



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士學位論文

지진보호장치 교량의 지진 해석기법에  
따른 지진거동 특성

Seismic behavior characteristics of  
seismic-protective bridges  
according to seismic analysis methodologies

蔚山大學校 大學院  
建設環境工學科  
姜兌勳

지진보호장치 교량의 지진 해석기법에  
따른 지진거동 특성

Seismic behavior characteristics of  
seismic-protective bridges  
according to seismic analysis methodologies

指導教授 金益賢

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2023年 12月

蔚山大學校 大學院  
建設環境工學科  
姜兌勳

姜兌勳의 工學碩士 學位論文을 認准함

審査委員 김익현 

審査委員 차수원 

審査委員 신호성 

蔚山대학교 大學院

2023年 12月

# 감사의 글

2021년 3월부터 시작하여 2024년 01월까지 약 3년간의 대학원 생활을 마치게 되었습니다. 대학원 생활을 통해 구조적 다양한 시각과 관점을 갖게 되었고 학부생때는 접할 수 없었던 특별한 경험들을 하며 엔지니어로서 한걸음 더 다가서게 되었습니다.

저에게 대학원 시절은 학문의 즐거움과 배우고 성장하는 기쁨으로 더없이 소중한 시간이었습니다. 이에 감사한 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저, 저를 제자로 거뒀주시고 깊은 가르침을 전해주시신 김익현 교수님, 바쁘신 중에도 꾸준한 관심을 보여주시신 차수원 교수님, 3년동안 함께하며 아낌없는 조언과 구조 엔지니어로서 역량을 갖추게 해주신 선창호 교수님, 교수님 모두에게 깊은 존경과 감사의 말씀을 드립니다. 그리고, 모르는 것을 물어볼 때마다 항상 자세히 알려주시신 10학번 안성민 형님께도 감사의 말씀을 드립니다.

15학번 동기들에게도 고마움을 전하고자 합니다. 먼저, 대학생활 가장 오랜 친구 민재와 영후, 그리고 많은 추억을 함께한 재성, 대원, 지환, 도진, 선용이에게 감사의 말을 전합니다. 그리고, 연구실 후배인 고마운 동윤이와 정민이, 막내이지만 든직한 준영이와 귀재에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 10년 넘게 함께해온 줄리에타 친구들과 건설환경공학부 48대 학생회에게도 감사의 말을 전합니다.

마지막으로 늘 부족한 저를 진심으로 아껴주고 사랑해주는 유정이와 변함없이 믿어주시고 아낌없이 지원해주신 부모님과 누나에게 감사보다도 사랑한다는 말을 전하며, 배움의 길을 함께했던 선후배들, 힘들 때마다 응원해주었던 친구들 모두에게 감사의 마음을 전합니다.

지면 위에 적어내린 몇 줄의 글자로는 저의 감사함을 다 표현할 수는 없겠지만 많은 분들이 도와주셨기에 지금의 제가 있을 수 있었습니다. 제게 주셨던 도움을 밑바탕으로 앞으로 사회적 가치를 창출하는 멋진 엔지니어가 되겠습니다. 감사합니다.

2023년 12월  
강 태 훈 드림

# 국 문 요 약

## 지진보호장치 교량의 지진 해석기법에 따른 지진 거동 특성

울산대학교 대학원  
건설환경공학과  
강 태 훈

최근 전 세계적으로 대규모 지진이 발생하여 인적, 물적인 피해가 심각해지고 있다. 또한, 국내에서는 2016년부터 규모 3.0 이상의 지진 횟수가 급격히 증가하고 있다. 이러한 상황에서 재해 시 인적, 물적 자원을 수송하는 교량과 같은 국가적 주요 구조물의 내진성능 확보가 필요하다. 신설 교량 경우 지진·화산재해대책법에 의거하여 1992년부터 내진설계를 실시하고 있지만 내진설계가 되어있지 않은 기존 교량은 내진성능평가를 수행하여 내진성능을 확인한 후 필요 시 내진보강설계와 내진보강공사를 하여 내진성능을 확보해야 한다. 기존 구조물(교량)에 대한 내진성능평가를 할 때에는 가장 보수적인 해석방법이라고 평가받는 일반적인 응답이력해석을 사용하지만 신설 구조물(교량)을 내진 설계할 때에는 지반과 구조물의 상호작용을 고려한 부지특성 응답이력해석을 사용하기도 한다.

본 연구에서는 많은 내진보강 방안 중 지진보호장치를 설치한 보강방안으로 전단키 및 댐퍼를 설치한 교량에 대해 각각 일반 응답이력해석, 부지특성 응답이력해석, 부지특성 다지점가진해석 3가지 기법에 따른 지진거동특성을 분석한다. 전단키는 상부구조의 온도변화에 따른 변위를 수용하기 위하여 적정한 갭(gap)을 두고 가동단 교각에 설치하여 고정단 교각에 집중되는 지진력을 가동단 교각으로 분산하는 장치이며 지진해석 시에는 갭에 따른 비선형 지진해석이 필요하다. 댐퍼도 마찬가지로 가동단 교각에 설치하여 고정단 교각에 집중되는 가동단 교각으로 지진력을 분산하고, 또한 댐퍼의 감쇠에 의한 지진력 감소도 함께 도모하는 장치이다. 댐퍼의 감쇠효과는 상부구조의 응답속도에 의존하므로 전단키와 마찬가지로 비선형 이력해석이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 지진보호장치(전단키, 댐퍼)가 설치된 교량을 현재 내진성능평가 시 사용하는 일반적인 응답이력해석을 포함하여, 부지특성 응답이력해석, 부지특성 다지점가진 응답이력해석까지 총 3가지 지진해석기법으로 해석 후 교량의 지진거동특성을 분석하였다.

## 목 차

감사의 글 .....	i
국문 요약 .....	ii
목 차 .....	iii
표 목 차 .....	iv
그림 목차 .....	v

## 지진보호장치 교량의 지진 해석기법에 따른 지진거동 특성

제 1장 서론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 국내 교량의 내진성능 기준(criteria) .....	2
1.2.1 내진등급 .....	2
1.2.2 내진성능목표 .....	2
1.2.3 지진구역계수(Z) .....	3
1.2.4 위험도계수(I) .....	3
1.2.5 유효수평지반가속도(S) .....	4
1.2.6 지반분류 .....	4
1.2.7 설계응답스펙트럼 .....	5
1.3 내진성능 평가절차 .....	6
1.3.1 일반사항 .....	6
1.3.2 응답이력해석에 의한 내진성능평가 .....	6
제 2장 비선형 지진 해석기법(비선형 동적해석) .....	8
2.1 일반 응답이력해석 .....	8
2.2 부지특성 응답이력해석 .....	9
2.3 부지특성 다지점가진 응답이력해석 .....	10
제 3장 대상 교량의 제원 및 해석모델 .....	11
3.1 교량의 제원 및 지반특성 .....	11
3.1.1 교량의 제원 .....	11
3.1.2 지반분류 .....	13
3.2 교량시스템의 지진해석 모델 .....	17
3.2.1 교량 모델링 .....	17
3.2.2 지진보호장치 모델링 .....	19

3.3 입력지반운동의 시간이력 .....	24
3.3.1 스펙트럼 부합 시간이력 .....	24
3.3.2 부지특성 시간이력 .....	28
3.3.3 부지특성 다지점가진 시간이력 .....	31
3.3.4 입력지반운동의 스펙트럼 특성 비교, 분석 .....	40
<b>제 4장 해석기법에 따른 교량의 지진거동특성 .....</b>	<b>42</b>
4.1 보강전 교량 .....	42
4.1.1 보강전 교량의 고정단 교각 지진거동특성 .....	42
4.1.2 보강전 교량의 가동단 교각 지진거동특성 .....	46
4.1.3 보강전 교량의 상부구조 응답변위 .....	50
4.2 전단키 설치 교량(W25 전단키 부착) .....	51
4.2.1 전단키 설치 교량의 고정단 교각 지진거동특성 .....	51
4.2.2 전단키 설치 교량의 가동단 교각(W25, 전단키 부착 구간) 지진거동특성 ..	56
4.2.3 전단키 설치 교량의 상부구조 응답변위 .....	61
4.3 댐퍼 설치 교량(W25 댐퍼 부착) .....	63
4.3.1 댐퍼 설치 교량의 고정단 교각 지진거동특성 .....	63
4.3.2 댐퍼 설치 교량의 가동단 교각(W25, 댐퍼 부착 구간)의 지진거동특성 .....	68
4.3.3 댐퍼 설치 교량의 상부구조 응답변위 .....	73
4.4 결과 및 분석	
4.4.1 보강전 교량, 전단키 설치 교량, 댐퍼 설치 교량의 응답이력해석 결과 비교 .....	75
4.4.2 전단키 설치 교량의 고정단 교각 결과 및 분석 .....	76
4.4.3 전단키 설치 교량의 가동단 교각(전단키 부착 구간) 결과 및 분석 .....	77
4.4.4 전단키 설치 교량의 상부구조 응답변위 결과 및 분석 .....	78
4.4.5 댐퍼 설치 교량의 고정단 교각 결과 및 분석 .....	79
4.4.6 댐퍼 설치 교량의 가동단 교각(댐퍼 부착 구간) 결과 및 분석 .....	80
4.4.7 댐퍼 설치 교량의 상부구조 응답변위 결과 및 분석 .....	81
<b>제 5장 결론 .....</b>	<b>82</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>83</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>84</b>

## 표 목 차

표 1.2-1 교량의 내진등급 .....	2
표 1.2-2 교량의 내진성능목표 .....	3
표 1.2-3 지진구역의 구분 .....	3
표 1.2-4 위험도계수(I) .....	3
표 1.2-5 내진등급별 유효수평지반가속도(S) .....	4
표 1.2-6 지반의 분류 .....	4
표 1.2-7 지반증폭계수( $F_a$ 및 $F_v$ ) .....	5
표 3.1-1 교량의 제원 .....	11
표 3.1-2 교량 사용재료의 특성 .....	11
표 3.1-3 위치별 지반분류 .....	13
표 3.1-4 A지반 전단파속도 및 지반분류 .....	13
표 3.1-5 W26지반 전단파속도 및 지반분류 .....	14
표 3.1-6 W25지반 전단파속도 및 지반분류 .....	15
표 3.1-7 W24지반 전단파속도 및 지반분류 .....	16
표 3.2-1 교량의 모델링 요소 .....	17
표 3.2-2 전단키 모델링 제원 .....	20
표 3.2-3 댐퍼 모델링 제원 .....	23
표 3.3-1 가속도시간이력 구간선형 포락함수에 대한 지진규모별 지속시간(단위 : sec) .....	24
표 3.3-2 일반이력해석과 부지특성 다지점가진 시간이력 스펙트럼의 최대 응답가속도 및 비 .....	41
표 4.1-1 보강전 교량의 일반 응답이력해석 고정단 교각 응답 .....	45
표 4.1-2 보강전 교량의 일반 응답이력해석 가동단 교각 응답 .....	49
표 4.1-3 보강전 교량의 일반 응답이력해석 상부구조 응답변위 .....	50
표 4.2-1 전단키 설치 교량의 일반 응답이력해석 고정단 교각 응답 .....	55
표 4.2-2 전단키 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 고정단 교각 응답 .....	55
표 4.2-3 전단키 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 고정단 교각 응답 .....	55
표 4.2-4 전단키 설치 교량의 일반 응답이력해석 가동단 교각 응답 .....	60
표 4.2-5 전단키 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 가동단 교각 응답 .....	60
표 4.2-6 전단키 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 가동단 교각 응답 .....	60
표 4.2-7 전단키 설치 교량의 일반 응답이력해석 상부구조 응답변위 .....	61
표 4.2-8 전단키 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 상부구조 응답변위 .....	62
표 4.2-9 전단키 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 상부구조 응답변위 .....	62
표 4.3-1 댐퍼 설치 교량의 일반 응답이력해석 고정단 교각 응답 .....	67
표 4.3-2 댐퍼 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 고정단 교각 응답 .....	67

표 4.3-3 댐퍼 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 고정단 교각 응답 .....	67
표 4.3-4 댐퍼 설치 교량의 일반 응답이력해석 가동단 교각 응답 .....	72
표 4.3-5 댐퍼 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 가동단 교각 응답 .....	72
표 4.3-6 댐퍼 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 가동단 교각 응답 .....	72
표 4.3-7 댐퍼 설치 교량의 일반 응답이력해석 상부구조 응답변위 .....	73
표 4.3-8 댐퍼 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 상부구조 응답변위 .....	74
표 4.3-9 댐퍼 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 상부구조 응답변위 .....	74

## 그림목차

그림 1.1-1 연도별 국내지진 발생추이 그래프 .....	2
그림 1.2-1 수평 방향 가속도 응답스펙트럼(토사지반) .....	5
그림 1.3-1 내진성능 평가절차 .....	6
그림 3.1-1 교량 종·평면도 .....	12
그림 3.1-2 교각 일반도(단위:mm) .....	12
그림 3.1-3 교대 일반도(단위:mm) .....	12
그림 3.1-4 A지반 지질주상도 .....	13
그림 3.1-5 W26지반 지질주상도 .....	14
그림 3.1-6 W25지반 지질주상도 .....	15
그림 3.1-7 W24지반 지질주상도 .....	16
그림 3.2-1 대상 교량 구조해석 모델링 .....	17
그림 3.2-2 대상 교량 비선형 구조해석 모델링 .....	18
그림 3.2-3 Park Steel Model 응력-변형률 곡선 .....	18
그림 3.2-4 Mander Model 응력-변형률 곡선 .....	18
그림 3.2-5 전단키 .....	19
그림 3.2-6 2선형 슬립(slip bilinear) .....	19
그림 3.2-7 대상 교량 구조해석 전단키 모델링 .....	20
그림 3.2-8 댐퍼 .....	21
그림 3.2-9 탄성 2선형(Elastic Bilinear Type) .....	22
그림 3.2-10 대상 교량 구조해석 댐퍼 모델링 .....	23
그림 3.3-1 가속도시간이력의 구간선형 포락함수 .....	24
그림 3.3-2 $S_4$ 지반 지진재현주기 1000년 응답스펙트럼(80%) .....	25
그림 3.3-3 $S_4$ 지반 1000년 (80%) 인공합성지진과 세트1 .....	26
그림 3.3-4 $S_4$ 지반 1000년 (80%) 인공합성지진과 세트2 .....	26
그림 3.3-5 $S_4$ 지반 1000년 (80%) 인공합성지진과 세트3 .....	27
그림 3.3-6 $S_4$ 지반 1000년 (80%) 인공합성지진과 세트4 .....	27
그림 3.3-7 $S_1$ 지반 지진재현주기 1000년 응답스펙트럼(80%) .....	28
그림 3.3-8 지반 부지응답 인공합성지진과 세트1 .....	29
그림 3.3-9 지반 부지응답 인공합성지진과 세트2 .....	29
그림 3.3-10 지반 부지응답 인공합성지진과 세트3 .....	30
그림 3.3-11 지반 부지응답 인공합성지진과 세트4 .....	30
그림 3.3-12 W26(EQ1) 가속도, 속도, 변위 변환 그래프 (예시) .....	31
그림 3.3-13 지반 부지응답(다지점) 교대(A) 인공합성지진과 세트1-1 .....	31
그림 3.3-14 지반 부지응답(다지점) 교대(A) 인공합성지진과 세트1-2 .....	32
그림 3.3-15 지반 부지응답(다지점) 교대(A) 인공합성지진과 세트1-3 .....	32

그림 3.3-16	지반 부지응답(다지점) 교대(A) 인공합성지진파 세트1-4	33
그림 3.3-17	지반 부지응답(다지점) 교각(W26) 인공합성지진파 세트2-1	34
그림 3.3-18	지반 부지응답(다지점) 교각(W26) 인공합성지진파 세트2-2	34
그림 3.3-19	지반 부지응답(다지점) 교각(W26) 인공합성지진파 세트2-3	35
그림 3.3-20	지반 부지응답(다지점) 교각(W26) 인공합성지진파 세트2-4	35
그림 3.3-21	지반 부지응답(다지점) 교각(W25) 인공합성지진파 세트3-1	36
그림 3.3-22	지반 부지응답(다지점) 교각(W25) 인공합성지진파 세트3-2	36
그림 3.3-23	지반 부지응답(다지점) 교각(W25) 인공합성지진파 세트3-3	37
그림 3.3-24	지반 부지응답(다지점) 교각(W25) 인공합성지진파 세트3-4	37
그림 3.3-25	지반 부지응답(다지점) 교각(W24) 인공합성지진파 세트4-1	38
그림 3.3-26	지반 부지응답(다지점) 교각(W24) 인공합성지진파 세트4-2	38
그림 3.3-27	지반 부지응답(다지점) 교각(W24) 인공합성지진파 세트4-3	39
그림 3.3-28	지반 부지응답(다지점) 교각(W24) 인공합성지진파 세트4-4	39
그림 3.3-29	일반이력해석 설계스펙트럼과 부지특성 시간이력의 스펙트럼	40
그림 3.3-30	일반이력해석 설계스펙트럼과 부지특성 다지점가진 시간이력의 스펙트럼	41
그림 4.1-1	보강전 교량의 세트1 고정단 교각 응답 그래프	42
그림 4.1-2	보강전 교량의 세트2 고정단 교각 응답 그래프	43
그림 4.1-3	보강전 교량의 세트3 고정단 교각 응답 그래프	44
그림 4.1-4	보강전 교량의 세트4 고정단 교각 응답 그래프	45
그림 4.1-5	보강전 교량의 세트1 가동단 교각 응답 그래프	46
그림 4.1-6	보강전 교량의 세트2 가동단 교각 응답 그래프	47
그림 4.1-7	보강전 교량의 세트3 가동단 교각 응답 그래프	48
그림 4.1-8	보강전 교량의 세트4 가동단 교각 응답 그래프	49
그림 4.1-9	상부구조 응답변위 측정 위치	50
그림 4.2-1	전단키 설치 교량의 세트1 고정단 교각 응답 그래프	51
그림 4.2-2	전단키 설치 교량의 세트2 고정단 교각 응답 그래프	52
그림 4.2-3	전단키 설치 교량의 세트3 고정단 교각 응답 그래프	53
그림 4.2-4	전단키 설치 교량의 세트4 고정단 교각 응답 그래프	54
그림 4.2-5	전단키 설치 교량의 세트1 가동단 교각 응답 그래프	56
그림 4.2-6	전단키 설치 교량의 세트2 가동단 교각 응답 그래프	57
그림 4.2-7	전단키 설치 교량의 세트3 가동단 교각 응답 그래프	58
그림 4.2-8	전단키 설치 교량의 세트4 가동단 교각 응답 그래프	59
그림 4.2-9	상부구조 응답변위 측정 위치	61
그림 4.3-1	댐퍼 설치 교량의 세트1 고정단 교각 응답 그래프	63
그림 4.3-2	댐퍼 설치 교량의 세트2 고정단 교각 응답 그래프	64
그림 4.3-3	댐퍼 설치 교량의 세트3 고정단 교각 응답 그래프	65

그림 4.3-4 댐퍼 설치 교량의 세트4 고정단 교각 응답 그래프 .....	66
그림 4.3-5 댐퍼 설치 교량의 세트1 가동단 교각 응답 그래프 .....	68
그림 4.3-6 댐퍼 설치 교량의 세트2 가동단 교각 응답 그래프 .....	69
그림 4.3-7 댐퍼 설치 교량의 세트3 가동단 교각 응답 그래프 .....	70
그림 4.3-8 댐퍼 설치 교량의 세트4 가동단 교각 응답 그래프 .....	71
그림 4.3-9 상부구조 응답변위 측정 위치 .....	73
그림 4.4-1 3가지 교량의 응답이력해석을 통한 고정단 교각 응답 비 그래프 .....	75
그림 4.4-2 해석기법에 따른 고정단 교각 응답 비 그래프 .....	76
그림 4.4-3 해석기법에 따른 가동단 교각 응답 비 그래프 .....	77
그림 4.4-4 해석기법에 따른 상부구조 변위 비 그래프 .....	78
그림 4.4-5 해석기법에 따른 고정단 교각 응답 비 그래프 .....	79
그림 4.4-6 해석기법에 따른 가동단 교각 응답 비 그래프 .....	80
그림 4.4-7 해석기법에 따른 상부구조 변위 비 그래프 .....	81

# 제 1장 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

최근 전 세계적으로 대규모 지진이 발생하여 인적, 물적인 피해가 심각해지고 있다. 또한, 국내에서는 2016년부터 규모 3.0 이상의 지진 횟수가 급격히 증가하고 있다(그림 1.1-1). 이러한 상황에서 재해 시 인적, 물적 자원을 수송하는 교량과 같은 국가적 주요 구조물의 내진성능 확보가 필요하다. 신설 교량 경우 지진·화산재해대책법에 의거하여 1992년부터 내진설계를 실시하고 있지만 내진설계가 되어있지 않은 기존 교량은 내진성능평가를 수행하여 내진성능을 확인한 후 필요 시 내진보강설계와 내진보강공사를 하여 내진성능을 확보해야 한다.

교량의 구성요소 중 교각은 상부구조물을 지지하고, 지진력을 다른 구성요소로 전달하는 매우 중요한 구성요소로 반드시 내진성능을 확보하여야 한다. 그러나 내진설계가 되지 않은 기존 교량의 경우 교량받침과 더불어 가장 취약한 요소이다. 내진보강은 일반적으로 내진성능이 부족한 구성요소를 직접 보강하는 것이 일반적이므로 교각의 경우 내진성능이 부족하다면 파괴모드(휨 파괴, 전단파괴 등)에 따라 적절한 내진보강 방법을 채택하고 있다. 그러나 교각이 아니라 기초와 같이 내진보강이 어려운 구성요소, 또는 교각과 함께 교량받침 등 복수의 구성요소에 대해 내진보강이 필요한 경우, 또는 일반 내진공법으로 교량의 소요 내진성능을 확보하기 어려운 경우에는 지진보호장치를 적용한다. 지진보호장치의 내진 기능은 교량의 장주기화(지진격리받침 등), 고감쇠화(지진격리장치, 댐퍼 등)에 의한 지진력 저감, 또는 지진력 분산 장치(전단키, 댐퍼, Lock-up device 등)에 의한 지진력 분산 등이다.

본 연구에서는 많은 내진보강 방안 중 지진보호장치로 전단키 및 댐퍼를 설치한 교량의 지진해석기법에 따른 지진거동특성을 다룬다. 전단키는 상부구조의 온도변화에 따른 변위를 수용하기 위하여 적절한 갭(gap)을 두고 가동단 교각에 설치하여 고정단 교각에 집중되는 지진력을 가동단 교각으로 분산하는 장치이며 지진해석 시에는 갭에 따른 비선형 지진해석이 필요하다. 댐퍼는 가동단 교각에 설치하여 고정단 교각에 집중되는 가동단 교각으로 지진력을 분산하고, 또한 댐퍼의 감쇠에 의한 지진력 감소도 함께 도모하는 장치이다. 댐퍼의 감쇠효과는 상부구조의 응답속도에 의존하므로 전단키와 마찬가지로 비선형 이력해석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 지진보호장치(전단키, 댐퍼)가 설치된 교량을 현재 내진성능평가 시 사용하는 일반적인 응답이력해석을 포함하여, 부지특성 응답이력해석, 부지특성 다지점가진 해석까지 총 3가지 지진해석기법으로 해석 후 교량의 지진거동특성을 분석하였다.

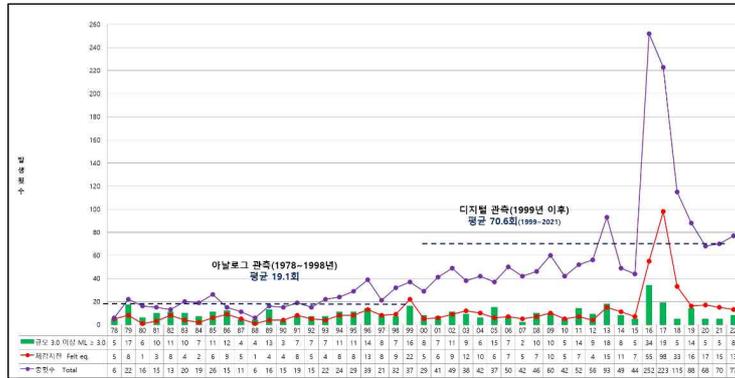


그림 1.1-1 연도별 국내지진 발생추이 그래프

## 1.2 국내 교량의 내진성능기준(criteria)

### 1.2.1 내진등급

교량의 내진등급은 교량의 중요도에 따라 표 1.2-1과 같이 내진특등급, 내진등급, 내진II등급으로 분류한다(“KDS 24 17 11 교량내진설계기준(한계상태설계법)”).

표 1.2-1 교량의 내진등급

내진등급	교량
내진특등급	- 내진등급 중에서, 국방, 방재상 매우 중요한 교량 또는 지진 피해 시 사회경제적으로 영향이 매우 큰 교량
내진등급	- 고속도로, 자동차전용도로, 특별시도, 광역시도 또는 일반국도상의 교량 및 이들 도로 위를 횡단하는 교량 - 지방도, 시도 및 군도 중 지역의 방재계획상 필요한 도로에 건설된 교량 및 이들 도로 위를 횡단하는 교량 - 해당도로의 일일계획교통량을 기준으로 판단했을 때 중요한 교량 - 설계지진 발생 후에도 기능을 유지해야 할 철도교
내진II등급	- 내진특등급 및 내진등급에 속하지 않는 교량

### 1.2.2 내진성능목표

구조물의 내진성능수준은 손상수준 및 요구성능이 구조물에 발생한 손상이 경미하여 기능이 유지될 수 있는 성능수준인 “기능수행”, 구조물에 발생한 손상이 크지 않아 단기간 내에 즉시 복구되어 원래의 기능이 회복될 수 있는 성능수준인 “즉시복구”, 구조물이나 시설물에 큰 손상이 발생할 수 있지만 장기간의 복구 후 기능을 회복하고 인명손실이 발생하지 않는 성능수준인 “장기복구/인명보호”, 마지막으로 구조물에 매우 큰 손상이 발생할 수 있지만 구조물이나 시설물의 붕괴로 인한 대규모 피해를 방지하고, 인명피해를 최소화하

는 성능수준인 “붕괴방지” 4가지로 분류할 수 있다. 현행 교량의 내진설계는 이 중에서 ‘붕괴방지’를 목표로 하며 교량의 내진등급에 따른 재현주기는 표 1.2-2와 같다(“KDS 24 17 11 교량내진설계기준(한계상태설계법)”).

표 1.2-2 교량의 내진성능목표

설계지진의 평균재현주기	내진성능수준			
	기능수행	즉시복구	장기복구	붕괴방지
50년				
100년				
200년				
500년				내진II등급
1,000년				내진I등급
2,400년				내진특등급

### 1.2.3 지진구역계수(Z)

행정구역에 따른 지진구역계수는 표 1.2-3과 같다(“KDS 17 10 00 내진설계 일반”).

표 1.2-3 지진구역의 구분

지진구역	행정구역		지진구역계수(Z) (재현주기 500년)
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종	0.11g
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부	
II	도	강원 북부(홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초), 제주	0.07g

### 1.2.4 위험도계수(I)

평균재현주기가 500년인 지진의 유효수평지반가속도(S)를 기준으로 평균재현주기가 다른 지진의 유효수평지반가속도에 대한 상대적인 비율이며 표 1.2-4와 같다(“KDS 17 10 00 내진설계 일반”).

표 1.2-4 위험도계수(I)

재현주기(년)	50	100	200	500	1000	2400
위험도계수(I)	0.40	0.57	0.73	1.00	1.40	2.00

### 1.2.5 유효수평지반가속도 (S)

내진성능평가지진의 유효수평지반가속도(S)는 식 (1.1)과 같이 지진구역계수(Z)와 위험도계수(I)의 곱으로 정의한다(“KDS 17 10 00 내진설계 일반”).

$$S = Z \times I \quad (1.1)$$

식 (1.1)로 교량의 내진등급별 유효수평지반가속도 (S)를 계산하면 표 1.2-5와 같다.

표 1.2-5 내진등급별 유효수평지반가속도(S)

내진등급	지진I구역	지진II구역
내진특등급	0.220 g	0.140 g
내진 I 등급	0.154 g	0.098 g
내진 II 등급	0.110 g	0.070 g

### 1.2.6 지반분류

국지적인 토질, 지질조건과 지표 및 지하 지형이 해당 구조물의 지반운동에 미치는 영향을 고려하기 위하여 지반을  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  총 6종의 종류로 분류한다(표 1.2-6). 다만, 기반암(bed rock)은 전단파속도가 760m/s 이상인 지층으로 정의하고 기반암의 깊이와 무관하게 토층 평균전단파속도가 120m/s 이하인 지반은  $S_5$ 지반으로 분류한다(“KDS 17 10 00 내진설계 일반”).

표 1.2-6 지반의 분류

지반종류	지반종류의 호칭	분류기준	
		기반암 깊이, $H$ (m)	토층평균전단파속도, $V_{s,soil}$ (m/s)
$S_1$	암반지반	1 미만	-
$S_2$	얕고 단단한 지반	1 ~ 20 이하	260 이상
$S_3$	얕고 연약한 지반		260 미만
$S_4$	깊고 단단한 지반	20 초과	180 이상
$S_5$	깊고 연약한 지반		180 미만
$S_6$	부지 고유의 특성평가 및 지반응답해석이 필요한 지반		

### 1.2.7 설계응답스펙트럼

내진성능평가를 위한 입력지반운동은 세기, 진동수 성분 및 지속시간의 3가지 측면에서 그 특성을 고려하여 정의한다. 입력지반운동은 기본적으로 가속도 응답스펙트럼으로 표현하며, 암반 및 토사지반의 입력지반운동의 스펙트럼가속도( $S_d$ )는 ‘KDS 17 10 00 내진설계 일반’에서 규정하는 가속도표준설계응답 스펙트럼으로부터 결정한다.

토사지반( $S_2 \sim S_5$ )에서 5% 감쇠비가 적용된 수평 방향 가속도 응답스펙트럼은 그림 1.2-1로 정의되며, 유효수평지반가속도( $S$ )에 따라 단주기지반증폭계수( $F_a$ )와 장주기 지반증폭계수( $F_v$ )는 표 1.2-7로 결정한다. 단, 유효수평지반가속도( $S$ )값이 중간 값일 경우 직선보간하여 결정한다.

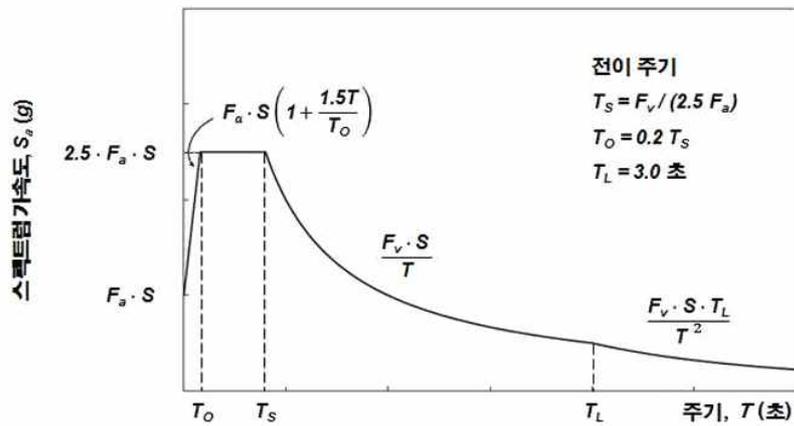


그림 1.2-1 수평 방향 가속도 응답스펙트럼(토사지반)

표 1.2-7 지반증폭계수( $F_a$  및  $F_v$ )

지반분류	단주기 지반증폭계수, $F_a$			장주기 지반증폭계수, $F_v$		
	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$	$S \leq 0.1$	$S = 0.2$	$S = 0.3$
$S_2$	1.4	1.4	1.3	1.5	1.4	1.3
$S_3$	1.7	1.5	1.3	1.7	1.6	1.5
$S_4$	1.6	1.4	1.2	2.2	2.0	1.8
$S_5$	1.8	1.3	1.3	3.0	2.7	2.4

## 1.3 내진성능 평가절차

### 1.3.1 일반사항

현재 국내에서는 ‘기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령(국토안전관리원)’을 기준으로 교량의 내진성능평가를 수행하고 “우선순위평가”와 “본평가” 2단계로 구분하여 단계적으로 수행한다.

교량의 내진성능평가는 교량 내진설계기준에서 요구하는 내진성능목표를 해당 교량이 만족하는지를 판단하는 일련의 행위이며 이를 위해서 교량 내진설계기준에 제시된 내진성능수준, 내진등급, 지진구역계수, 위험도계수, 지반종류 등에 따라 결정되는 설계지반운동을 “내진성능 평가지진”으로 적용하여야 한다.

내진성능평가의 기본 절차는 그림 1.3-1과 같이 단계적으로 수행한다. 다만, 내진성능평가 대상교량의 수가 적어 우선순위를 결정하는 것이 무의미한 경우는 ‘우선순위평가’를 생략할 수 있다.

