

현행설계법 및 하중저항계수설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 설계결과 비교

Design Comparison of Totally Prefabricated Bridge Substructure Systems Designed by Present Design and LRFD Methods

김태훈¹⁾ · 김영진²⁾ · 신현목³⁾

Kim, Tae Hoon · Kim, Young Jin · Shin, Hyun Mock

국문 요약 >> 개발된 완전 조립식 교량 하부구조에 대한 설계비교와 비선형 해석을 수행하였다. 조립식 교량 하부구조는 현행설계법과 하중저항계수설계법으로 설계하였다. 설계시에는 현 도로교설계기준에 규정된 DB-24 및 DL-24 설계활하중을 적용하였다. 이 연구는 비선형 유한요소해석을 통해서 완전 조립식 교량 하부구조의 현행 설계법인 KHBD (2005)와 AASHTO-LRFD (2007)를 평가하였다. 사용된 프로그램은 철근콘크리트 구조물의 해석을 위한 RCAHEST이다.

주요어 완전 조립식 교량 하부구조, 설계비교, 비선형 해석, 현행설계법, 하중저항계수설계법

ABSTRACT >> The design comparison and nonlinear analysis of totally prefabricated bridge substructure systems are performed. The prefabricated bridge substructures are designed by the methods of present design and load and resistance factor design (LRFD). For the design, the current Korea Highway Bridge Code (KHBD), with DB-24 and DL-24 live loads, is used. This study evaluates the present design method of KHBD (2005) and AASHTO-LRFD (2007) for totally prefabricated bridge substructure systems. A computer program, named RCAHEST (Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures, was used.

Key words Totally prefabricated bridge substructure systems, Design comparison, Nonlinear analysis, Present design, Load and resistance factor design

1. 서론

새로운 교량 하부구조에 대한 연구로서 프리캐스트 기술의 적용이 최근 들어 활발하게 이루어지고 있는데, 이러한 조립식 교량 하부구조는 여러 개의 세그먼트를 공장에서 제작한 후 현장에서 조립하여 프리스트레스 힘을 도입하는 시스템으로서 최근 선진 각국에서 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾

이러한 조립식 교량 하부구조는 여러 가지 복합적인 요인으로 공법의 장점이 부각되어 채택되는 경우가 늘어가고 있다. 콘크리트 타설 또는 거푸집 설치 등이 용이하지 않은 입지조건이나 신속한 하부구조 시공이 요구되는 경우에 매우 효과적이며 교량 건설에서 유발되는 환경문제 및 민원문제를 최소화 할 수 있는 장점이 있다.

이 연구는 국내 환경에 맞는 완전 조립식 교량 하부구조 시스템을 개발하기 위한 일련의 연구로서 교각구체와 기초 사이의 연결, 교각구체와 교각구체의 연결에서 새롭게 고안한 전단저항 연결체와 프리스트레스 긴장재를 동시에 이용하여 개발된 구조시스템^{(4),(5)}과 연계된다. 또한 정착부가 일체로 형성된 프리캐스트 기초부재를 지반에 설치한 후 기초부 나머지 부분과 연결하고 콘크리트를 타설하는 조립식 기초부^{(6),(7)} 및 매치캐스팅을 적용한 세그먼트간에 긴장재를

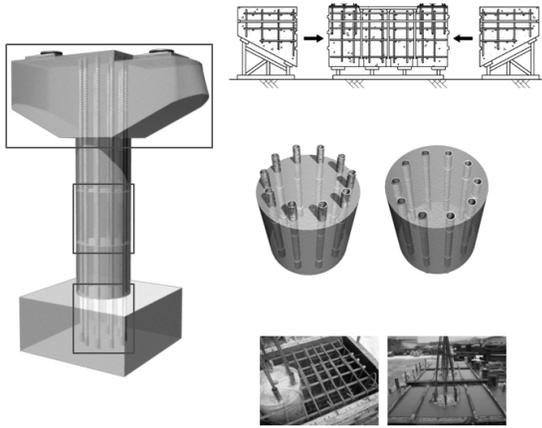
¹⁾ 정회원 · 삼성물산(주) 건설부문 기반기술연구소 수석연구원, 공학박사
(교신저자: th1970.kim@samsung.com)

²⁾ 대우건설 기술연구원 연구위원, 공학박사

³⁾ 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 9. 17 / 수정일 : 2010. 11. 7 / 게재확정일 : 2010. 11. 9)



〈그림 1〉 완전 조립식 교량 하부구조 시스템

통해 횡방향 긴장력을 도입하고 세그먼트 접합에 있어 요철 부분의 맞물림 작용 등으로 전단저항 및 연성을 확보할 수 있는 전단키를 적용한 조립식 코핑부^{(8),(9)}와 연계된다.(그림 1)

이 연구의 목적은 기존의 연구에서 개발된 조립식 기둥부, 조립식 기초부 그리고 조립식 코핑부를 통하여 구축된 완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 구조성능을 해석적 연구 등을 통해 확인하는데 있다. 또한 최근 국내 설계규정을 정립하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있는 하중저항계수설계법(LRFD)⁽¹⁰⁾과 현행설계법^{(11),(12)}에 의한 조립식 교량 하부구조 시스템의 설계결과를 비교·분석함으로써 국내적용에 대한 적합성을 검토하고자 한다.

하중저항계수설계법은 설계기본변수(하중, 저항강도, 및 기하적 제원)에 부분안전계수(하중계수 및 저항계수)를 적용하여 구한 설계값을 기준으로 검증하는 설계기법으로 부분안전계수의 수치 값은 결정론적 방법이거나 확률론적 방법 또는 두 방법의 조합에 의해 결정된다⁽¹³⁾. 우리나라도 이미 국제적으로 표준화된 신뢰도 기반 LRFD 설계기준에 의한 설계기술의 확보가 시급하고 국내 LRFD 설계규정을 정립하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

하중 및 재료 등의 공칭값에 대한 실제값의 변동성으로 인하여 발생하는 불확실성을 통계분석 및 신뢰도분석을 통하여 고려한 하중저항계수설계법을 완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 설계에 적용시키는 경우, 균일한 안전성을 확보한 설계가 가능할 뿐만 아니라 경제적이고 합리적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

이 연구에서는 고속도로 4차로 편측폭원 3경간 교량의 조립식 하부구조를 현행설계법과 하중저항계수설계법으로 설계하였다. 두 방법으로 설계된 결과의 구조성능과 경제성을 분석하였으며, 비선형 유한요소해석에 의한 지진해석을 수행하고 지진응답 등을 비교·고찰 하였다.

〈표 1〉 완전 조립식 교량 하부구조의 설계

구분	현행설계법	하중저항계수설계법
PSC 부재	<ul style="list-style-type: none"> · 허용응력하중조합 부재력으로단면 선정 - $f_c < f_{ca}$ · 강도하중조합으로 단면의 안전성 검토 - $M_u < \phi M_n$ 	<ul style="list-style-type: none"> · 사용한계상태 검토(시공중) - 압축 및 인장응력 · 사용한계상태 검토(공용중) - 압축응력(코핑, 기둥) - 인장응력(코핑) - 인장응력(기둥) · 강도한계상태 검토 - 휨 및 전단, 비틀림 · 극한한계상태 검토 - 휨 및 전단, 비틀림 · 사용한계상태 검토(사용성) - 균열(PSC 부재) · 정착구 검토
RC 부재	<ul style="list-style-type: none"> · 강도하중조합으로 단면 선정 - $M_u < \phi M_n$ · 허용응력하중조합 부재력으로 사용성 검토 - 균열, 처짐 	<ul style="list-style-type: none"> · 강도한계상태 검토 - 휨 및 전단, 비틀림 · 극한한계상태 검토 - 휨 및 전단, 비틀림 · 사용한계상태 검토(사용성) - 균열(RC 부재)
기초 안전성	<ul style="list-style-type: none"> · 사용하중 조합 - 지지력, 전도, 활동 	<ul style="list-style-type: none"> · 강도한계상태 검토 - 지지력, 전도, 활동 · 극한한계상태 검토 - 지지력, 전도, 활동 · 사용한계상태 검토(사용성) - 지지력

2. 완전 조립식 교량 하부구조 설계

완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 설계는 조립식 기둥부, 조립식 기초부 그리고 조립식 코핑부 설계 등으로 구성된다.

