

지진응답특성에 의한 강재교각의 내진성 평가에 관한 연구

A Study on the Seismic Evaluation of Steel Piers by Earthquake Response Characteristics

권 영 록* 손 영 호** 최 광 규***
Kwon, Young Rok Son, Young Ho Choi, Kwang Kyu

국문요약

강재 교각을 갖는 고가교량은 상부구조가 매우 큰 길방을 갖는 거대구조가 되고 규모가 큰 지진운동 하에서 대단히 큰 관성력을 받게된다. 따라서 탄소성 동적응답 해석에 의해서 강재 교각의 지진거동을 파악하는 것이 필요하다. 본 연구에서는, 탄소성 동적응답해석을 위한 합리적인 수치해석 방법을 제시하고 이를 바탕으로 강재 교각에 대한 내진성 평가를 수행한다. 1995년 고베 지진 시 손상을 받은 강재 교각과 그 이후 재구축된 교각을 모델로 해서 국부좌굴 이전 소성화의 영향만을 고려한 강재 교각의 지진 거동을 파악한다. 입력 지진파는 고베 지진 시 관측된 Takatori 지진파이고 이를 가속도 진폭 조정하여 사용한다.

주요어 지진응답특성, 강재 교각, 내진성 평가, 탄소성 동적응답해석, 지진거동, 손상된 교각, 재구축된 교각

ABSTRACT

Recently, the usage of the steel piers of single column type is increasing for the reason such as the restriction of construction time, the restriction of ground space and large-size structures, etc. in the urban area, a steel pier for the viaduct under its dead load will be subjected to large inertia force at the top during strong earthquakes. Therefore, it is necessary to clarify the elasto-plastic behavior of the steel pier to strong earthquakes. The steel piers were severely damaged for the first time in the Hansin-Awaji earthquake occurred on January 17 1995, Japan. In this study, to clarify the seismic-proof and the characteristics of earthquake response of steel pier, the elasto-plastic response analysis is conducted to the damaged steel pier and the reconstructed steel pier.

Key words : *earthquake response characteristics, steel pier, seismic evaluation, elasto-plastic response analysis, seismic behavior, damaged pier, reconstructed pier*

1. 서 론

최근, 도심부에는 입지공간의 제약, 건설공기의 제약, 구조물의 대형화 등의 이유로 단주(single column)형식의 강재교각 건설이 계속 추진되고 있는 실정이다. 이와 같은 형식의 고가 교량은 상부구조가 매우 큰 질량을 갖는 거대구조이고 이것은 규모가 큰 지진운동 하에서

대단히 큰 관성력을 발생시킨다. 따라서 교각의 설계 시 내진설계가 상당히 중요한 역할을 하게된다. 지금까지의 거대지진 하에서는 RC교각에 대한 피해가 대부분이었기 때문에 거대지진 발생 시의 RC교각에 대한 연구가 일본, 미국 등에서 활발히 발표되었다. 강재교각의 경우는 RC교각에 비해 지진피해가 상대적으로 적었고, 구조용 강은 인성이 뛰어난 재료로서 거대지진이 발생해도 일부 손상이 있어도 붕괴 등의 엄청난 피해는 일어나지 않을 것이라고 하는 것이 일반적인 견해였다. 그러나 최근의 거대지진, 예를 들면 1995. 1. 7의 일본의 Kobe 지진

* Osaka University Civil Eng., 조수

** 경희원·경북전문대학 토목과 조교수

*** 김희원·동이대학교 토목·해양공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다

하에서는 많은 강재교각이 손상과 파괴 그리고 전도 등의 피해를 입었다. 또 최근의 연구에 의하면 얇은 박스형 단면을 가지는 강재교각은 국부좌굴로 인해 변형성능이 떨어지기 때문에 적절히 설계된 RC교각보다 반드시 뛰어난 변형 성능을 지닌다고는 말할 수 없다. 이와 같은 배경으로 강재교각의 변형성능에 관해서 실험적인 연구뿐만 아니라 해석적인 연구도 활발히 진행되고 있고, 강재교각의 지진응답특성에 관한 검토가 추가되고 있는 실정이다.

Kobe지진 이후 강재교각의 내진성 검토에 관한 연구가 일본에서 활발히 수행되었다. 지진발생 시 교각의 탄소성 거동을 파악하기 위해 渡辺 등⁽¹⁾, 宇佐美 등⁽²⁾은 반복하중과 지진파를 받는 강재교각을 모델로 해서 간이해석법을 제안하였고 내진성능에 대한 동적응답 검토를 수행하였다. 中島와 倉西⁽³⁾는 정현파가 축방향으로 작용하는 기둥의 탄소성 거동에 대한 동적응답해석과 level2 (일본 도로교시방서의 기준 지진파) 지진 운동에 대한 강재교각의 기본응답특성에 대한 검토를 수행하였다. 奈良 등⁽⁴⁾과 北田 등⁽⁵⁾은 탄소성 유한변위이론에 기초한 동적 탄소성 해석법을 개발하였고, 잔류응력을 고려한 강재 박스단면 기둥의 극한상태에 대한 지진응답특성을 고찰하였다.