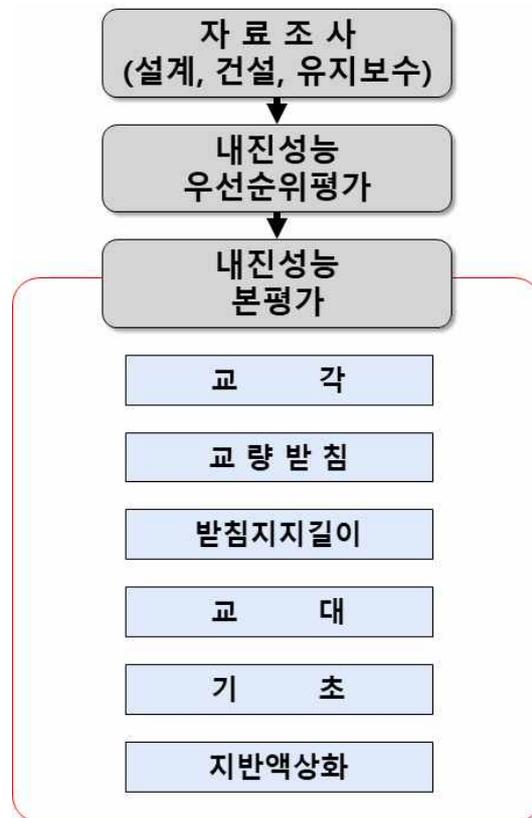


그림 1.3-1 내진성능 평가절차

### 1.3.2 응답이력해석에 의한 내진성능평가

지진보호장치가 적용되어 비선형 거동을 하는 교량의 내진성능평가는 비선형동적해석을 수행하여 평가한다. 일반적으로 해석모델은 3차원 공간모델을 기본으로 한다. 입력지반운동은

수평입력지반운동과 수직입력지반운동을 동시에 입력하여야 하며, 교량의 각 방향(수평2축 및 수직 방향)에 대해 독립적으로 해석하고 해석 결과를 조합(방향별 조합)하는 것은 불가하다. 만약 수직지반운동 또는 수평1축 지반운동의 효과가 적은 경우에는 해당 방향의 입력지반운동을 생략할 수 있다.

한편, 응답스펙트럼은 다양한 특성을 갖는 지반운동을 표현한 것이므로 이를 적용한 스펙트럼해석에는 입력지반운동의 다양성이 포함되어 있다 그러나 하나의 입력지반운동에 대한 응답이력해석의 경우에는 하나의 지진 이벤트(지반운동)에 대한 시설물의 지진거동 특성만 나타낸다. 따라서 다양한 입력지반운동에 대한 시설물의 보편적인 거동을 파악하기 위해서는 다수의 입력지반운동이 필요하다. 일반적으로 최소 3, 4세트 이상의 입력지반운동을 고려하며 3 또는 4세트의 입력지반운동을 사용한 경우에는 그 수가 충분하지 않은 점을 고려하여 각 해석에서의 응답의 최댓값을 최대응답값으로 하며, 7세트 이상의 입력지반운동을 사용한 경우에는 어느 정도 시설물의 평균적인 거동을 파악하기에 충분한 수로 간주하여 각 해석의 최대응답값의 평균값을 그 구성요소의 최대응답값으로 취한다. 그리고, 입력지반운동의 공간적 변동을 무시할 수 없다면 이를 고려하여 해석한다.

## 제 2장 비선형 지진해석기법(비선형 동적해석)

### 2.1 일반 응답이력해석

기본적인 지진해석 방법으로는 크게 선형 정적, 선형 동적, 비선형 정적, 비선형 동적으로 나눌 수 있다. 정적거동은 구조물의 강성과 외력의 관계를 통해 변위를 얻지만, 동적거동의 경우 강성뿐만 아니라 질량과 감쇠도 함께 고려하여 시간에 따른 변위응답, 속도응답, 가속도응답을 구할 수 있다.

실제 구조물의 지진 시 거동은 선형보다는 비선형 거동을 보이고, 각 시간마다 응답값이 변화하므로 비선형 동적해석이 실제 구조물의 지진거동을 파악하기 위한 가장 정확한 해석이다. 지진과 같은 동적 하중 조건 하에서의 구조물 비선형적인 거동을 이해하기 위해 시간에 따라 변화하는 지진 등 외부 하중을 고려한 구조물의 응답을 분석한다. 비선형성을 고려해야 하는 요소는 받침과 댐퍼와 같은 지진보호장치의 비선형성, 재료의 비선형성, 하중과 경계조건의 비선형성 등이 있다.

고려하는 입력지반운동의 시간이력은 지진동이 입력되는 교각(고정단 교각)의 지반특성을 고려하여야 한다. 만약 고정단 교각의 지반조건이 상이하다면 응답값이 가장 불리한 지반으로 적용하여 보수적인 입력지반운동을 생성한다. 즉 보수적으로 선전된 지반의 설계응답스펙트럼에 부합되는 시간이력을 생성하여 이를 입력지반운동으로 하여 응답이력해석을 수행한다.

입력 지반운동의 시간이력은 KDS 17 10 00(4.2.1.4(8)-(10))에 따르면 실제 기록된 지진운동을 수정하거나 인공적으로 합성된 최소한 4세트 이상의 지반운동 시간이력을 작성하여 사용하며, 7세트 미만의 지반운동 시간이력에 의한 해석결과로부터 얻어진 응답치의 최댓값 혹은 7세트 이상의 해석결과로부터 얻어진 각각의 최댓값의 평균값을 응답값으로 한다.

본 연구에서는  $S_4$  지반, 재현주기 1000년(지진위험지도 기반) 지진에 해당하는 유효수평지반가속도(S)를 고려하고 표 3.3-1의 지진규모 5.5 이상 6.0 미만의 상승시간 1sec, 강진동지속시간 5.5sec, 하강시간 8sec를 적용(“KDS 17 10 00 내진설계 일반”)하여 인공합성지진파를 생성하였다. 입력지반운동이 4세트로 구성하였으며 한 개의 세트는 교축방향(X), 교축직각방향(Y), 수직방향(Z) 총 3개의 인공합성지진파로 이루어지므로 총 12개의 인공합성지진파를 생성하였다. 이 때 임의의 2개의 지진파의 상관계수는 0.16을 초과하지 않아야 한다. 입력지반운동을 4세트를 사용하는 경우 각 세트의 최대응답값을 교량의 응답값으로 한다. 설계응답스펙트럼에 부합하는 입력지반운동의 시간이력은 ‘3.3.1 스펙트럼 부합 시간이력’에 정리되어 있다.

## 2.2 부지특성 응답이력해석

현재 기존 시설물(교량)에 대한 내진성능평가는 ‘기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령’에 따라 상세해석이 필요한 교량에 대해 정밀해석법(일반 응답이력해석법)을 사용하여 해석을 수행한다. 반면에, 신설 구조물(교량)에 대한 내진설계는 내진설계 기준(KDS 17 10 00)에 의해 부지특성 응답이력해석을 사용하여 해석을 수행한다. 이 때 지반운동이 입력되는 고정 지점의 지반종류가 다른 경우에는 보수적인 값을 얻기 위해 지반증폭(단주기 증폭계수( $F_a$ ) 및 장주기증폭계수( $F_v$ ))가 큰 지반의 입력지반운동을 적용한다. 즉, 입력지반운동의 가속도 시간이력은 암반지반( $S_1$  지반)의 설계응답스펙트럼에 부합되게 인공합성지반운동을 생성한 후 보수적으로 선정된 지반의 지반해석(부지특성 응답이력해석)을 수행하여 지표에서의 가속도 시간이력을 생성하여 얻는다.

부지특성 응답이력해석은 구조물과 지반사이의 상호작용을 더 상세히 고려해준 해석이다. 지진 시 구조물의 거동을 정확히 예측하기 위해서는 부지고유 특성현상의 신뢰성 있는 평가가 매우 중요하다. 특히 단층대 또는 연약층에 속해 있는 경우 내진 설계 시 부지특성의 영향을 반드시 고려하여야 한다. 세계 각국에서 이용되고 있는 내진설계기준에서는 기반암 위에 비교적 균질한 지층이 존재할 경우 이 지층의 특성을 고려한 설계 지반운동을 산정하는 간편법을 제시하고 있으나 단층대 또는 연약지반대가 폭 넓게 발달된 지형으로 분류되는 경우에는 부지고유의 특성평가에 의하여 지반운동을 산정하도록 규정하고 있다. 즉, 일반 응답이력해석과는 다르게 각 지반의 정보와 지질주상도를 사용하여 지반을 모델링 하고 지반의 기반암 부분에 암반지반( $S_1$  지반) 설계응답스펙트럼에 해당하는 유효수평지반가속도(S)의 80%에 부합되는 인공합성지반운동을 생성한 후 해당 지반에 대해 지반해석(부지특성 응답이력해석)을 수행하여 지표에서의 가속도 시간이력을 생성한다. 생성된 지표 저면의 지진파 중 가장 불리한 응답값이 나오는 지진파로 해석한다. 재현주기는 1000년으로 하였으며 지진 지속시간은 표 3.3-1의 지진규모 5.5 이상 6.0 미만의 상승시간 1sec, 강진동지속시간 5.5sec, 하강시간 8sec를 적용하였다. 각각의 지진파의 상관계수는 0.16을 넘지 않도록 한 개의 세트당 교축방향(X), 교축직각방향(Y), 수직방향(Z) 총 3개의 인공합성지진파로 이루어져 있다. 본 연구에서는 4세트의 입력지반운동 응답 최댓값의 최댓값 혹은 7세트의 입력지반운동 응답 최댓값의 평균값 중 전자인 4세트의 입력지반운동 응답 최댓값의 최댓값을 사용하여 총 12개의 인공합성지진파를 생성하였다. 본 연구의 해당 교량 지반 특성은 ‘3.1.2 지반특성’에 정리되어 있고, 부지특성 응답이력해석의 입력지반운동의 경우 ‘3.3.2 부지특성 시간이력’에 정리되어 있다.

## 2.3 부지특성 다지점가진 응답이력해석

부지특성 다지점가진 응답이력해석(이하 ‘부지특성 다지점가진해석’)의 경우 부지특성 응답해석과 동일하게 각 지반의 정보와 지질주상도를 사용하여 지반을 모델링 하고 지반의 기반암 부분에 암반지반( $S_1$ 지반) 설계응답스펙트럼에 해당하는 유효수평지반가속도(S)의 80%에 부합되는 인공합성지반운동을 생성한 후 해당 지반에 대해 지반해석(부지특성 응답이력해석)을 수행하여 지표에서의 가속도 시간이력을 생성한다. 다만, 부지특성 응답이력해석과의 차이점은 부지특성 응답이력해석의 경우 생성된 지표 저면의 지진파 중 가장 불리한 응답값이 나오는 지진파로 해석하지만 다지점가진해석의 경우는 가장 불리한 응답값이 나오는 지진파가 아닌 모든 지점의 각기 다른 지반 특성을 고려하여 부지응답해석을 수행하고 각기 다른 가속도 시간이력을 생성하여 입력지반운동으로 사용한다. 즉, 교축방향으로 고정 단 지점에만 입력지반운동을 생성해주는 것이 아니라 모든 지점에 대해 입력지반운동을 생성해 주는 해석방법이다. 이 또한 재현주기는 1000년으로 하였으며 지진지속시간은 표 3.3-1의 지진규모 5.5 이상 6.0 미만의 상승시간 1sec, 강진동지속시간 5.5sec, 하강시간 8sec를 적용하였다. 각각의 지진파의 상관계수는 0.16을 넘지 않도록 한 개의 세트 당 교축방향(X), 교축직각방향(Y), 수직방향(Z) 총 3개의 인공합성지진파로 이루어져 있다. 본 연구에서는 4세트의 입력지반운동 응답 최댓값의 최댓값 혹은 7세트의 입력지반운동 응답 최댓값의 평균값 중 전자인 4세트의 입력지반운동 응답 최댓값의 최댓값을 사용하여 총 48개의 인공합성지진파를 생성하였다. 부지특성 다지점가진해석의 입력지반운동은 A~W24 부지특성 응답이력해석으로 구한 기초 저면의 가속도를 변위로 변환하여 각각의 교각하단에 지반운동으로 입력하였다. 본 연구의 해당 교량 지반 특성은 ‘3.1.2 지반특성’에 정리되어 있고, 부지특성 다지점가진해석의 입력지반운동의 경우 ‘3.3.3 부지특성 다지점가진 시간이력’에 정리되어 있다.

## 제 3장 대상 교량의 제원 및 해석모델

### 3.1 교량의 제원 및 지반특성

#### 3.1.1 교량의 제원

대상 교량은 3경간 연속교로 포트받침을 가지고 있으며, 교각은 벽식 교각이다. 교량의 상세한 제원은 다음 표 3.1-1과 같으며 사용재료의 특성은 표 3.1-2와 같다.

표 3.1-1 교량의 제원

교량등급	1종	
상부구조형식	STBOX(STEEL BOX Girder)	
교량연장 및 경간구성	180.000m(3@60)	
교량폭원	21.445m	
받침형식	포트받침	
교각형식	벽식 교각(기둥 1EA, 단면적 $35.675m^2$ , 구형단면)	
	축방향철근 배근상태	D29 (514 EA(2단))
	축방향철근 겹침이음	유
	피복두께	100mm
교대형식	A 교대	역T형식 교대
	W24교각	역T형식 교각
기초형식	교대	현장타설말뚝(A1)
	교각	현장타설말뚝(W26~W24)

표 3.1-2 교량 사용재료의 특성

콘크리트 바닥판	콘크리트	$f_{ck} = 27 \text{ MPa}, E_c = 27,804 \text{ MPa}$
	철근	$f_y = 400 \text{ MPa}, E_s = 200,000 \text{ MPa}$
거더(강거더)	주부재 강종	SM520B
	부부재 강종	SM490B
	탄성계수	$E_s = 205,000 \text{ MPa}$
하부구조	콘크리트	$f_{ck} = 24 \text{ MPa}, E_c = 26,985.8 \text{ MPa}$
	철근	$f_y = 300 \text{ MPa}, E_s = 200,000 \text{ MPa}$

교량의 종·평면도(그림 3.1-1)와 교각 일반도(그림 3.1-2), 교대 일반도(그림 3.1-3)는 다음과 같다.

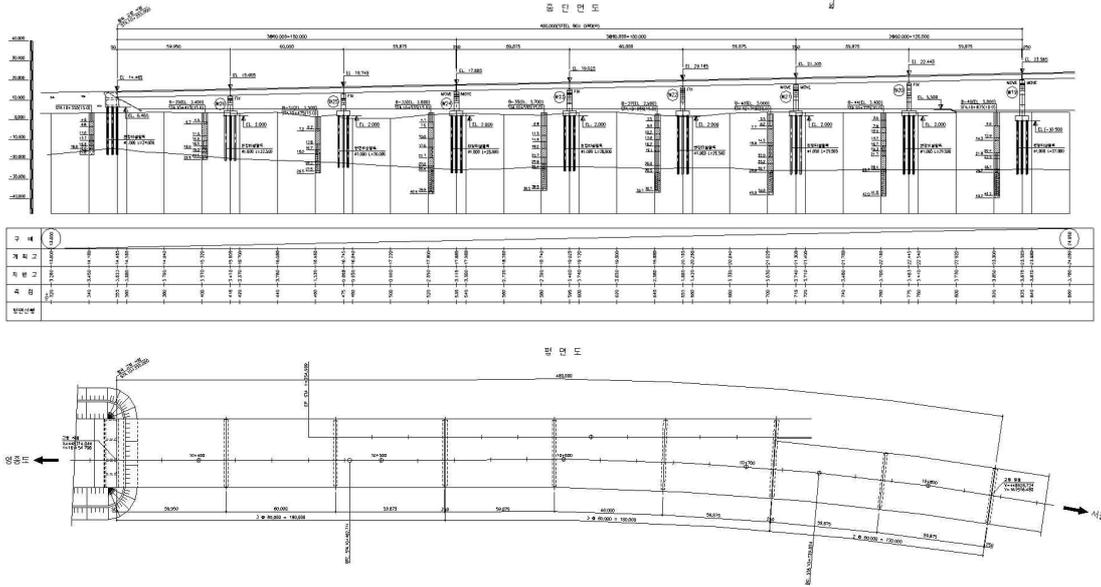


그림 3.1-1 교량 종·평면도

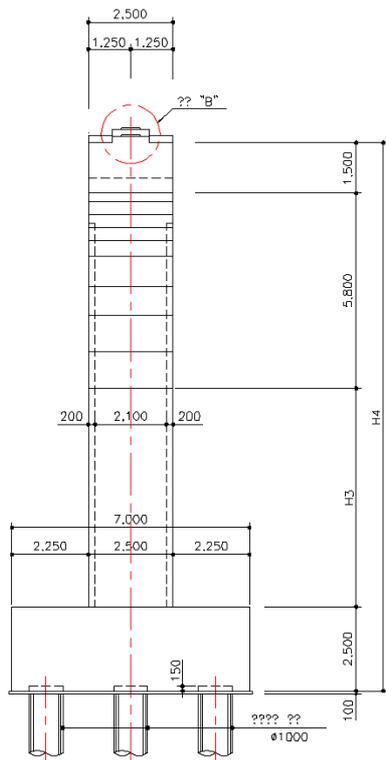


그림 3.1-2 교각 일반도(단위:mm)

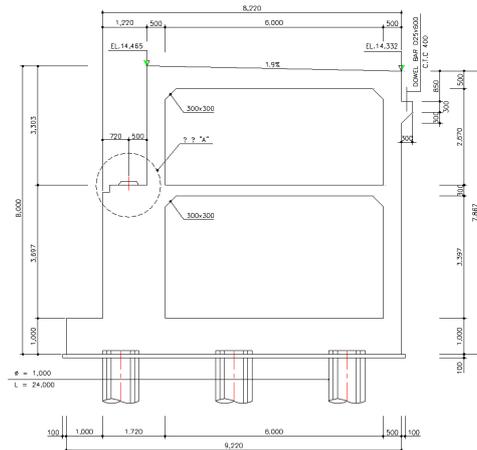


그림 3.1-3 교대 일반도(단위:mm)

### 3.1.2 지반분류

교각 및 교대의 각 위치별(A~W24) 지반분류는 표 3.1-3과 같다. 각 지반의 N치, 전단파 속도 등 해당 지반의 프로파일을 다음 항에 나타내었다.

표 3.1-3 위치별 지반분류

위치	A	W26	W25	W24
지반분류	S <sub>3</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>4</sub>

#### 1) 교대(A)

교대(A)지반 지질주상도(그림 3.1-4)와 전단파속도 및 지반분류(표 3.1-4)이다.

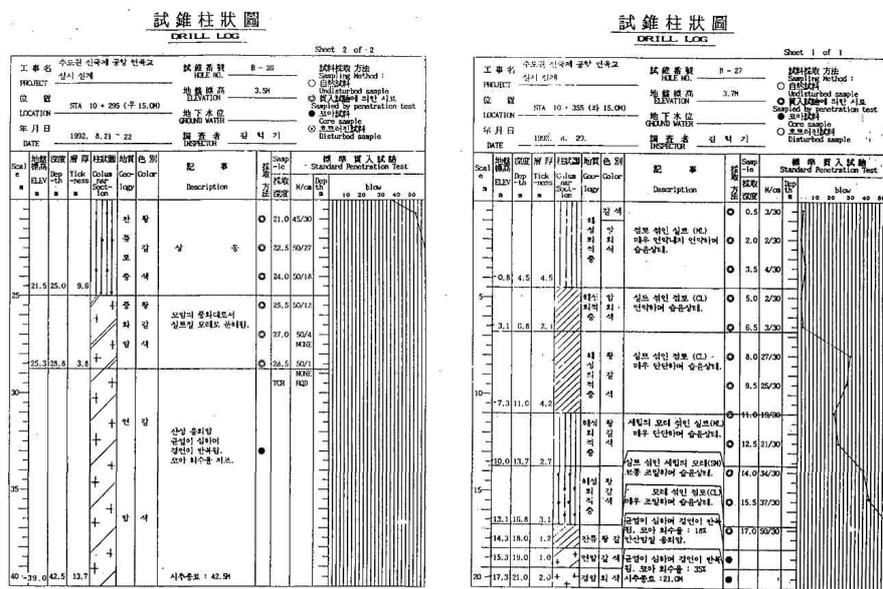


그림 3.1-4 A지반 지질주상도

표 3.1-4 A지반 전단파속도 및 지반분류

A				
기반암 깊이(H, m)		18.00	S <sub>3</sub>	
평균전단파 속도( $\bar{V}_{s,soil}$ , m/s)		215.075		
깊이(m)	토층두께( $d_i$ , m)	N치	각층의 전단파속도( $V_i$ , m/s)	$\frac{d_i}{V_i}$
4.50	4.50	3.00	145	0.031
6.80	2.30	2.50	136	0.017
11.00	4.20	23.67	296	0.014
13.70	2.70	21.00	284	0.009
16.80	3.10	35.50	341	0.009
18.00	1.20	50.00	384	0.003
			$\Sigma(d_i/V_i)$	0.084
		$\bar{V}_{s,soil} = \frac{H}{\Sigma(d_i/V_i)}$		215.075

2) 교각(W26)

교각(W26)지반 지질주상도(그림 3.1-5)와 전단파속도 및 지반분류(표 3.1-5)이다.

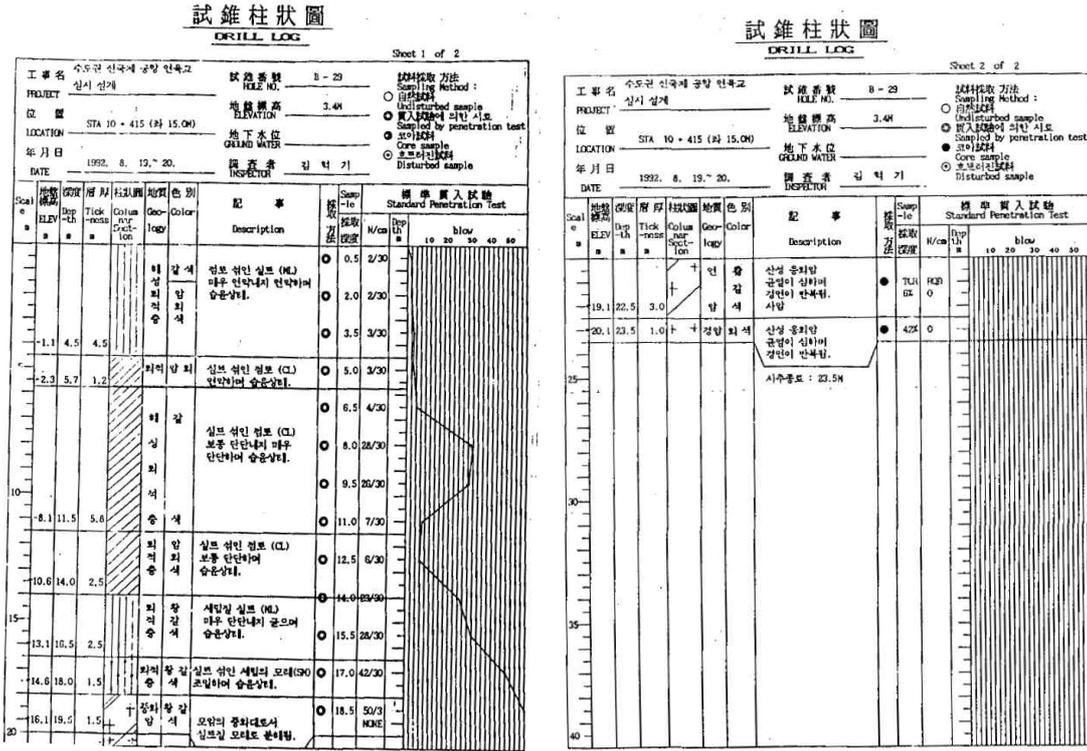


그림 3.1-5 W26지반 지질주상도

표 3.1-5 W26지반 전단파속도 및 지반분류

W26				
기반암 깊이(H, m)		19.60	$S_3$	
평균전단파 속도( $\bar{V}_{s,soil}$ , m/s)		212.593		
깊이(m)	토층두께( $d_i$ , m)	N치	각층의 전단파속도( $V_i$ , m/s)	$\frac{d_i}{V_i}$
4.50	4.50	2.33	133	0.034
5.70	1.20	3.00	145	0.008
11.50	5.80	16.25	260	0.022
14.00	2.50	6.00	185	0.014
16.50	2.50	28.00	314	0.008
18.00	1.50	42.00	361	0.004
19.60	1.60	300.00	712	0.002
			$\Sigma(d_i/V_i)$	0.092
			$\bar{V}_{s,soil} = \frac{H}{\Sigma(d_i/V_i)}$	212.593

3) 교각(W25)

교각(W25)지반 지질주상도(그림 3.1-6)와 전단파속도 및 지반분류(표 3.1-6)이다.

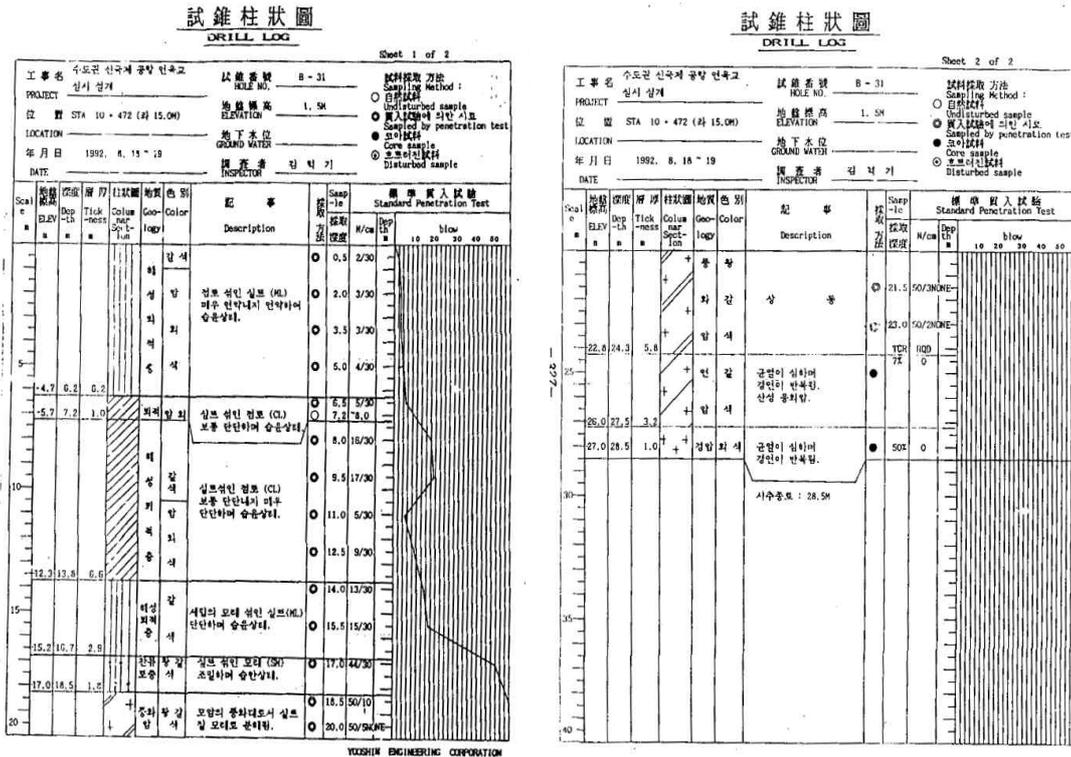


그림 3.1-6 W25지반 지질주상도

표 3.1-6 W25지반 전단파속도 및 지반분류

W25				
기반암 깊이(H, m)		24.30	$S_4$	
평균전단파 속도( $\bar{V}_{s,soil}$ , m/s)		239.294		
깊이(m)	토층두께(m)	N치	각층의 전단파속도( $V_i$ , m/s)	$\frac{d_i}{V_i}$
6.20	6.20	3.00	145	0.043
7.20	1.00	5.00	173	0.006
13.80	6.60	11.75	233	0.028
16.70	2.90	14.00	247	0.012
18.50	1.80	44.00	367	0.005
24.30	5.80	300.00	712	0.008
			$\Sigma(d_i/V_i)$	0.017
			$\bar{V}_{s,soil} = \frac{H}{\Sigma(d_i/V_i)}$	239.294

4) 교각(W24)

교각(W24)지반 지질주상도(그림 3.1-7)와 전단파속도 및 지반분류(표 3.1-7)이다.

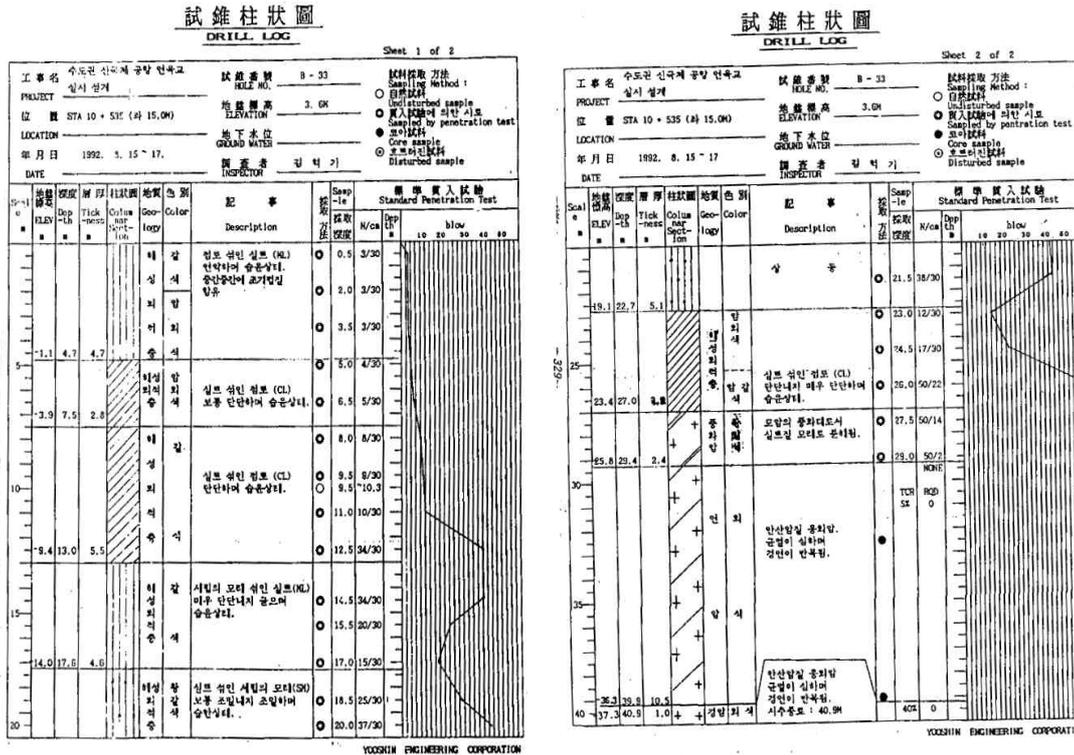


그림 3.1-7 W24지반 지질주상도

표 3.1-7 W24지반 전단파속도 및 지반분류

W24				
기반암 깊이(H, m)		29.40	$S_4$	
평균전단파 속도( $\bar{V}_{s,soil}$ , m/s)		249.098		
깊이(m)	토층두께( $d_i$ , m)	N치	각층의 전단파속도( $V_i$ , m/s)	$\frac{d_i}{V_i}$
4.70	4.70	3.00	145	0.032
7.50	2.80	4.50	167	0.017
13.00	5.50	15.25	255	0.022
17.60	4.60	23.00	294	0.016
22.70	5.10	33.33	334	0.015
27.00	4.30	32.39	330	0.013
29.40	2.40	300.00	712	0.003
			$\Sigma(d_i/V_i)$	0.118
		$\bar{V}_{s,soil} = \frac{H}{\Sigma(d_i/V_i)}$		249.098

## 3.2 교량시스템의 지진해석 모델

### 3.2.1 교량 모델링

해석기법에 따른 지진거동특성분석을 위한 구조해석 모델링(그림 3.2-1)은 표 3.2-1과 같이 상부구조 STBOX (STEEL BOX Girder)는 3차원 격자요소로 모델링하였고, 지반은 구조물의 거동에 충분히 전달 수 있는 강성을 갖고 있다고 가정하여 고정단으로 모델링하였다. 또한, 받침과 전단키는 실제 교량의 비선형 거동특성과 일치되도록 General Link를 사용하여 모델링하였고, 교각의 휨강성은 축하중 산정 시에는 전단면강성( $EI_y$ )을 적용하고 일반 응답이력 해석 시에는 파이버(fiber)요소를 적용하였다. 파이버 요소는 비선형 휨거동을 정확하고 간단하게 모델링 할 수 있고, 단면을 여러 개로 분할하고 각각에 맞는 재료특성을 입력하여 단면에서의 파괴 매커니즘을 정확히 알 수 있다. 그리고, 지진하중에 의한 구조물의 손상상태를 예측하는데 큰 도움이 되는 특징이 있다. 대상 교량 비선형 구조해석 모델링과 콘크리트, 철근의 모델은 그림 3.2-2 ~ 그림 3.2-4에 나타나있다.