전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각의 설계는 휨에 대한 저항과 전단에 대한 저항으로 나누어 설계하였다. 수평력에 의해 휨모멘트가 발생할 경우 인장에 대해서는 내부에 삽입된 강연선이 부담하고, 압축에 대해서는 횡방향 철근 내부에 있는 심부구속 콘크리트가 부담하는 것으로 하였다. 설계에서 긴장재의 단면적과 프리스트레스의 크기 결정이 중요한 사항이며 반복 해석한 결과와 축방향 압축응력, 즉 축력과 프리스트레스에 의한 압축응력 합이 증가에 따라 변위연성도가 급감하는 범위가 20% 내외임을 고려하여 긴장응력의 수준을 결정하였다. 또한, 전단에 대해서는 세그먼트 사이를 연결하는 강제덕트가 저항하도록 하였다.

조립식 기초부의 설계는 기존 기초부의 설계에 횡방향으로 기초부 철근과 연결하기 위하여 프리캐스트 기초부재에 구비된 커플러 검토 및 기초부 철근의 헤드 바 검토 등을 추가하여 수행하였다.

조립식 코핑부의 설계는 기존 프리스트레스트 콘크리트 코핑부의 설계에 프리캐스트 블록 이음부 기준 등을 추가하여 코핑 안전성 검토, 휨강도 검토, 전단강도 검토, 전단기 검토 순으로 수행하였다

이 연구에서는 완전 조립식 교량 하부구조 시스템을 현행 설계법과 하중저항계수설계법으로 각각 설계하였으며 부재 별로 비교하여 정리하면 표 1과 같다.

각각 설계하였다. 이때 설계는 현행 도로교설계기준⁽¹¹⁾, 콘크리트구조설계기준⁽¹²⁾, 그리고 AASHTO-LRFD⁽¹⁰⁾를 근거로 하였다. 그리고 현행 도로교설계기준의 DB-24 및 DL-24 설계활하중을 적용하여 AASHTO-LRFD에 기초한 하중저항계수설계법으로 설계하였다.

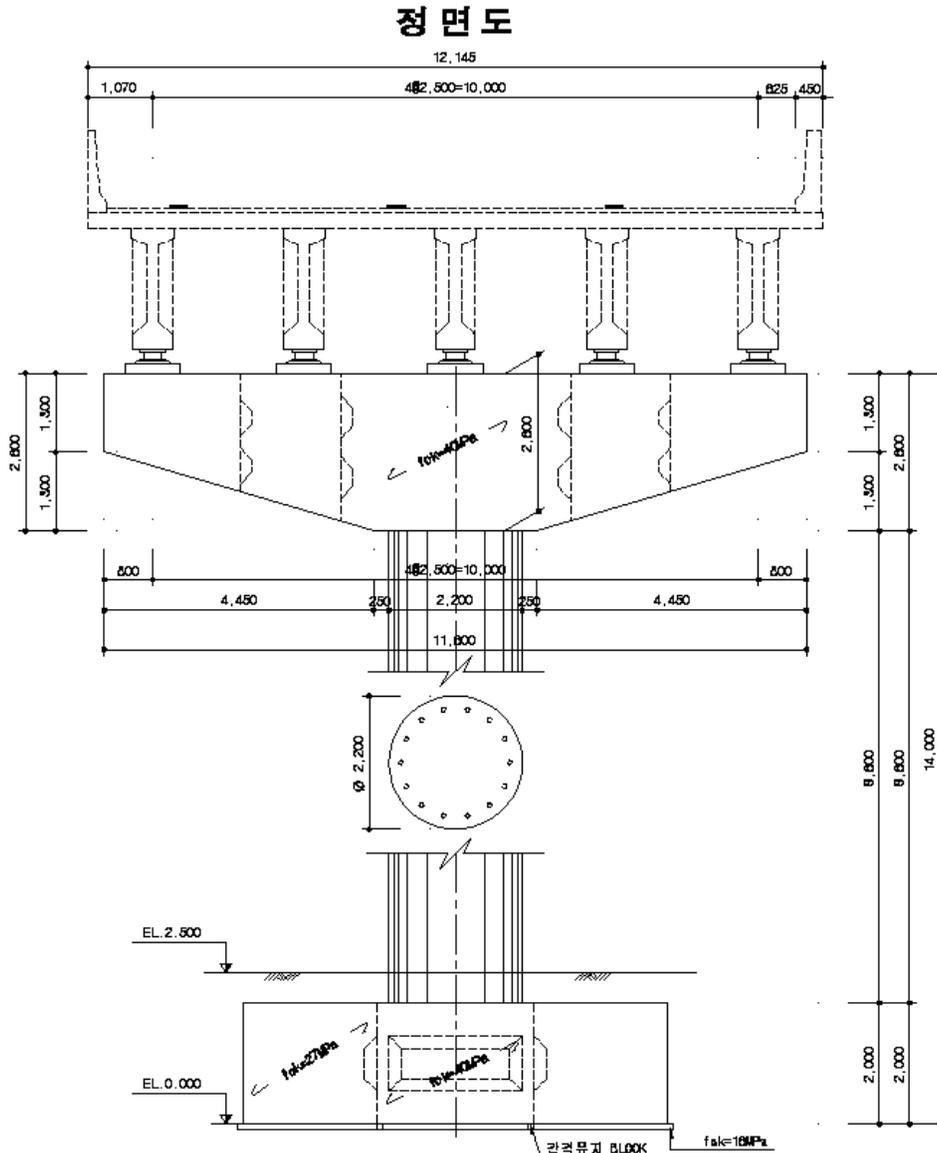
설계된 예제의 제원과 상세를 그림 2, 3과 표 2에 나타내었으며 일반사항은 다음과 같다.

