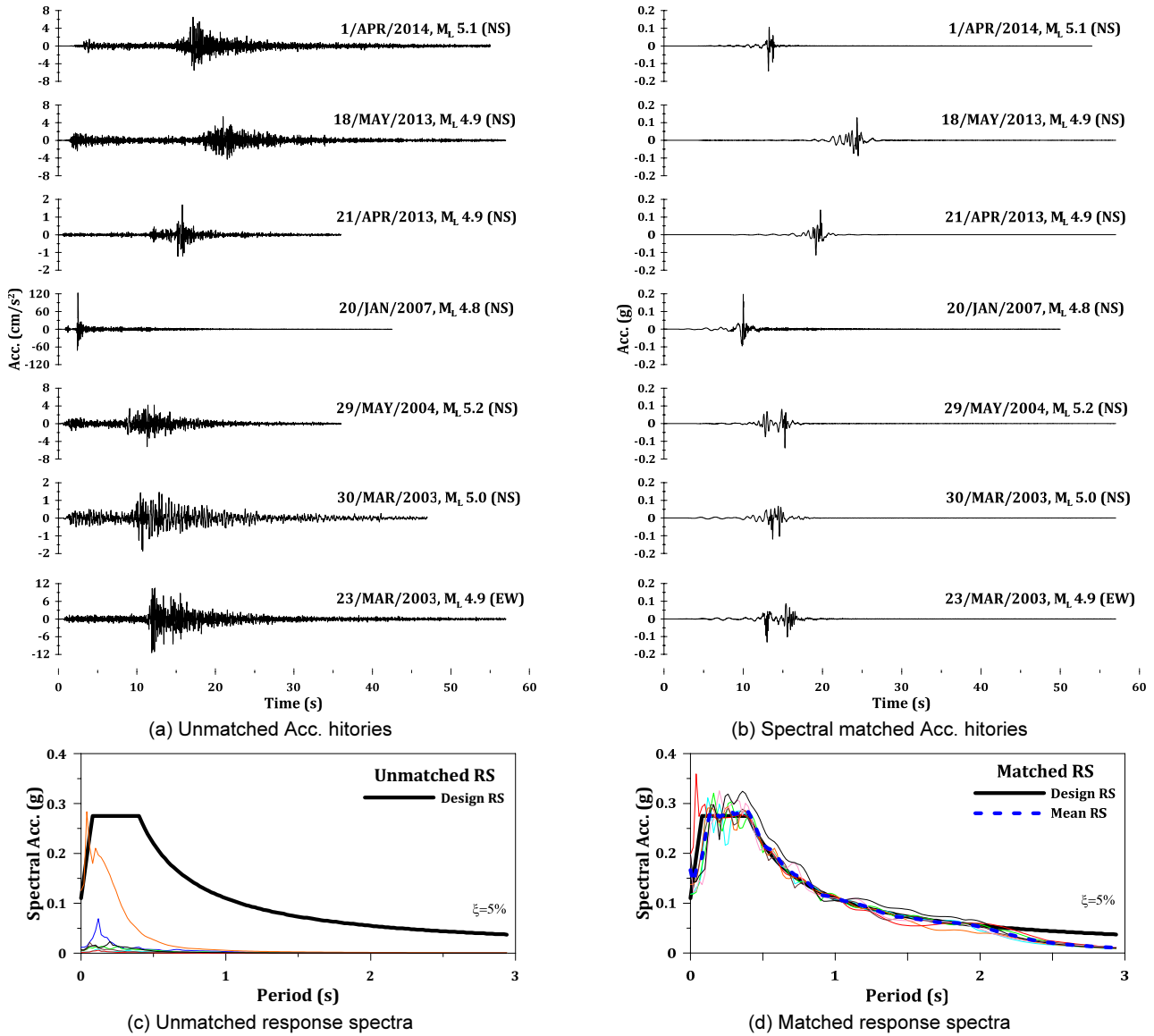


Fig. 2. Unmatched and matched domestic strong motion records with rock outcrop ( $M_L$  4.8~5.2) from KMA database, Bin #1

Table 2. Set of the international strong motion records with rock outcrop ( $M_L$  4.5~5.3) from PEER NGA WEST-2 database - BIN#2

No.	Event Year	Fault Type	Rock outcrop Station ( $V_{s30}$ , m/s)	$R_{jb}$ (km) $R_{rup}$ (km)	PGA (g)	$M_L$
1	1957	R	Golden Gate Park (874)	9.7 11.0	0.082	5.3
2	1970	RO	Cedar Springs, Allen Ranch (813)	17.4 19.4	0.041	5.3
3	1974	SS	Gilroy Array #1 (1428)	10.0 10.5	0.101	5.1
4	1994	R	LA - Griffith Park Observatory (1015)	18.5 21.7	0.032	5.3
5	2001	NO	Agave Hill (760)	16.5 20.8	0.139	4.9
6	2005	SS	Pinon Flats Observatory, Ca, Usa (763)	12.8 19.6	0.461	5.2
7	2006	SS	Taylor Mountain (760)	6.4 9.0	0.027	4.5