표 3.2-1 교량의 모델링 요소

역학 모델	교각	Concrete
	거더(Girder)	Steel
	콘크리트 모델	Mander 모델
	철근 모델	Park 모델
적용 요소	상부와 하부의 연결부 상세	NL LINK 탄성 스프링 모델
	기초와 지반의 연결부 상세	고정점 처리
	교각 하단 모델링	Fiber요소
	받침	General Link
	전단키	General Link
	댐퍼	General Link

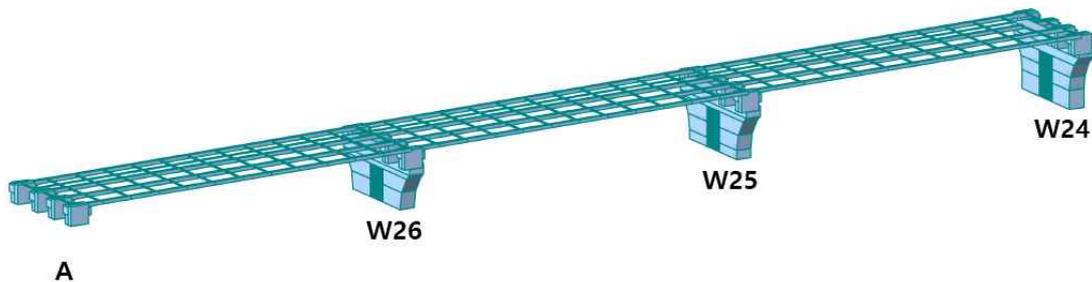


그림 3.2-1 대상 교량 구조해석 모델링

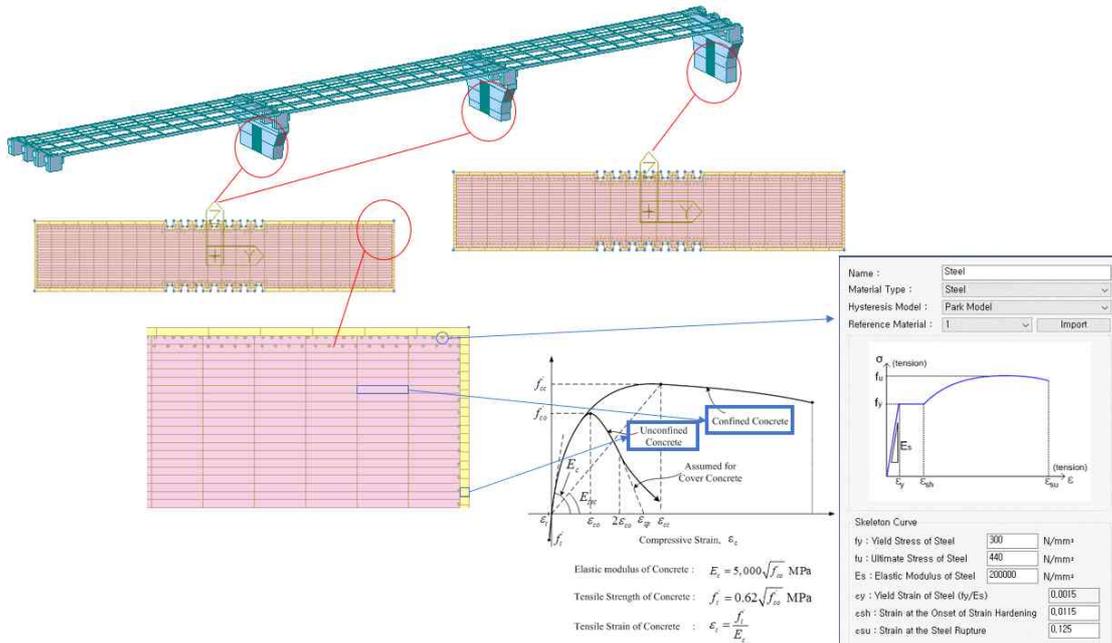
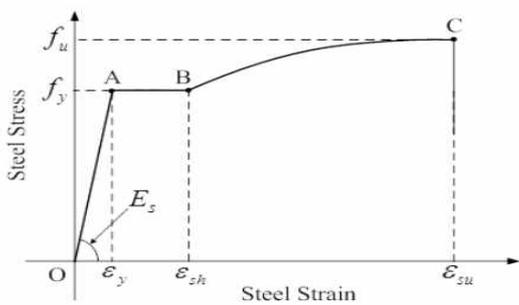
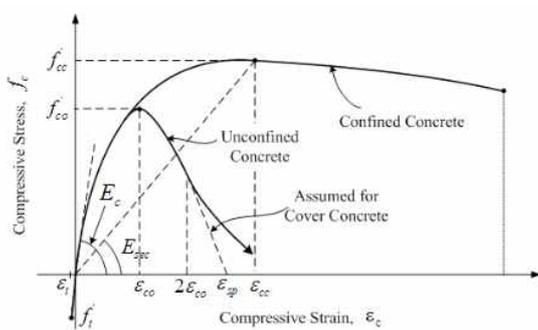


그림 3.2-2 대상 교량 비선형 구조해석 모델링



- $\epsilon$  : 철근의 변형률
- $f$  : 철근의 응력
- $f_y$  : 철근의 항복강도
- $f_u$  : 철근의 인장강도
- $E_s$  : 철근의 탄성계수
- $\epsilon_y$  : 철근의 항복변형률
- $\epsilon_{sh}$  : 철근의 변형경화시 변형률
- $\epsilon_{su}$  : 철근의 인장강도 시 변형률

그림 3.2-3 Park Steel Model 응력-변형률 곡선



- $f'_{co}$  : 무구속 콘크리트의 압축강도
- $\epsilon_{co}$  :  $f'_{co}$ 에 대응하는 콘크리트의 변형률
- $E_c$  : 콘크리트 탄성계수,  
 $E_c = 5,000\sqrt{f'_{co}}$  (MPa)
- $f'_t$  : 콘크리트 인장강도,  $f'_t = 0.62\sqrt{f'_{co}}$  (MPa)
- $\epsilon_t = \frac{f'_t}{E_c}$

그림 3.2-4 Mander Model 응력-변형률 곡선

### 3.2.2 지진보호장치 모델링

#### 1) 전단키

전단키(그림 3.2-5)는 지진 시 발생하는 수평하중인 수평지진력에 저항하는 추가적인 장치로서, 상부구조물인 상부 거더와 하부구조물인 교각에 설치되어 지진 시 낙교방지와 고정단 교각이 부담하는 지진하중을 전단키 설치 교각으로 분담하는 역할을 한다. 본 연구에서는 지진보호장치인 전단키의 비선형거동을 나타내기 위해 2선형 슬립(slip bilinear) 모델(그림 3.2-6)을 사용하였다.

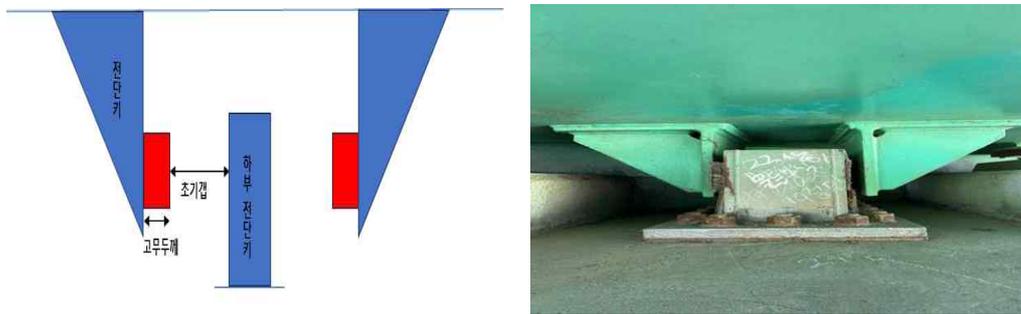


그림 3.2-5 전단키

2선형 슬립 모델(그림 3.2-6)의 경우 초기 갭(Gap)의 설정이 가능하여 실제 상부 전단키와 하부 전단키 사이에 있는 간격을 구현하고 이선형성 하중-변위 관계를 통해 전단키에 부착되어있는 고무패드의 강성과 전단키의 강성을 나타내었다.

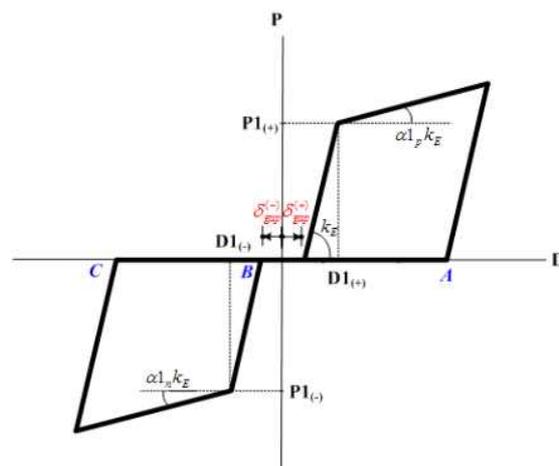


그림 3.2-6 2선형 슬립(slip bilinear)

전단키 모델링(그림 3.2-7)과 제원(표 3.2-2)의 경우 초기값은 온도수축변위를 고려하여 가동단 교축방향으로 0.02m를 주었고 고무패드와 전단키 강성의 경우 실제와 유사하도록 설정하였다.

가동단은 교축방향으로 초기값 0.02m, 고무패드 강성 30,000kN/m, 전단키 강성 무한강성이고 교직방향으로 초기값 0m, 고무패드 강성 40,000kN/m, 전단키 강성은 무한강성이다.

표 3.2-2 전단키 모델링 제원

부착 위치	방향	항목	특성값
가동단 (W25)	교축	초기값( $\delta_{gap}$ )	0.02 (m)
		고무패드 강성( $k_1 = \frac{P1}{D1 - \delta_{gap}}$ )	30,000 (kN/m)
		전단키 강성( $k_2 = \frac{P2 - P1}{D2 - D1}$ )	$\infty$ (kN/m)
	교직	초기값( $\delta_{gap}$ )	0 (m)
		고무패드 강성( $k_1 = \frac{P1}{D1 - \delta_{gap}}$ )	40,000 (kN/m)
		전단키 강성( $k_2 = \frac{P2 - P1}{D2 - D1}$ )	$\infty$ (kN/m)

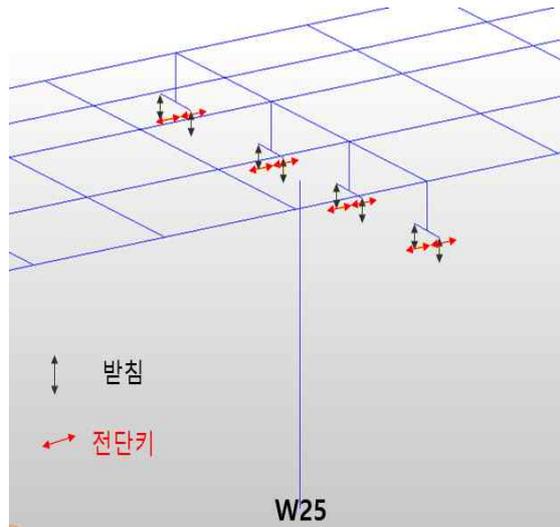


그림 3.2-7 대상 교량 구조해석 전단키 모델링

## 2) 댐퍼

댐퍼(그림 3.2-8)는 지진, 바람, 진동 등에 의해 구조물에 발생하는 운동에너지가 점성댐퍼에 전달되고 전달된 운동에너지는 내부에 충전된 실리콘 오일이 피스톤을 통과하면서 발생하는 열에너지의 형태로 변환되어 소산되는 원리를 이용하는 장치이다. 현재 교량뿐만 아니라 건축물, 플랜트, 군사용 설비 등 여러 산업분야에서 내풍, 내진, 진동감소의 목적으로 구조물 및 설비에 널리 적용되고 있다. 또한, 댐퍼는 온도의존성이 거의 없고 저속시 작은 하중의 재하로 장기하중(온도하중 등)에 대한 응력을 최소화하여 구조물의 안전성을 확보하고 별도의 보조장치나 외부의 전력이 불필요하다. 그리고, 지진 발생 후에도 성능의 변화가 없기 때문에 희생부재들과는 달리 지속적인 사용이 가능하여 유지관리가 불필요하다.

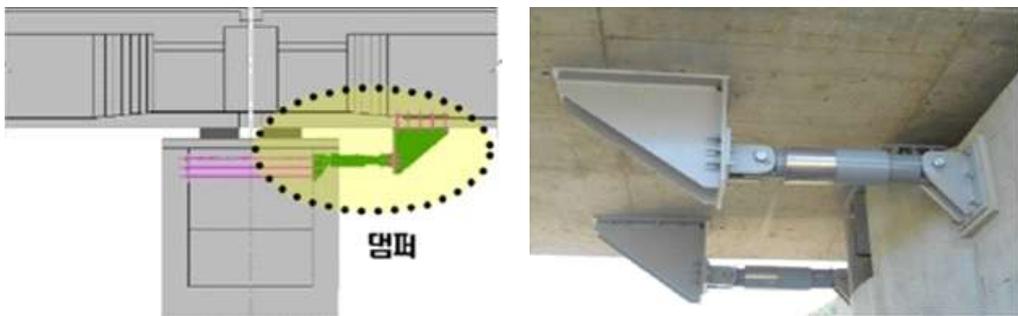


그림 3.2-8 댐퍼

댐퍼 형식(Type)은 선형스프링과 점성감쇠가 직렬로 연결된 모델인 Maxwell Model을 사용하였고 힘-변형 관계식은 식 (3.1)과 같다.

$$f = c_d \text{sign}(\dot{d}_d) \left| \frac{\dot{d}_d}{v_0} \right|^s = k_b d_b \quad (3.1)$$

여기서,  $c_d$  : 점탄성감쇠기의 감쇠 상수(kN)  
 $v_0$  : 기준 속도(m/sec)  
 $k_b$  : 연결부재의 강성(kN/m)

Dashpot Type은 재하 및 제하에 관계없이 루프곡선을 그리지 않고 항상 2선형 뼈대곡선상에서 이동하는 탄성 2선형(Elastic Bilinear Type)이력 모델(그림 3.2-9)을 사용하였다.

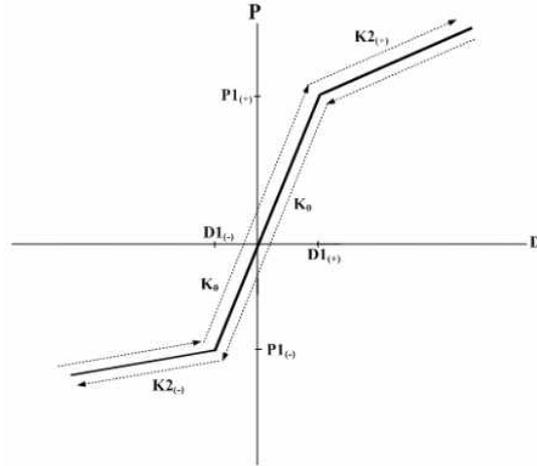


그림 3.2-9 탄성 2선형(Elastic Bilinear Type)

댐퍼의 감쇠력과 피스톤의 전달 속도의 상관관계식은 식 (3.2)과 같다.

$$P = C \cdot V^\alpha \quad (3.2)$$

여기서,  $P$  : 댐퍼의 감쇠력(kN)  
 $C$  : 감쇠계수(kN · sec/m)  
 $V$  : 속도(m/sec)  
 $\alpha$  : 속도의존성 지수

댐퍼의 모델링(그림 3.2-10)과 제원(표 3.2-3)의 경우 실제 보강공사 시 사용하는 댐퍼의 제원을 바탕으로 댐퍼의 최대 감쇠력은 4000kN, 초기감쇠계수는 2666kN · sec/m로 전달속도는 댐퍼감쇠력/초기감쇠계수인 1.5m/sec이다. 속도의존성 지수( $\alpha_1$ )의 경우  $0 < \alpha_1 < 1$  비선형 댐퍼,  $\alpha_1 = 1$  선형댐퍼,  $\alpha_1 > 1$  초선형 댐퍼로 0~2 사이로 설정한다. 본 연구에서는 지진격리장치의 비선형성을 고려하여 0.5로 설정하였다.

표 3.2-3 댐퍼 모델링 제원

부착 위치	방향	항목	특성값
가동단 (W25)	교	초기감쇠계수( $C_e$ )	2666 (kN · sec/m)
		댐퍼 감쇠력( $P_1$ )	4000 (kN)
		전달 속도( $V_1 = \frac{P_1}{C_e}$ )	1.50 (m/sec)
	축	2차감쇠계수( $C_1$ )	1333 (kN · sec/m)
		속도의존성 지수( $\alpha_1$ )	0.5

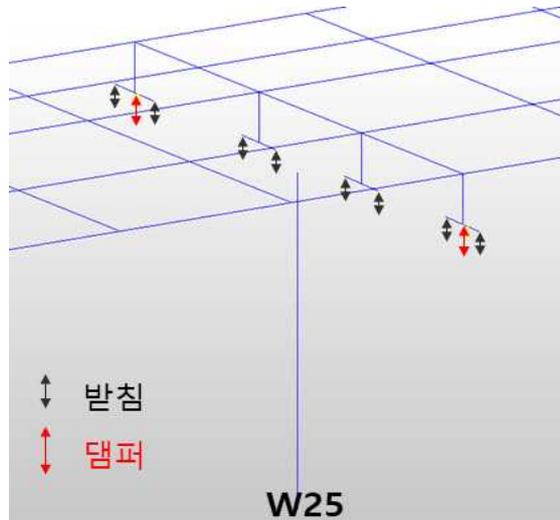


그림 3.2-10 대상 교량 구조해석 댐퍼 모델링

### 3.3 입력지반운동의 시간이력

#### 3.3.1 스펙트럼 부합 시간이력

비선형 응답(시간)이력해석을 수행하기 위해 ‘KDS 17 10 00 내진설계 일반’의  $S_4$ 지반의 응답스펙트럼에 부합하는 인공합성 지진파를 생성하였다. 지반운동의 지속시간은 지진의 규모와 특성, 전파경로 및 부지의 국지적인 조건이 미치는 영향을 고려하여야 하며, 지진 규모에 따른 구간선형 포락함수의 형상과 지속시간은 그림 3.3-1 및 표 3.3-1과 같다. 재현주기는 1000년으로 하였으며 지진지속시간은 지진규모 5.5이상 ~ 6.0미만으로 적용하였다.

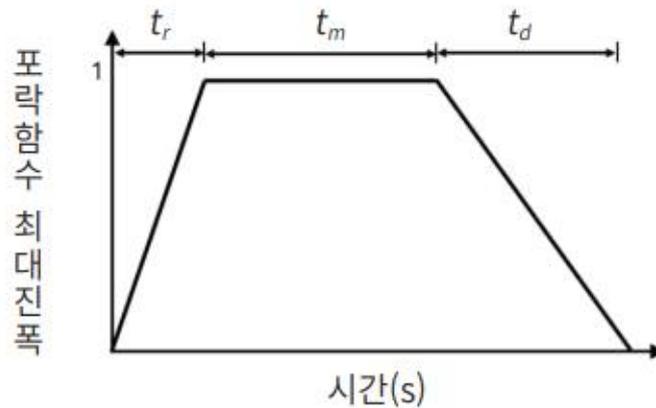


그림 3.3-1 가속도시간이력의 구간선형 포락함수

표 3.3-1 가속도시간이력 구간선형 포락함수에 대한 지진규모별 지속시간(단위 : sec)

지진규모	상승시간( $t_r$ )	강진지속시간( $t_m$ )	하강시간( $t_d$ )
7.0이상 ~ 7.5미만	2	12.5	13.5
6.5이상 ~ 7.0미만	1.5	9	10.5
6.0이상 ~ 6.5미만	1	7	9
<b>5.5이상 ~ 6.0미만</b>	<b>1</b>	<b>5.5</b>	<b>8</b>
5.0이상 ~ 5.5미만	1	5	7.5

또한, ‘KDS 17 10 00 내진설계 일반’에서는 응답스펙트럼의 유효수평지반가속도(S)를 산정할 때 국가지진위험지도를 이용하여 결정하는 경우 행정구역에 의해 결정한 값의 80%보다 작지 않아야 한다고 명시하고 있다. 지진구역에 의해 결정된 각 재현주기별  $S_4$ 지반의 유효수평지반가속도(S)의 80%의 값을 사용하여 그림 3.3-2  $S_4$ 지반 지진재현주기 1000년 응답스펙트럼(80%)을 산정할 수 있다.

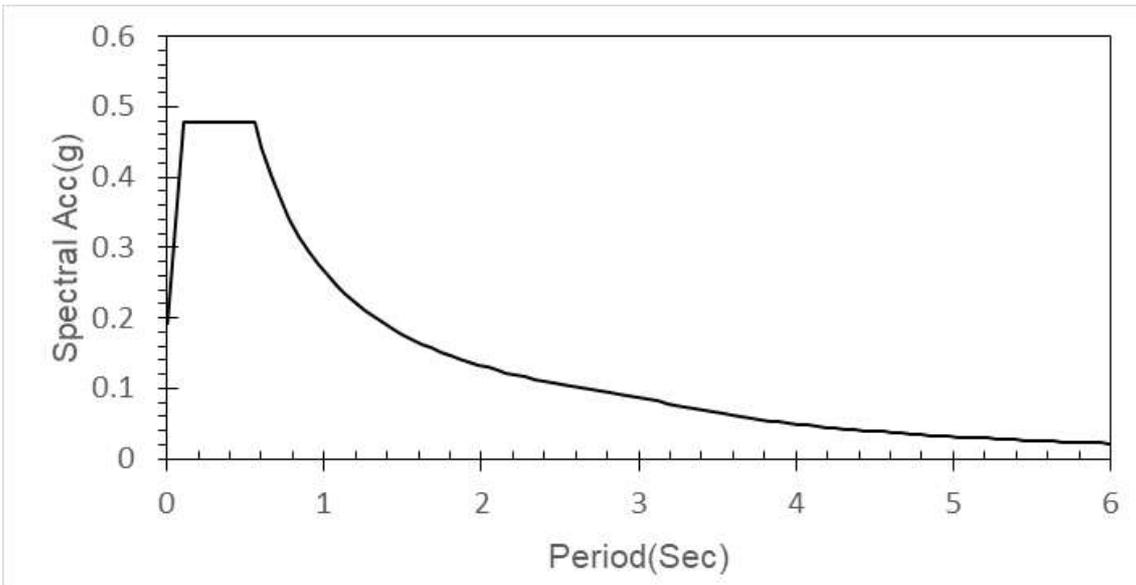
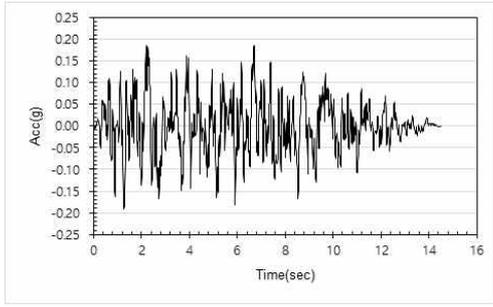
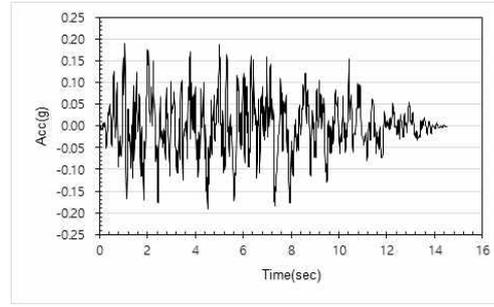


그림 3.3-2  $S_4$ 지반 지진재현주기 1000년 응답스펙트럼(80%)

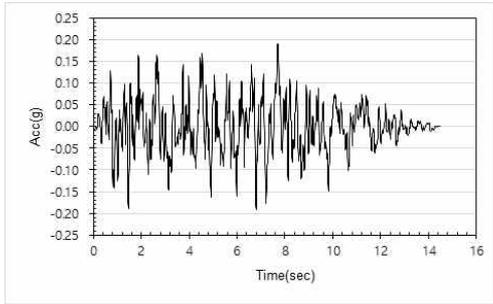
지반해석을 통해 가장 불리한 지반인  $S_4$ 지반으로 분류 후,  $S_4$ 지반 재현주기 1000년(80%) 스펙트럼에 부합하는 인공합성지진파(그림 3.3-3 ~ 그림 3.3-6)를 생성하였다. 인공합성지진파의 경우 지진 재현주기와 유효수평지반가속도(S)를 고려하여 표 3.3-1의 지진규모 5.5 이상 6.0미만의 상승시간 1sec, 강진동지속시간 5.5sec, 하강시간 8sec를 적용하였다. 각 지진파들의 상관계수는 0.16을 넘지 않도록 하였고 1세트 당 수평방향(X축(교축), Y축(교직)) 2개, 수직방향(Z축) 1개로 총 3개의 인공합성지진파로 이루어져있고 같은 방식으로 총 4세트의 인공합성지진파를 생성하였다. 그리고,  $S_4$ 지반 재현주기 1000년(80%) 스펙트럼과 부합성을 검토하였다.



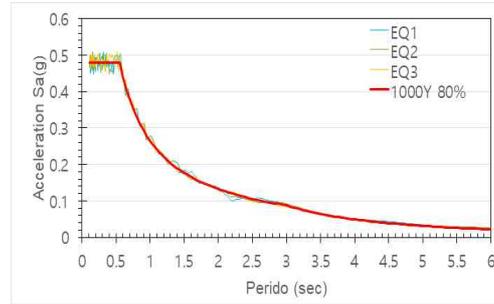
교축방향 재하 인공합성지진파(EQ1)



교직방향 재하 인공합성지진파(EQ2)

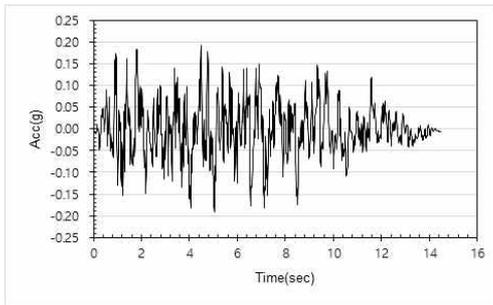


수직방향 재하 인공합성지진파(EQ3)

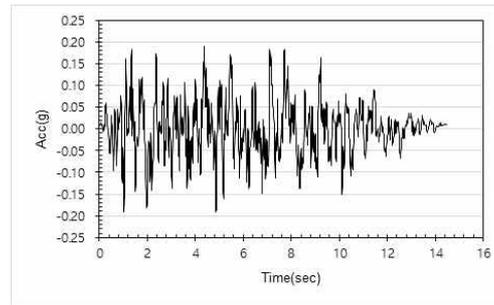


인공합성지진파 부합성검토

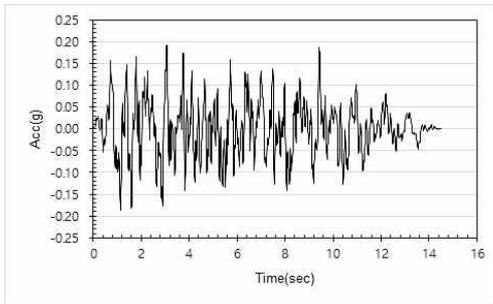
그림 3.3-3  $S_4$  지반 1000년 (80%) 인공합성지진파 세트1



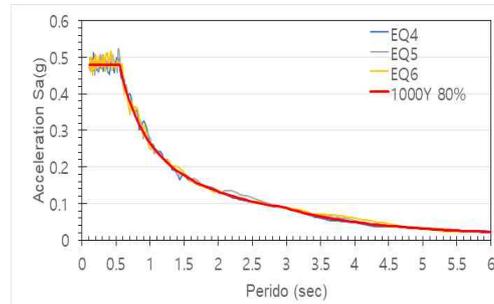
교축방향 재하 인공합성지진파(EQ4)



교직방향 재하 인공합성지진파(EQ5)

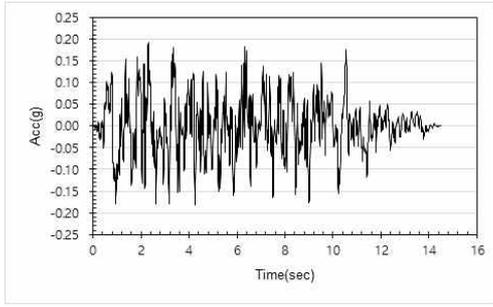


수직방향 재하 인공합성지진파(EQ6)

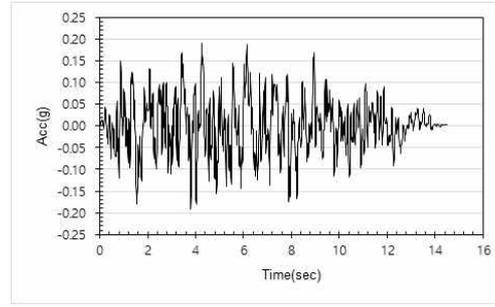


인공합성지진파 부합성검토

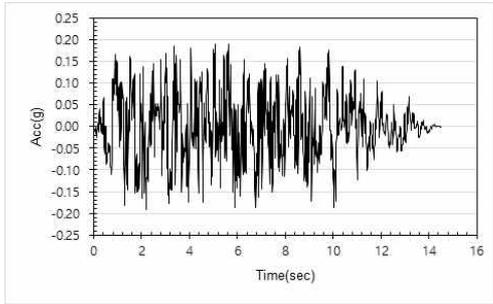
그림 3.3-4  $S_4$  지반 1000년 (80%) 인공합성지진파 세트2



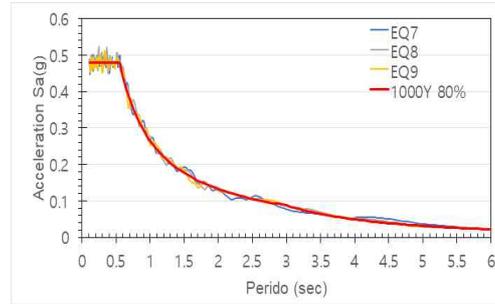
교축방향 재하 인공합성지진파(EQ7)



교직방향 재하 인공합성지진파(EQ8)

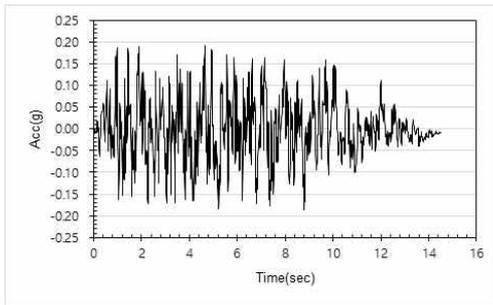


수직방향 재하 인공합성지진파(EQ9)

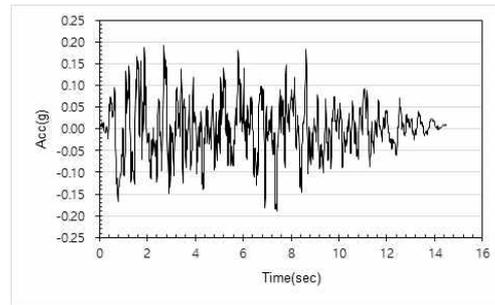


인공합성지진파 부합성검토

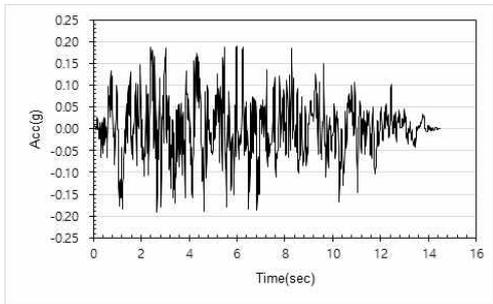
그림 3.3-5  $S_4$  지반 1000년 (80%) 인공합성지진파 세트3



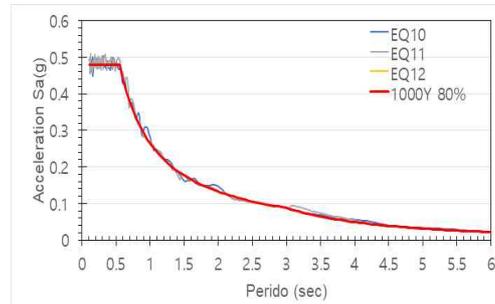
교축방향 재하 인공합성지진파(EQ10)



교직방향 재하 인공합성지진파(EQ11)



수직방향 재하 인공합성지진파(EQ12)



인공합성지진파 부합성검토

그림 3.3-6  $S_4$  지반 1000년 (80%) 인공합성지진파 세트4

### 3.3.2 부지특성 시간이력

부지특성 입력 지반운동의 경우 지반해석 프로그램을 사용하여 지반을 모델링 한 뒤 기반암 부분에 암반지반( $S_1$  지반) 지진재현주기 1000년 응답스펙트럼(80%)(그림 3.3-7)에 해당하는 스펙트럼을 삽입하여 기초 저면의 지진파를 산출한다. 재현주기는 1000년으로 하였으며 지진지속시간은 표 3.3-1의 지진규모 5.5이상 6.0미만, 상승시간 1, 강진지속시간 5.5, 하강시간 8을 적용하였다. 부지특성 응답이력해석으로 지표에 생성되는 가장 불리한 지진파로 해석하였다. 지진파 산출 결과 재현주기 1000년  $S_4$ (80%)와 비교하였을 때 단주기영역일 경우 부지특성 응답이력해석 지진파의 가속도가 크게 나왔고 장주기 영역으로 갈수록 작아졌다.