3. 설계결과 및 분석

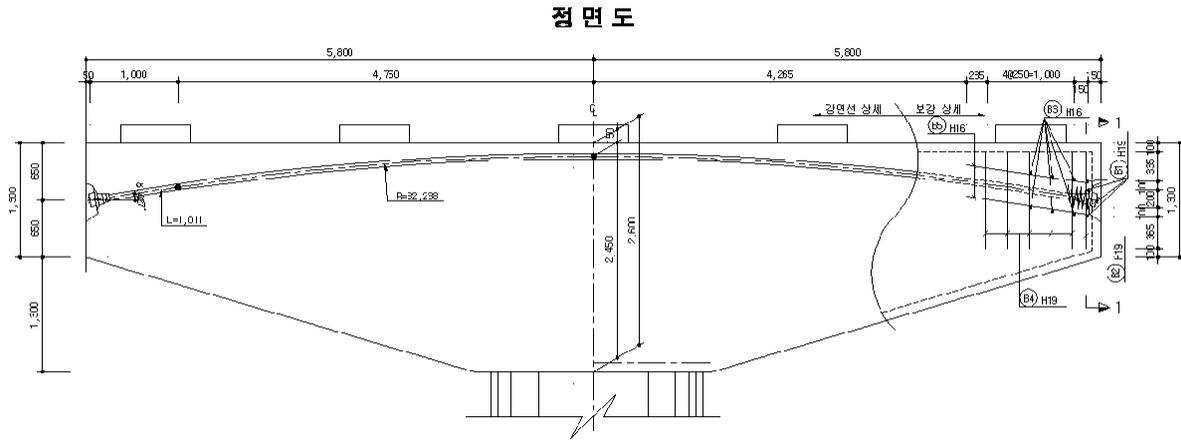
3.1 설계예제

이 연구에서는 고속도로 4차로 편측폭원 3경간 교량의 조립식 하부구조를 현행설계법과 하중저항계수설계법으로

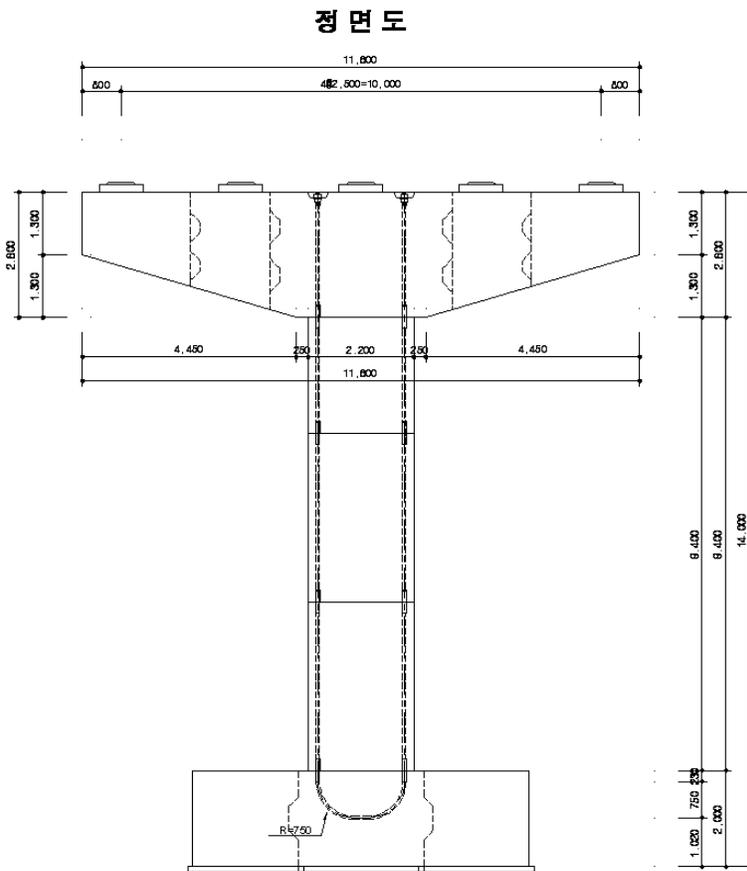
- 교량연장 : 30.0 + 30.0 + 30.0 = 90.0 m
- 교량폭원 : 12.15(상행) + 12.15(하행) = 24.3 m
- 상부구조형식 : PSC Beam 교
- 하부구조형식 : T형 교각 (원형충실)
- 교량등급 : 1등교
- 기초형식 : 직접기초



〈그림 2〉 설계예제 (조립식 교량 하부구조)



(a) 코핑 강연선 배치도



(b) 기둥 강연선 배치도

〈그림 3〉 조립식 교량 하부구조 상세도

3.2 설계결과 비교

현행설계법과 하중저항계수설계법을 적용하여 완전 조립식 교량 하부구조를 설계하였다. 하중해석 결과, 현행설계법에서는 허용응력이 하중저항계수설계법에서는 응력한계가 설계를 지배하는 것으로 분석되었다. 그리고 하중저항계수설계법에 의한 설계의 단면 및 강연선량 감소의 주된 원인은 하중조합에서 발생되었다. 응력 검토시 하중저항계수설계법에서는 충돌하중을 고려하지 않으며 또한 풍하중 크기

도 현행설계법보다 작다.

하중저항계수설계법에 의한 설계시 현행설계법에 의한 설계보다 강연선량은 43% 감소하였으며 완전 조립식 교량 하부구조의 전체 경제성은 9% 정도의 개선효과를 가져왔다.

강도 검토시에도 하중저항계수설계법에 의한 설계가 현행설계법보다 안전율이 증가하였다. 이는 하중저항계수설계법에 의한 설계를 할 경우 ϕ (Resistance Factor) 값이 현행설계법보다 큰 것에 기인된다. 하중저항계수설계법에서

〈표 2〉 설계예제의 제원

구분		현행설계법	하중저항계수설계법
		KHBD	LRFD
단면 직경(m)		2.2	2.1
교각 높이(m)		14.0	
재료 강도	콘크리트 (MPa)	40 (기초일부 27)	
	철근 (MPa)	SD40 (400)	
	강재덕트 (MPa)	STK400 (235)	
	강연선 (MPa)	기둥부	7@7연선 15.2 mm / 14본 (1860)
코핑부		7@7연선 15.2 mm / 7본 (1860)	
PS 강재	긴장응력 (MPa)	929.0 (기둥) 874.0 (코핑)	883.7 (기둥) 832.9 (코핑)
기둥부 철근	직경	H16 (주철근) - 최소량 H22, H29 (횡철근)	
코핑부 철근	직경	H13, H16 (수평철근) H19 (수직철근)	
기초부 철근	직경	H25, H19	
피복두께(mm)		100	
축력		$0.1 A_g f_{ck}$	

〈표 3〉 코핑 검토

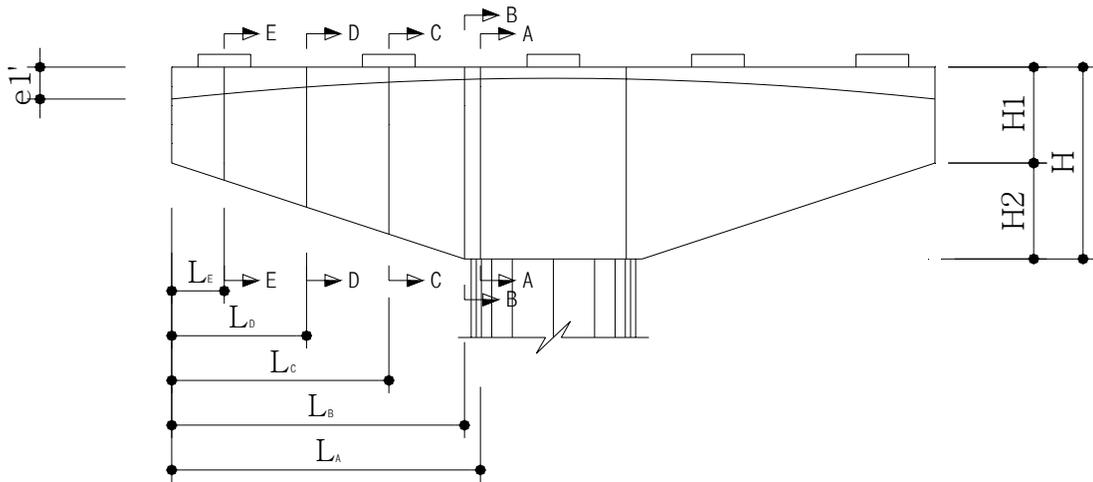
구분		현행설계법	하중저항계수설계법	
			압축응력한계	인장응력한계
응력 검토 (MPa)	A-A	-0.478(Top) 2.318(Bot)	-1.047(Top) 2.786(Bot)	-0.848(Top) 2.580(Bot)
	B-B	-0.058(Top) 1.877(Bot)	-0.490(Top) 2.207(Bot)	-0.315(Top) 2.026(Bot)
	C-C	1.124(Top) 0.927(Bot)	0.764(Top) 1.156(Bot)	0.903(Top) 1.013(Bot)
	D-D (접합부)	1.790(Top) 0.569(Bot)	1.474(Top) 0.736(Bot)	1.573(Top) 0.634(Bot)
	E-E	2.619(Top) 0.163(Bot)	2.437(Top) 0.149(Bot)	2.480(Top) 0.105(Bot)
강도 검토 (kN·m)	A-A	24951.1	27626.2	29080.3
	B-B	24862.1	27494.3	28941.4
	C-C	20212.7	22554.3	23741.3
	D-D (접합부)	15178.4	16847.4	17734.1
	E-E	9656.1	10609.5	11167.9

ϕ 은 강도한계시 0.95, 극한한계시 1.0이고 현행설계법에서는 0.85이다.