Fault type : R(Reverse) RO(Reverse Oblique) SS(Strike Slip) R(Reverse) NO(Normal Oblique) SS(Strike Slip)

$R_{jb}$  : Closest horizontal distance to rupture plane

$R_{rup}$  : Closest distance to rupture plane

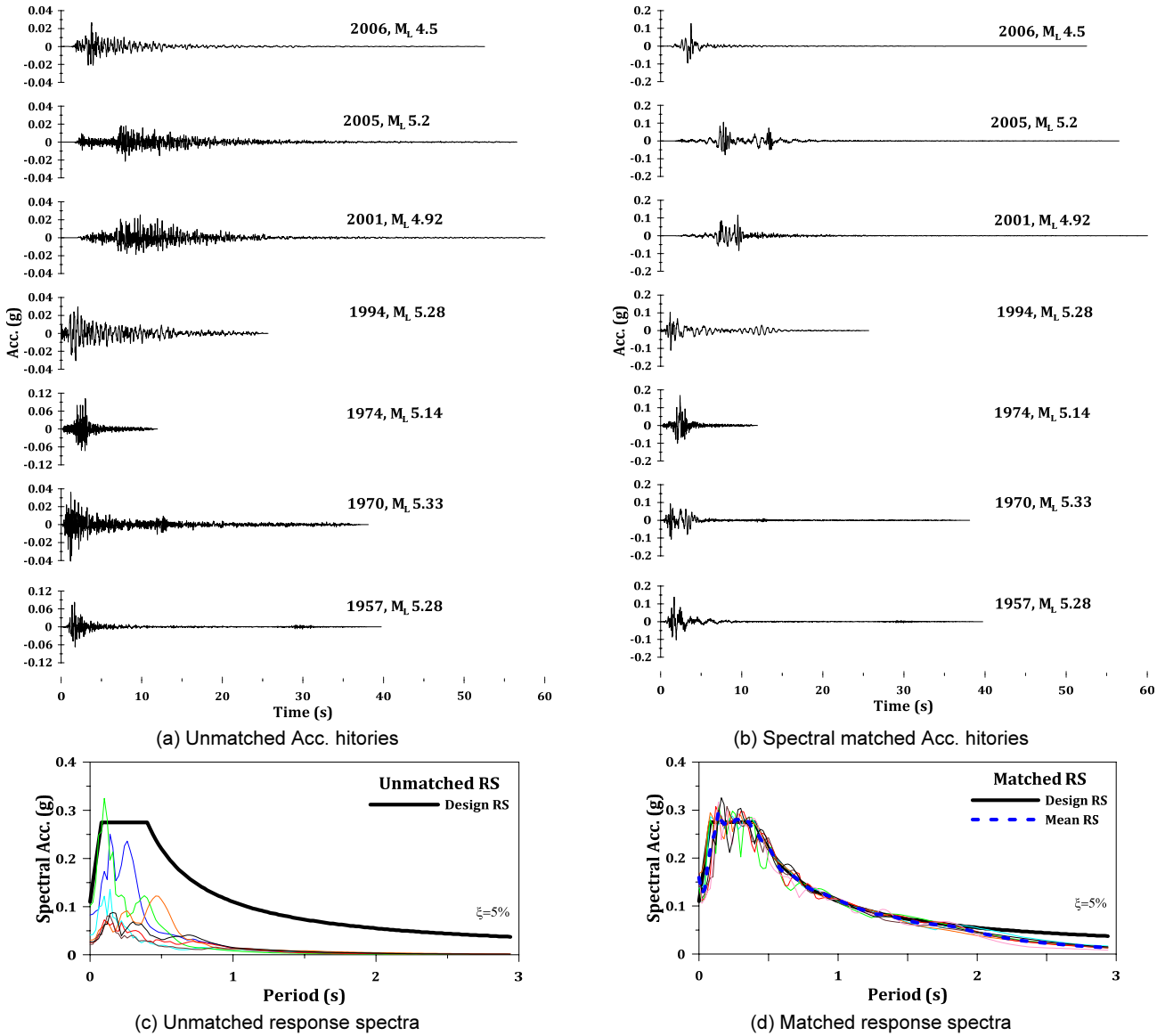


Fig. 3. Unmatched and matched international strong motion records with rock outcrop ( $M_L$  4.5~5.3) from PEER NGA-WEST2 database, Bin #2