최근에는 일본, 터키, 대만 등지에서 강력한 지진이 발생하여 기반 산업 시설 등에 큰 피해를 초래한 사례가 늘고 있다. 이와 같은 거대 지진 발생 시, 탄소성 지진응답 해석에 의한 강재교각의 내진성 검토가 반드시 행해져야 한다. 그리고 지진파의 특성과 교각의 구조특성에 의해 그 응답은 비선형성을 포함하는 불규칙한 진동특성을 가지므로 교각의 응답치의 일반성을 보장하기에는 다소 곤란하다. 본 연구에는 탄소성 지진 응답을 이용한 강재교각의 내진성 평가에 도움이 되기 위해 1995년 Hansin-Awaji earthquake 당시 손상을 받은 강재교각과 그 이후 재구축된 교각을 모델로 해서 국부좌굴 이전 소성화의 영향만을 고려한 강재교각의 지진 거동을 파악한다. 그리고 입력지진파의 진폭조정을 이용한 지진파형의 입력과 탄소성

지진 응답해석으로 강재교각의 지진 시 거동과 재구축 교각에서 채택된 채움콘크리트와 보강재에 대한 내진성능을 해석적으로 규명한다.

2. 구성관계식과 수치해석법

2.1 반복하중을 받는 강재의 구성방정식

강 구조물이 지진력 등의 반복하중을 받을 때 소성변형을 일으키는 경우의 재료거동을 정확하게 파악하기 위해서는 소성이력을 표현할 수 있는 구성관계식이 필요하다. 본 연구에서는 西村⁽⁶⁾에 의해 고안된 반복하중 하의 탄소성을 고려한 응력-변형도 관계식을 기초로 한다. 西村에 의한 구성관계식은 종래의 완전 탄소성 형태의 구성관계식으로 표현되는 탄성영역, 항복영역 이외에 單調載荷의 경우, 변형을 경화에 대한 영역 그리고 비선형 천이영역을 추가한다. 식 (1)은 단조재하곡선을 이루는 영역에서의 변형을 경화 계수 H 를 정의하고 있다.

$$H = E_{st}^b + \frac{a}{\epsilon_{mon}^b + b} - \frac{a}{b} \quad (1)$$

여기서, E_{st}^b 는 변형을 경화 구배, ϵ_{mon}^b 는 단조재하곡선 상의 소성변형률, a 와 b 는 강재에 의해 결정되는 정수이다. 식 (2)는 비선형 천이 영역에서의 변형을 경화 계수 H 를 정의하고 있다.

$$H = E_0^b + (1+m)^2 \left(E_0^b - \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon^b} \right) \left(\frac{-x}{\Delta\epsilon^b} \right)^m \ln \left(\frac{-x}{\Delta\epsilon^b} \right) \quad (2)$$

여기서,

E_0^b : 접선소성계수

$\Delta\sigma$: 탄성역으로부터 단조재하곡선의 영역에 도달하기까지의 응력

$\Delta\epsilon^b$: 탄성역으로부터 단조재하곡선의 영역에 도달하기까지의 소성변형률

x : 비선형 천이 영역에 도달해서부터 가산되는 소성변형률

m : 비선형 천이 영역의 형상을 나타내는 계수이다.

상기와 같은 구성관계식을 이용해서 해석을 수행한다.

2.2 수치해석법

지진 운동과 같은 불규칙한 하중을 받는 구조물의 탄소성 동적응답을 구하기 위해서는 미소시간 간격으로 운동방정식을 직접 시간 적분할 필요가 있다. 본 해석에서는 Newmark- β 법을 이용해서 수치적분을 수행한다. 지진동이 작용할 때의 증분형의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\Delta y_n''\} + [C]\{\Delta y_n'\} + [K]\{\Delta y_n\} = -[M]\{\Delta y_{n+1,g}''\} \quad (3)$$

여기서, $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성 매트릭스이다.

본 연구의 해석에는 재료 비선형과 기하 비선형의 평형상태를 구하기 위해 오차의 누적이 작은 수정증분법과 Newton-Rapson법을 혼용해 사용하여 수렴판정을 행하였다.

3. 해석모델과 입력 지진파

3.1 해석모델

본 연구의 대상이 되는 강재교각은 일본 판서지방 한신 고속도로의 고베선 마츠바라 교차점의 교각 NP584이다. Hansin-Awaji earthquake 당시 이 교각은 심한 지진 손상을 입었고 그 이후, 이 교각은 재구축되었다. 본 연구의 해석대상이 된 단주원형단면형식의 강재교각은 지진 당시 가장 좌굴손상이 많았던 형식이다. 이 형식의 교각은 대부분이 좌굴손상등의 손상을 입었고 그중 가장 심한 좌굴에 의한 손상을 입은 교각이 NP584 교각이다.