표 3에는 조립식 코핑부의 단면설계 결과로서 응력검토와 강도검토를 나타내었다. 현행설계법에서는 총 손실후 응

력과 휨강도를 검토하였으며 하중저항계수설계법에서는 총 손실후 응력한계와 강도한계상태 및 극한한계상태에서의 휨강도를 검토하였다.(그림 4)

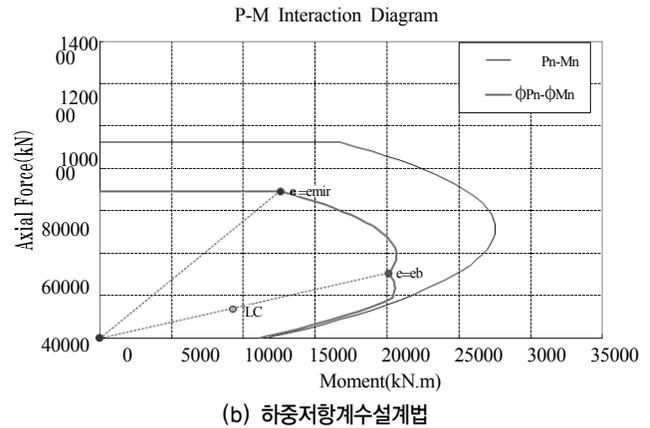
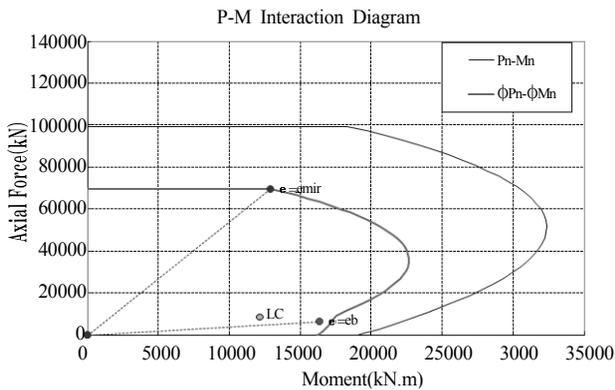
표 4에는 조립식 기둥부의 단면설계 결과로서 응력검토



〈그림 4〉 조립식 코핑 제원

〈표 4〉 기둥 검토

현행 설계법	단면		발생응력 (MPa)		허용응력 (MPa)		
			Top	Bot	인장	압축	
	상단		1.351	6.312	0.000	16.000	
	하단		0.416	8.383	0.000	16.000	
하중저항계수 설계법	단면		발생응력 (MPa)		응력한계 (MPa)		
			Top	Bot	인장	압축	
	압축 응력 검토	상단		1.587	7.908	0.000	24.000
		하단		0.439	9.599	0.000	24.000
인장 응력 검토	상단		3.605	5.284	0.000	24.000	
	하단		0.331	9.208	0.000	24.000	



〈그림 5〉 P-M 상관도

를 나타내었다. 현행설계법에서는 기둥 상하단에서의 응력을 검토하였으며 하중저항계수설계법에서는 기둥 상하단에서의 응력한계를 검토하였다.

그리고 기둥의 강도 검토는 그림 5와 같은 P-M 상관도를 이용하였다. 조립식 기둥부재는 축방향력과 휨모멘트를 동

시에 받으므로 프리스트레스를 고려할 수 있도록 기존의 이론⁽¹⁴⁾을 바탕으로 개발한 P-M 상관도를 통해 강도를 검토하였다. 하중저항계수설계법에서는 강도한계상태와 극한한계상태에 대해 각각 검토를 수행하였다.

2D or 3D Spring Element	4 nodes PSC Shell Element	2D or 3D Flexibility-Based Fiber Beam-column Element	4 nodes Elastic Shell Element
Interface Element	FEAP		4 nodes RC Shell Element
Joint Element	Bonded or Unbonded Prestressing Bar Element	RC Plane Stress Element	2D Elasto-plastic Plane Stress Element

〈그림 6〉 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

4. 비선형 유한요소해석

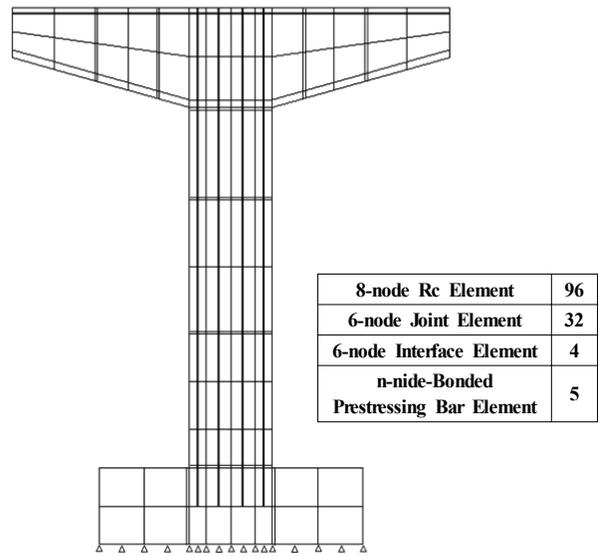
4.1 해석 개요

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소, 경계면요소, 부착 및 비부착 텐던요소 그리고 접합요소 등^{(4),(5),(7),(9),(15-18)}을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽¹⁹⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램인 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 사용하였다.(그림 6)

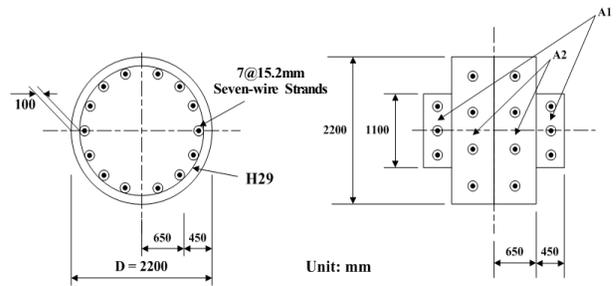
프리스트레스드 콘크리트는 일반적으로 콘크리트와 철근 및 텐던으로 구성되는 복합재료이며, 비선형 재료모델은 이들 각 구성 재료가 중첩된 것으로 표현할 수 있는데 각각의 해석모델은 콘크리트와의 부착특성을 고려하여 개발된 것이라야 한다. 비선형 재료모델은 저자 등에 의하여 이미 발표된 재료모델^{(4),(5),(7),(9),(15-18)}을 그대로 적용하였다.