## 2.2 외국 계기지진 계측기록의 선정-II : Bin #3

마지막 지진기록군은 우리나라 내진설계기준에서 목표로 하고 있는 규모( $M_L$ ) 5.1 ~ 6.5에 해당하는 외국 계기지진 계측기록군이다. 유사규모의 국내 계기지진계측기록이 존재하지 않으므로 지진기록의 선정은 Bin #2와 동일하게 시행하였다. 미국 캘리포니아 외 대만, 이탈리아에서 계측된 지진 기록을 포함하고 있으며, Bin #1과 비교시 규모차이로 인하여 장주기 에너지 성분을 많이 포함하고 있다. 진앙거리에 제한을 두지 않음에 따라 최대 가속도값은 다양한 분포를 보인다. 선정된 지진기록을 Table 3에 수록하였으며, 선정된 기록으로 스펙트럼 매칭을 실시한 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

## 3. 입력 지진기록에 따른 역 T형 옹벽의 잔류변위 변화

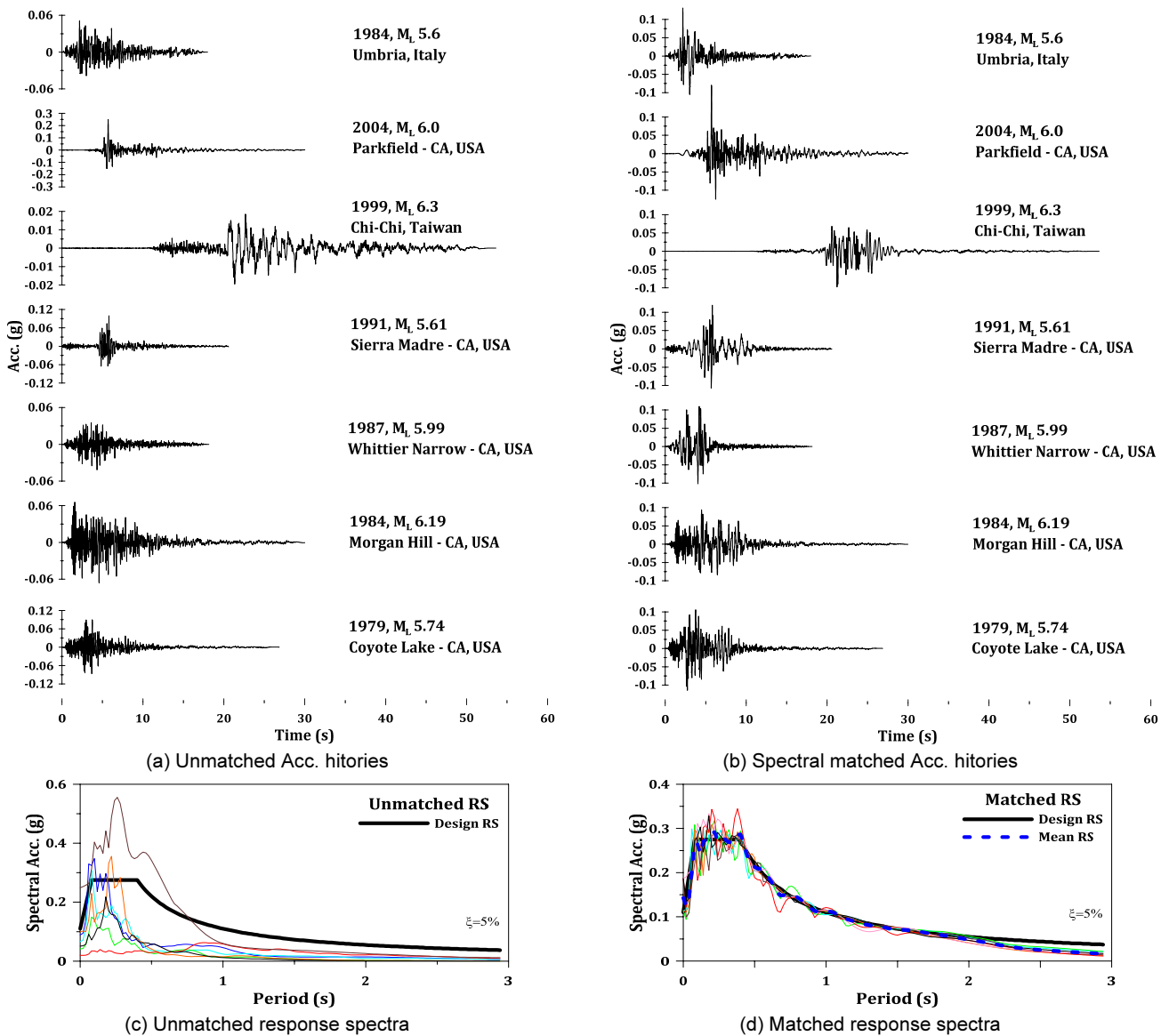
본 논문에서는 입력지진의 선택에 따른 역T형 옹벽의 잔류변위(옹벽 상

단 수평변위 기준) 영향 검토를 위하여 동반논문에서 검증된 수치해석 모델을 사용하였다[2]. 수치해석 모델, 경계조건, 지반물성치 등 모든 계반조건은 동반논문에서 검증시 사용된 조건과 동일하며, Fig. 5와 같다. 2절에서 선정한 지진기록군은 반무한 탄성암반으로 모델링된 최하단부에 응력이력 으로 변환하여 가진되었다[17],[18].