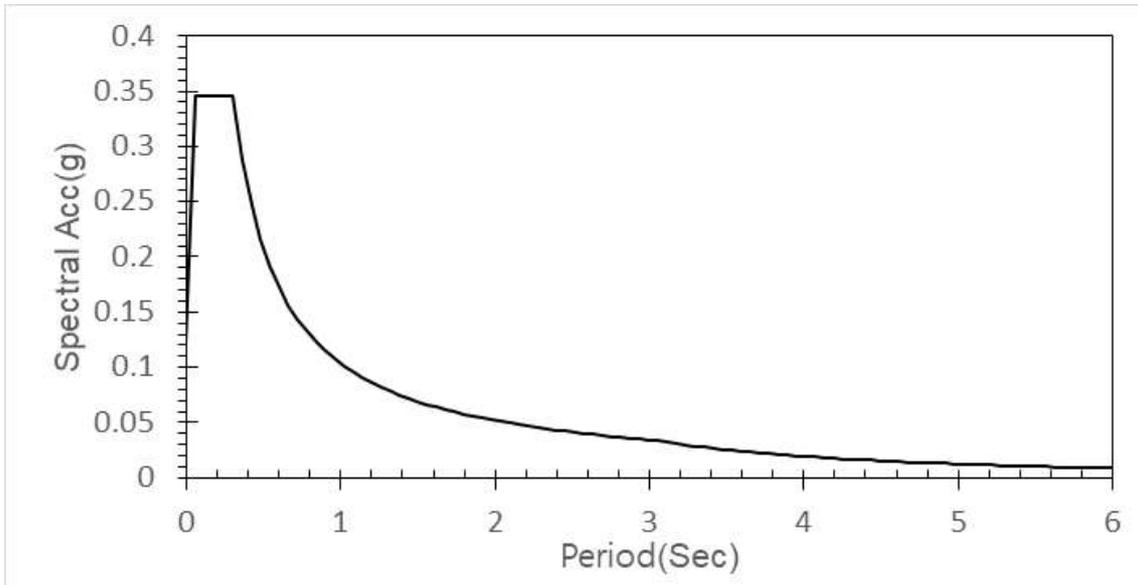


그림 3.3-7  $S_1$  지반 지진재현주기 1000년 응답스펙트럼(80%)

부지특성 응답이력해석에 해당하는 인공합성지진파는 그림 3.3-8 ~ 그림 3.3-11에 나타냈다.

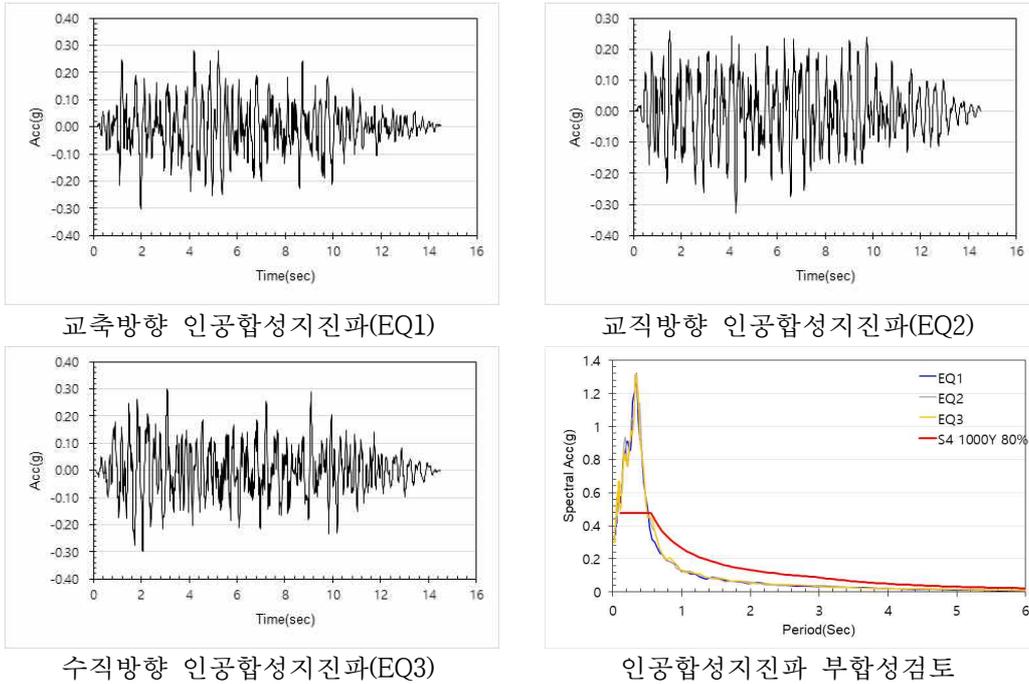


그림 3.3-8 지반 부지특성 인공합성지진파 세트1

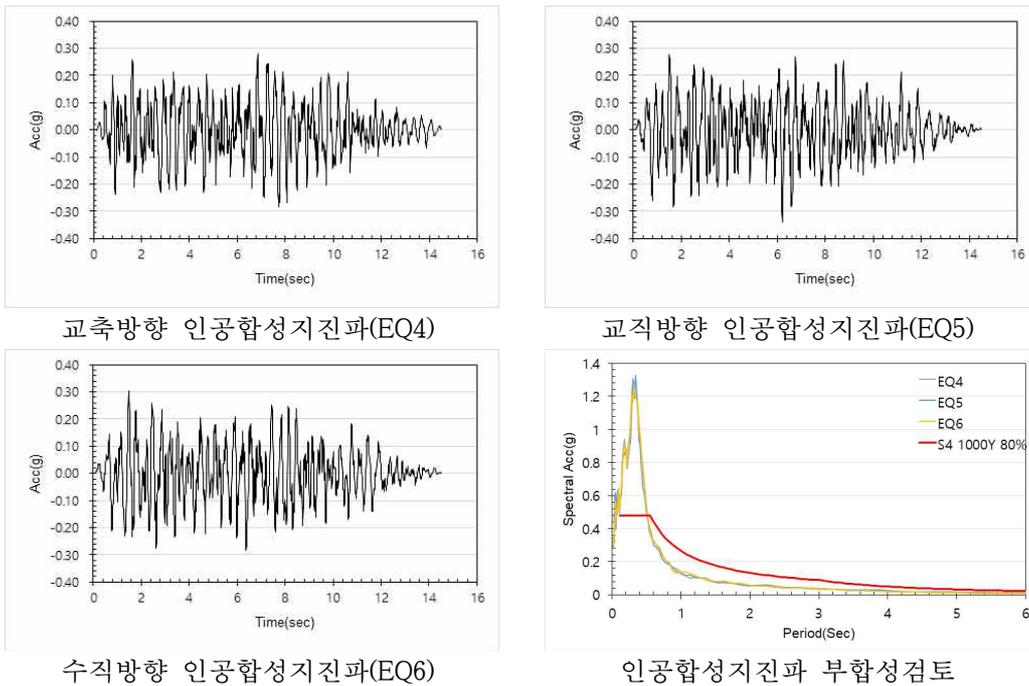
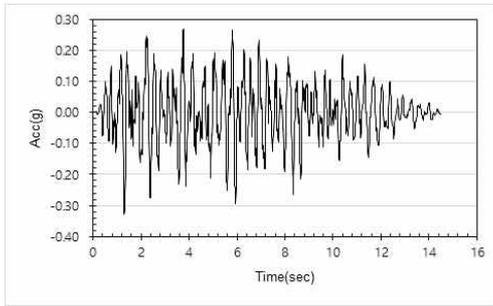
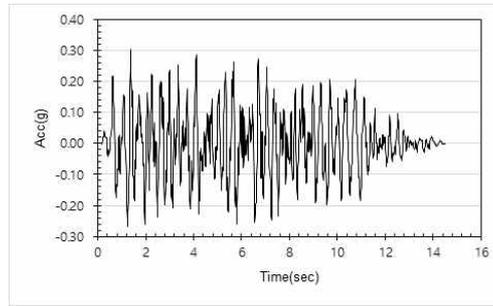


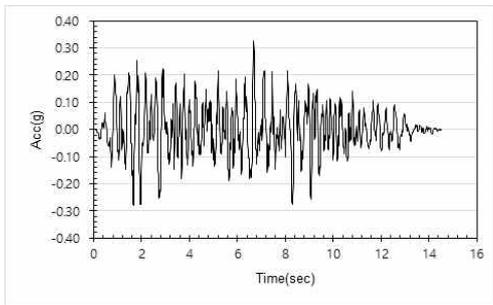
그림 3.3-9 지반 부지특성 인공합성지진파 세트2



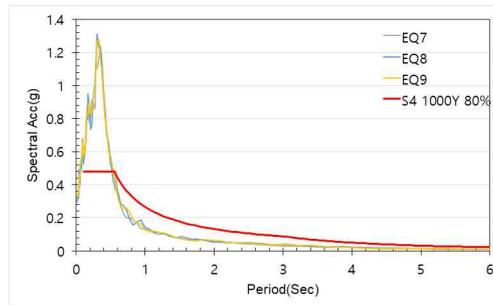
교축방향 인공합성지진파(EQ7)



교직방향 인공합성지진파(EQ8)

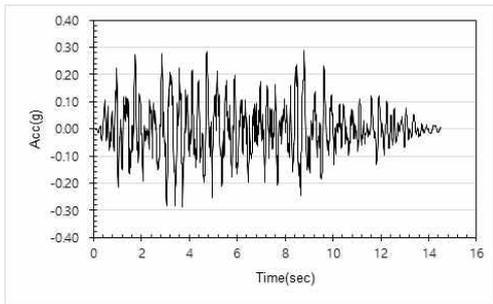


수직방향 인공합성지진파(EQ9)

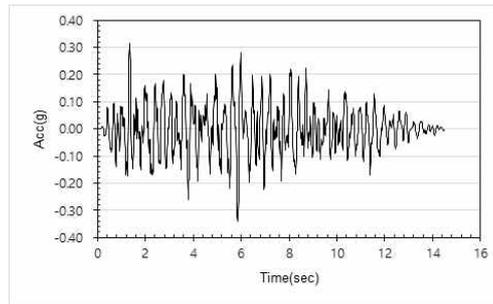


인공합성지진파 부합성검토

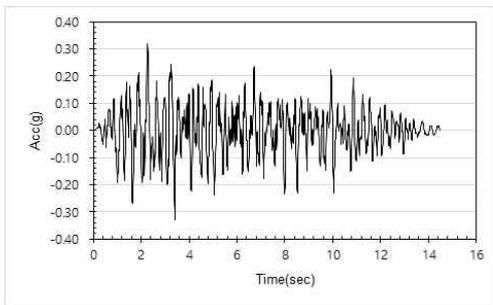
그림 3.3-10 지반 부지특성 인공합성지진파 세트3



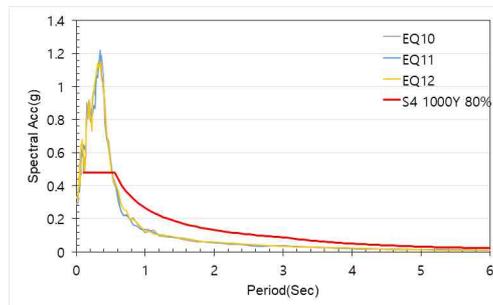
교축방향 인공합성지진파(EQ10)



교직방향 인공합성지진파(EQ11)



수직방향 인공합성지진파(EQ12)



인공합성지진파 부합성검토

그림 3.3-11 지반 부지특성 인공합성지진파 세트4

### 3.3.3 부지특성 다지점가진 시간이력

부지특성 다지점가진해석의 입력 지반운동은 A-W24 부지특성 응답이력해석으로 구한 기초 저면의 가속도를 변위로 변환(그림 3.3-12)하여 각각의 교각하단에 지반운동으로 입력한다.

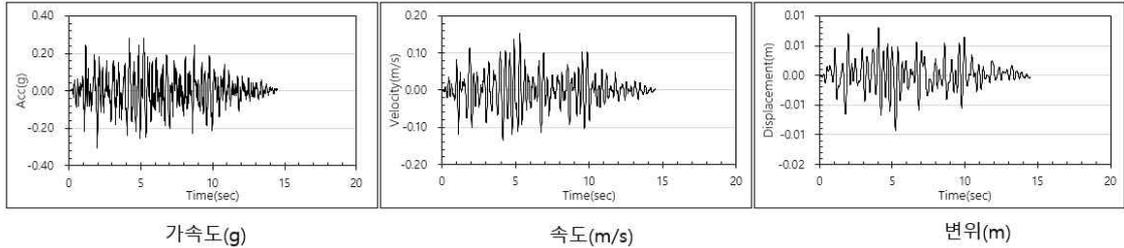


그림 3.3-12 W26(EQ1) 가속도, 속도, 변위 변환 그래프 (예시)

교대(A) 지반 부지특성(다지점) 인공합성지진파 세트는 그림 3.3-13 ~ 그림 3.3-16와 같다.

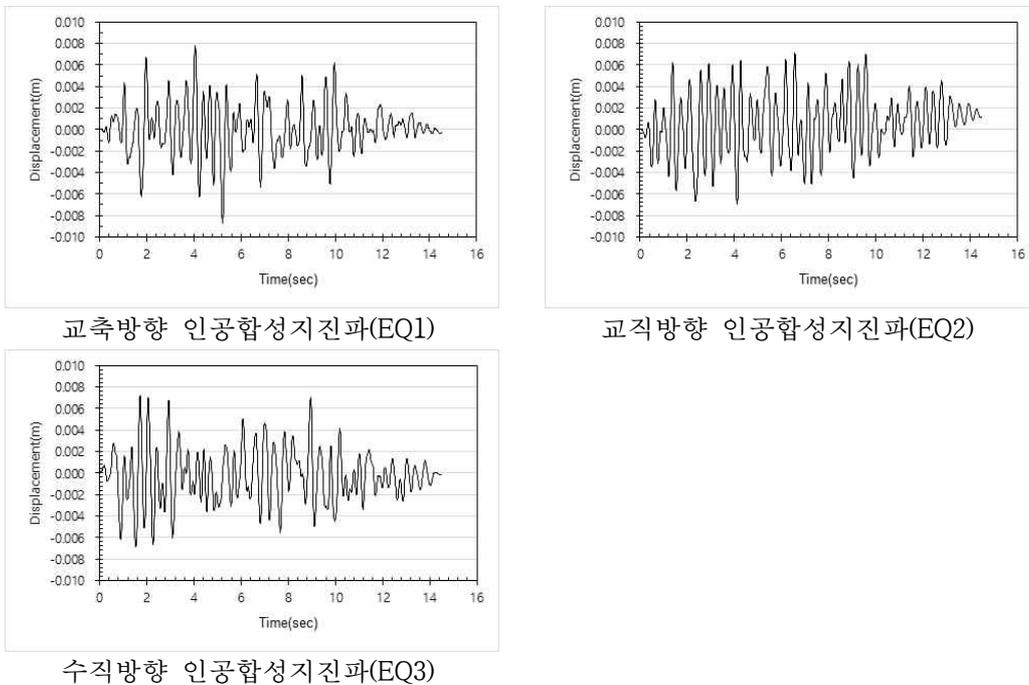
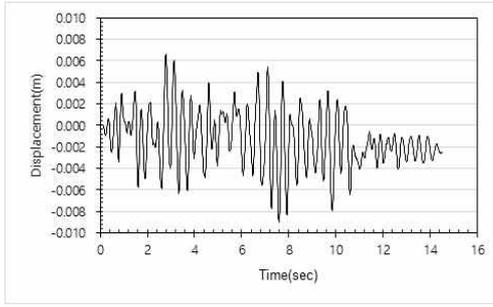
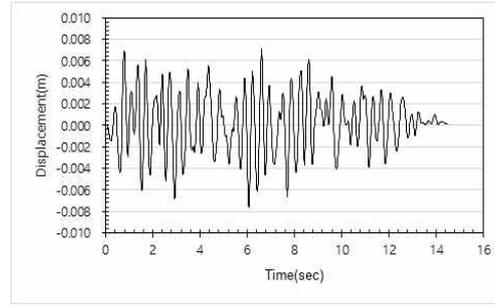


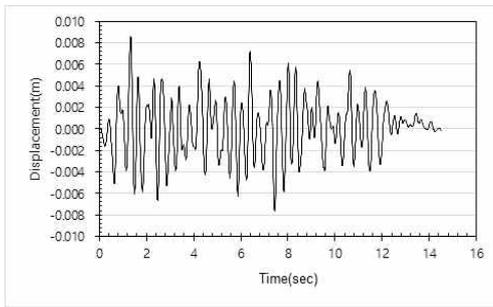
그림 3.3-13 지반 부지특성(다지점) 교대(A) 인공합성지진파 세트1-1



교축방향 인공합성지진파(EQ4)

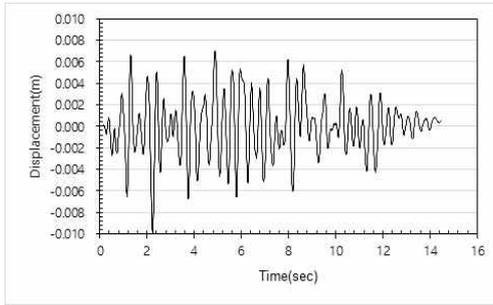


교직방향 인공합성지진파(EQ5)

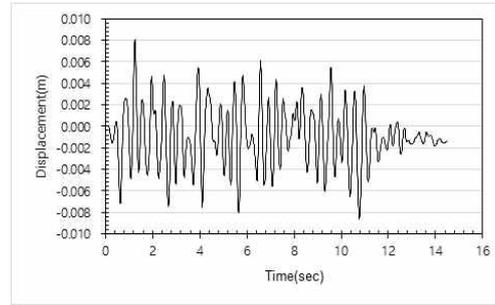


수직방향 인공합성지진파(EQ6)

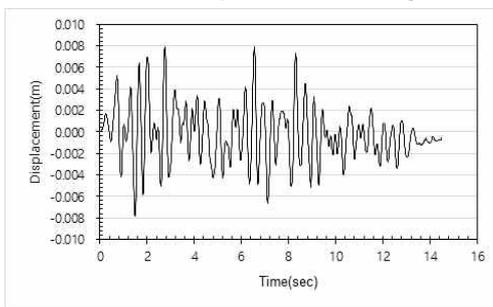
그림 3.3-14 지반 부지특성(다지점) 교대(A) 인공합성지진파 세트1-2



교축방향 인공합성지진파(EQ7)

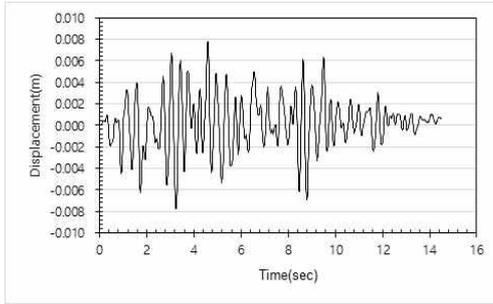


교직방향 인공합성지진파(EQ8)

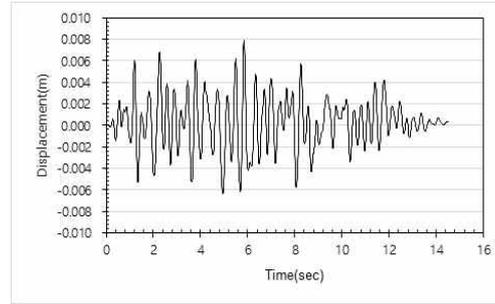


수직방향 인공합성지진파(EQ9)

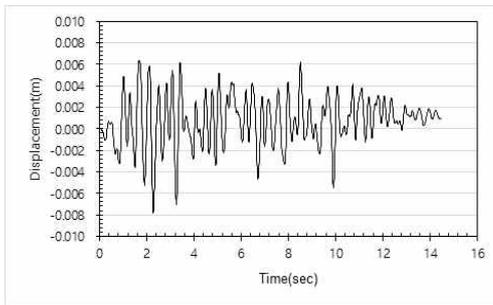
그림 3.3-15 지반 부지특성(다지점) 교대(A) 인공합성지진파 세트1-3



교축방향인공합성지진파(EQ10)



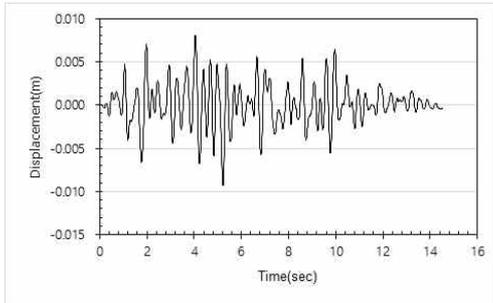
교직방향 인공합성지진파(EQ11)



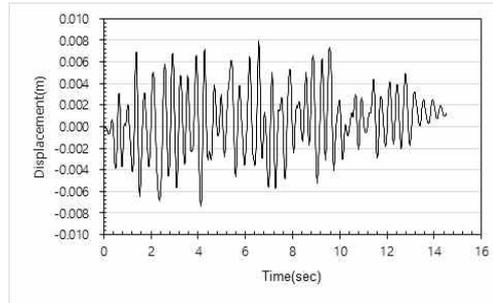
수직방향 인공합성지진파(EQ12)

그림 3.3-16 지반 부지특성(다지점) 교대(A) 인공합성지진파 세트1-4

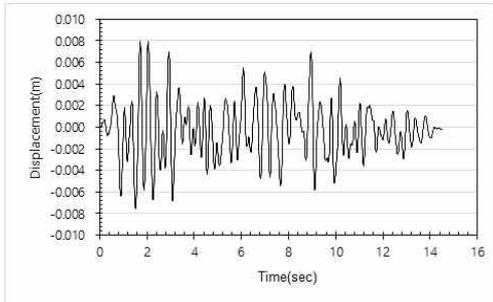
교각(W26) 지반 부지특성(다지점) 인공합성지진파 세트는 그림 3.3-17 ~ 그림 3.3-20와 같다.



교축방향 인공합성지진파(EQ1)

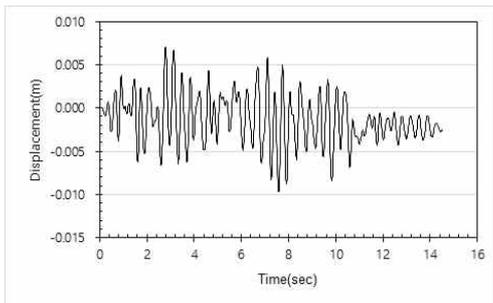


교직방향 인공합성지진파(EQ2)

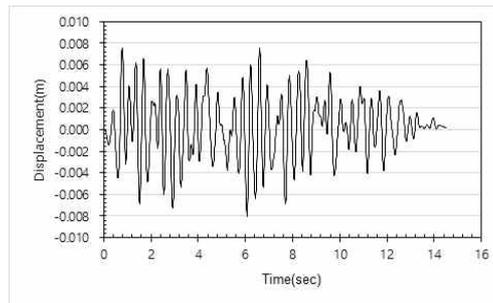


수직방향 인공합성지진파(EQ3)

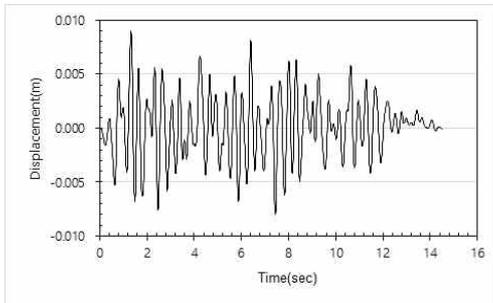
그림 3.3-17 지반 부지특성(다지점) 교각(W26) 인공합성지진파 세트2-1



교축방향 인공합성지진파(EQ4)

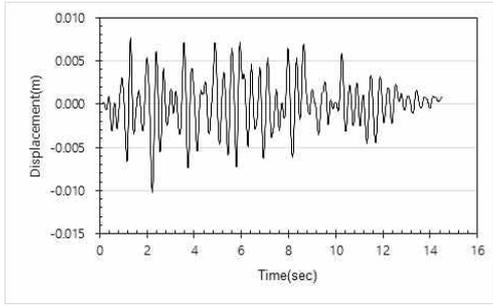


교직방향 인공합성지진파(EQ5)

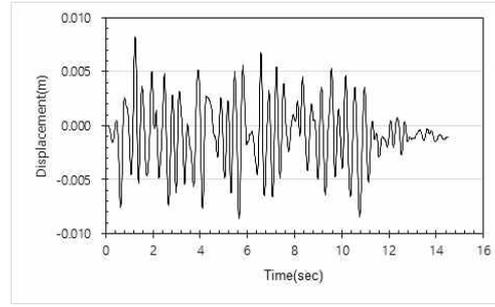


수직방향 인공합성지진파(EQ6)

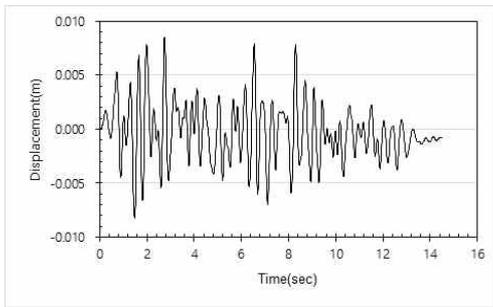
그림 3.3-18 지반 부지특성(다지점) 교각(W26) 인공합성지진파 세트2-2



교축방향 인공합성지진파(EQ7)

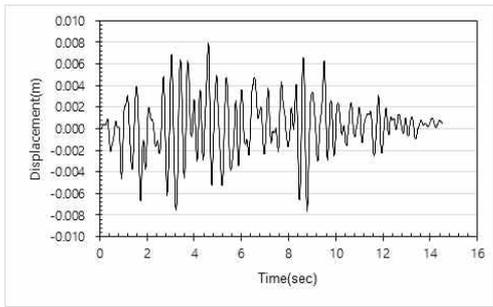


교직방향 인공합성지진파(EQ8)

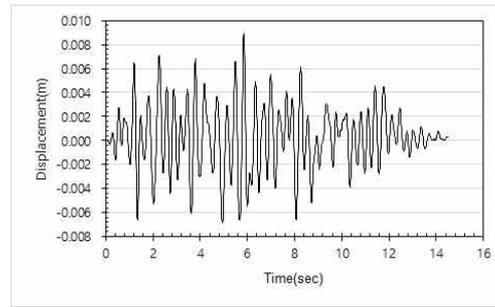


수직방향 인공합성지진파(EQ9)

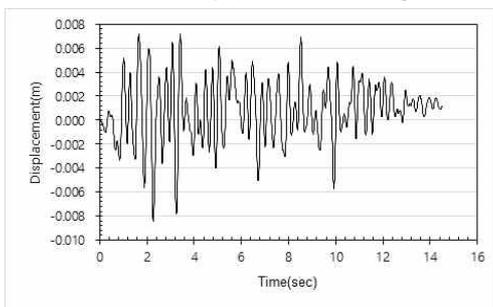
그림 3.3-19 지반 부지특성(다지점) 교각(W26) 인공합성지진파 세트2-3



교축방향 인공합성지진파(EQ10)



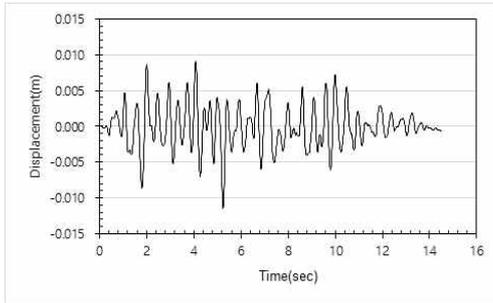
교직방향 인공합성지진파(EQ11)



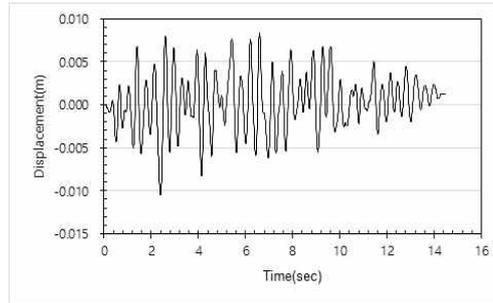
수직방향 인공합성지진파(EQ12)

그림 3.3-20 지반 부지특성(다지점) 교각(W26) 인공합성지진파 세트2-4

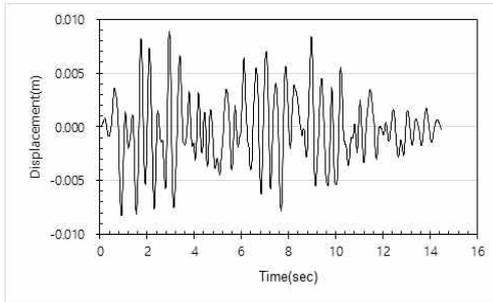
교각(W25) 지반 부지특성(다지점) 인공합성지진파 세트는 그림 3.3-21 ~ 그림 3.3-24과 같다.