4.2 정적 해석

그림 7은 비선형 유한요소해석을 수행하기 위하여 요소 분할한 예이다. 완전 조립식 교량 하부구조 설계예제의 경우 그림 7(a)에서 보는 것처럼 기초부, 기둥부 그리고 코핑부에 9개의 세그먼트로 구성되어 있으며 총 137개의 요소로 분할하였다. 8절점 철근콘크리트 평면응력 요소가 96개, 세그먼트 사이에 6절점 프리캐스트 접합면 요소 32개, 프리캐스트 기초부재와 후타설 기초부 사이에 6절점 경계면 요소 4개, 그리고 부착 텐던의 거동을 고려하기 위한 다절점 부착 텐던요소 5개가 사용되었다. 또한 원형 프리캐스트 세그먼트 교각의 2차원 해석을 위하여 그림 7(b)에서 보는 것처럼 등가환산단면을 이용하여 원형단면을 4개의 직사각형



(a) 유한요소모델



(b) 등가환산단면

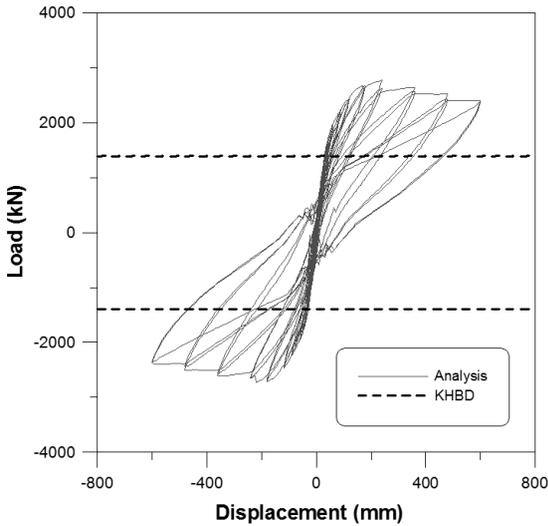
〈그림 7〉 조립식 교량 하부구조 예제

요소로 변환하여 해석을 수행하였다. 등가환산단면은 원형 프리캐스트 세그먼트 교각의 실제거동과 유사하도록 PS 강재와 콘크리트의 단면적, 하중재하 방향의 단면 2차 모멘트를 같게 하여 유도하였다.

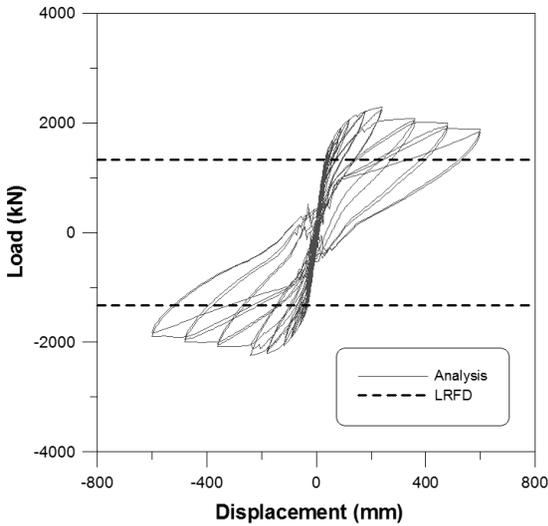
이 연구에서 세그먼트 접합부의 거동특성을 지배하는 내부마찰각과 점착력은 기존의 연구결과⁽²⁰⁾와 사용된 에폭시의 재료물성을 근거로 각각 45°와 5.88 MPa로 정하였다. 그리고 사용된 유한요소망과 등가환산단면은 일반 탄성해석과의 수렴성 시험(Convergence Test) 결과 형상비(Aspect Ratio)에 의한 영향은 1.0% 미만이었으며 이는 콘크리트구조의 비선형해석에서 예상되는 오차에 비하여 매우 작은 것으로 나타나 그 타당성이 검증되었다.

그림 8에 현행설계법과 하중저항계수설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 하중-변위 이력곡선을 나타내었다. 또한 각 시스템의 공칭모멘트에 대한 설계하중을 함께 나타내었다.

현행설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 1392 kN이며 해석값은 +2770 kN, -2726 kN이다. 그리고 하중저항계수설계법에 의한 조립식



(a) 현행설계법

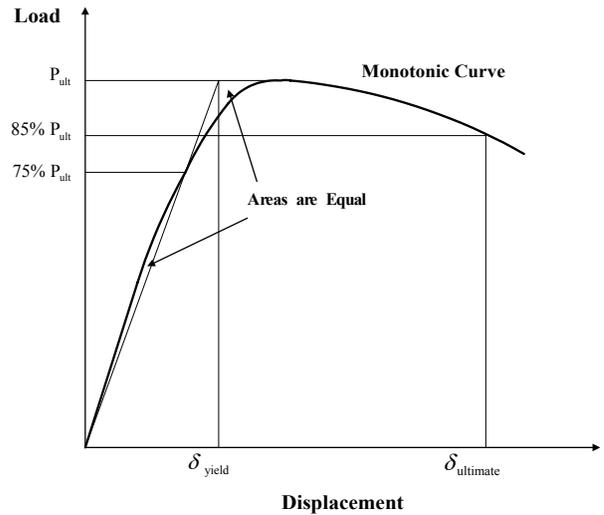


(b) 하중저항계수설계법

〈그림 8〉 시스템의 하중-변위 이력곡선

교량 하부구조의 공칭모멘트에 대한 설계하중은 1325 kN이며 해석값은 +2294 kN, -2241 kN이다. 현행설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 경우 설계하중의 190% 수준까지 내력이 나타나고 있으며 하중저항계수설계법에 의한 조립식 교량 하부구조의 경우 설계하중의 170% 수준으로 충분한 내력이 발휘되고 있다.

해석에서 하부구조 시스템의 항복변위와 극한변위는 철근콘크리트 교각의 변위연성도 평가에서 가장 널리 사용되고 있는 하중-변위곡선으로부터 결정하는 간접적인 방법⁽²¹⁾으로 구하였다.(그림 9) 즉, 하중-변위곡선으로부터 시스템의 수평 저항능력이 최대 내력에 비하여 15% 저하되었을 때의 변위를 극한변위로 정의하였으며, 항복변위는 하중-변위곡선의 원점과 최대 내력의 75%에 달하였을 때의 변위점을 이은 직선이 최대 내력점에 도달하였을 때의 수평변위로 정의하였다.



〈그림 9〉 시스템의 항복변위와 극한변위

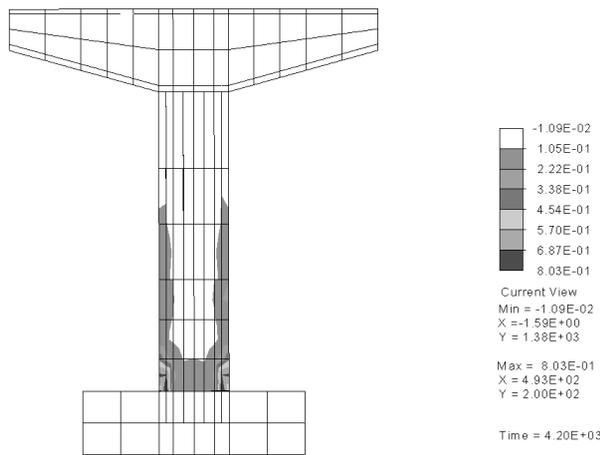
구조시스템의 특성상 RC 대응 항복변위가 철근콘크리트 교각의 경우에 비해 일반적으로 크게 평가됨에도 불구하고, 현행설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 변위연성도는 6.3이다. 또한 하중저항계수설계법에 의한 조립식 교량 하부구조의 변위연성도는 5.7로서 단주교각의 요구연성도 5를 만족하고 있음이 확인되었다.