그림 1(a)와 (b)는 손상된 교각과 재구축된 교각의 해석모델을 나타내고, 표 1은 해석모델의

구조사양을 나타내고 있다. 손상된 교각과 재구축된 교각의 주요한 특징은 다음과 같다. 손상된 교각은 세그먼트에 있어 채움콘크리트 부분으로부터 판두께의 변화가 한군데, 강종의 변화는 두군데가 있다. 재구축된 교각은 판두께와 강종이 일정하고 채움 콘크리트의 높이가 손상된 교각의 약 2배이고 교각의 종방향으로 보강재가 설치되었다. 채움 콘크리트는 판두께를 고려하여 손상된 교각은 36요소, 재구축된 교각은 40요소로 분할(그림 1(d))하고 각각의 요소에 대해서 탄소성 판정을 행한다. 본 연구에서는 상기의 피해교각과 재구축된 교각에 대해서 각각 3차원 뼈대 요소를 이용해서 해석을 수행했다.

3.2 입력지진파

구조물의 지진응답특성은 지진파에 크게 의존한다. 따라서 사용되는 지진파의 의해 구조물의 응답성상은 여러 가지로 변화한다. 과거에 구조물에 큰 피해를 준 강력한 지진 운동기록파형을 이용해서 지진응답해석을 행하는 것은 지진시의 구조물거동을 해석할 때 가장 직접적이고 유효한 방법이다. 본 해석에 사용된 지진파는 그림 2와 같이 1995년 Hansin-Awaji 지진시 JR(일본철도) Takatori역에서 관측된 지진파이고 현재 이 지진파는 Takatori 지진이라고 명명되고 있고 본 연구는 이 지진파형을 이용하여 강재교각의 탄소성 지진응답 해석을 수행하였다.

Takatori 지진파는 최대가속도가 NS성분으로 642Gal이고 200Gal을 넘는 가속도가 13초 정도 지속되는 강력한 지진파이다. 그림 3은 입력 지진파의 최대 응답 스펙트럼이고 여기서 감쇠비는 0.05, 0.1, 0.2 이다. 그림에서 알 수 있듯이 고유주기 0.2초부터 2초 사이에 가속도 응답치가 상당히 크게 나타나고 있는 특징을 가지고 있다.

본 연구에는 이 지진파를 피해 교각과 재구축 교각에 대해서 최대가속도가 100Gal부터 약 1000Gal까지 지진파의 최대가속도 진폭을 선형 증가 시킨 지진파 입력을 이용해서 양 교각의 내진성 평가를 행했다.

4. 지진응답특성

4.1 피해교각의 응답특성

강재교각의 최상부의 최대 변위응답 및 잔류

변위와 최대입력가속도의 관계를 그림 4에, 교각 최상부의 시간에 따른 변위응답을 그림 5에 나타내고, 교각에 있어 가장 큰 거동을 나타내고 있는 요소에서의 응력-변형을 관계를 그림 6에 표시한다.