본 논문에서 사용된 높이 5.4 m 역T형 옹벽의 지진시 성능목표는 옹벽 벽체 최상단 수평잔류변위를 대상으로 판단한다. 따라서, 본 절에서는 수치 해석으로 얻어진 입력지진별 수평잔류변위 변화를 분석하였다. 이렇게 얻어진 수평변위 이력 중 Fig. 6은 대표적인 결과를 나타내고 있다. Fig. 6에 수록되지 않은 다른 해석결과 모두 비슷한 잔류변위 발생 양상을 나타낸다. 사용된 모든 입력지진이 목표 UHS를 대상으로 매칭되었음에도 불구하고 수평잔류변위 분포는 약 4 ~ 25cm로 매우 큰 분산을 나타내었다(Table 4). 본 논문에서는 수평잔류변위에 대한 지진파의 영향을 정량적으로 판단하기 위하여 총 22개의 지진운동매개변수(Ground motion parameter)를 선

**Table 3.** Set of international strong motion records with rock outcrop ( $M_L$  5.6~6.3) from PEER NGA WEST-2 database - BIN#3

No.	Event Year	Fault Type	Rock outcrop Station ( $V_{s30}$ , m/s)	$R_{jb}$ (km) $R_{rup}$ (km)	PGA (g)	$M_L$
1	1979	SS	Coyote Lake / Gilroy Array#1 (1428)	10.2 10.7	0.089	5.7
2	1984	SS	Morgan Hill / Gilroy Array#1 (1428)	14.9 14.9	0.066	6.2
3	1987	RO	Whittier Narrows / LA-Wonderland Ave (1222)	23.4 27.6	0.042	6.0
4	1991	R	Sierra Madre / Vasquez rocks park (996)	37.6 39.8	0.249	5.6
5	1999	R	Chi-Chi, Taiwan / CHY102 (845)	62.5 63.3	0.051	6.3
6	2004	SS	Parkfield / Parkfield turkey flat#1 (906)	4.7 5.3	0.100	6.0
7	1984	N	Umbria, Italy / Gubbio (922)	14.7 15.7	0.020	5.6



**Fig. 4.** Unmatched and matched international strong motion records with rock outcrop ( $M_L$  5.6~6.3) from PEER NGA-WEST2 database, Bin #3

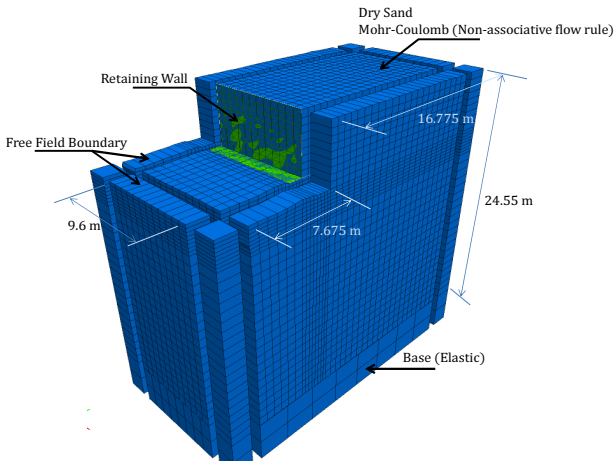


Fig. 5. Numerical model (Finite difference model in FLAC 3D)

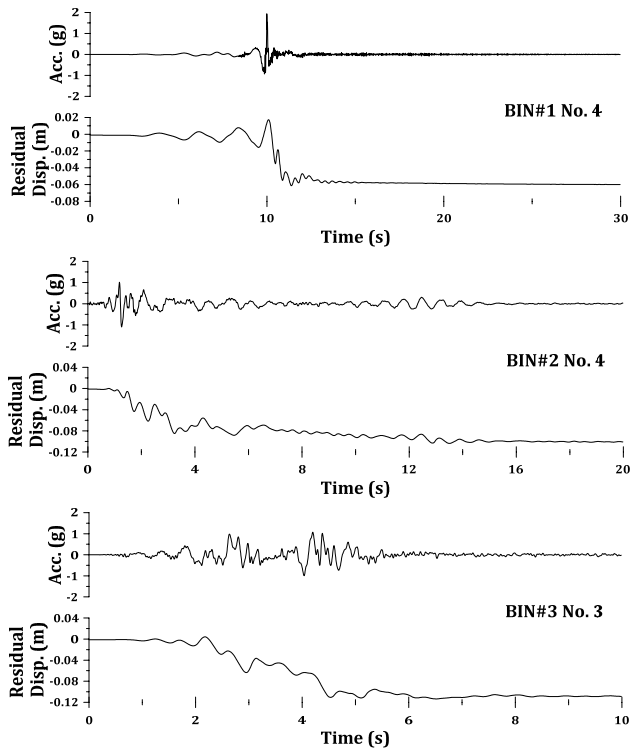


Fig. 6. Command motions and horizontal displacement histories at the top of the wall stem for the representative analysis