교축방향 인공합성지진파(EQ1)

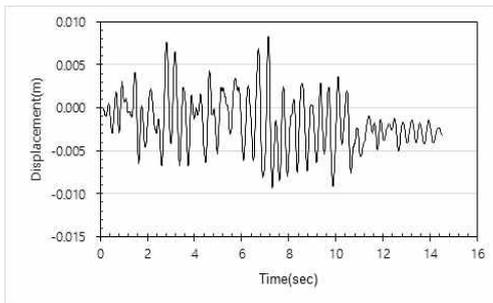


교직방향 인공합성지진파(EQ2)

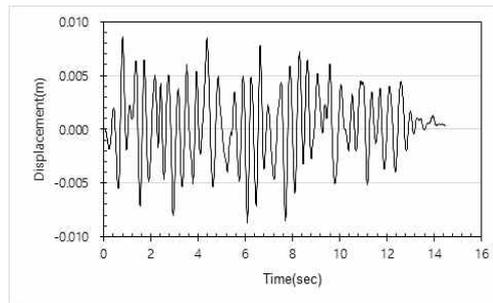


수직방향 인공합성지진파(EQ3)

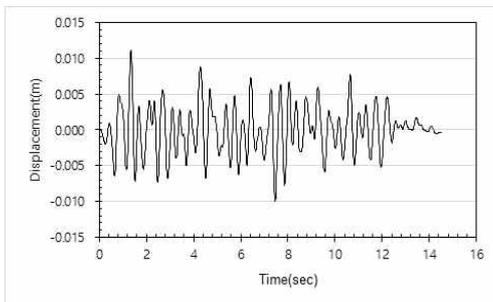
그림 3.3-21 지반 부지특성(다지점) 교각(W25) 인공합성지진파 세트3-1



교축방향 인공합성지진파(EQ4)

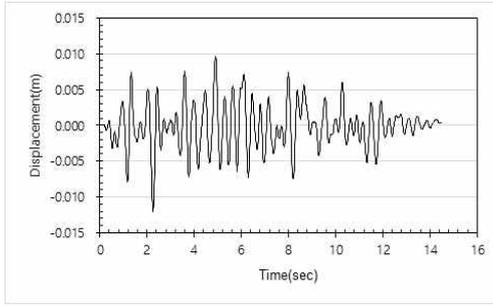


교직방향 인공합성지진파(EQ5)

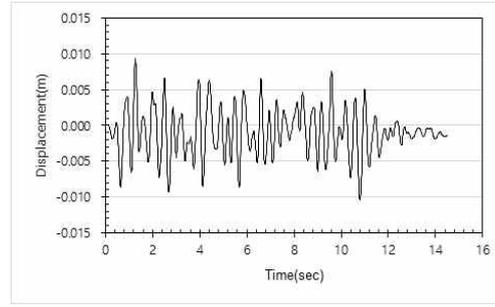


수직방향 인공합성지진파(EQ6)

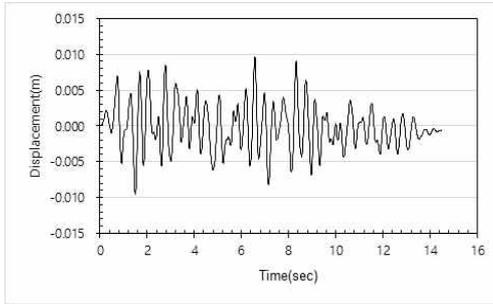
그림 3.3-22 지반 부지특성(다지점) 교각(W25) 인공합성지진파 세트3-2



교축방향 재인공합성지진파(EQ7)

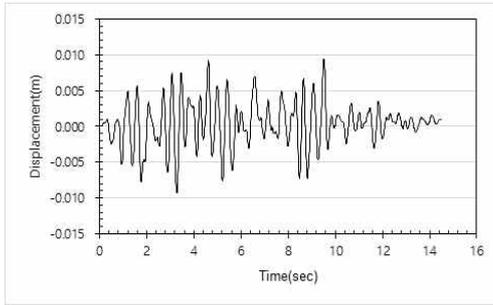


교직방향 인공합성지진파(EQ8)

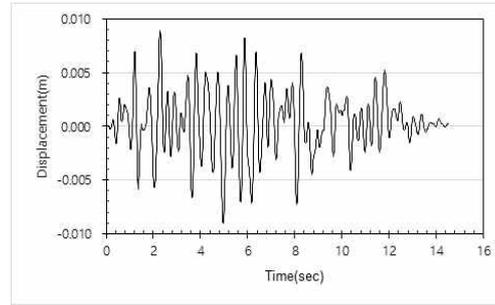


수직방향 인공합성지진파(EQ9)

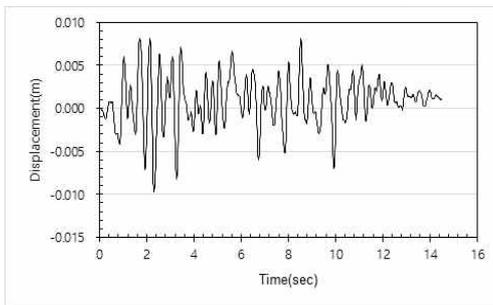
그림 3.3-23 지반 부지특성(다지점) 교각(W25) 인공합성지진파 세트3-3



교축방향 인공합성지진파(EQ10)



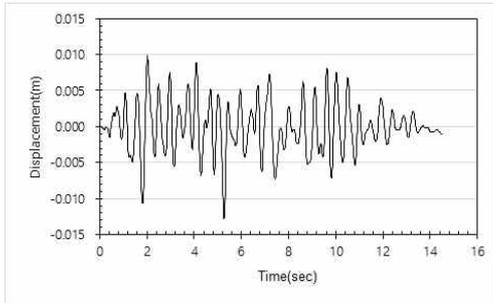
교직방향 인공합성지진파(EQ11)



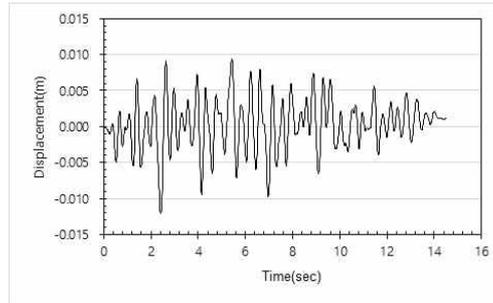
수직방향 인공합성지진파(EQ12)

그림 3.3-24 지반 부지특성(다지점) 교각(W25) 인공합성지진파 세트3-4

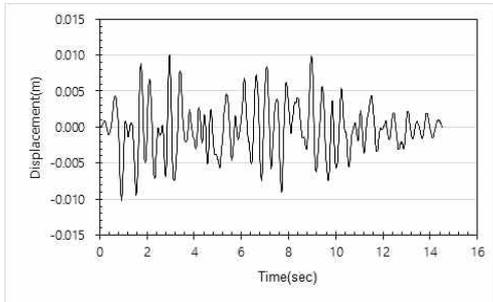
교각(W24) 지반 부지특성(다지점) 인공합성지진파 세트는 그림 3.3-25 ~ 그림 3.3-28과 같다.



교축방향 인공합성지진파(EQ1)

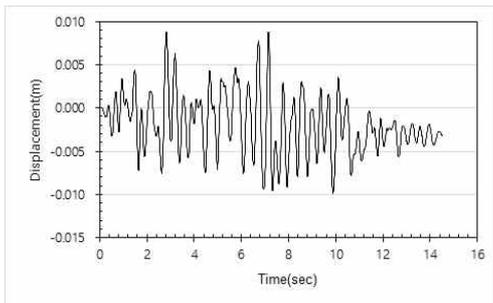


교직방향 인공합성지진파(EQ2)

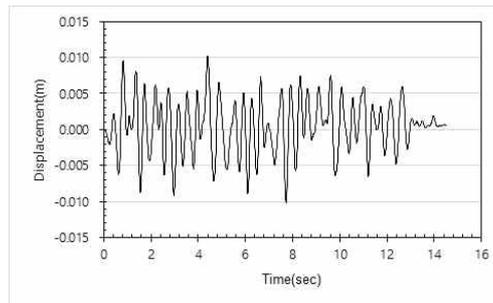


수직방향 인공합성지진파(EQ3)

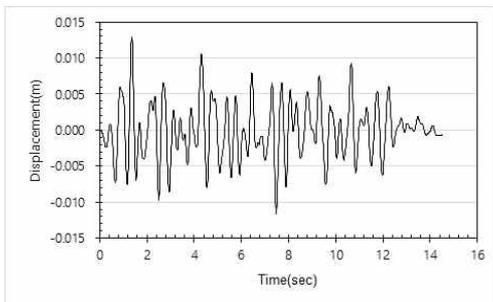
그림 3.3-25 지반 부지특성(다지점) 교각(W24) 인공합성지진파 세트4-1



교축방향 인공합성지진파(EQ4)

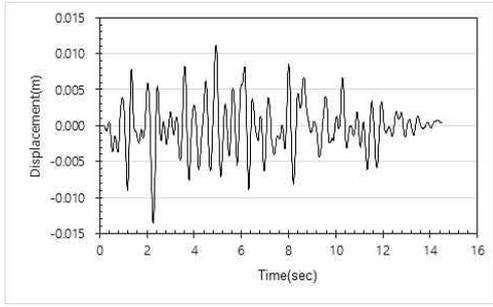


교직방향 인공합성지진파(EQ5)

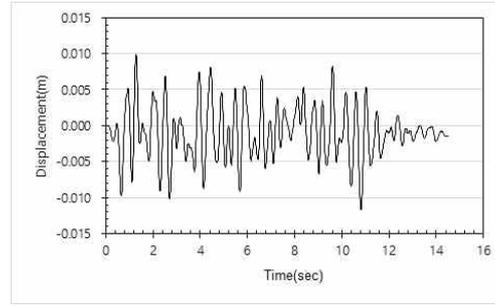


수직방향 인공합성지진파(EQ6)

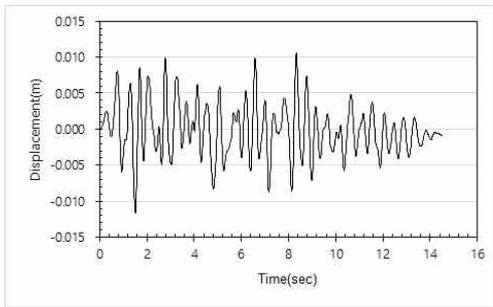
그림 3.3-26 지반 부지특성(다지점) 교각(W24) 인공합성지진파 세트4-2



교축방향 인공합성지진파(EQ7)

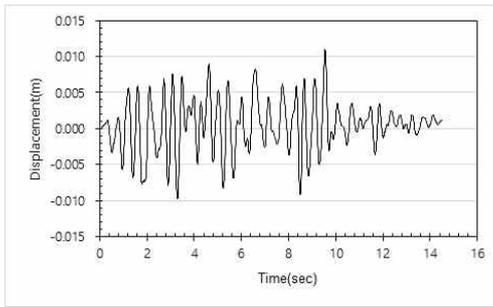


교직방향 인공합성지진파(EQ8)

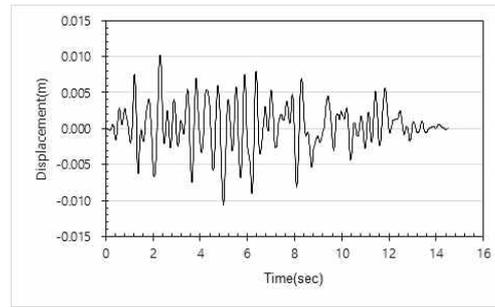


수직방향 인공합성지진파(EQ9)

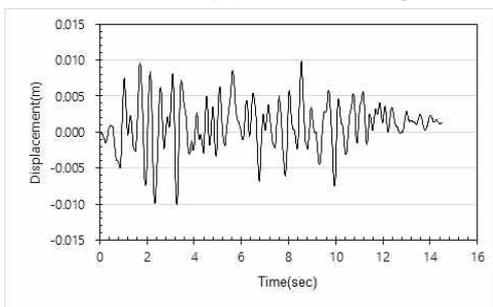
그림 3.3-27 지반 부지특성(다지점) 교각(W24) 인공합성지진파 세트4-3



교축방향 인공합성지진파(EQ10)



교직방향 인공합성지진파(EQ11)



수직방향 인공합성지진파(EQ12)

그림 3.3-28 지반 부지특성(다지점) 교각(W24) 인공합성지진파 세트4-4

### 3.3.4 입력지반운동의 스펙트럼 특성 비교, 분석

스펙트럼 부합 시간이력, 부지특성 시간이력, 부지특성 다지점가진 시간이력의 스펙트럼을 분석하고자 한다. 먼저, 일반이력해석 설계스펙트럼과 부지특성 시간이력의 스펙트럼을 그림 3.3-29에 나타냈다.

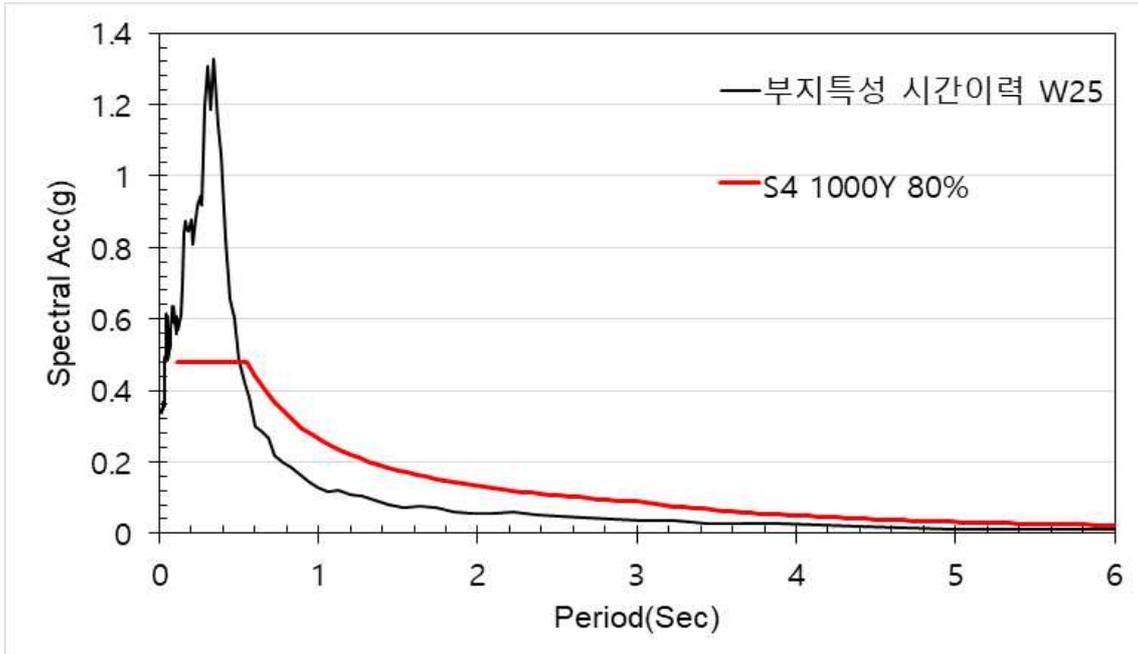


그림 3.3-29 일반이력해석 설계스펙트럼과 부지특성 시간이력의 스펙트럼

일반이력해석의 설계스펙트럼과 비교하였을 때 부지특성 시간이력 스펙트럼의 응답가속도 최대값이 2.77배로 단주기영역에서 큰 값을 나타냈다. 0.53sec를 기준으로 단주기 영역에서는 부지특성 시간이력 스펙트럼의 응답가속도가 큰 값을 나타냈고, 장주기 영역에서는 일반이력해석 설계스펙트럼의 응답가속도가 큰 값을 나타냈다. 교량의 주기는 X방향으로 0.66sec, Y방향으로 0.40sec, Z방향으로 0.39sec를 가지고 있으므로 탄성지진력을 비교하는 경우 부지특성 시간이력이 X방향으로는 작은 응답가속도를 가지고 Y, Z방향으로는 큰 응답가속도를 가진다.

다음으로, 스펙트럼 부합 시간이력의 스펙트럼과 부지특성 다지점가진 시력이력의 스펙트럼을 그림 3.3-30에 나타냈다.

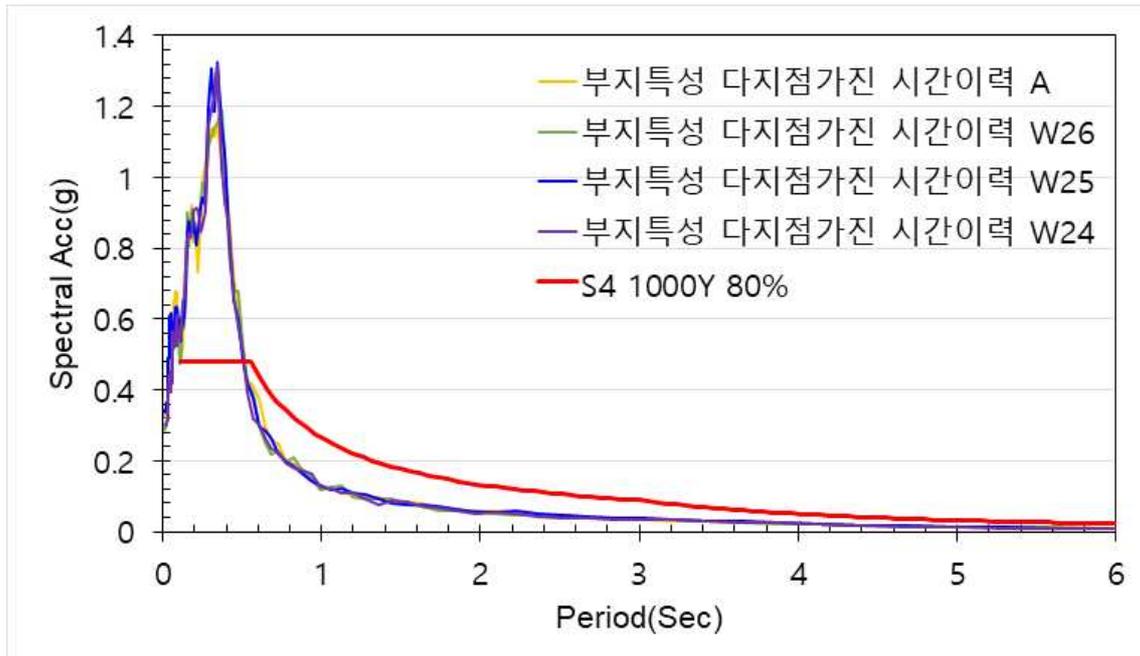


그림 3.3-30 일반이력해석 설계스펙트럼과 부지특성 다지점가진 시간이력의 스펙트럼

일반이력해석의 설계스펙트럼과 비교하였을 때 부지특성 다지점가진 시간이력 스펙트럼의 응답가속도 최댓값(표 3.3-2)이 각각 A는 2.40배, W26은 2.48배, W25는 2.77배, W24는 2.76 배로 단주기 영역에서 모두 큰 응답가속도를 나타냈다. 부지특성 시간이력 스펙트럼의 응답가속도와 마찬가지로 0.53sec를 기준으로 단주기 영역에서는 부지특성 다지점가진 시간이력 스펙트럼의 응답가속도가 큰 값을 나타냈고, 장주기 영역에서는 일반이력해석 설계스펙트럼의 응답가속도가 큰 값을 나타냈다. 교량의 주기는 X방향으로 0.66sec, Y방향으로 0.40sec, Z방향으로 0.39sec를 가지고 있으므로 탄성지진력을 비교하는 경우 다지점가진 시간이력이 X방향으로는 작은 응답가속도를 가지고 Y, Z방향으로는 큰 응답가속도를 가진다.

표 3.3-2 일반이력해석과 부지특성 다지점가진 시간이력 스펙트럼의 최대 응답가속도 및 비

항 목	설계스펙트럼( $S_4$ 지반)①	다지점가진 스펙트럼②			
		A	W26	W25	W24
최대 응답가속도(g)	0.4785	1.1477	1.1887	1.3259	1.3206
비율(②/①)	1.00	2.40	2.48	2.77	2.76

## 제 4장 해석기법에 따른 교량의 지진거동특성

### 4.1 보강전 교량

#### 4.1.1 보강전 교량의 고정단 교각 지진거동특성

보강전 교량의 일반 응답이력해석에 대한 고정단 교각의 축력, 전단력, 모멘트는 그림 4.1-1 ~ 그림 4.1-4와 같다.

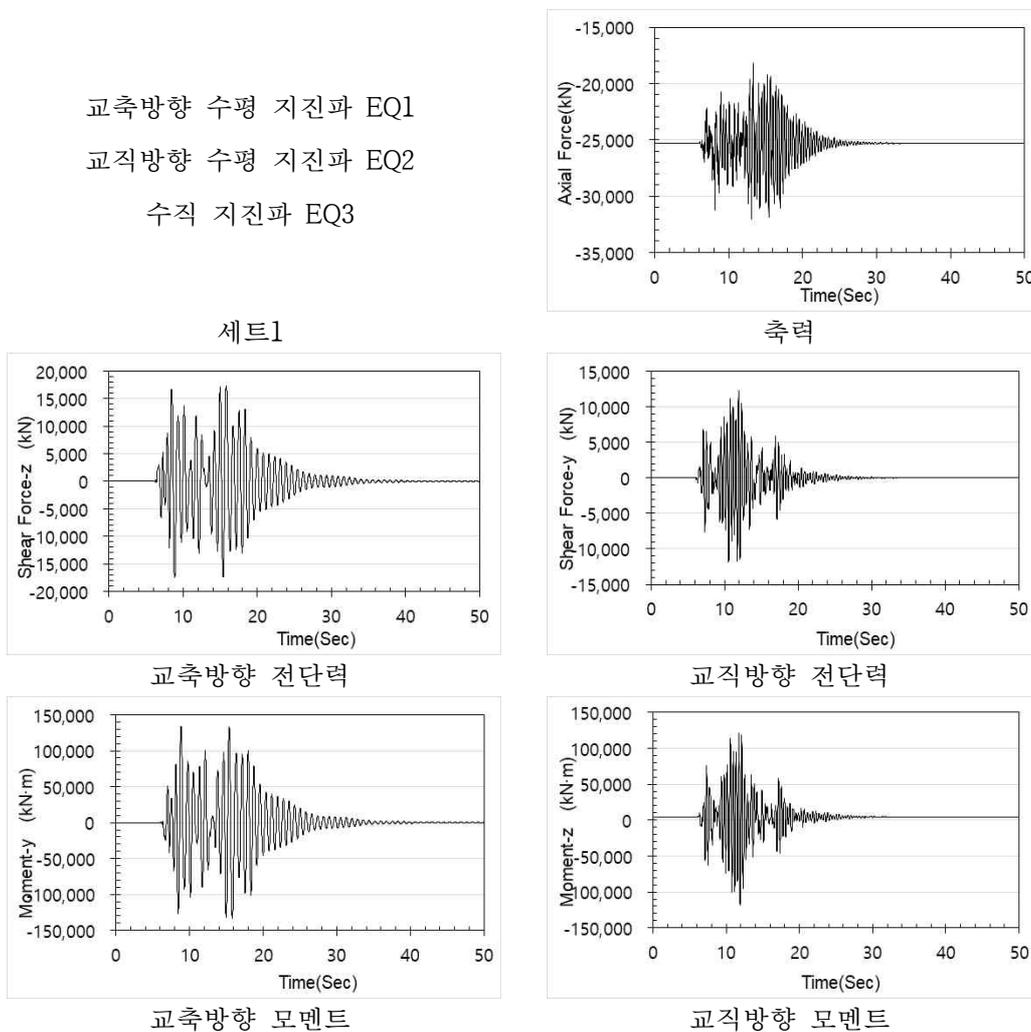
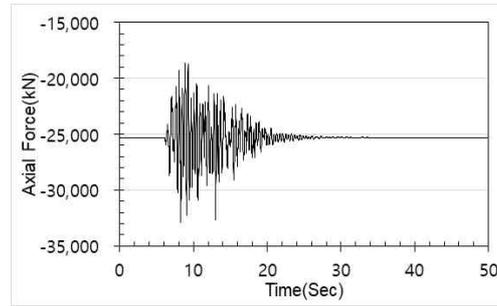
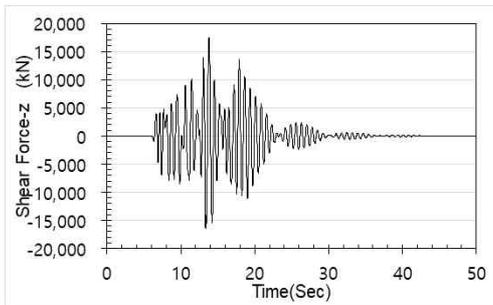


그림 4.1-1 보강전 교량의 세트1 고정단 교각 응답 그래프

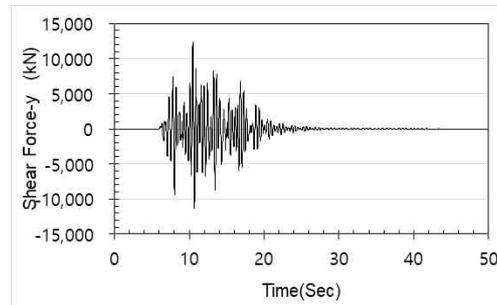
교축방향 수평 지진파 EQ4  
 교직방향 수평 지진파 EQ5  
 수직 지진파 EQ6



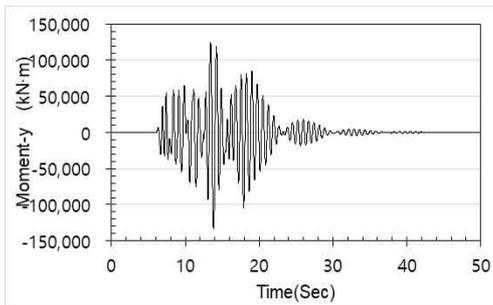
축력



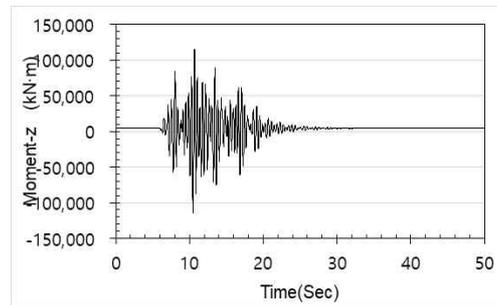
교축방향 전단력



교직방향 전단력



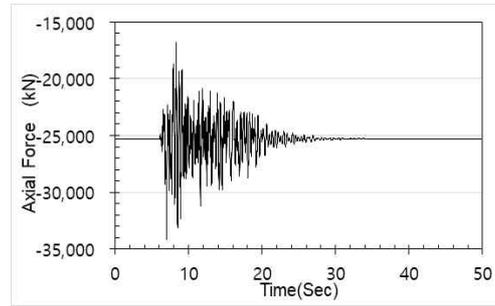
교축방향 모멘트



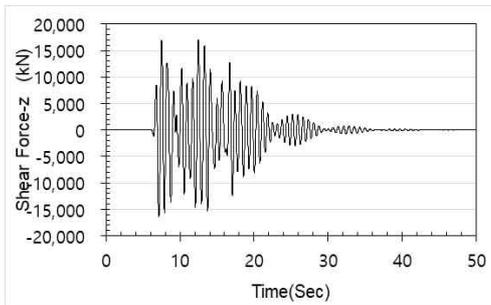
교직방향 모멘트

그림 4.1-2 보강전 교량의 세트2 고정단 교각 응답 그래프

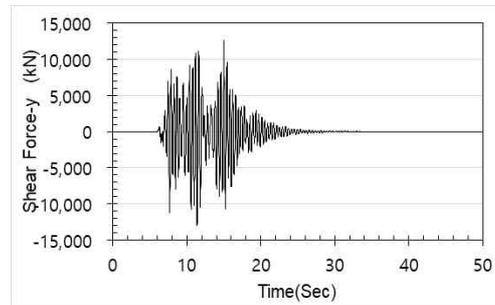
교축방향 수평 지진파 EQ7  
 교직방향 수평 지진파 EQ8  
 수직 지진파 EQ9



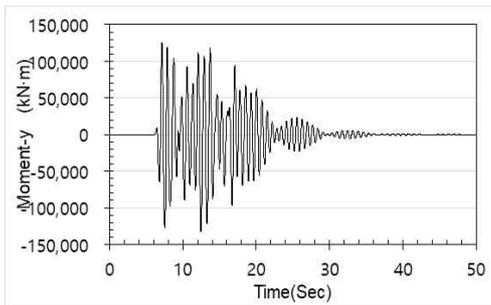
축력



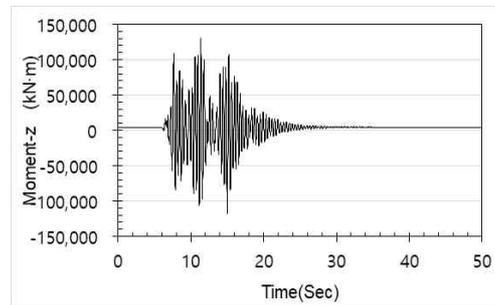
교축방향 전단력



교직방향 전단력



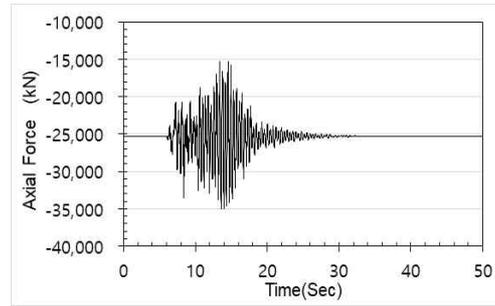
교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

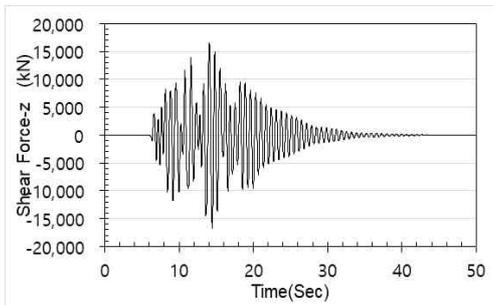
그림 4.1-3 보강전 교량의 세트3 고정단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진파 EQ10  
 교직방향 수평 지진파 EQ11  
 수직 지진파 EQ12

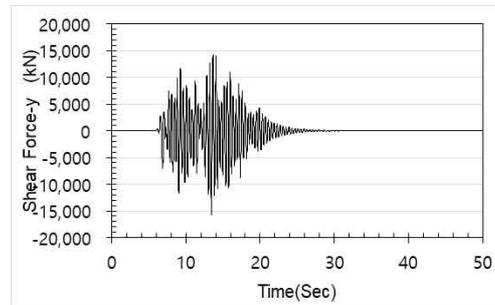


축력

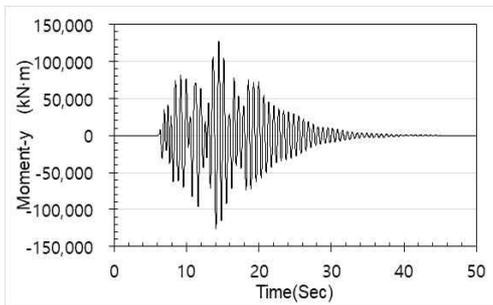
세트1



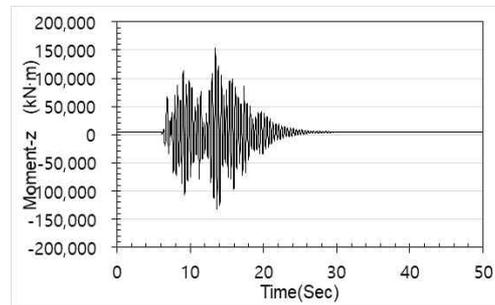
교축방향 전단력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

그림 4.1-4 보강전 교량의 세트4 고정단 교각 응답 그래프

세트 1~4까지 보강전 교량의 일반 응답이력해석을 통한 교축, 교직에 대한 축력, 전단력, 모멘트의 응답값(각 세트의 최대값)은 표 4.1-1과 같다.

표 4.1-1 보강전 교량의 일반 응답이력해석 고정단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN·m)
축력 최대(교축)	<b>35053.70</b>	13654.60	101530.00
축력 최대(교직)	<b>35053.70</b>	8330.37	67741.30
전단력 최대(교축)	23281.80	<b>17515.60</b>	133331.00
전단력 최대(교직)	20799.30	<b>15760.20</b>	153804.00
모멘트 최대(교축)	29639.00	17366.30	<b>133563.00</b>
모멘트 최대(교직)	20799.30	15760.20	<b>153804.00</b>

#### 4.1.2 보강전 교량의 가동단 교각 지진거동특성

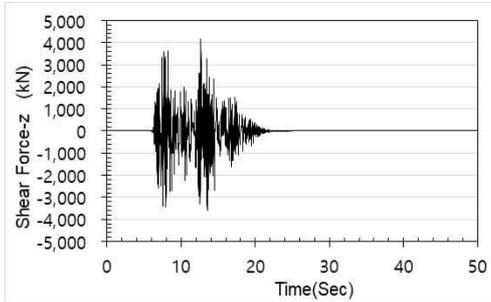
보강전 교량의 일반 응답이력해석에 대한 가동단 교각의 축력, 전단력, 모멘트는 그림 4.1-5 ~ 그림 4.1-8과 같다.