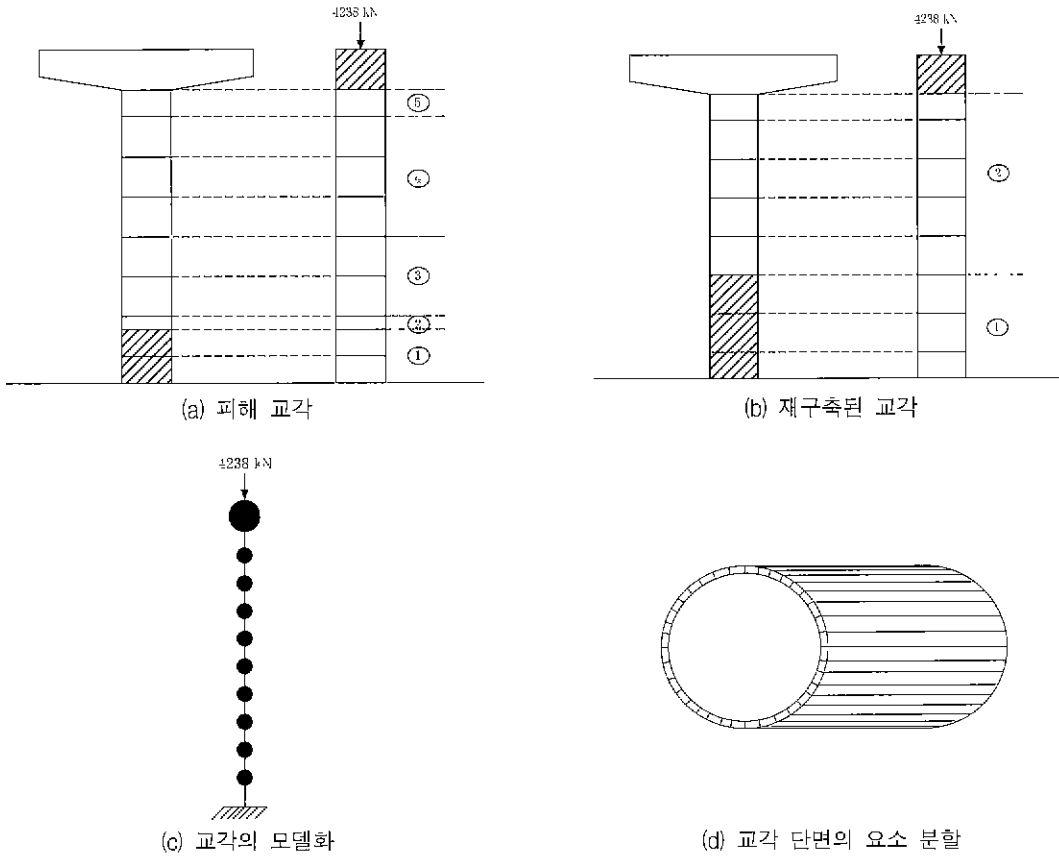


그림 1 해석모델

표 1 해석모델의 구조사양

모델	요소	단면적 (mm)	형식	높이 (m)	교각높이 (m)	사하중 (kN)	항복하중 (kN)	항복변위 (m)
피해교각	①	$\varnothing 2200 \times t51.0$	SM490	2.63	15.74	4238	1551.71	0.094
	②	$\varnothing 2200 \times t25.0$		0.63				
	③	$\varnothing 2200 \times t25.0$	SM400	4.0				
	④	$\varnothing 2200 \times t19.0$		6.0				
	⑤	$\varnothing 2200 \times t19.0$	SM490	1.28				
재구축된 교각	①	$\varnothing 2200 \times t57.5$	SM520	4.97	14.23	4328	5122.99	0.12
		Rib: $\varnothing 180 \times t44.9$						
	②	$\varnothing 2200 \times t32.0$		8.06				
		Rib: $\varnothing 180 \times t44.9$						

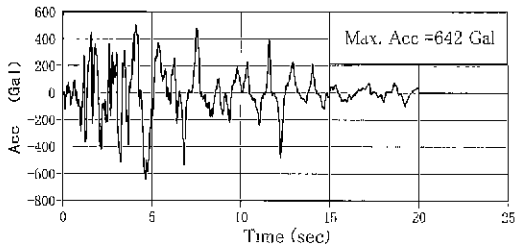


그림 2 JR-Takaton 지진파 NS 성분

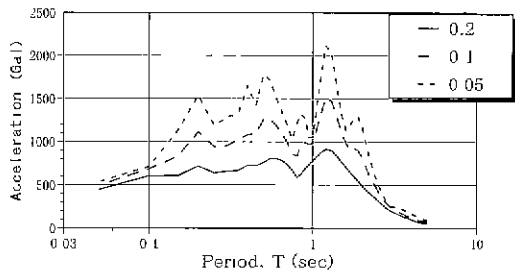


그림 3 가속도 응답 스펙트럼(Takaton earthquake)

그림 4에 있어 최대입력가속도가 100Gal ~ 333 Gal까지는 거의 선형적으로 변위응답이 증가하고 있는 것을 볼 수가 있다. 최대입력가속도 200Gal을 초과해서부터는 교각의 소성화가 시

작되어 잔류변위의 발생이 보이고 333Gal정도까지는 작은 잔류변위로서 교각의 기능상에 큰 문제가 없는 정도로 판단된다. 최대입력가속도 366Gal이 되자 음(-)의 방향으로 최대변위의 급격한 증가가 보이고 있다. 이때의 잔류변위는 -51.7cm로서 이 값은 교각 높이의 3.3%이고 허용범위인 1%을 크게 초과하고 있다. 다시 466Gal 이후는 양(+)의 방향으로 최대변위와 잔류변위는 감소하고 방향도 반전된다. 최대입력가속도 533Gal의 경우에는 잔류변위가 6.6cm로서 교각 높이의 0.42%로 허용범위 1%미만에 안정적인 응답을 보이고 있다. 최대입력가속도 533Gal까지는 잔류변위가 약간의 증감을 보이고 있지만 최대입력가속