택하여 분석을 실시하였다. 다만, 다른 입력지진에 비하여 상대적으로 큰 변위를 나타낸 Bin#3 - No5는 1999년 발생한 대만 Chi-Chi 지진의 여진으로, 다른 지진기록과는 발생이력이 다른 것을 감안하여야 한다. 사용된 매개변수들과 각 매개변수에 대한 설명은 Table 5에 수록하였다.

Fig. 7은 옹벽 최상단 수평잔류 변위와 지진운동매개변수와의 상관관계이다. 총 22개의 매개변수 중 가장 큰 상관관계를 나타내는 매개변수는 지진규모(Magnitude,  $M_L$ )로 지진규모에 비례하여 잔류변위도 증가함을 알 수 있다. 이외에도, 가장 큰 잔류변위가 발생한 특이치(BIN#3, Earthquake No. 5)를 제외할 경우 지진에너지를 나타내는 매개변수들인 CAV와 진도 관련 매개변수인 AI, CI, SEI가 비교적 잔류변위와 상관관계를 나타내는 것으로 나타났다. 상기매개변수들 모두 진동반복회수가 증가함에 따라 크기가 증가하는 지진에너지를 나타내는 매개변수로, 지진시 구조물손상 지표로 활용하기 위하여 제안된 변수들이다. 반면, 댁(콘크리트, 락펠)의 손상지표로 활용을 위하여 제안된 VSI, ASI는 특정주기대역의 에너지를 나타내는 지표이내[26], 본 연구에 적용된 역T형 옹벽의 잔류변위와는 상관관계를 나타내지 않는 것을 알 수 있다. 이는 모델옹벽(0.21s)과 댁(0.6~2.3s)의 공진주기 차이에 기인하는 것으로 추정되나, 추가적인 분석이 필요한 부분이다. 마지막으로 SMA, SMV, A95, EDA, Significant duration 등 지진파의 형상에 관련된 항목 또한 본 논문에서 검토한 역T형 옹벽의 잔류변위와는 뚜렷한 상관관계를 나타내지는 않는다. 지진기록군의 영향을 살펴보면, 유사한 지진규모를 가지는 Bin#1과 Bin#2 중 Bin#1의 잔류변위 분산이 적은 것을 알 수 있으며, 이는 CAV, CI의 분포를 살펴 보았을 때 Bin#2에 비하여 상대적으로 지진기록별 지진파의 총 에너지에 큰 차이가 없는 이유로 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 시간영역 비선형 수치해석을 이용한 성능기반내진설계 시 입력지진파의 선택에 따른 역T형 옹벽의 잔류변위변화를 살펴보았다. 이로부터 동일한 목표스펙트럼으로 매칭된 입력지진이라든 최대 5배의 잔류변위 차이가 발생함을 알 수 있었다. 이는 매우 큰 해석결과와 분산으로, 해석기법과 입력물성치의 영향을 무시할 수 있는 수준으로 향후 심도 깊은 연구가 시행되어야 할 것으로 판단된다.

입력지진으로 사용된 지진기록군에 대해서 총 22개의 지진운동매개변수 분석결과, 역T형 옹벽의 지진 후 잔류변위와 가장 명확한 상관관계를 나

Table 4. Summary of residual horizontal displacement at the top of the wall stem

Bin #1		Bin #2		Bin #3	
EQ. No	Residual disp. (cm)	EQ. No	Residual disp. (cm)	EQ. No	Residual disp. (cm)
1	6.5	1	6.6	1	15.9
2	8.5	2	8.2	2	17.8
3	6.6	3	4.0	3	11.1
4	6.2	4	10.1	4	8.1
5	6.8	5	12.9	5	25.8
6	9.6	6	8.1	6	11.8
7	6.2	7	7.6	7	8.9