교축방향 수평 지진과 EQ1

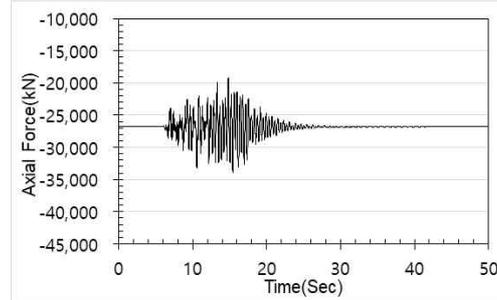
교직방향 수평 지진과 EQ2

수직 지진과 EQ3

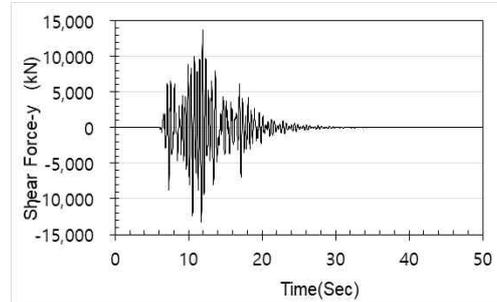
세트1



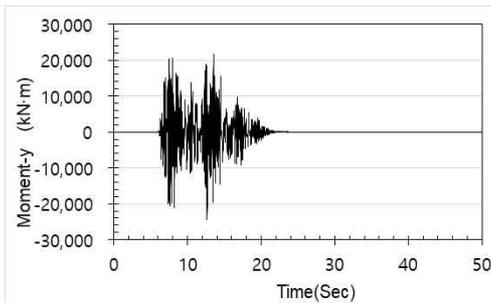
교축방향 전단력



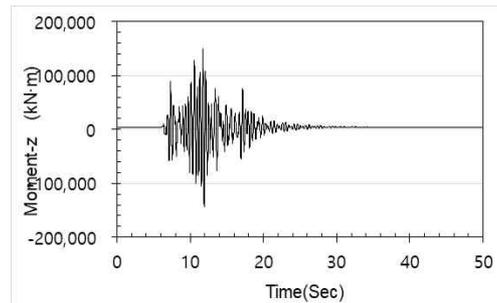
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



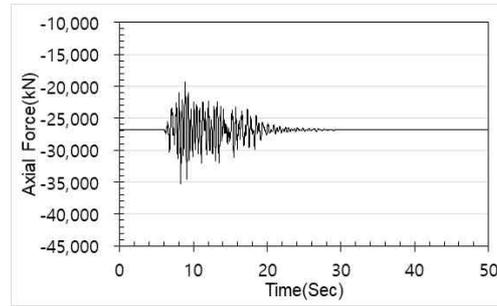
교직방향 모멘트

그림 4.1-5 보강전 교량의 세트1 가동단 교각 응답 그래프

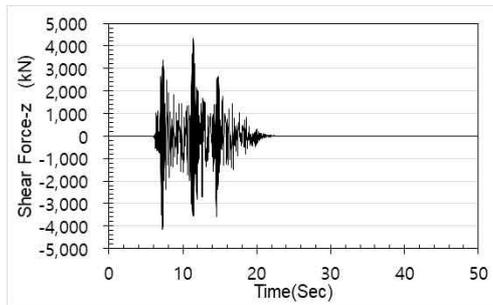
교축방향 수평 지진파 EQ4

교직방향 수평 지진파 EQ5

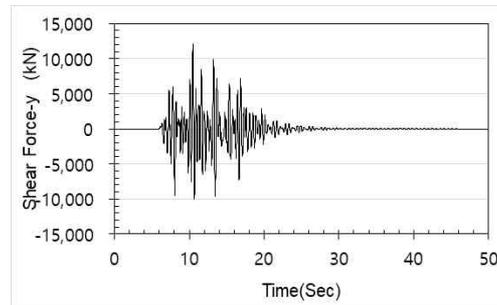
수직 지진파 EQ6



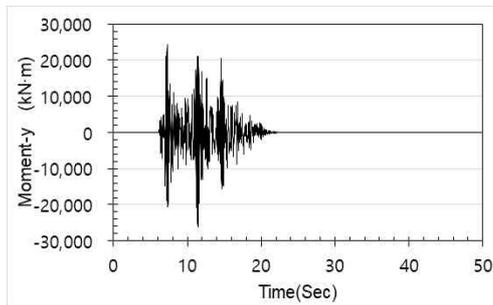
축력



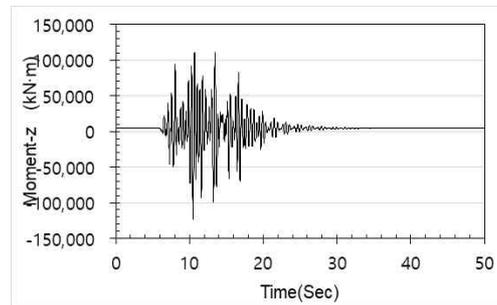
교축방향 전단력



교직방향 전단력



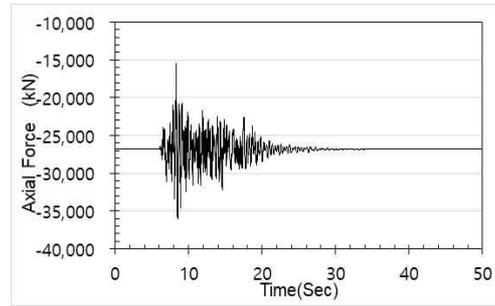
교축방향 모멘트



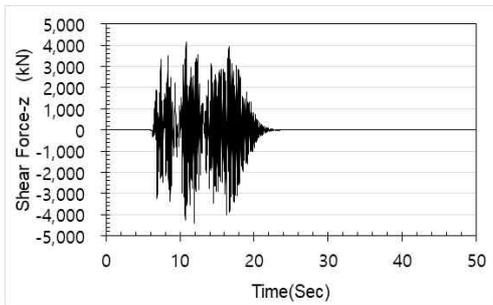
교직방향 모멘트

그림 4.1-6 보강전 교량의 세트2 가동단 교각 응답 그래프

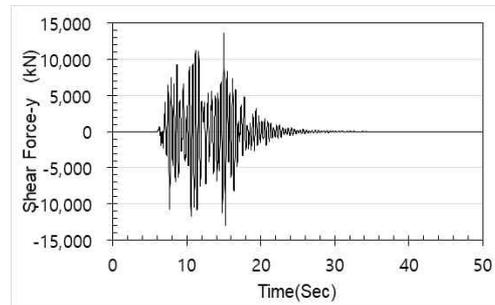
교축방향 수평 지진파 EQ7  
 교직방향 수평 지진파 EQ8  
 수직 지진파 EQ9



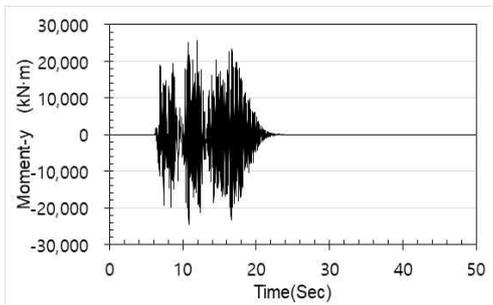
축력



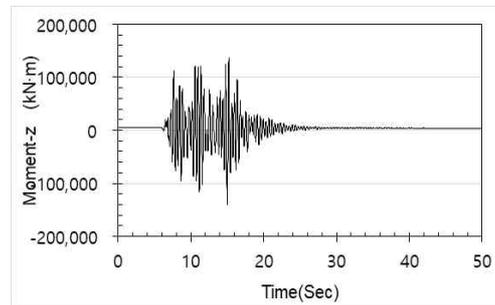
교축방향 전단력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

그림 4.1-7 보강전 교량의 세트3 가동단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진파 EQ10  
 교직방향 수평 지진파 EQ11  
 수직 지진파 EQ12

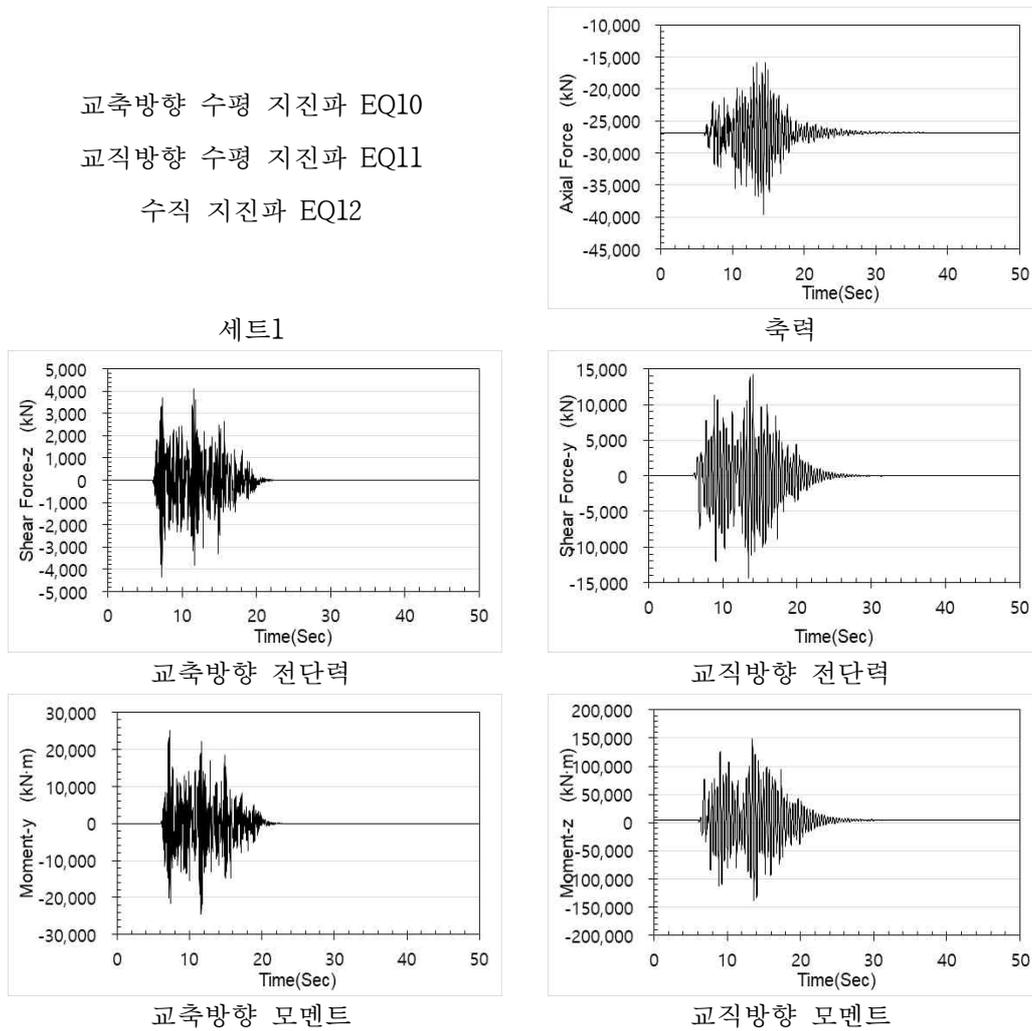


그림 4.1-8 보강전 교량의 세트4 가동단 교각 응답 그래프

세트 1~4까지 보강전 교량의 일반 응답이력해석을 통한 교축, 교직에 대한 축력, 전단력, 모멘트의 응답값(각 세트의 최대값)은 표 4.1-2와 같다.

표 4.1-2 보강전 교량의 일반 응답이력해석 가동단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN·m)
축력 최대(교축)	<b>39611.72</b>	1098.63	5332.37
축력 최대(교직)	<b>39611.72</b>	5226.95	46933.24
전단력 최대(교축)	24113.35	<b>4389.12</b>	25202.01
전단력 최대(교직)	21758.96	<b>14308.83</b>	148719.10
모멘트 최대(교축)	26290.22	4346.72	<b>26129.14</b>
모멘트 최대(교직)	26402.93	13218.42	<b>149433.80</b>

### 4.1.3 보강전 교량의 상부구조 응답변위

보강전 교량의 상부구조의 변위는 낙교방지를 위한 받침지지길이와 받침의 변위를 파악하기 위해 그림 4.1-9에 나타나있는 노드에 대해 응답변위를 구하였다.

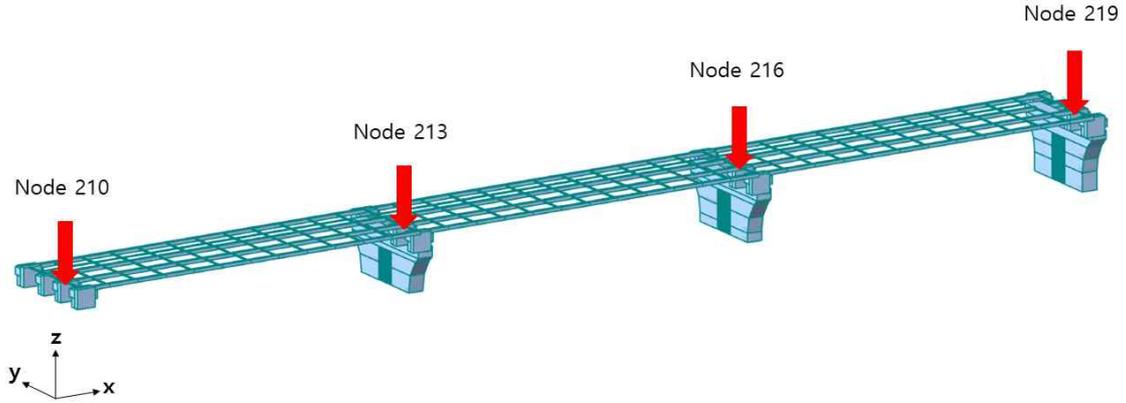


그림 4.1-9 상부구조 응답변위 측정 위치

보강전 교량의 일반 응답이력해석 시 상부구조의 응답변위는 다음 표 4.1-3과 같다.

표 4.1-3 보강전 교량의 일반 응답이력해석 상부구조 응답변위

지진과 세트	Node	일반 응답이력해석별 응답변위		
		x방향(교축, mm)	y방향(교직, mm)	z방향(수직, mm)
TH1	210	-69.4804	0.035326	-0.01155
	213	61.66549	-10.8337	-3.983
	216	-65.2836	-12.8887	-4.54811
	219	69.8095	4.798283	-2.39334
TH2	210	-60.634	0.035533	-0.0112
	213	-48.9784	-10.4917	-4.20643
	216	-56.7594	-11.1664	-4.32803
	219	48.7321	-5.08073	-2.6634
TH3	210	-63.6117	-0.03087	-0.01168
	213	-51.6043	11.70035	-4.48755
	216	-60.7229	-12.7002	-4.74847
	219	53.03596	-7.04793	-2.92196
TH4	210	-54.3294	0.034104	-0.01145
	213	-42.4564	13.83474	-4.7232
	216	-50.5667	13.3656	-5.38828
	219	48.61511	-4.76259	-2.58872

## 4.2 전단키 설치 교량(W25 전단키 부착)

### 4.2.1 전단키 설치 교량의 고정단 교각 지진거동특성

전단키 설치 교량의 일반 응답이력해석(이하 ‘응답이력해석’), 부지특성 응답이력해석(이하 ‘부지응답해석’), 부지특성 다지점가진 응답이력해석(이하 ‘다지점가진해석’)에 대한 고정단 교각의 축력, 전단력, 모멘트는 그림 4.2-1 ~ 4.2-4와 같다.

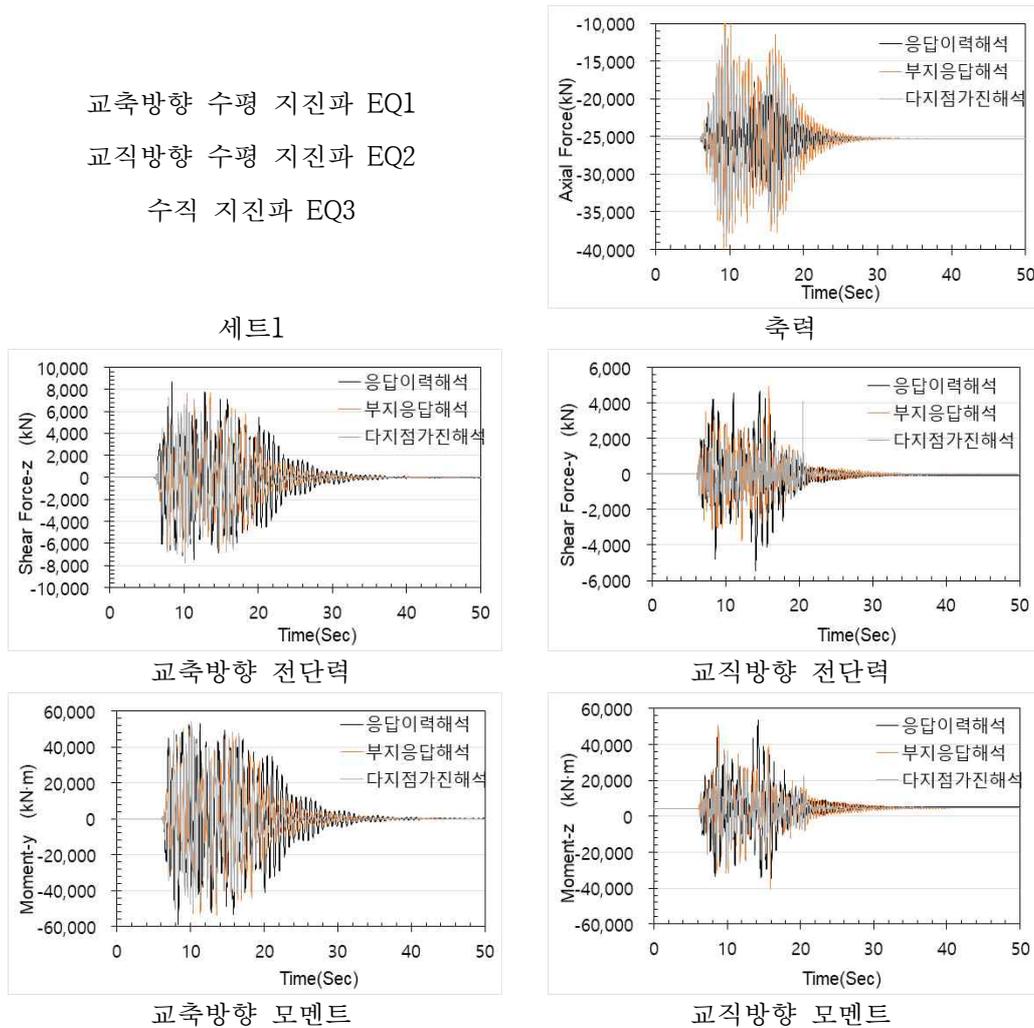
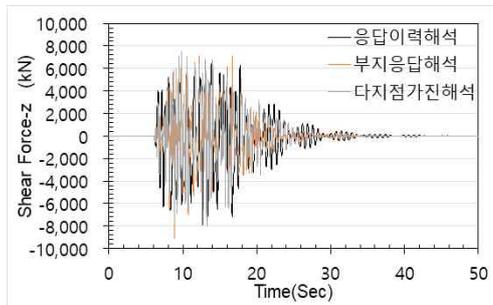


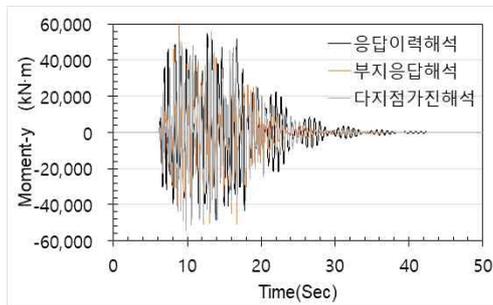
그림 4.2-1 전단키 설치 교량의 세트1 고정단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ4  
 교직방향 수평 지진과 EQ5  
 수직 지진과 EQ6

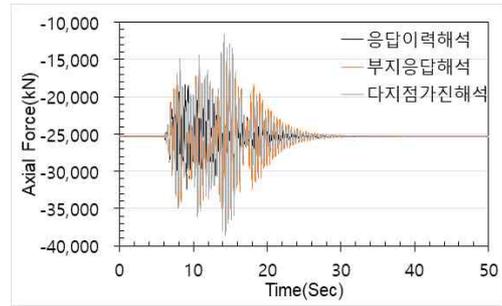
세트2



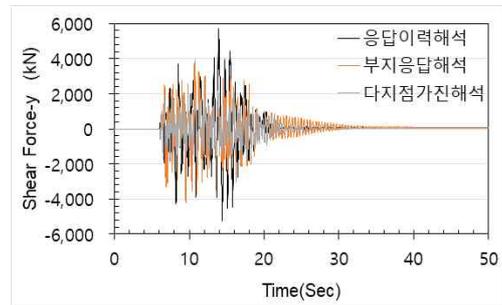
교축방향 전단력



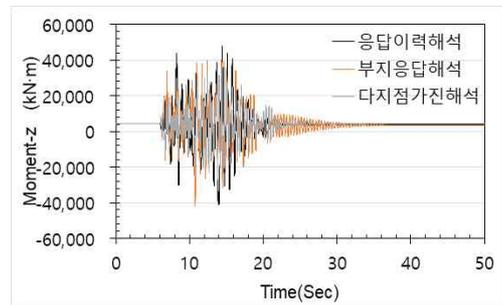
교축방향 모멘트



축력



교직방향 전단력

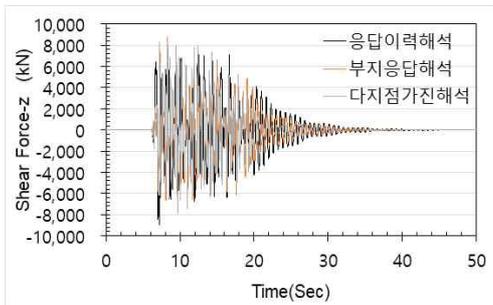


교직방향 모멘트

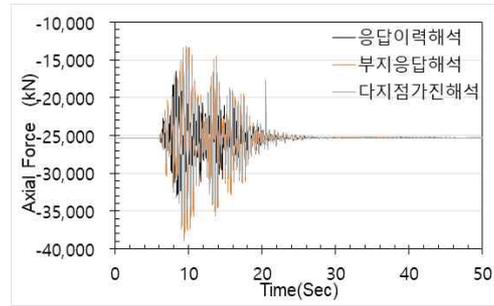
그림 4.2-2 전단키 설치 교량의 세트2 고정단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진파 EQ7  
 교직방향 수평 지진파 EQ8  
 수직 지진파 EQ9

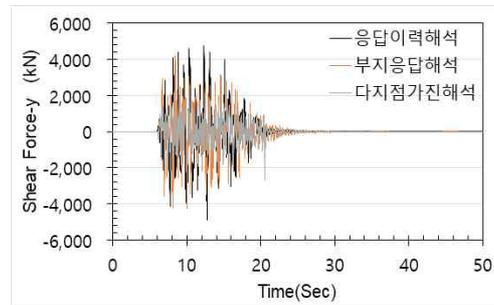
세트3



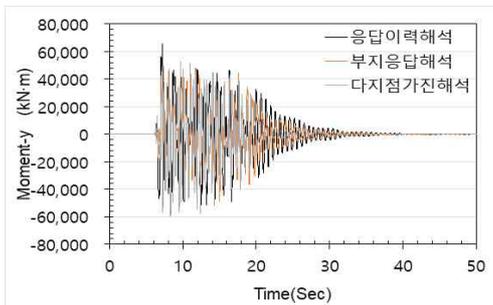
교축방향 전단력



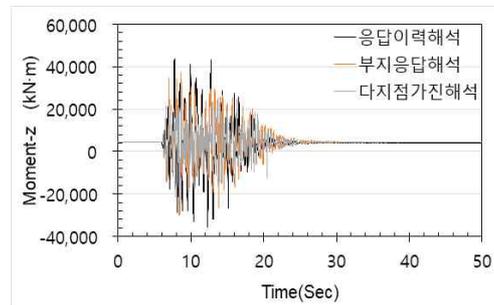
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

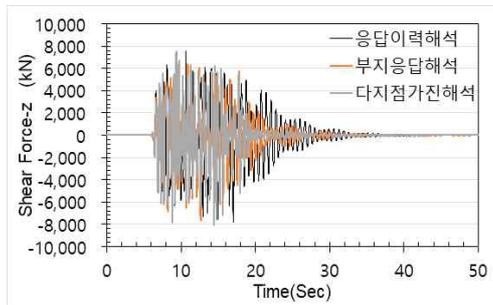
그림 4.2-3 전단기 설치 교량의 세트3 고정단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ10

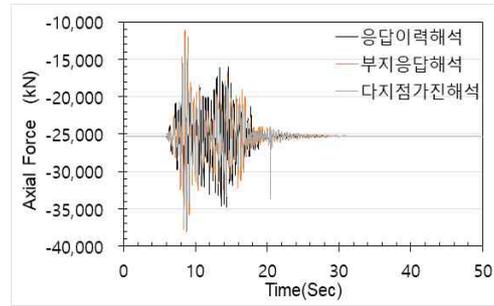
교직방향 수평 지진과 EQ11

수직 지진과 EQ12

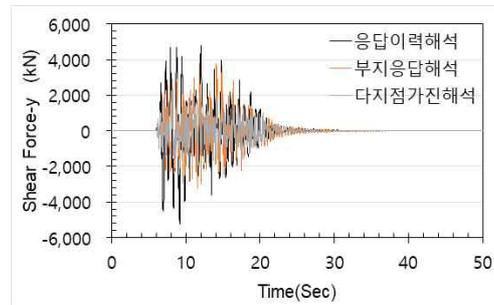
세트4



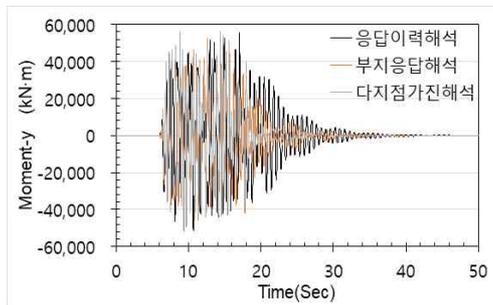
교축방향 전단력



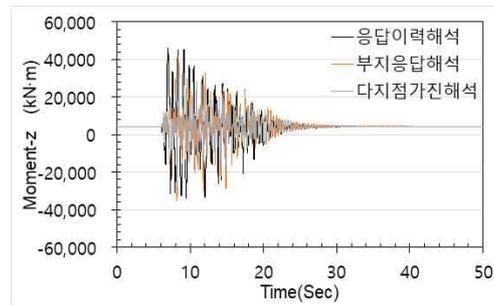
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

그림 4.2-4 전단기 설치 교량의 세트4 고정단 교각 응답 그래프

세트 1~4까지 전단키 설치 교량의 응답이력해석, 부지응답해석, 다지점가진해석의 응답값 중 교축, 교직에 대한 축력, 전단력, 모멘트의 응답값(각 세트의 최댓값)은 표 4.2-1 ~ 표 4.2-3과 같다.

표 4.2-1 전단키 설치 교량의 일반 응답이력해석 고정단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN·m)
축력 최대(교축)	<b>34712.13</b>	4037.03	30071.81
축력 최대(교직)	<b>34712.13</b>	1309.76	19906.97
전단력 최대(교축)	25638.01	<b>8952.77</b>	65916.94
전단력 최대(교직)	27206.99	<b>5737.11</b>	37457.93
모멘트 최대(교축)	25638.01	8952.77	<b>65916.94</b>
모멘트 최대(교직)	31115.95	4492.02	<b>53406.87</b>

표 4.2-2 전단키 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 고정단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN·m)
축력 최대(교축)	<b>40030.71</b>	1790.97	12807.24
축력 최대(교직)	<b>40030.71</b>	2806.53	22443.25
전단력 최대(교축)	23279.68	<b>9127.09</b>	60832.66
전단력 최대(교직)	23022.92	<b>4930.82</b>	40439.15
모멘트 최대(교축)	24149.17	8914.73	<b>61372.36</b>
모멘트 최대(교직)	36309.39	2896.75	<b>50448.60</b>

표 4.2-3 전단키 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 고정단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN·m)
축력 최대(교축)	<b>38616.12</b>	5811.78	43088.90
축력 최대(교직)	<b>38616.12</b>	1390.16	20778.37
전단력 최대(교축)	32059.63	<b>8375.19</b>	57954.27
전단력 최대(교직)	23737.06	<b>4127.33</b>	22990.99
모멘트 최대(교축)	32059.63	8375.19	<b>57954.27</b>
모멘트 최대(교직)	33154.74	1707.60	<b>38630.24</b>

#### 4.2.2 전단키 설치 교량의 가동단 교각(W25, 전단키 부착 구간) 지진거동특성

전단키 설치 교량의 응답이력해석, 부지응답해석, 다지점가진해석에 대한 가동단 교각의 축력, 전단력, 모멘트는 그림 4.2-5 ~ 4.2-8과 같다.

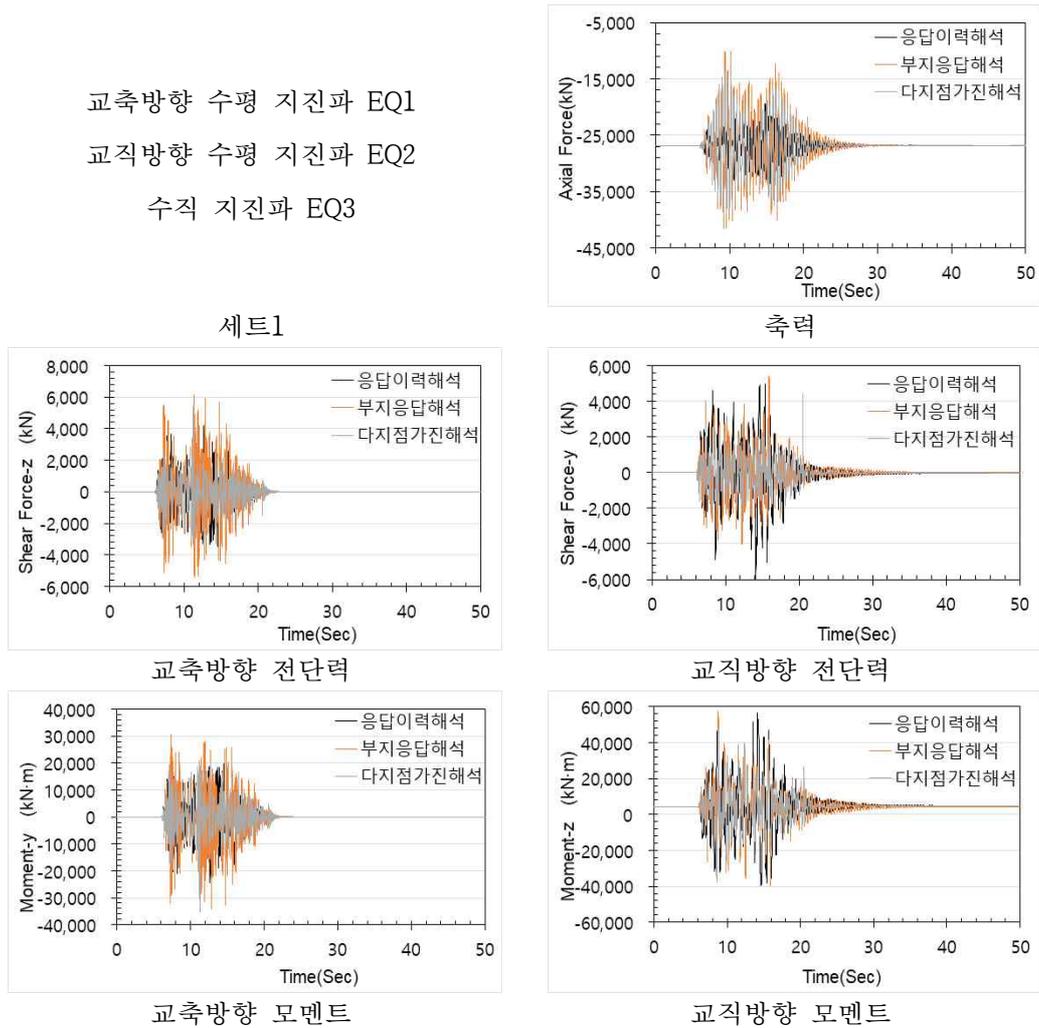
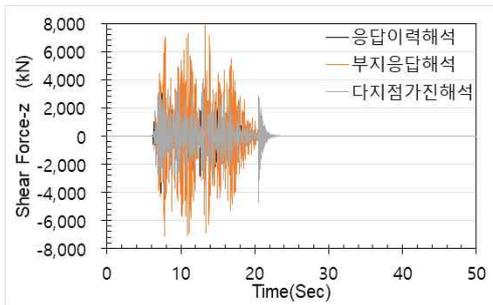


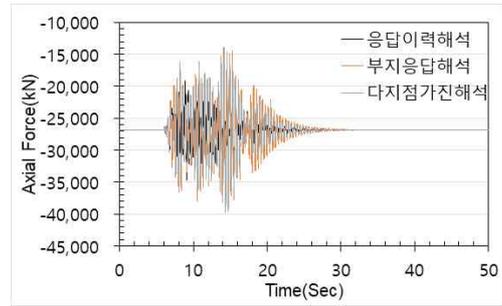
그림 4.2-5 전단키 설치 교량의 세트1 가동단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ4  
 교직방향 수평 지진과 EQ5  
 수직 지진과 EQ6

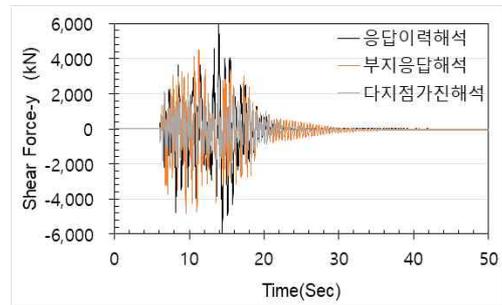
세트2



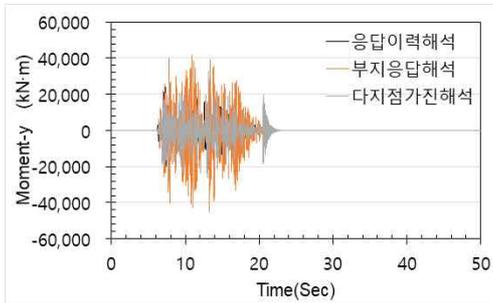
교축방향 전단력



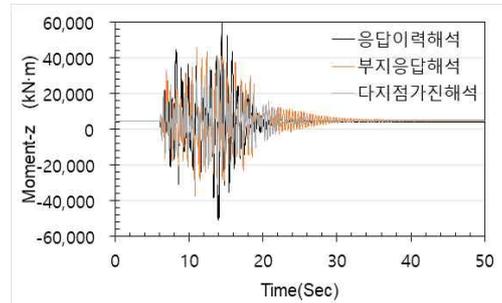
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트

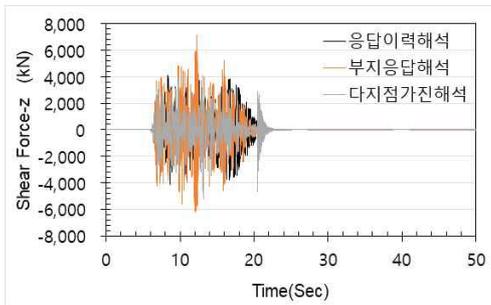


교직방향 모멘트

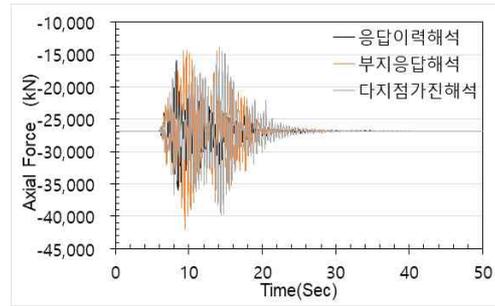
그림 4.2-6 전단키 설치 교량의 세트2 가동단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ7  
 교직방향 수평 지진과 EQ8  
 수직 지진과 EQ9

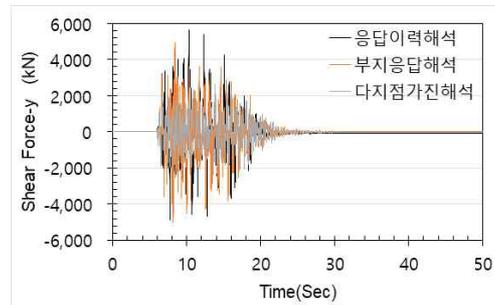
세트3



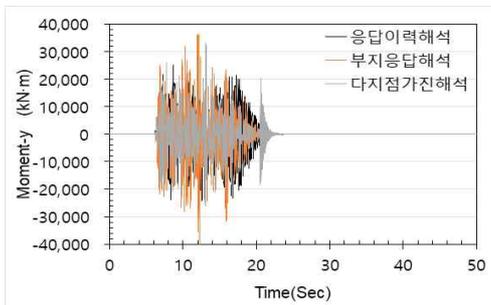
교축방향 전단력



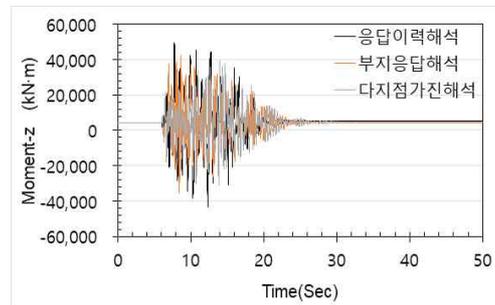
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

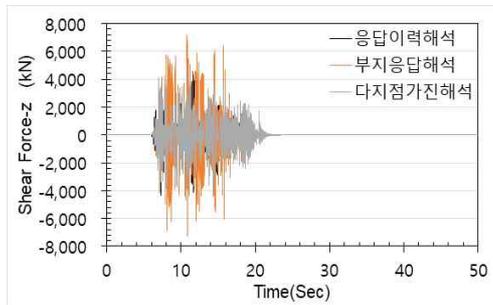
그림 4.2-7 전단기 설치 교량의 세트3 가동단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ10

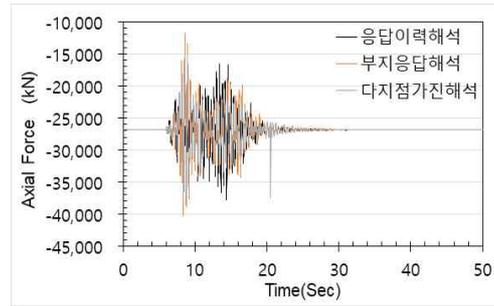
교직방향 수평 지진과 EQ11

수직 지진과 EQ12

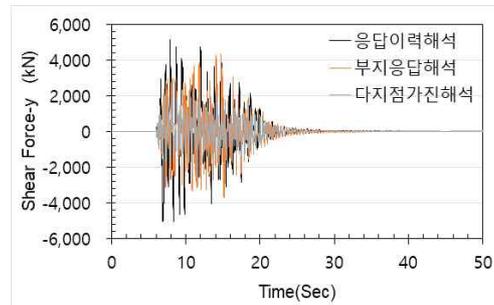
세트4



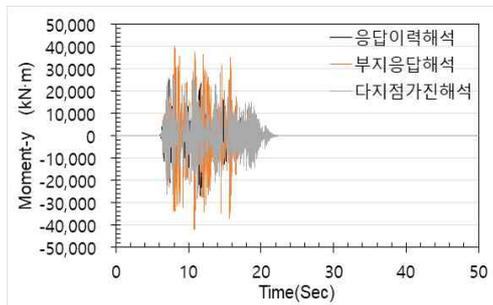
교축방향 전단력



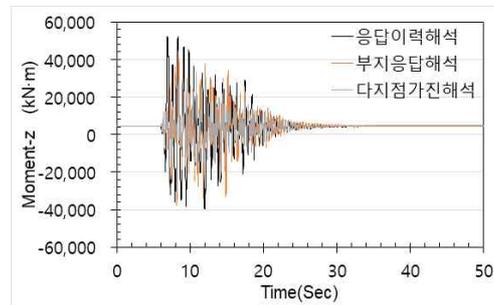
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

그림 4.2-8 전단키 설치 교량의 세트4 가동단 교각 응답 그래프

세트 1~4까지 전단키 설치 교량의 응답이력해석, 부지응답해석, 다지점가진해석의 응답값 중 교축, 교직에 대한 축력, 전단력, 모멘트의 응답값(각 세트의 최댓값)은 표 4.2-4 ~ 표 4.2-6과 같다.