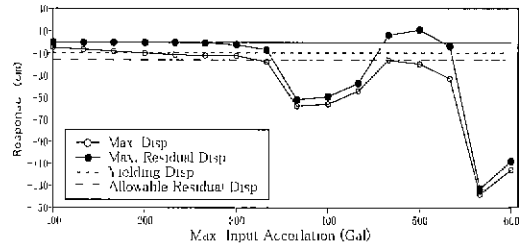


그림 4 최대입력가속도와 최대변위, 잔류변위

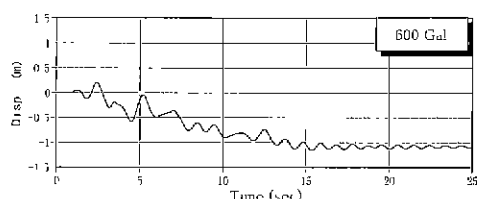
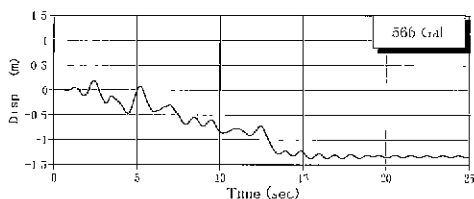
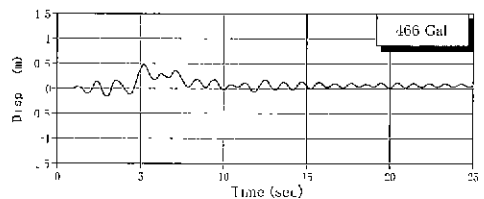
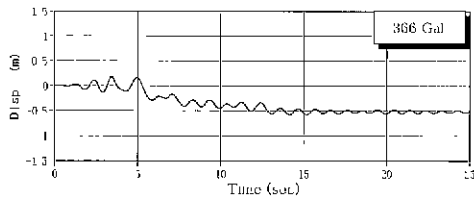
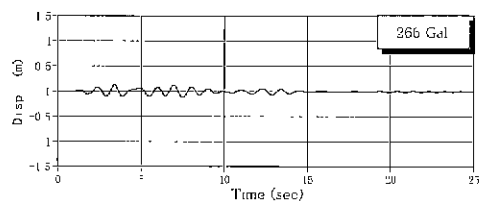
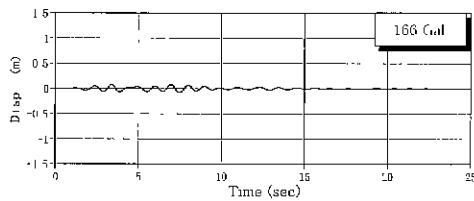


그림 5 지진파의 진폭조정에 의한 변위 응답

도가 566Gal을 초과하면 다시 크게 음(-)의 방향으로 잔류변위의 증가가 나타나고 있다.

그림 5의 응답에 있어 최대입력가속도 366Gal에서 일어나는 큰 잔류변위는 시각 약 5.1초부터 5.7초 사이의 응답의 거동에 의해 결정되어 지고 큰 변위응답이 생기게 된다. 그러나 최대입력가속도 466Gal에 있어서는 약 4.3초부터 5.1초 사이에서 발생한 음의 방향의 변위는 그 이후 양(+)의 방향으로 발생한 큰 소성변형에 의해 잔류변위의 감소가 생겼다고 볼수 있다. 그러나 잔류변위가 다시 크게 되는 최대입력가속도 566Gal 이후부터는 2.5초부터 4.3초사이와 7초부터 13초사이의 큰 변위에 의해 과대한 잔류변위의 발생을 초래하고 있다.

그림 6은 그림 1(a) 요소2의 하부(채움콘크리트 경계부)에서의 응력-변형을 관계를 나타내고 있다. 최대입력가속도 166, 266Gal의 응력-변형을 이력 루프는 작은 변형을 진폭으로 안정적인 루프를 나타내고 있다. 그러나 최대입력가속도 366Gal에 있어서는 소성변형의 발생에 의해 한쪽 방향으로 치우치는 열려져 있는 이력 루프의 형상을 나타내고 그 결과 큰 잔류변위를

발생시키고 있다. 최대입력가속도 466Gal에 있어서는 한쪽 방향으로 큰 소성변형을 발생시킨 직후 다시 반대방향으로 큰 소성변형이 일어나 그 이후 응력-변형을 이력은 닫혀진 형태의 루프를 나타내고 있고 초기의 큰 소성변형이 억제되어 버린 안정된 이력 루프를 나타내고 있다. 다시 최대입력가속도 566Gal 이상이 되면 응력-변형을 이력은 큰 잔류변위를 발생시키고 있음을 나타내고 있다.

이상과 같은 손상된 교각에 대해 지진파의 최대진폭을 선형 비례시켜 입력파를 이용한 지진응답으로 다음과 같은 응답특성을 지적할 수가 있다.

- 1) 소규모 지진 입력에 대한서의 교각의 응답은 탄성범위 내에서 억제되고 잔류변위도 거의 생기지 않는 안정된 응답을 나타냈다.
- 2) 응력-변형을 이력 루프가 작은 진폭으로 안정적인 폐루프를 보일 경우, 잔류변위는 아주 작고, 큰 소성변형이 발생하여 불안정한 이력 루프를 보일 경우, 최초의 소성변형에 의한 큰 잔류변위를 발생시켰다.