**Table 5.** List of ground motion parameters used in this study

Ground motion parameter	Unit	Formular / Description	Ref.
Magnitude	M <sub>L</sub>		
Peak acceleration	g	$\max  a(t) $	
Peak velocity	cm/s	$\max  v(t) $	
Peak displacement	cm	$\max  u(t) $	
V <sub>max</sub> /A <sub>max</sub>	s	$\frac{\max  v(t) }{\max  a(t) }$	
RMS acceleration	g	$\sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)]^2 dt}$	
RMS velocity	cm/s	$\sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [v(t)]^2 dt}$	
RMS displcement	cm	$\sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [u(t)]^2 dt}$	
Arias intensity(AI)	cm/s	$\frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt$	[19]
Characteristic intensity(CI)		$a_s^{1.5} T_d^{0.5}$	[20]
Specific energy intensity(SEI)		$\int_0^{T_d} [v(t)]^2 dt$	
Cumulative absolute velocity (CAV)	cm/s	$\int_0^{T_d}  a(t)  dt$	[21]
Acceleration spectrum intensity (ASI)	g-s	$\int_{0.1}^{0.5} S_a(\xi = 0.05, T) dT$	[22]
Velocity spectrum intensity (VSI)	cm	$\int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi = 0.05, T) dT$	[22]
Housner intensity(HI)	cm	$\int_{0.1}^{2.5} PSV(\xi = 0.05, T) dT$	[23]
Sustained Max. acceleration* (SMA)	g	The sustained max. acceleration or velocity during 3 cycles Defined as the third highest absolute value of acceleration or velocity in the time-history	[24]
Sustained Max. velocity(SMV)	cm/s	same above	[24]
Effective design acceleration (EDA)	g	Peak acceleration value after lowpass filtering with a cut-off frequency of 9Hz	[21]
A95 parameters**	g	The acceleration level below which 95% of the total Arias intensity is contained	[25]
Predominant periods	s		
Significant duration***	s	The interval of time over which a proportion(percentage) of the total Arias Intensity is accumulated	
Epicentral distance	km		

where,  $a(t)$  acceleration;  $v(t)$  velocity;  $u(t)$  displacement;  $T_d$  period;  $S_a$ ,  $S_v$  spectral acc. and velocity, respectively;  $PSV$  pseudo spectral velocity;  $\xi$  damping ratio

\*In order for an absolute value to be considered as a "maximum", it must be larger than values 20 steps before and 20 steps after

\*\*If the entire accelerogram yields a value of AI equal to 100, the A95 parameter is the threshold of acceleration such that integrating all the values of the accelerogram below it, one gets an AI=95.

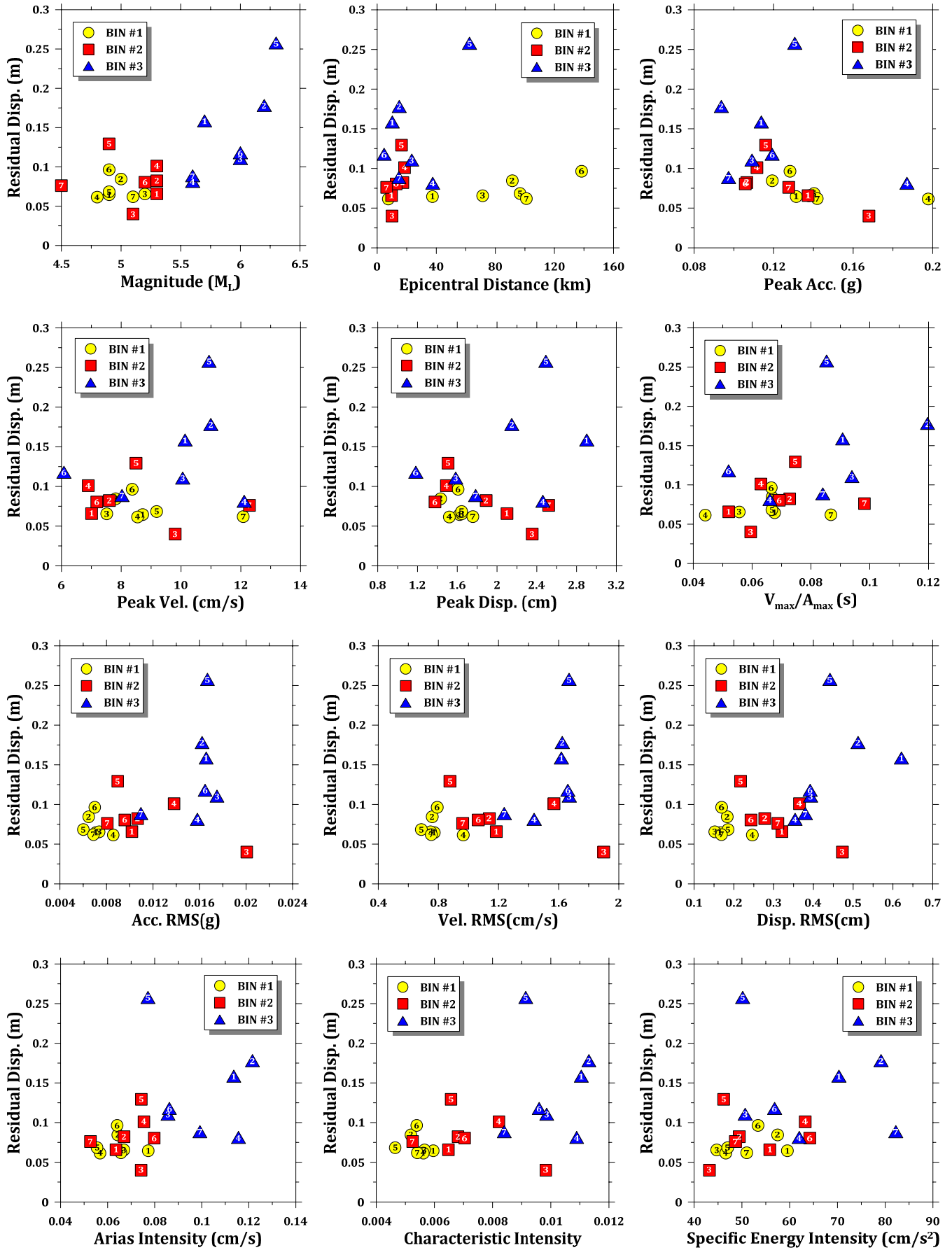
\*\*\*Default is the interval between the 5% and 95% thresholds