그림 10은 비선형 유한요소해석을 전제로 하여 유한요소해석에서 필연적으로 계산되는 가우스 적분점에서의 변형률을 이용한 파괴시점의 요소레벨의 손상지수⁽¹⁶⁾를 비교한 것으로서 구조물의 중요한 비선형 거동특성인 소성흔지 형성 부위가 거의 유사함을 알 수 있다. 이러한 가시화된 요소레벨의 손상지수도를 통하여 완전 조립식 교량 하부구조의 손상정도를 쉽게 검색할 수 있으며 내진성능평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

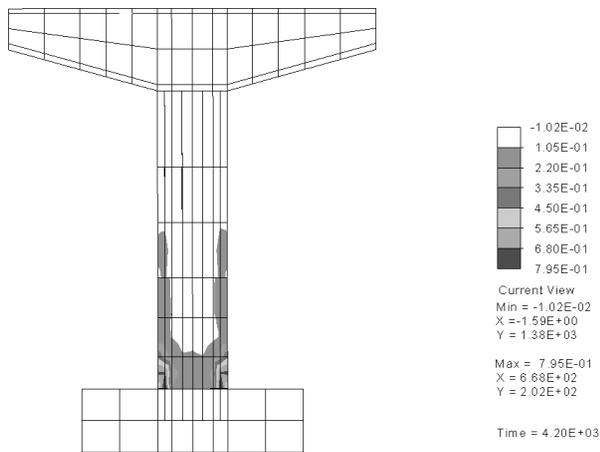
4.3 동적 해석

이 연구에서는 현행설계법과 하중저항계수설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 내진성능을 근단층지반운동⁽²²⁾에 대해서 평가하기 위해 축소모형을 제작하고 축력효과는 프리스트레스에 의해 구현하며 질량 효과는 별도의 질량모사 프레임을 제작하여 수행한 실험과 해석결과⁽²³⁾를 근거로 완전 조립식 교량 하부구조의 지진해석을 수행하였다.

지반운동은 국내에서 중규모지진에 의한 근단층지반운동 모델을 수행하여 얻어진 결과를 이용하였고 단계별로 가속도 수준을 높이면서 파괴에 이르도록 설정하였다. 근단층지반운동으로 사용한 지반운동은 중규모지진에 의해서 생성

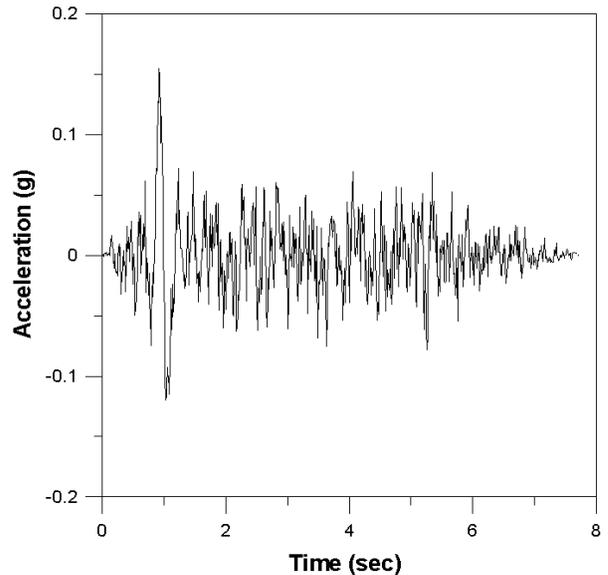


(a) 현행설계법



(b) 하중저항계수설계법

〈그림 10〉 설계예제의 파괴양상



〈그림 11〉 입력지진파 (PGA 0.154g)

〈표 5〉 설계예제의 해석결과 - 고유진동수

구분	Natural Frequency (Hz)	
	완전 조립식 교량 하부구조	현행설계법
	하중저항계수설계법	0.91011

된 것으로 0.0627g, 0.0803g, 0.11g, 0.154g, 0.22g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g까지 가진을 실시하였다.

지진해석을 위해서 사용된 지진파는 입력지진파의 최대 가속도 크기를 조정하였으며, 시간축은 상사성의 원리에 따랐고 그림 11은 PGA 값이 0.154g인 입력지진파를 나타내고 있다.

이 연구에서는 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법⁽²⁴⁾에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 거침으로써 해를 구하였다.

구조물의 비선형응답은 운동방정식의 점층 증가방식의 수치적분에 의하여 구해지며 주로 직접적분법이 사용되고 있다. 이러한 직접적분법 중 연구에 실제 많이 이용되는 해석법은 Newmark 법과 Hilber-Hughes-Taylor (HHT) 법이다. HHT 법은 Newmark 법이 갖고 있는 단점인 수치적인 감쇠효과를 유도할 때 발생하는 정확도의 감소를 보완한 해석방법으로서 Hughes에 의해 그 수렴성과 안정성이 검증되

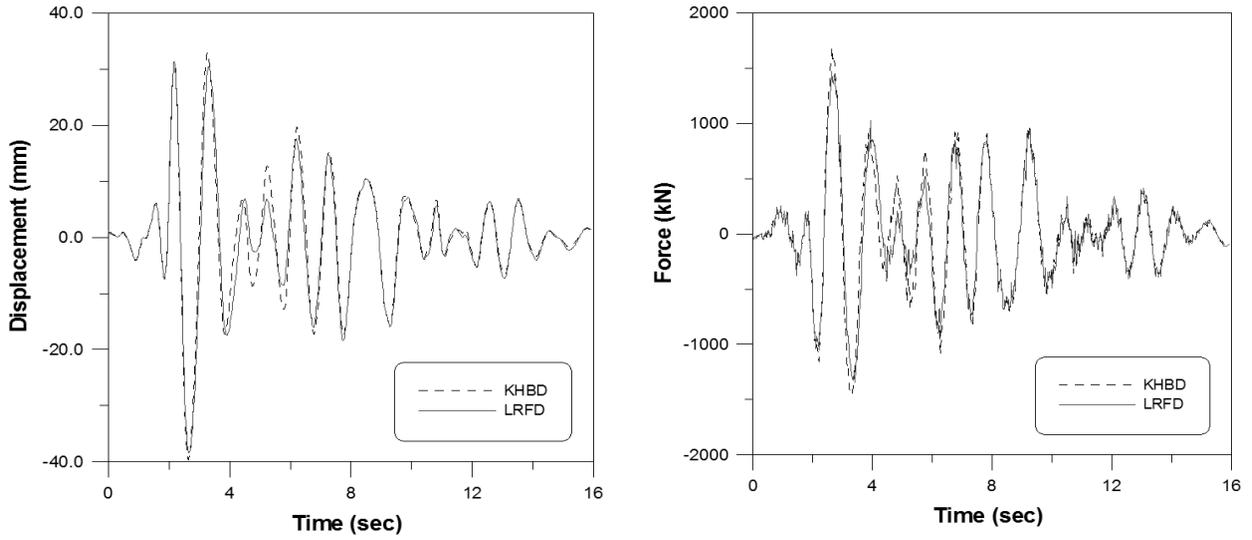
었다.⁽²⁵⁾

비선형 동적 유한요소해석을 수행하기 위한 요소 분할은 4.2절의 그림 7과 동일하게 총 137개의 요소로 분할하였다.