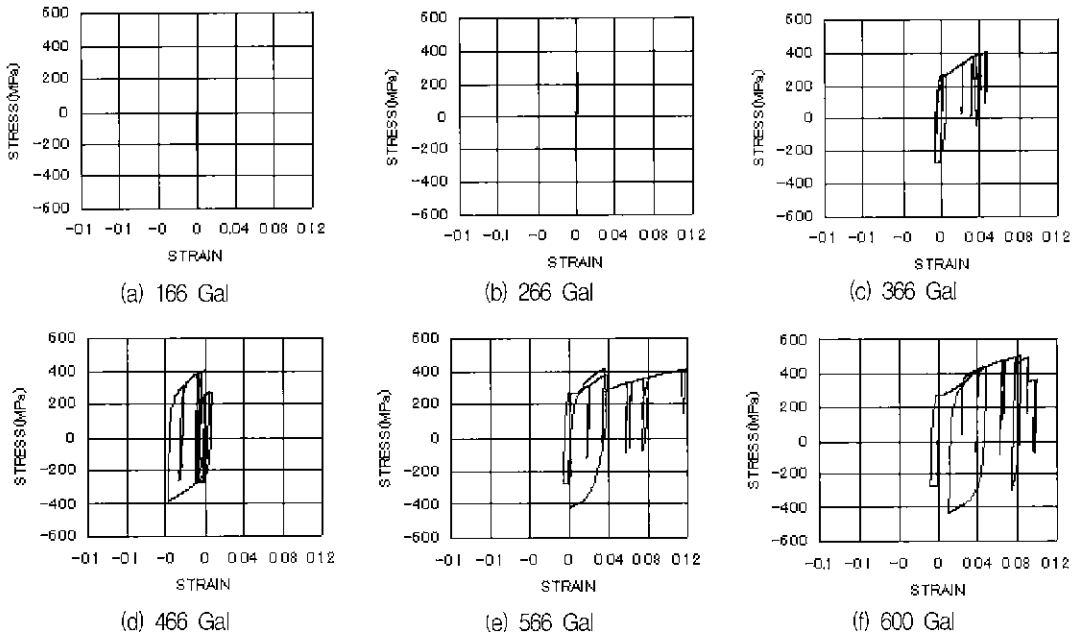


그림 6 최대입력가속도의 진폭조정에 의한 응력-변형을 관계

3) 최대입력가속도의 선형 비례 증가와 함께 교각의 최대응답과 잔류변위가 선형적으로 증가해 나간다. 그러나 그 응답이 반대 방향의 형태로 반전되는 경우, 교각은 안정된 응답을 나타내는 경우가 생긴다. 그 이유는 초기에 발생한 큰 소성변형 이후 다시 반대방향으로 작용한 큰 지진파에 의해 발생한 소성변형이 초기에 발생한 소성변형을 억제시켜 주는 역할에 의해 교각의 응답은 안정된 페이력 루프를 발생시키고 있다.

이상과 같이 교각의 응답은 같은 입력 파형을 가진 지진파일지라도 최대입력가속도의 크기에 의해 변화하지만 상기의 3)의 결과와 같이 반대방향으로 작용한 큰 입력가속도에 의한 소성변형에 의해 다시 안정된 응답이 발생할 가능성이 있음을 나타내고 있다.

4.2 재구축 교각의 응답 특성

도로교시방서(일본)에서는 내진해석 시 type2의 입력 지진파(일본 도로교 시방서에서 규정하고있는 표준지진파)를 지반의 종별에 따라 지진파의 진폭을 조정된 파형을 입력가속도로 하는 해석을 요구하고 있다. 본 연구에서도 재구축된 교각에 대한 응답특성을 구하기 위해 지진파의 진폭을 상향 조정해서 해석을 행하였다.

그림 7은 재구축된 NP584 교각 상단부의 입력가속도에 의한 최대변위응답과 잔류변위를 나타내고 있고 그림 8은 가장 큰 거동을 나타낸 요소에 대한 응력-변형을 관계를 보이고 있다. 그림 7에서는, 최대입력가속도가 700Gal까지는 최대변위가 거의 선형적으로 증가하고 있고,

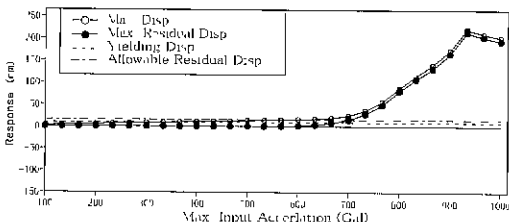


그림 7 최대입력가속도와 최대변위, 잔류변위

잔류변위는 거의 허용범위 1%이내에서 안정되어 있음을 보이고 있다. 그러나 최대입력가속도가 700Gal을 초과하면 잔류변위는 급진적으로 증가함을 나타내고 있다.