타내는 영향인자는 지진규모(M<sub>L</sub>)로, 지진규모에 비례하여 잔류변위가 확연히 증가하는 양상을 알 수 있었다. 국내 계기지진계측기록군은 동일 규모의 국외기록군 대비 적은 에너지를 보유하고 전체적으로 잔류변위가 적게 나타나는 양상을 보였다. 또한, 잔류변위 분산에 있어서 국내 계기지진계측기록군(Bin#1)이 다른 기록군(Bin#2)에 비하여 상대적으로 적게 나타내는 것은 계측범위가 비교적 협소한 면적(한반도)에 국한된 특성에 기

인한 것으로 판단된다. 다만, 상기 결론은 특정 조건의 역T형 옹벽의 거동에 대한 결론으로 향후 다른 형태의 구조물에 대해서는 본 연구 결과를 확장할 필요가 있다.

마지막으로, 신뢰성있는 성능기반내진설계를 위해서는 우리나라 내진설계기준에서 목표로 하는 지진규모와 국내계기지진기록 특성을 동시에 만족할 수 있는 지진기록을 선정하는 것이 필요하다고 판단된다. 이를 위한





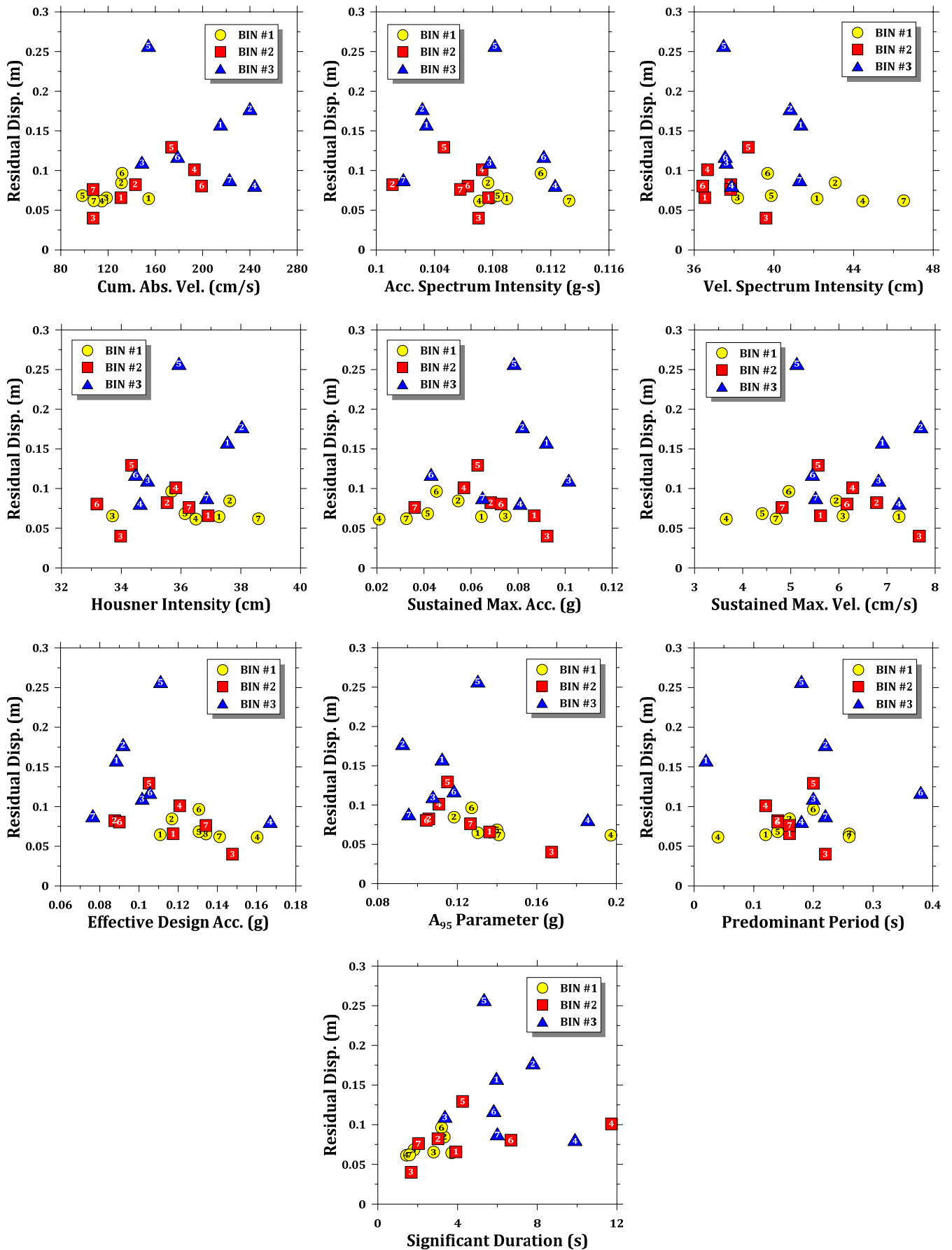


Fig. 7. Correlation between residual horizontal displacement and ground motion parameters

선결과제로 내진설계기준에서 목표로 하는 지진규모와 설계지진가속도를 동시에 만족시킬 수 있는 진앙거리와 활성단층간의 상관관계 규명이 빠른 시일 내에 이루어져야 할 것이다.

**/ 감사의 글 /**

이 논문은 2014년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행됨

**/ REFERENCES /**

1. Nozu A, Ichii K, Sugano T, Seismic design of port structures, J. of Japan Association for Earthquake Engineering, 2004;4(3):195-208.
2. Lee JS, Seismic behavior of inverted T-type wall under earthquake Part I : Verification of the numerical modeling techniques, EESK J Earthquake Eng. in print.
3. Bommer JJ, Acevedo AB, The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis, J. of Earthquake Engineering, 2004; 8(S1):43-91.
4. Katsanos EI, Sextos AG, Manolis GD, Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective, Soil dynamics and earthquake engineering, 2010;30:157-169.
5. Kalkan E, Luco N, Special issue on earthquake ground-motion selection and modification for nonlinear dynamic analysis of structures, J. of structural engineering ASCE, 2011;137:277.
6. Baker JW, Conditional mean spectrum: Tool for ground-motion selection, J. of structural engineering ASCE, 2011;137:322-331.
7. Lin T, Baker J, Probabilistic seismic hazard deaggregation of ground motion prediction models, Proceedings of 5th international conference on earthquake geotechnical engineering, 2011;10-13.
8. CEN, Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance, Part I: general rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization; c2003.
9. CEN, Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance, Part II: bridges, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization; c2003.
10. Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE, c2006.
11. Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary, ASCE, c2000.
12. NEHRP Part1 : recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, 2000 edition, FEMA; c2000.
13. Structural design actions Part 5: earthquake actions-New Zealand, Standards New Zealand; c2004.
14. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) n. 3274, Norme tecniche per il progetto, c2003.
15. EPPO Hellenic Antiseismic Code : Ministry of Public Works; c2000.
16. 박광순, 시설물 내진설계기준 현황 및 개선방안, 시설물저널 기획특집, 2013;18-31.
16. Atik LA, Abrahamson N, An improved method for nonstationary spectral matching, Earthquake spectra, 2010;26(3):601-617.
17. Lee JS, Appropriate input earthquake motion for the verification of seismic response analysis by geotechnical dynamic centrifuge test, EESK J. Earthquake Eng. 2013;17(5):209-217.
18. Mejia LH, Dawson EM, Earthquake deconvolution for FLAC, In: Proceedings of 4th international FLAC symposium on numerical modeling in geomechanics; 2006 Madrid, Spain, c2006.
19. Arias A, A measure of earthquake intensity, in R,J.Hansen, ed, Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1970;438-483.
20. Ang AHS, Reliability bases for seismic safety assessment and design, Proceedings, Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI Palm Springs, 1990;1:29-45.
21. Benjamin JR, A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake, EPRI Report NP-5930, Electric Power Research Institute, Palo Alto, c1988.
22. Von Thun JL, Rochim LH, Scott GA, Wilson JA, Earthquake ground motions for design and analysis of dams, Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-Motion Evaluation, Geotechnical Special Publication, 1988;20:463-481.
23. Housner GW, Behavior of structures during earthquakes, J. of the engineering mechanics division ASCE, 1959;85(EMI4):109-129.
24. Nuttli OW, The relation of sustained maximum ground acceleration and velocity to earthquake intensity and magnitude, Miscellaneous Paper S-71-1, Report 16, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, c1979.
25. Sarma SK, Yang KS, An evaluation of strong motion records and a new parameter A95, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1987;15:119-132.
26. Makdisi FI, Seed HB, Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations, J of the geotechnical engineering division ASCE, 1978;104(GT7):849-867.