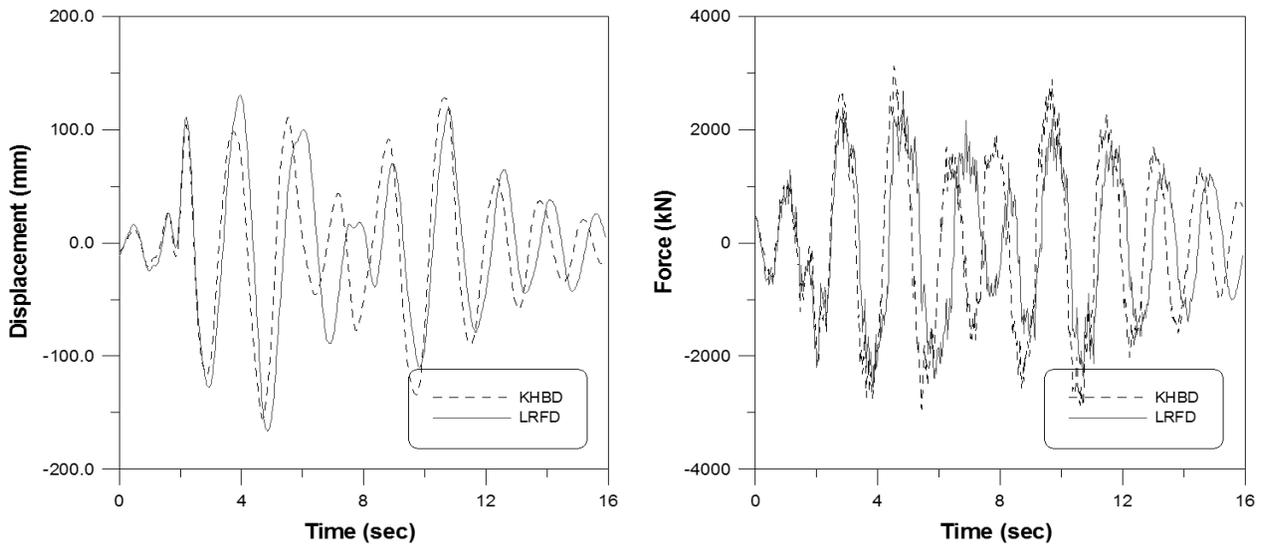
감쇠를 3%로 하고 고유진동수를 측정된 해석결과를 비교하여 표 5에 나타내었다. 고유진동수는 비교검증을 위한 현행설계법과 하중저항계수설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 동적거동 특성을 잘 나타내고 있다. 특히 설계법에 따른 초기프리스트레스의 감소에 따라 고유진동수 감소 등의 비선형 이력특성을 잘 표현하고 있다.

그림 12 ~ 그림 14는 비선형 동적 유한요소해석 결과에 의한 변위와 하중의 이력관계를 현행설계법과 하중저항계수설계법으로 비교하여 나타내고 있으며 완전 조립식 교량 하부구조의 지진하중에 대한 변위와 하중의 주기 및 전체적인 응답특성을 전반적으로 정확하게 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 설계법에 따른 초기프리스트레스의 감소에 따른 변위 진폭의 증가와 하중 진폭의 감소 등의 비선형 이력특성을 비교적 잘 표현하고 있다.

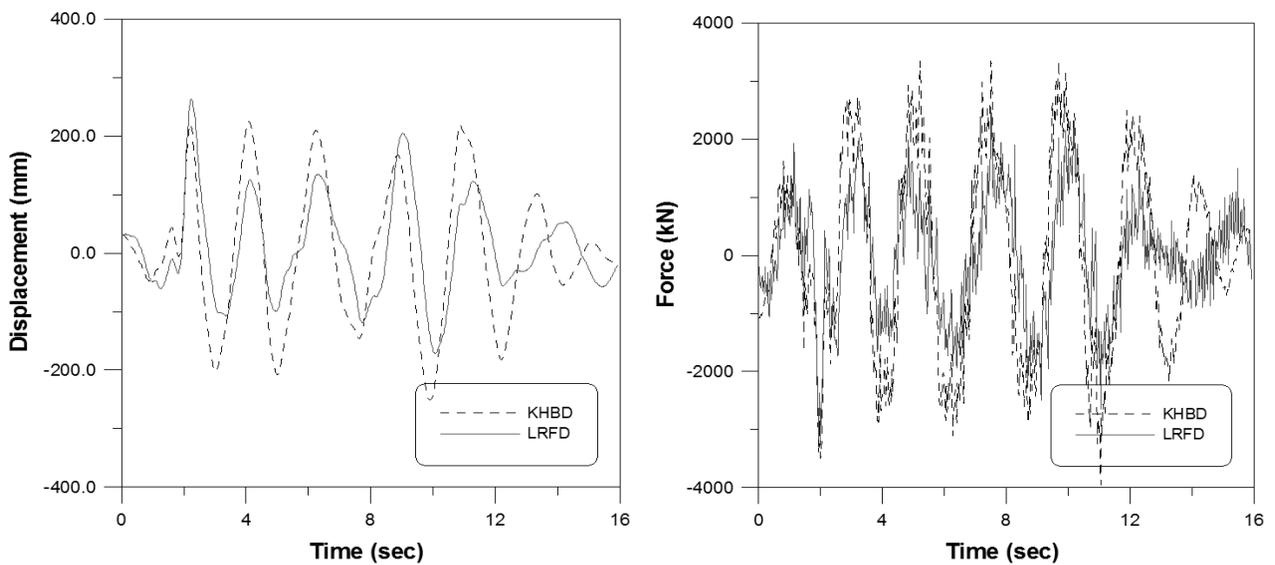
그림 15와 16은 현행설계법과 하중저항계수설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 복원력 해석결과를 나타내고 있다. 해석결과에 의한 현행설계법의 최대하중은 +3348 kN, -3946 kN이고 하중저항계수설계법의 최대하중은 +2766



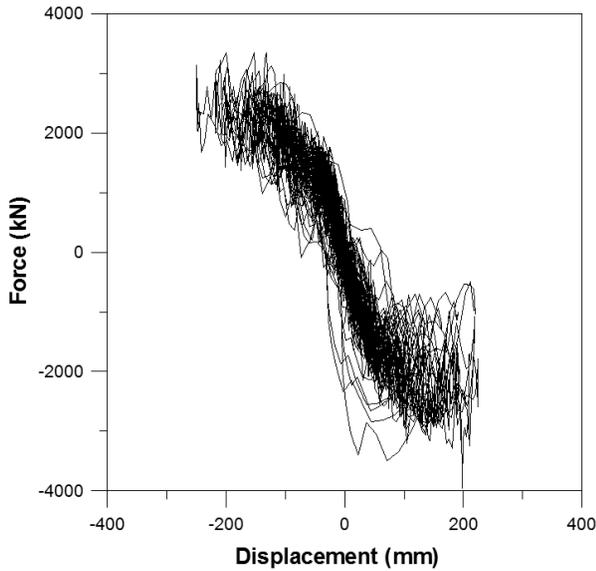
〈그림 12〉 지진응답 (0.154g)



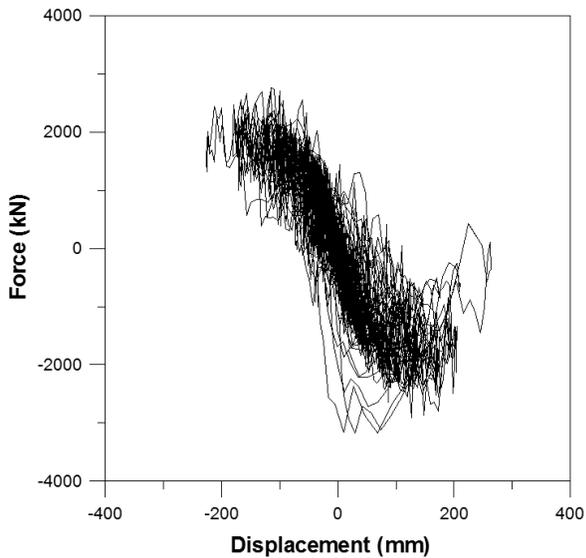
〈그림 13〉 지진응답 (0.5g)



〈그림 14〉 지진응답 (0.9g)



〈그림 15〉 복원력 (현행설계법)

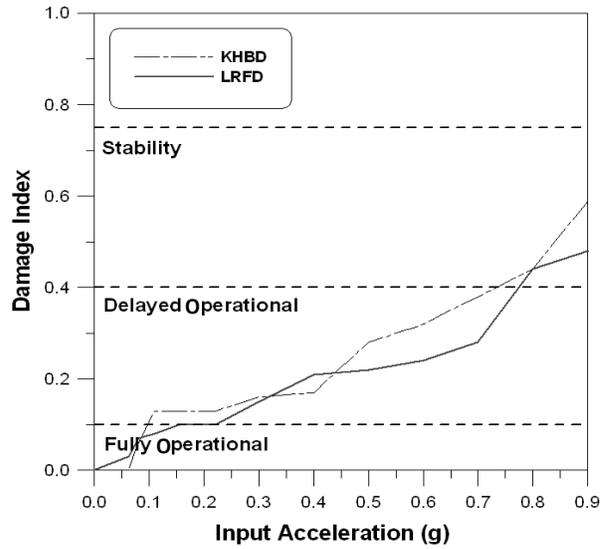


〈그림 16〉 복원력 (하중저항계수설계법)

kN, -3178 kN이다.