표 4.2-4 전단키 설치 교량의 일반 응답이력해석 가동단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN·m)
축력 최대(교축)	<b>37789.90</b>	688.94	2901.59
축력 최대(교직)	<b>37789.90</b>	1222.49	19709.18
전단력 최대(교축)	31314.77	<b>4543.04</b>	27249.12
전단력 최대(교직)	27474.94	<b>6372.14</b>	49637.61
모멘트 최대(교축)	31314.77	4543.04	<b>27249.12</b>
모멘트 최대(교직)	27093.60	5932.82	<b>62116.09</b>

표 4.2-5 전단키 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 가동단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN·m)
축력 최대(교축)	<b>41990.33</b>	1324.11	7957.32
축력 최대(교직)	<b>41990.33</b>	899.24	12813.29
전단력 최대(교축)	21613.79	<b>7904.43</b>	45139.98
전단력 최대(교직)	28879.46	<b>5448.05</b>	39101.56
모멘트 최대(교축)	21613.79	7904.43	<b>45139.98</b>
모멘트 최대(교직)	38186.90	3194.07	<b>57488.45</b>

표 4.2-6 전단키 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 가동단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN·m)
축력 최대(교축)	<b>39782.52</b>	2868.12	18667.79
축력 최대(교직)	<b>39782.52</b>	1431.73	31663.00
전단력 최대(교축)	27503.19	<b>5337.79</b>	33764.90
전단력 최대(교직)	21728.14	<b>4476.33</b>	27053.02
모멘트 최대(교축)	27503.19	5337.79	<b>33764.90</b>
모멘트 최대(교직)	36558.65	2065.42	<b>48238.64</b>

### 4.2.3 전단키 설치 교량의 상부구조 응답변위

전단키 설치 교량의 상부구조의 변위는 낙교방지를 위한 받침지지길이와 받침의 변위를 파악하기 위해 그림 4.2-9에 나타나있는 노드에 대해 응답변위를 구하였다.

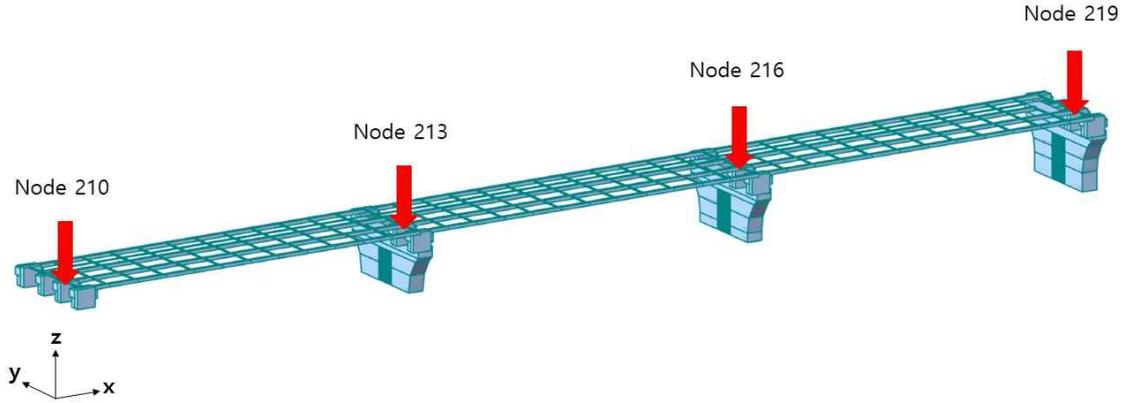


그림 4.2-9 상부구조 응답변위 측정 위치

전단키 설치 교량의 응답이력해석 시 상부구조의 응답변위는 다음 표 4.2-7과 같다.

표 4.2-7 전단키 설치 교량의 일반 응답이력해석 상부구조 응답변위

지진파 세트	Node	응답이력해석별 응답변위		
		x방향(교축, mm)	y방향(교직, mm)	z방향(수직, mm)
TH1	210	-38.77	70.38	-0.01
	213	-30.84	32.46	-3.73
	216	-34.47	31.18	-4.00
	219	31.77	53.94	-2.25
TH2	210	-29.00	-61.50	-0.01
	213	24.65	-31.50	-3.57
	216	-24.02	-32.69	-3.72
	219	29.33	-57.86	-2.20
TH3	210	-38.14	-48.94	-0.01
	213	41.50	26.98	-3.69
	216	36.92	25.10	-3.84
	219	47.05	-57.45	-2.48
TH4	210	-36.45	85.05	-0.01
	213	-26.28	27.44	-3.95
	216	-31.44	27.22	-4.14
	219	30.77	85.69	-2.44

전단키 설치 교량의 부지응답해석 시 상부구조의 응답변위는 다음 표 4.2-8과 같다,

표 4.2-8 전단키 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 상부구조 응답변위

지진파 세트	Node	부지응답해석별 응답변위		
		x방향(교축, mm)	y방향(교직, mm)	z방향(수직, mm)
TH1	210	-34.45	-28.71	-0.01
	213	-26.09	-22.82	-4.59
	216	-33.39	-22.12	-4.73
	219	-25.86	-22.03	-2.47
TH2	210	-29.42	-21.68	-0.01
	213	32.41	-17.66	-4.04
	216	27.79	-17.12	-4.27
	219	35.83	27.96	-2.50
TH3	210	-33.52	24.46	-0.01
	213	-23.65	21.70	-4.03
	216	-28.40	21.06	-4.29
	219	25.09	26.71	-2.55
TH4	210	-25.65	-20.31	-0.01
	213	18.56	-21.60	-3.97
	216	-23.10	-20.70	-4.06
	219	24.43	-21.83	-2.53

전단키 설치 교량의 다지점가진해석 시 상부구조의 응답변위는 다음 표 4.2-9와 같다.

표 4.2-9 전단키 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 상부구조 응답변위

지진파 세트	Node	다지점가진해석별 응답변위		
		x방향(교축, mm)	y방향(교직, mm)	z방향(수직, mm)
TH1	210	-22.85	-11.94	5.54
	213	-14.65	-9.87	5.89
	216	-20.35	-11.06	6.58
	219	14.65	-17.85	-7.85
TH2	210	-23.67	-10.50	6.62
	213	-14.65	-7.79	6.69
	216	-21.08	-8.03	8.33
	219	14.73	11.25	10.00
TH3	210	-28.86	-13.50	6.08
	213	-18.76	-6.93	-6.52
	216	-24.32	-8.26	-7.51
	219	-16.35	21.22	-9.15
TH4	210	-23.06	-8.90	-6.02
	213	14.99	8.59	-6.62
	216	-20.27	9.51	-7.60
	219	22.17	-13.68	-7.90

### 4.3 댐퍼 설치 교량(W25 댐퍼 부착)

#### 4.3.1 댐퍼 설치 교량의 고정단 교각 지진거동특성

댐퍼 설치 교량의 응답이력해석, 부지응답해석, 다지점가진해석에 대한 고정단 교각의 축력, 전단력, 모멘트는 그림 4.3-1 ~ 4.3-4와 같다.

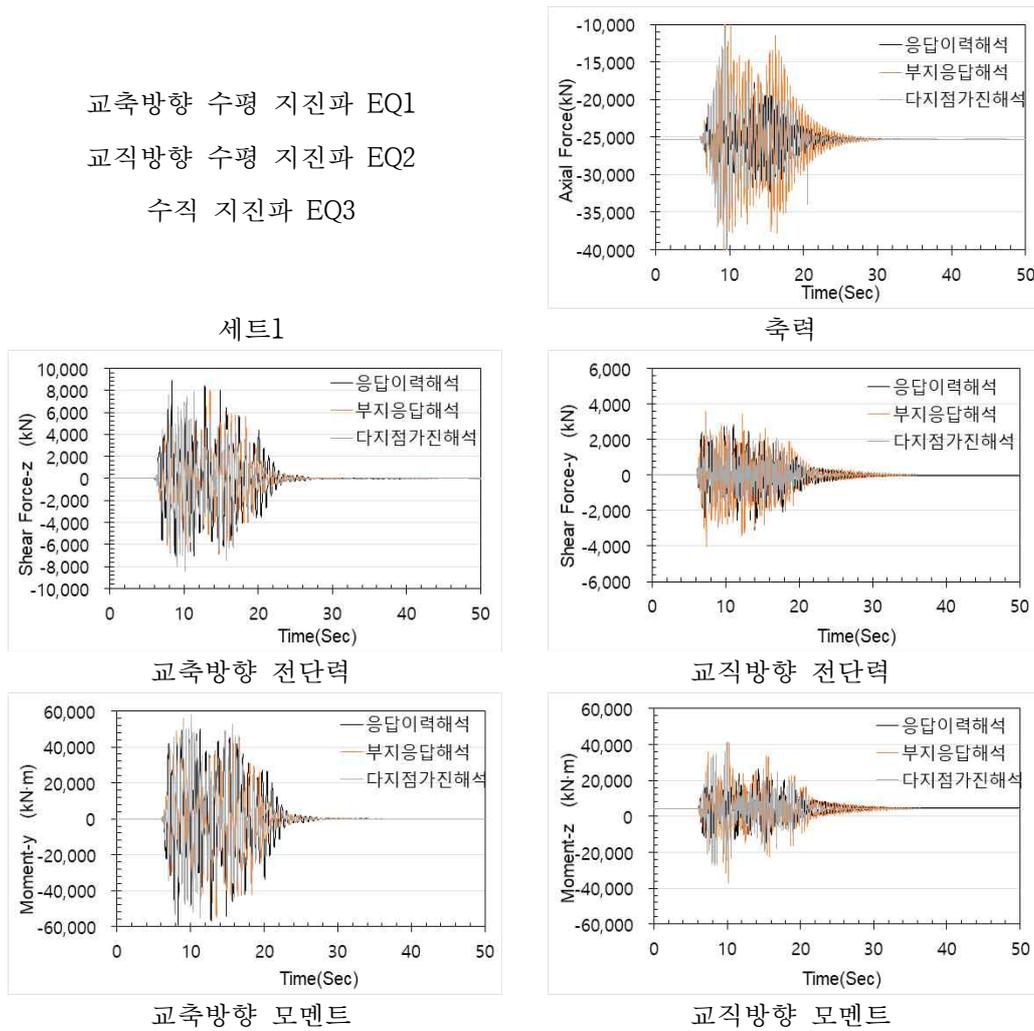
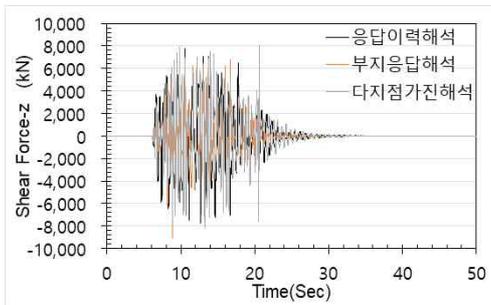


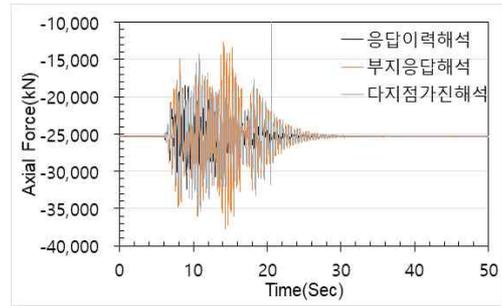
그림 4.3-1 댐퍼 설치 교량의 세트1 고정단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ4  
 교직방향 수평 지진과 EQ5  
 수직 지진과 EQ6

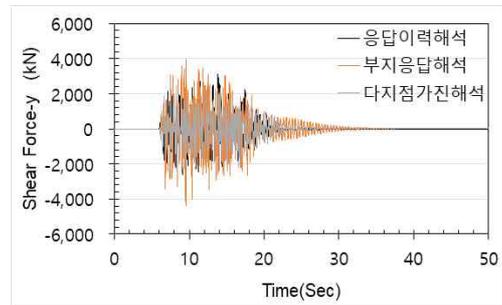
세트2



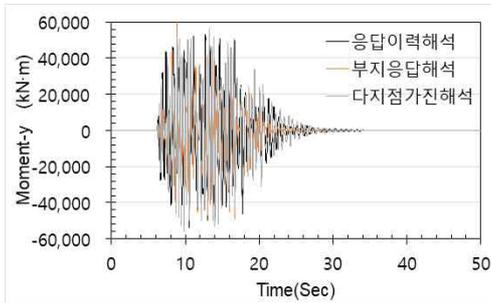
교축방향 전단력



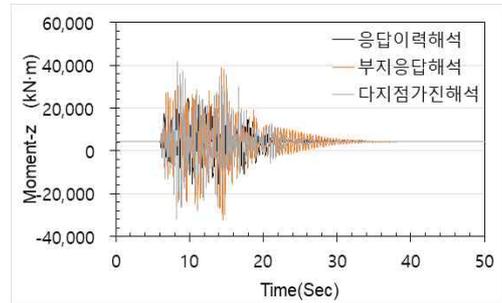
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트

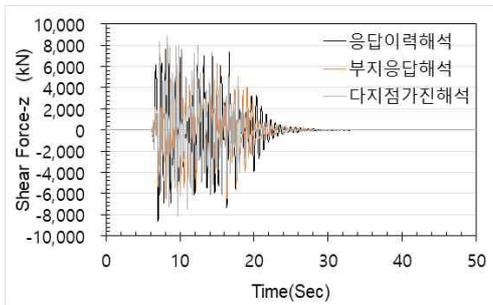


교직방향 모멘트

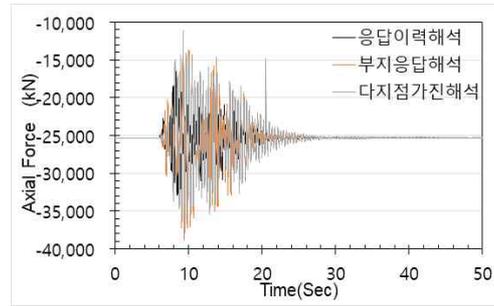
그림 4.3-2 댐퍼 설치 교량의 세트2 고정단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진파 EQ7  
 교직방향 수평 지진파 EQ8  
 수직 지진파 EQ9

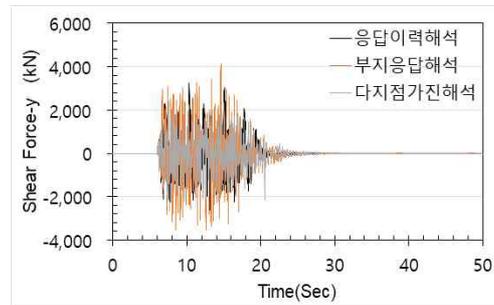
세트3



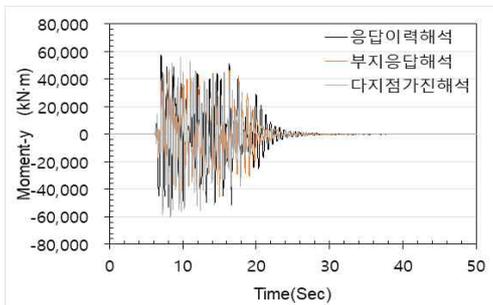
교축방향 전단력



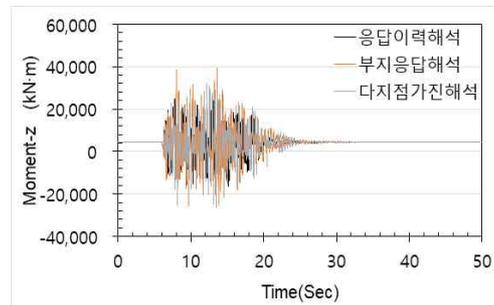
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

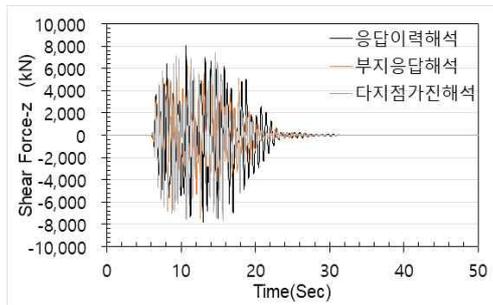
그림 4.3-3 댐퍼 설치 교량의 세트3 고정단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ10

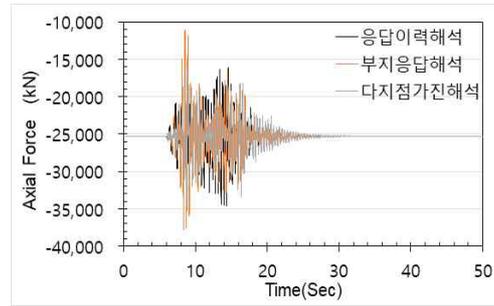
교직방향 수평 지진과 EQ11

수직 지진과 EQ12

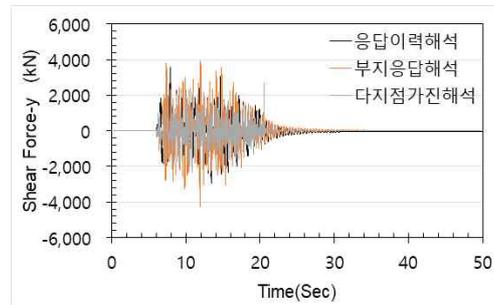
세트4



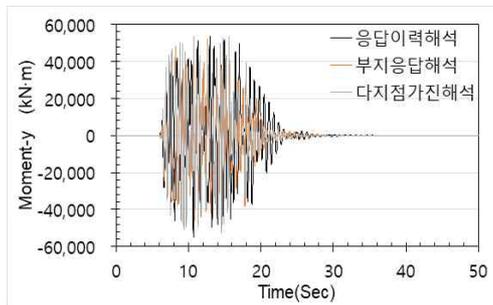
교축방향 전단력



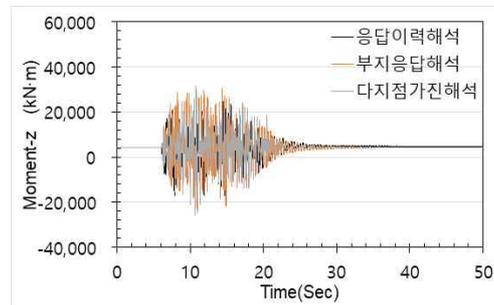
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

그림 4.3-4 댐퍼 설치 교량의 세트4 고정단 교각 응답 그래프

세트 1~4까지 댐퍼 설치 교량의 응답이력해석, 부지응답해석, 다지점가진해석의 응답값 중 교축, 교직에 대한 축력, 전단력, 모멘트의 응답값(각 세트의 최댓값)은 표 4.3-1 ~ 표 4.3-3 과 같다.

표 4.3-1 댐퍼 설치 교량의 일반 응답이력해석 고정단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN · m)
축력 최대(교축)	<b>34667.46</b>	3793.07	28611.84
축력 최대(교직)	<b>34667.46</b>	1347.71	17297.33
전단력 최대(교축)	23818.47	<b>8953.63</b>	59478.08
전단력 최대(교직)	28009.96	<b>3581.52</b>	13853.33
모멘트 최대(교축)	23818.47	8953.63	<b>59478.08</b>
모멘트 최대(교직)	30068.37	2417.06	<b>26494.69</b>

표 4.3-2 댐퍼 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 고정단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN · m)
축력 최대(교축)	<b>39996.29</b>	2301.54	16295.52
축력 최대(교직)	<b>39996.29</b>	1576.77	10680.10
전단력 최대(교축)	23408.95	<b>9114.08</b>	60267.41
전단력 최대(교직)	23947.26	<b>4349.61</b>	22384.76
모멘트 최대(교축)	23408.95	9114.08	<b>60267.41</b>
모멘트 최대(교직)	35667.55	2338.84	<b>41045.44</b>

표 4.3-3 댐퍼 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 고정단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN · m)
축력 최대(교축)	<b>40292.55</b>	5161.36	39840.01
축력 최대(교직)	<b>40292.55</b>	667.63	8966.18
전단력 최대(교축)	31950.43	<b>8867.80</b>	60914.72
전단력 최대(교직)	26341.65	<b>2682.87</b>	18729.91
모멘트 최대(교축)	31950.43	8867.80	<b>60914.72</b>
모멘트 최대(교직)	31984.50	2337.05	<b>42067.22</b>

### 4.3.2 댐퍼 설치 교량의 가동단 교각(W25, 댐퍼 부착 구간) 지진거동특성

댐퍼 설치 교량의 응답이력해석, 부지응답해석, 다지점가진해석에 대한 가동단 교각의 축력, 전단력, 모멘트는 그림 4.2-5 ~ 4.2-8과 같다.

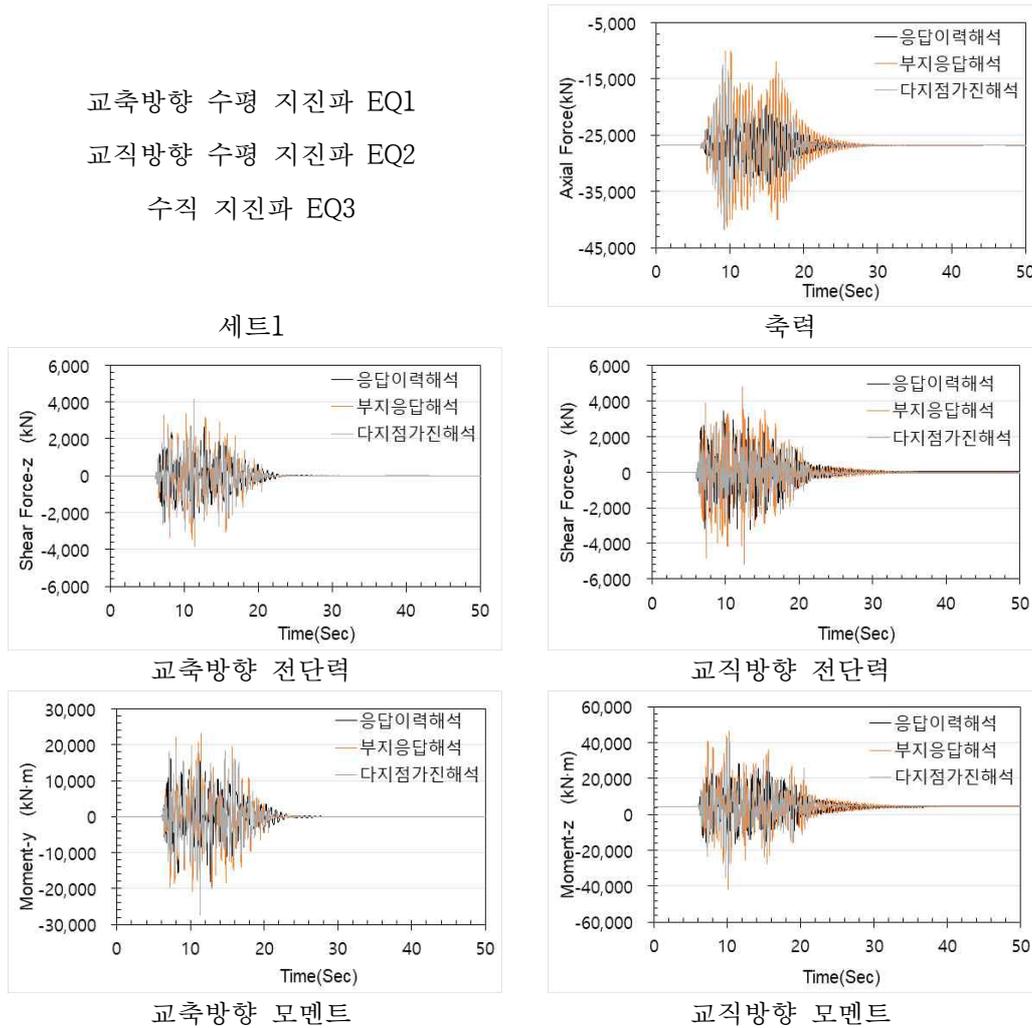
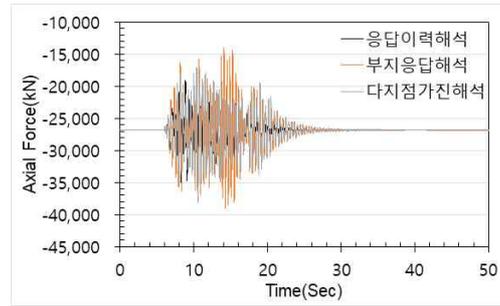


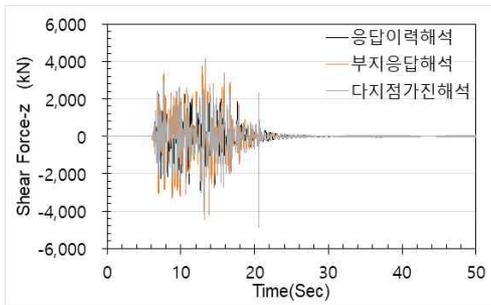
그림 4.3-5 댐퍼 설치 교량의 세트1 가동단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ4  
 교직방향 수평 지진과 EQ5  
 수직 지진과 EQ6

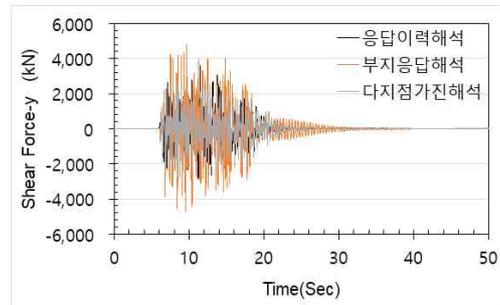
세트2



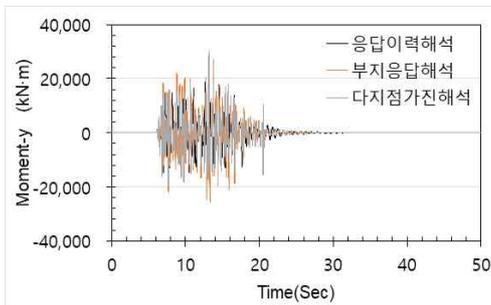
축력



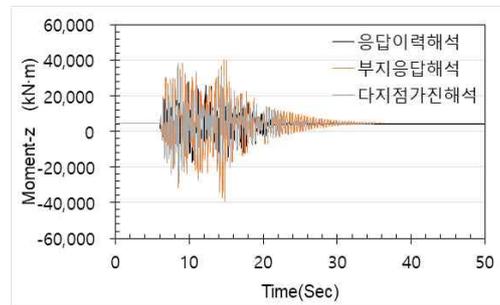
교축방향 전단력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트

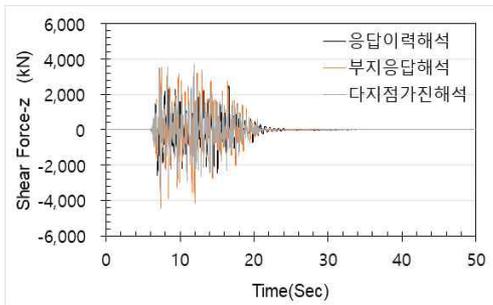


교직방향 모멘트

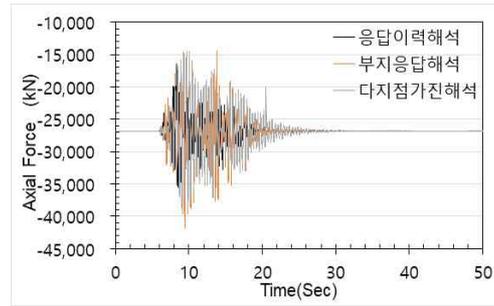
그림 4.3-6 댐퍼 설치 교량의 세트2 가동단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진파 EQ7  
 교직방향 수평 지진파 EQ8  
 수직 지진파 EQ9

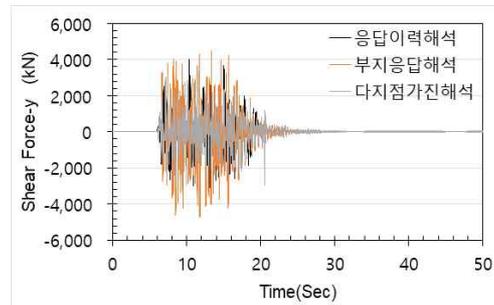
세트3



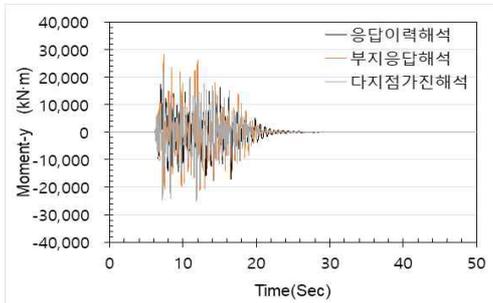
교축방향 전단력



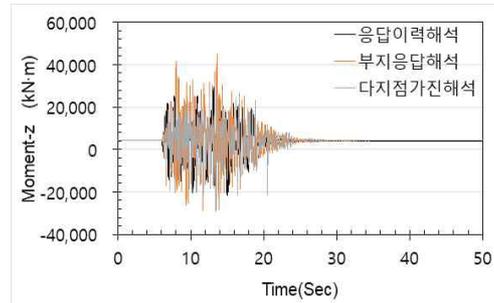
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

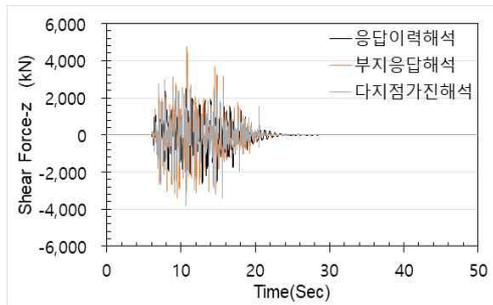
그림 4.3-7 댐퍼 설치 교량의 세트3 가동단 교각 응답 그래프

교축방향 수평 지진과 EQ10

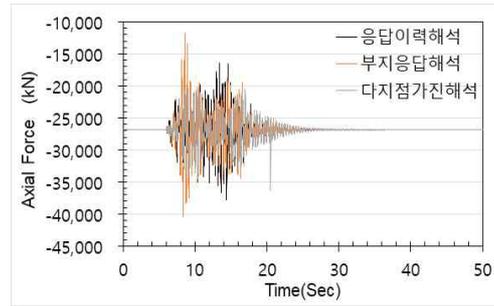
교직방향 수평 지진과 EQ11

수직 지진과 EQ12

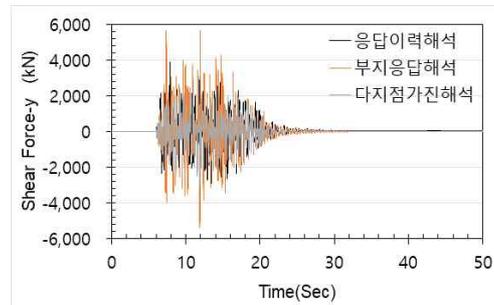
세트4



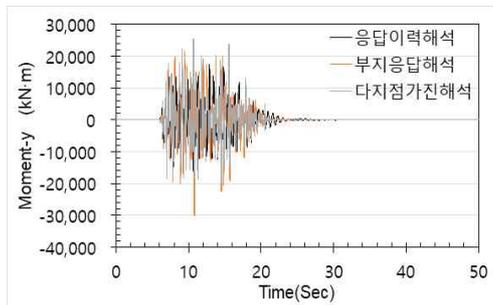
교축방향 전단력



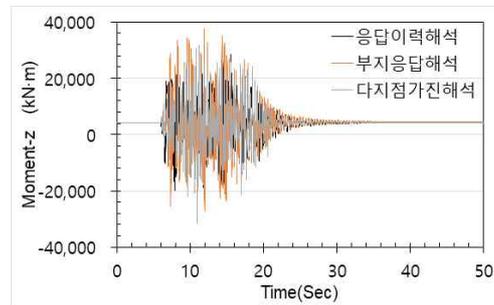
축력



교직방향 전단력



교축방향 모멘트



교직방향 모멘트

그림 4.3-8 댐퍼 설치 교량의 세트4 가동단 교각 응답 그래프

세트 1~4까지 댐퍼 설치 교량의 응답이력해석, 부지응답해석, 다지점가진해석의 응답값 중 교축, 교직에 대한 축력, 전단력, 모멘트의 응답값(각 세트의 최댓값)은 표 4.3-4 ~ 표 4.3-6 과 같다.