그림 8은 재구축된 교각의 해석모델인 그림 2(b) 요소2 하부에서의 응력-변형을 관계를 나타내고 있다. 본 해석에서 가장 큰 변형이 생긴 위치(요소2)는 교각의 채움 콘크리트와의 경계부이다. 그림 8에서 최대입력가속도 566Gal까지는 응력-변형을 이력은 작은 변형을 진폭으로 안정적인 페루프를 나타내고 있지만 그 이후의 이력 루프는 점점 루프의 열림이 확연하게 나타나고 한쪽방향으로 치우친 불안정한 루프를 보이고 있다. 재구축된 교각의 지진응답으로부터, 콘크리트의 하부에서는 약간의 소성변형이 발생했고 가장 큰 변형률이 발생한 곳은 채움 콘크리트의 상단부이다. 재구축 교각에 대한 지진응답해석 결과, Takatori 지진파의 642Gal에 대해서는 재구축된 교각에서 채택된 채움 콘크리트의 증설효과는 이전 교각에 비해 상당히 큰 내진성과 안정된 지진 응답을 보였고, 재구축된 교각에 사용한 판뚜껑과 강종의 일정성 및 종보강재의 효과는 피해교각에서 발생한 좌굴에 의한 손상에 대해 내진보강을 크게 향상시키는 결과를 기대할 수가 있다고 판단할 수 있다. 그러나 그림 7과 같은 700Gal을 초과하는 일본 도로교시방서에서 요구하는 최대입력가속도(1000Gal)까지 고려해 해석한 결과, 큰 잔류변형의 발생과 함께 교각의 기능을 상실하는 결과를 초래했다. 즉, 1995년 Hansin-Awaji earthquake(Japan)와 같이 예상치 못한 초거대 지진에 대해서는 본 연구의 모델이 된 재구축 교각은 반드시 충분한 내진성을 발휘한다고 말할 수 없고 다른 내진설계나 내진보강방법의 고안이 필요하다고 생각한다.

5. 결 론

본 연구에서는 최근 도심부 등에서 자주 이용되는 단주형식의 강재교각의 내진 성능을 해

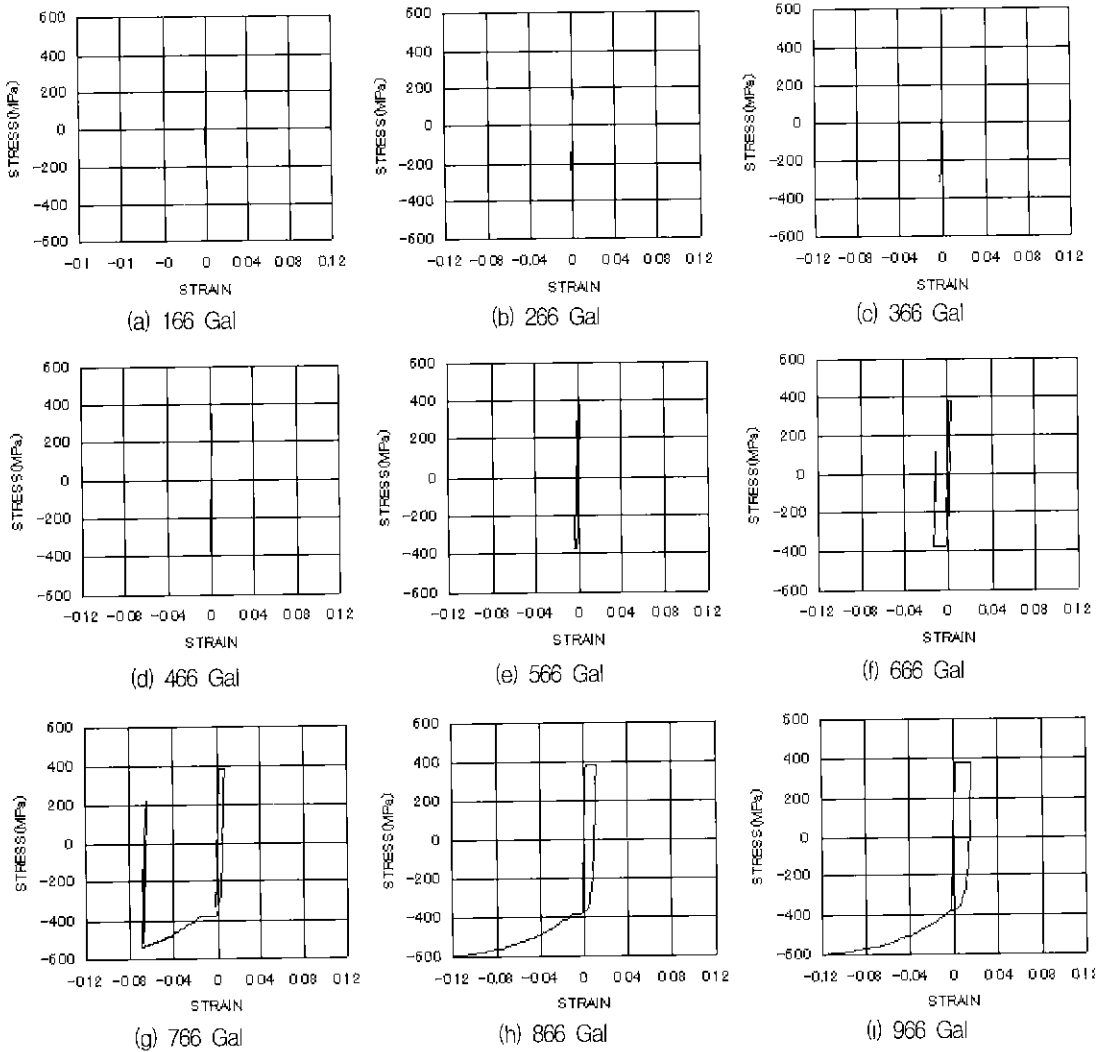


그림 8 최대입력가속도의 진폭조정에 의한 응력-변형률 관계

석적으로 규명하기 위해 1995년 Hansin-Awaji earthquake 당시, 실제로 손상을 받은 강교각과 그 이후 재구축된 교각을 모델로 이용하여 탄소성 지진 응답해석을 수행하였다. 본 해석으로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 지진파의 최대입력가속도를 선형적으로 증가시켜 입력시킨 결과, 교각의 응답은 같은 입력파형에서도 그 파형의 최대입력가속도에 의해 크게 변화하지만, 그 변화는 입력가속도의 크기에 반드시 의존한다고는 말할 수가
- 없고 큰 소성변형이후 반대방향으로 작용하는 큰 입력가속도에 의해 교각의 응답은 다시 작은 잔류변형이 발생함을 알았다.
- 2) 피해 교각에 대한 지진응답 결과, 실제 지진시 본 연구모델에 좌굴에 의해 큰 피해가 발생한 부분과 본 해석결과에서 얻은 가장 큰 변형률이 발생한 부분, 즉 강종이 변화하는 부분과 일치함을 알았다. 그리고 큰 최대변위응답, 잔류변위의 결과와 같이 교각으로서의 기능을 상실했음을 보였다.
- 3) 피해교각과 재구축된 교각의 지진응답을 비

교한 결과, 재구축된 교각에서 채택된 증설된 채움 콘크리트의 효과는 피해교각에 비해 상당한 내진성의 향상을 보였고, 피해 당시의 지진파형(642Gal)에 대해서도 안정된 응답을 보였다. 그리고 재구축된 교각에 사용한 판뚜껑, 강종의 일정성 및 종보강재의 효과는 피해교각에서 현저하게 보인 좌굴에 의한 손상에 비해 큰 내진보강의 향상을 기대하게 되었다.

참 고 문 헌

1. Watanabe, H., Sakimoto, T., and Takahashi, I., "A simplified analysis on ultimate behavior of concrete-filled steel box piers under horizontal cyclic loads," *JSCE, Proc. of the 2nd Sym. on Nonlinear Num. Ana. & Its Appli. to Seismic Design of Steel Struc.*, 1998. 11, pp. 241-248.
2. Yoshizaki, K., Usami, T., and Saizuka, K., "Components of earthquake waves causing severe damage to steel bridge piers," *Journal of JSCE*, No. 584, 1998, pp. 125-134.
3. Nakajima, A. and Kuranishi, S., "Fundamental dynamic response characteristics of steel bridge pier under strong earthquake," *Journal of JSCE, Strc. Eng.* Vol. 40A, 1994. 3, pp. 227-234.
4. Nara, S., Murakami, S., and Tamari, K., "Elastoplastic dynamic analysis of steel bridge piers considering their local buckling behavior under seismic load," *JSCE, Proc. of the 2nd Sym. on Nonlinear Num. Ana. & Its Appli. to Seismic Design of Steel Struc.*, 1998. 11, pp. 263-270.
5. Kitada, T., Nakai, H., Kano, M., and Okada, J., "Establishment of a method for analyzing elasto-plastic and dynamic response of steel bridge piers with single column by considering local buckling," *JSCE, Proc. of the 2nd Sym. on Nonlinear Num. Ana. & Its Appli. to Seismic Design of Steel Struc.*, 1998. 11, pp. 255-262.
6. Nishimura, N., Ono, K., and Ikeuchi, T., "A constitutive equation for structural steels based on a monotonic loading curve under cyclic loading," *Journal of JSCE*, No. 513, 1995. 4, pp. 27-38.
7. Newmark, N. M., "A method of computation for structural dynamics," *Proc. of ASCE*, 1959.