표 4.3-4 댐퍼 설치 교량의 일반 응답이력해석 가동단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN · m)
축력 최대(교축)	<b>37738.71</b>	1193.92	6648.45
축력 최대(교직)	<b>37738.71</b>	1281.82	15344.20
전단력 최대(교축)	29022.58	<b>2891.66</b>	18478.28
전단력 최대(교직)	27529.43	<b>4031.87</b>	20386.57
모멘트 최대(교축)	28378.06	2820.34	<b>18838.89</b>
모멘트 최대(교직)	28634.30	3071.51	<b>29538.09</b>

표 4.3-5 댐퍼 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 가동단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN · m)
축력 최대(교축)	<b>41826.03</b>	1003.87	7553.64
축력 최대(교직)	<b>41826.03</b>	133.39	5857.03
전단력 최대(교축)	30726.21	<b>4762.10</b>	29724.41
전단력 최대(교직)	31098.77	<b>5640.98</b>	26776.86
모멘트 최대(교축)	29829.91	4674.16	<b>30321.91</b>
모멘트 최대(교직)	34186.47	3840.95	<b>46542.18</b>

표 4.3-6 댐퍼 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 가동단 교각 응답

구분	축력(kN)	전단력(kN)	모멘트(kN · m)
축력 최대(교축)	<b>41753.15</b>	806.48	6286.69
축력 최대(교직)	<b>41753.15</b>	293.06	3981.06
전단력 최대(교축)	21519.77	<b>4898.00</b>	15811.95
전단력 최대(교직)	27773.58	<b>3511.48</b>	19972.46
모멘트 최대(교축)	27866.11	4408.46	<b>30446.84</b>
모멘트 최대(교직)	37978.78	1776.68	<b>42460.73</b>

### 4.3.3 댐퍼 설치 교량의 상부구조 응답변위

댐퍼 설치 교량의 상부구조의 변위는 낙교방지를 위한 받침지지길이와 받침의 변위를 파악하기 위해 그림 4.3-9에 나타나있는 노드에 대해 응답변위를 구하였다.

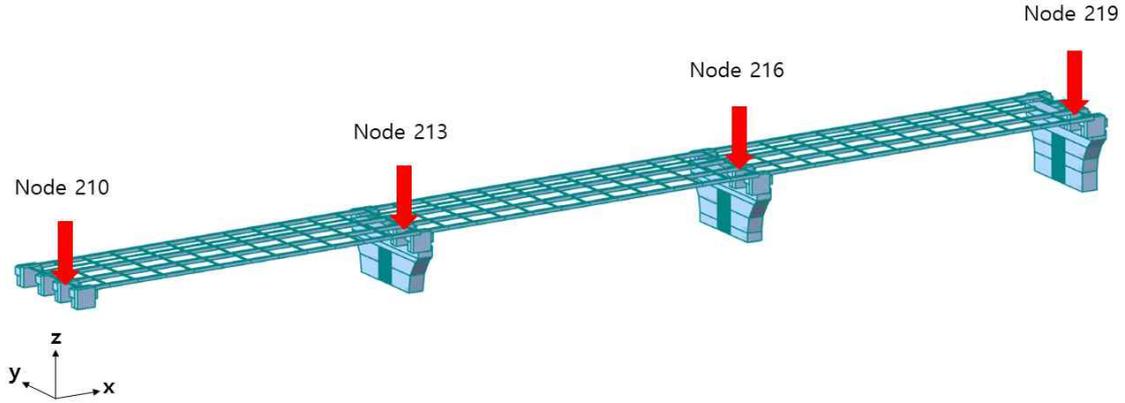


그림 4.3-9 상부구조 응답변위 측정 위치

댐퍼 설치 교량의 응답이력해석 시 상부구조의 응답변위는 다음 표 4.3-7과 같다.

표 4.3-7 댐퍼 설치 교량의 일반 응답이력해석 상부구조 응답변위

지진과 세트	Node	응답이력해석별 응답변위		
		x방향(교축, mm)	y방향(교직, mm)	z방향(수직, mm)
TH1	210	-66.07	72.71	-0.01
	213	-56.70	85.12	-3.49
	216	-61.09	84.72	-3.63
	219	-52.93	79.34	-2.21
TH2	210	56.96	-57.26	-0.01
	213	63.38	-74.01	-3.32
	216	61.49	-78.63	-3.48
	219	68.79	-70.75	-2.17
TH3	210	-57.73	-63.06	-0.01
	213	-46.15	-61.60	-3.46
	216	-54.62	-65.66	-3.67
	219	-43.89	-66.85	-2.48
TH4	210	-37.40	62.15	-0.01
	213	41.80	76.21	-3.71
	216	35.88	77.22	-3.84
	219	46.77	64.85	-2.41

댐퍼 설치 교량의 부지응답해석 시 상부구조의 응답변위는 다음 표 4.3-8과 같다.

표 4.3-8 댐퍼 설치 교량의 부지특성 응답이력해석 상부구조 응답변위

지진파 세트	Node	부지응답해석별 응답변위		
		x방향(교축, mm)	y방향(교직, mm)	z방향(수직, mm)
TH1	210	-50.02	-26.94	-0.01
	213	-40.44	28.73	-4.45
	216	-44.65	48.35	-4.69
	219	-34.83	60.93	-2.48
TH2	210	35.99	-38.15	-0.01
	213	44.43	37.89	-3.98
	216	40.15	40.48	-4.19
	219	48.55	30.82	-2.52
TH3	210	-49.21	-39.94	-0.01
	213	-39.46	-44.39	-4.09
	216	-44.35	-37.65	-4.41
	219	-35.39	21.81	-2.58
TH4	210	29.60	26.55	-0.01
	213	37.33	45.85	-3.91
	216	32.51	55.35	-4.05
	219	42.08	61.16	-2.60

댐퍼 설치 교량의 다지점가진해석 시 상부구조의 응답변위는 다음 표 4.3-9와 같다.

표 4.3-9 댐퍼 설치 교량의 부지특성 다지점가진해석 상부구조 응답변위

지진파 세트	Node	다지점가진해석별 응답변위		
		x방향(교축, mm)	y방향(교직, mm)	z방향(수직, mm)
TH1	210	35.94	25.67	5.53
	213	43.68	-11.31	-6.03
	216	38.78	-26.34	6.67
	219	47.72	-50.40	-7.84
TH2	210	-28.92	-29.14	6.62
	213	-19.94	-23.79	-6.26
	216	-25.17	-17.21	8.43
	219	-17.88	-13.35	10.04
TH3	210	-65.71	-13.89	6.08
	213	-56.39	-11.87	-6.72
	216	-60.55	13.73	-7.68
	219	-51.19	21.98	-9.18
TH4	210	20.49	22.56	-6.02
	213	28.87	12.04	6.69
	216	25.11	-19.74	-7.42
	219	34.64	-39.56	-7.93

## 4.4 결과 및 분석

### 4.4.1 보강전 교량, 전단키 설치 교량, 댐퍼 설치 교량의 응답이력해석 결과 비교

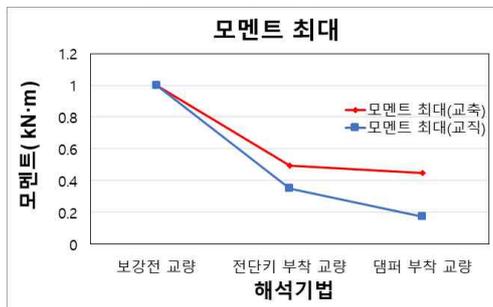
보강전 교량, 전단키 설치 교량, 댐퍼 설치 교량 각각의 응답이력해석 결과를 보강전 교량을 기준으로 각각의 비를 산정하였다. 고정단 교각 거동 특성은 그림 4.4-1과 같다.



3가지 교량의 응답이력해석을 통한 고정단 교각 축력 비



3가지 교량의 응답이력해석을 통한 고정단 교각 전단력 비



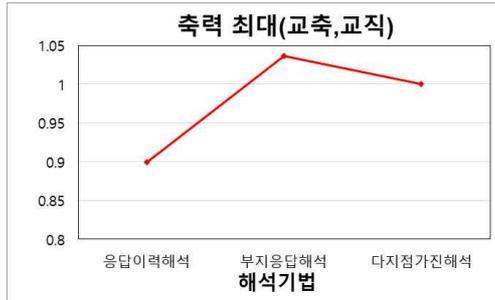
3가지 교량의 응답이력해석을 통한 고정단 교각 모멘트 비

그림 4.4-1 3가지 교량의 응답이력해석을 통한 고정단 교각 응답 비 그래프

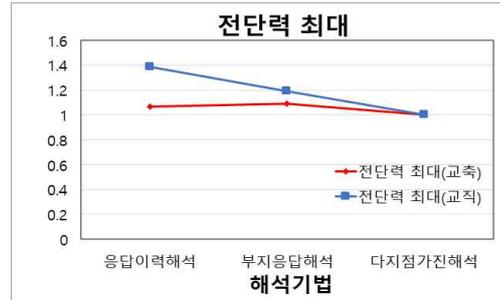
보강전 교량을 기준으로 전단키 설치 교량과 댐퍼 설치 교량의 축력 비는 1 : 0.99 : 0.99로 축력은 거의 동일하게 나타났다. 전단력 비의 경우 교축방향은 1 : 0.51 : 0.51로 전단키 설치 교량과 댐퍼 설치 교량 모두 49% 감소효과를 나타냈고 교직방향은 1 : 0.36 : 0.23로 전단키 설치 교량은 64%, 댐퍼 설치 교량은 77% 감소효과를 나타냈다. 모멘트 비의 경우 교축방향은 1 : 0.49 : 0.45로 전단키 설치 교량은 51%, 댐퍼 설치 교량은 55% 감소효과를 나타냈고 교직방향은 1 : 0.35 : 0.17로 전단키 설치 교량은 65%, 댐퍼 설치 교량은 83% 감소효과를 나타냈다.

#### 4.4.2 전단기 설치 교량의 고정단 교각 결과 및 분석

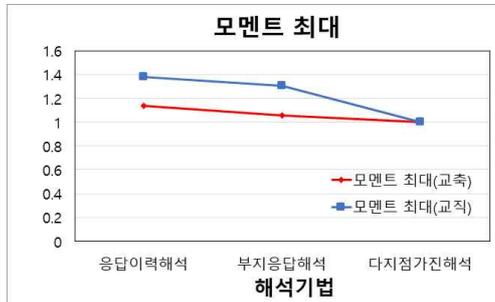
해석기법에 따른 고정단 교각의 거동 특성을 다지점가진해석을 기준으로 각각의 비를 산정하였다. 해석기법에 따른 응답 비는 그림 4.4-2와 같다.



해석기법에 따른 고정단 교각 축력 비



해석기법에 따른 고정단 교각 전단력 비



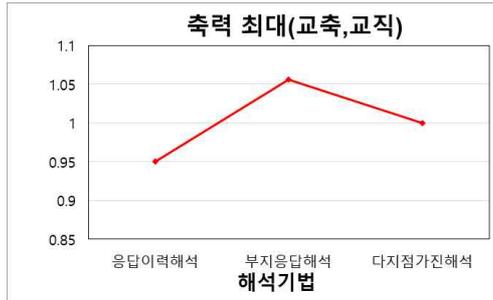
해석기법에 따른 고정단 교각 모멘트 비

그림 4.4-2 해석기법에 따른 고정단 교각 응답 비 그래프

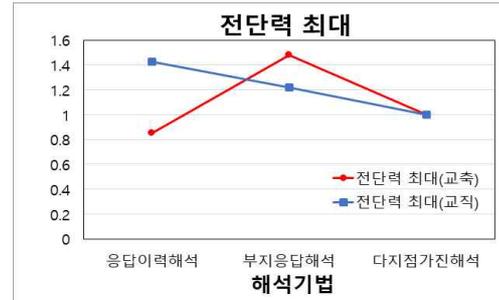
전단기 설치 교량의 3가지 해석기법에 따른 고정단 교각의 축력, 전단력, 모멘트의 비는 축력 비의 경우 0.9 : 1.04 : 1로 부지응답해석일 때 가장 큰 축력이 나타났다. 전단력 비의 경우 교축방향으로는 1.07 : 1.09 : 1로 부지응답해석일 때 가장 큰 전단력이 발생했고 교직방향으로는 1.39 : 1.19 : 1로 응답이력해석일 때 가장 큰 전단력이 나타났다. 마지막으로 모멘트 비의 경우 교축방향으로는 1.14 : 1.06 : 1, 교직방향으로는 1.38 : 1.31 : 1로 교축방향과 교직방향 모두 응답이력해석일 때가 가장 큰 모멘트가 발생했다.

#### 4.4.3 전단키 설치 교량의 가동단 교각(전단키 부착 구간) 결과 및 분석

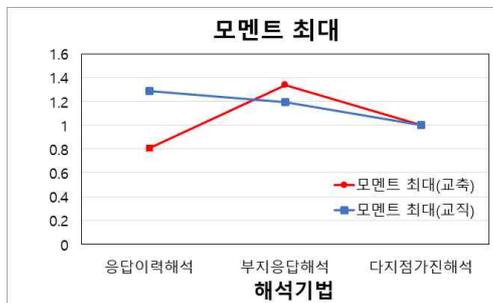
해석기법에 따른 가동단 교각의 거동 특성을 다지점가진해석을 기준으로 각각의 비를 산정하였다. 해석기법에 따른 응답 비는 그림 4.4-3과 같다.



해석기법에 따른 가동단 교각 축력 비



해석기법에 따른 가동단 교각 전단력 비



해석기법에 따른 가동단 교각 모멘트 비

그림 4.4-3 해석기법에 따른 가동단 교각 응답 비 그래프

전단키 설치 교량의 3가지 해석기법에 따른 가동단 교각의 축력, 전단력, 모멘트의 비는 축력 비의 경우 0.95 : 1.06 : 1로 부지응답해석일 때 가장 큰 축력이 나타났다. 전단력 비의 경우 교축방향으로는 0.85 : 1.48 : 1로 부지응답해석일 때 가장 큰 전단력이 발생했고 교직방향으로는 1.42 : 1.22 : 1로 응답이력해석일 때 가장 큰 전단력이 나타났다. 마지막으로 모멘트 비의 경우 교축방향으로는 0.81 : 1.34 : 1로 부지응답해석일 때 가장 큰 모멘트가 발생했고 교직방향으로는 1.29 : 1.19 : 1로 응답이력해석일 때가 가장 큰 모멘트가 발생했다.

#### 4.4.4 전단기 설치 교량의 상부구조 응답변위 결과 및 분석

해석기법에 따른 상부구조의 변위를 다지점가진해석을 기준으로 각각의 비를 산정하였다. 해석기법에 따른 변위 비는 그림 4.4-4와 같다.

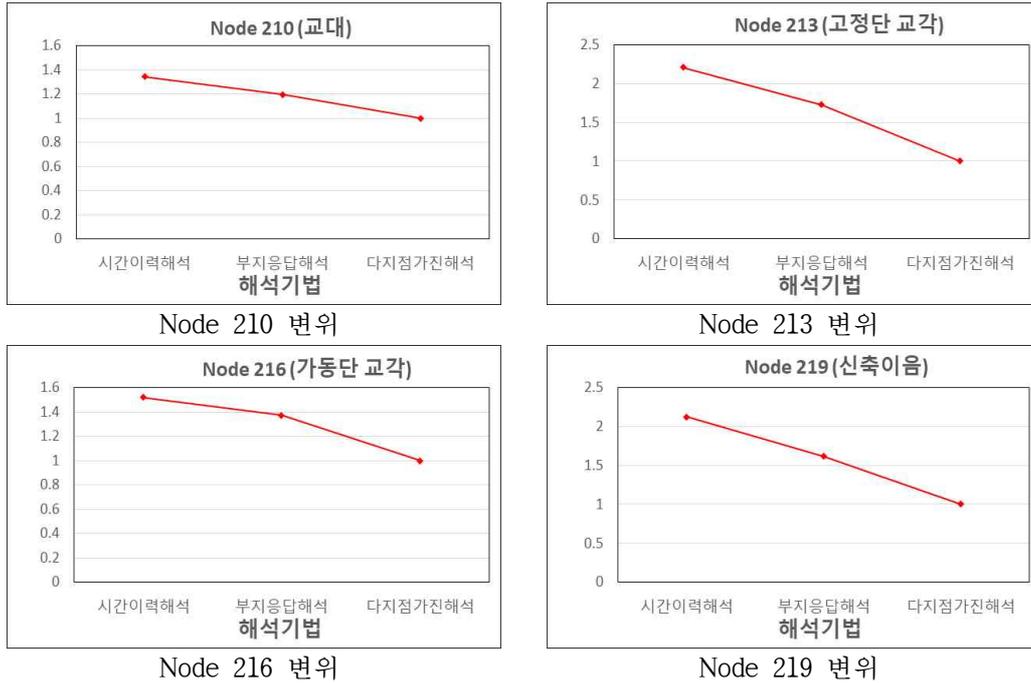


그림 4.4-4 해석기법에 따른 상부구조 변위 비 그래프

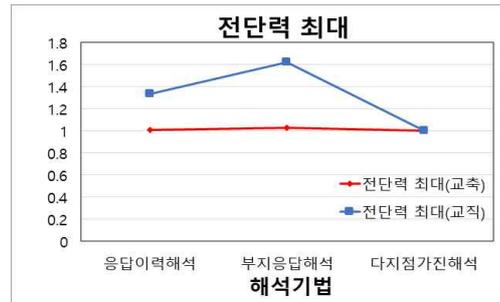
전단기 설치 교량의 3가지 해석기법에 따른 상부구조의 변위는 모두 응답이력해석일 때 가장 큰 변위가 발생했다.

#### 4.4.5 댐퍼 설치 교량의 고정단 교각 결과 및 분석

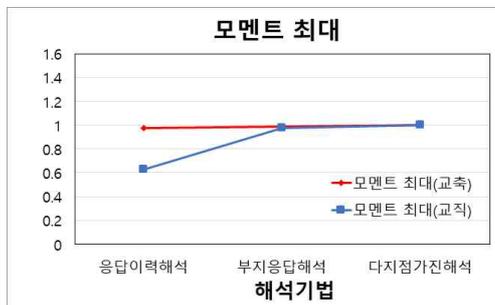
해석기법에 따른 고정단 교각의 거동 특성을 다지점가진해석을 기준으로 각각의 비를 산정하였다. 해석기법에 따른 응답 비는 그림 4.4-5와 같다.



해석기법에 따른 고정단 교각 축력 비



해석기법에 따른 고정단 교각 전단력 비



해석기법에 따른 고정단 교각 모멘트 비

그림 4.4-5 해석기법에 따른 고정단 교각 응답 비 그래프

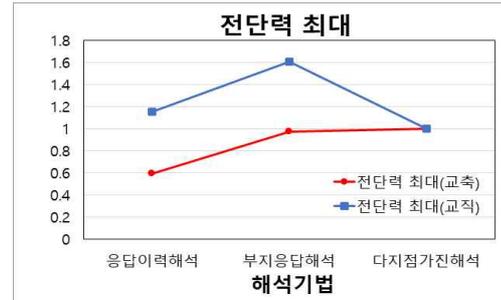
댐퍼 설치 교량의 3가지 해석기법에 따른 고정단 교각의 축력, 전단력, 모멘트의 비는 축력 비의 경우 0.86 : 0.99 : 1로 다지점가진해석일 때 가장 큰 축력이 나타났다. 전단력 비의 경우 교축방향으로는 1.01 : 1.03 : 1, 교직방향으로는 1.33 : 1.62 : 1로 부지응답해석일 때 교축방향과 교직방향 모두 가장 큰 전단력이 나타났다. 마지막으로 모멘트 비의 경우 교축방향으로는 0.98 : 0.99 : 1, 교직방향으로는 0.63 : 0.98 : 1로 교축방향과 교직방향 모두 다지점가진해석일 때가 가장 큰 모멘트가 발생했다.

#### 4.4.6 댐퍼 설치 교량의 가동단 교각(댐퍼 부착 구간) 결과 및 분석

해석기법에 따른 가동단 교각의 거동 특성을 다지점가진해석을 기준으로 각각의 비를 산정하였다. 해석기법에 따른 응답 비는 그림 4.4-6과 같다.



해석기법에 따른 가동단 교각 축력 비



해석기법에 따른 가동단 교각 전단력 비



해석기법에 따른 가동단 교각 모멘트 비

그림 4.4-6 해석기법에 따른 가동단 교각 응답 비 그래프

댐퍼 설치 교량의 3가지 해석기법에 따른 가동단 교각의 축력, 전단력, 모멘트의 비는 축력 비의 경우 0.9 : 1 : 1로 부지응답해석과 다지점가진해석일 때 가장 큰 축력이 나타났다. 전단력 비의 경우 교축방향으로는 0.59 : 0.97 : 1로 다지점가진해석일 때 가장 큰 전단력이 발생했고 교직방향으로는 1.15 : 1.61 : 1로 부지응답해석일 때 가장 큰 전단력이 나타났다. 마지막으로 모멘트 비의 경우 교축방향으로는 0.62 : 1 : 1로 부지응답해석과 다지점가진해석일 때 가장 큰 모멘트가 발생했고 교직방향으로는 0.70 : 1.10 : 1로 부지응답해석일 때가 가장 큰 모멘트가 발생했다.

#### 4.4.7 댐퍼 설치 교량의 상부구조 응답변위 결과 및 분석

해석기법에 따른 상부구조의 변위를 다지점가진해석을 기준으로 각각의 비를 산정하였다. 해석기법에 따른 변위 비는 그림 4.4-7과 같다.

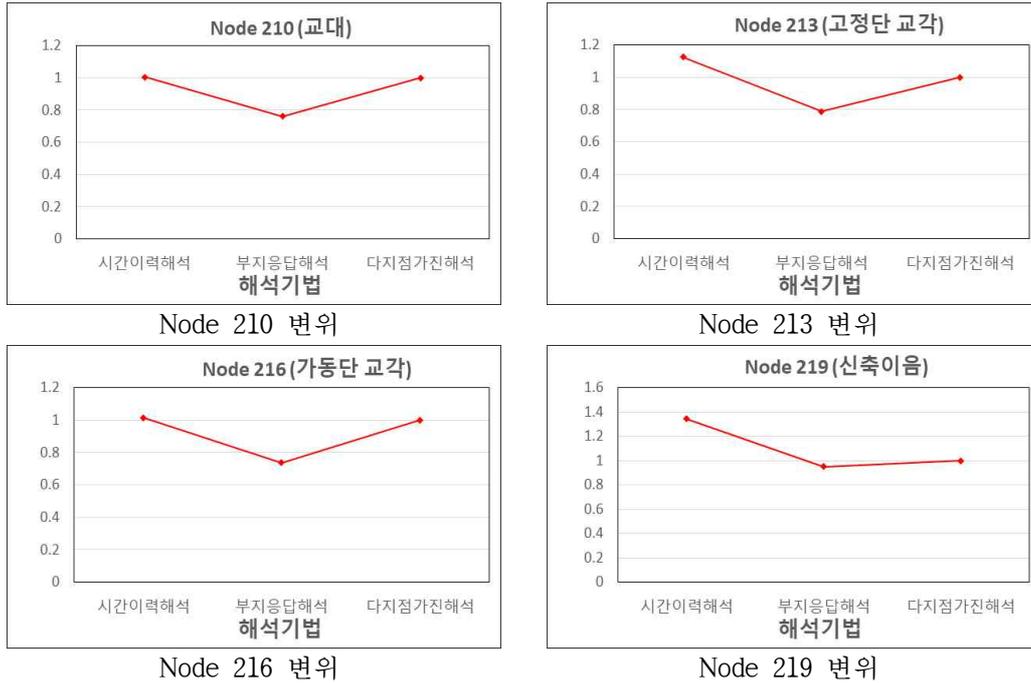


그림 4.4-7 해석기법에 따른 상부구조 변위 비 그래프

댐퍼 설치 교량의 3가지 해석기법에 따른 상부구조의 변위는 모두 응답이력해석일 때 가장 큰 변위가 발생했다.

## 제 5장 결론

본 연구는 지진보호장치가 설치된 교량을 다양한 해석기법에 따른 거동 특성을 분석하는 것이 목표이다. 지진보호장치는 전단키와 댐퍼가 각각 설치된 교량 모델을 사용하였고 해석 기법은 지진보호장치의 비선형 거동 특성을 고려하여 비선형 동적해석인 일반 응답이력해석, 부지특성 응답이력해석, 부지특성 다지점가진해석을 사용하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 보강전 교량과 비교하여 지진보호장치(전단키, 댐퍼)를 설치한 교량의 응답값은 49% ~ 83% 까지의 감소효과가 나타났다.
- (2) 3가지 해석기법을 비교하였을 때 가장 보수적인 해석으로 평가받는 일반 응답이력해석의 응답값이 가장 클 것으로 예상 되었으나 전단키 설치교량은 일반 응답이력해석과 부지특성 응답이력해석, 댐퍼 설치교량은 부지특성 응답이력해석과 부지특성 다지점가진해석이 큰 응답값을 나타냈다. 따라서, 일반 응답이력해석이 반드시 보수적인 것만은 아니었고 부지특성 다지점가진해석이 비보수적 것은 아니었다. 보강으로 인한 교량의 진동주기와 부지의 탁월주기의 상관성에 따라 교량 응답은 해석기법에 따라 달라지게 된다.
- (3) 표준설계응답스펙트럼과 부지특성 응답스펙트럼을 비교하였을 때 단주기영역에서는 부지특성 응답스펙트럼이 더 큰 가속도를 나타냈고 장주기영역은 표준설계응답스펙트럼이 큰 가속도를 나타냈다. 따라서 일반 응답이력해석이 부지특성 응답이력해석 보다 더 이른 시점에 소성영역으로 들어가게 된다.
- (4) 해당 교량의 주기는 단주기 영역에 속해 탄성영역에서는 부지응답해석이 큰 응답값을 나타낼 수 있지만 소성영역으로 넘어갈 경우 구조물의 비선형적 거동과 구조물의 주기가 변하기 때문에 어떠한 응답값이 더 크게 산출될 지는 예측하기 어렵다.
- (5) 하나의 교량 모델과 특정한 지진파 세트를 가지고 어떠한 해석기법이 보수적이고 경제적인지는 판단할 수 없다. 따라서, 다양한 교량을 대상으로 많은 입력지반운동을 생성하여 최대한 많은 해석 사례를 가지고 판단하는 것이 가장 이상적이라 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 국토해양부 (2011), "기존 시설물(교량) 내진성능 평가 및 향상 요령"
2. 국토교통부 (2018) "내진설계 일반" KDS 17 10 00
3. 국토교통부 (2016) "교량내진설계기준(일반설계법)" KDS 24 17 10
4. 국토교통부 (2022) "교량내진설계기준(한계상태설계법)" KDS 24 17 11
5. 한국교량및구조공학회 (2017), "낙동강 하구 연약지반 및 양산단층을 고려한 교량 내진 설계 절차 개발"
6. 박인준, 유지형 (2010), "부지응답해석에 기초한 지하공간 내진설계 개념", 한국터널공학회논문집
7. 김병민, 박두희 (2017), "지반응답해석의 최신 동향", 한국지반공학회

# ABSTRACT

In recent years, large-scale earthquakes worldwide have caused significant human and material damage. Moreover, in South Korea, the frequency of earthquakes with a magnitude of 3.0 or higher has been rapidly increasing since 2016. In this context, it is essential to ensure the seismic performance of critical national structures, such as bridges, which transport human and material resources during disasters. While newly constructed bridges have been subject to seismic design since 1992 under the Earthquake and Volcano Emergency Measures Act, existing bridges without seismic design must undergo seismic performance evaluation. If necessary, seismic retrofit design and construction are conducted to enhance their seismic performance.

For seismic performance evaluation of existing structures (bridges), the most conservative analysis method, commonly considered as general response history analysis, is employed. However, when designing seismic features for new structures (bridges), a site-specific response history analysis considering the interaction between the ground and the structure is sometimes used.

This study analyzes the seismic behavior of bridges retrofitted with seismic protection devices, specifically shear keys and dampers, using three different methods: general response history analysis, site-specific response history analysis, and site-specific multi-point ground motion analysis. Shear keys, installed on the abutment pier, accommodate displacements due to temperature variations in the superstructure. They act as devices to distribute seismic forces concentrated on the fixed pier to the movable pier, necessitating nonlinear seismic analysis to consider the effects of the gap. Dampers, similarly installed on the movable pier, serve to disperse seismic forces concentrated on the fixed pier to the movable pier. Additionally, they contribute to seismic force reduction through damping. The damping effect of dampers depends on the response velocity of the superstructure, requiring nonlinear history analysis similar to shear keys.

Therefore, this study comprehensively analyzes the seismic behavior of bridges equipped with seismic protection devices, including shear keys and dampers, using three seismic analysis techniques: general response history analysis, site-specific response history analysis, and site-specific multi-point ground motion analysis.