현행설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 경우 설계하중의 260% 수준까지 내력이 나타나고 있으며 하중저항계수설계법에 의한 조립식 교량 하부구조의 경우 설계하중의 220% 수준으로 충분한 내력이 발휘되고 있다. 이를 통해 개발된 완전 조립식 교량 하부구조의 지진하중에 대한 복원능력이 상당히 유용할 수 있음을 알 수 있다.

그림 17은 입력지진파에 따른 손상지수⁽¹⁶⁾의 변화를 성능수준과 함께 비교·검토하여 완전 조립식 교량 하부구조의 내진성능평가를 나타내고 있다. 이러한 해석결과는 현행설계법과 하중저항계수설계법 모두 지진하중이 진행되는 동안 소성힌지 영역에서 비탄성 변형이 증대됨에 따라 일어나는 콘크리트의 균열과 파쇄, 그리고 이로 인한 손상이나 파



〈그림 17〉 내진성능평가

괴가 대체적으로 유사함을 알 수 있다.

일련의 해석결과로부터 이 연구에서 제안하고 있는 방법은 지진하중에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 비탄성 이력거동을 적절히 평가하고 있으며, 개발된 비선형 유한요소해석 프로그램(RCAHEST)을 이용함으로써, 해석적 방법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 내진성능평가 및 내진설계가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

이 연구에서는 완전 조립식 교량 하부구조를 현행설계법과 하중저항계수설계법으로 설계하여 구조성능과 경제성을 분석하였으며, 비선형 유한요소해석에 의한 정적해석과 동적해석을 수행하였다. 연구 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

1. 하중저항계수설계법에 의한 설계시 현행설계법에 의한 설계보다 강연선풐은 43% 감소하였으며 완전 조립식 교량 하부구조의 전체 경제성은 9% 정도의 개선효과를 가져왔다. 즉 하중저항계수설계법은 보다 합리적이고 경제적인 설계를 가능하게 하는 것으로 분석되었다.
2. 현행설계법에서는 허용응력이 하중저항계수설계법에서는 응력한계가 설계를 지배하는 것으로 분석되었다. 그리고 하중저항계수설계법에 의한 설계의 단면 및 강연선풐 감소의 주된 원인은 하중조합에서 발생하였다. 응력검토시 하중저항계수설계법에서는 충돌하중을 고려하지 않으며 또한 풍하중 크기도 현행설계법보다 작다.
3. 현행설계법에 의한 완전 조립식 교량 하부구조의 경우 설계하중의 190% 수준까지 내력이 나타나고 있으며 하중

- 저항계수설계법에 의한 조립식 교량 하부구조의 경우 설계하중의 170% 수준으로 충분한 내력이 발휘되고 있다. 또한 현행설계법과 하중저항계수설계법에 의한 설계 모두 충분한 변위 연성도를 확보하고 있음이 확인되었다.
4. 지진하중의 지속시간 및 크기, 질량의 크기, 그리고 감쇠 효과 등을 고려하여 완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 지진응답을 비교적 정확하게 예측하였다. 지진하중을 받는 조립식 교량 하부구조의 응답특성 및 지진손상을 제대로 평가함으로써 완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 내진성능평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.
5. 완전 조립식 교량 하부구조 시스템의 동적 특성과 지진동의 동적 특성을 고려하여 내진설계에 반영시킴으로서, 유사시 피해를 최소화 시킬 수 있을 것으로 기대되며 성능기반 내진설계개념에 접목하여 비선형 유한요소해석을 이용한 합리적이고 경제성 있는 차세대 내진설계법의 개발 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. Billington, S. L., and Yoon, J. K., "Cyclic Response of Unbonded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-Reinforced Concrete," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 9, No. 4, 353-363, 2004.
2. Wang, J. C., Ou, Y. C., Chang, K. C., and Lee, G. C., "Large-scale Seismic Tests of Tall Concrete Bridge Columns with Precast Segmental Construction," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, 1449-1465, 2008.
3. Yamashita, R., and Sanders, D. "Seismic Performance of Precast Unbonded Prestressed Concrete Columns," *ACI Structural Journal*, Vol. 106, No. 6, 821-830, 2009.
4. 김태훈, 김영진, 김성운, 신현목, "전단저항 연결체를 갖는 프리캐스트 세그먼트 교각의 성능평가," 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 4A호, 591-601, 2008.
5. 김태훈, 박세진, 김영진, 신현목, "프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 성능평가를 위한 지진해석," 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제13권, 2호, 15-27, 2009.
6. 김태훈, 박세진, 김영진, "조립식 기초부를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각: I. 시스템 개발 및 검증," 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제29권, 4A호, 395-405, 2009.
7. 김태훈, 김영진, 이재훈, 신현목, "조립식 기초부를 갖는 프리캐스트 세그먼트 PSC 교각: II. 실험 및 해석," 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제29권, 4A호, 407-419, 2009.
8. 김태훈, 박세진, 김영진, "프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부: I. 시스템 개발 및 검증," 대한토목학회 논문집, 제30권, 제5A호, 463-473, 2010.
9. 김태훈, 김영진, 이재훈, 신현목, "프리캐스트 세그먼트 PSC 교각의 조립식 코핑부: II. 실험 및 해석," 대한토목학회 논문집, 제30권, 제5A호, 475-484, 2010.
10. AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th Edition, 2007.
11. 건설교통부, 도로교설계기준, 2005.
12. 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 2007.
13. 정영수, 신현목, 김우, 이재훈, "콘크리트 교량의 신뢰도기반 한계상태 설계기준 체계," 대한토목학회 정기학술대회 논문집 / 전문학회 세션, 대한토목학회, 3147-3156, 2005.
14. Naaman, A. E., *Prestressed Concrete Analysis Design*, 2nd Edition, Techno Press, 2004.
15. Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 9, pp. 1199-1207, 2003.
16. Kim, T. H., Lee, K. M., Chung, Y. S., and Shin, H. M., "Seismic Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridge Columns," *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 4, 576-592, 2005.
17. Kim, T. H., Park, J. G., Kim, Y. J., and Shin, H. M., "A Computational Platform for Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Piers with Unbonded Reinforcing or Prestressing Bars," *Computers & Concrete*, Vol. 5, No. 2, 135-154, 2008.
18. Kim, T. H., Lee, H. M., Kim, Y. J., and Shin, H. M., "Performance Assessment of Precast Concrete Segmental Bridge Columns with a Shear Resistant Connecting Structure," *Engineering Structures*, Vol. 32, No. 5, 1292-1303, 2010.
19. Taylor, R. L., *FEAP - A Finite Element Analysis Program*, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
20. 김태훈, 진병무, 김영진, 신현목, "조립식 프리스트레스트 콘크리트 교각의 비탄성거동에 관한 해석적 연구," 한국지진공학회논문집, 한국지진공학회, 제9권, 제5호, 29-40, 2005.
21. Park, R., "Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing," *Proc. of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. VII, Balkema, Rotterdam, 605-616, 1998.
22. Phan, V. T., Near Fault (Near Field) Ground Motion Effects on Reinforced Concrete Bridge Columns, Thesis, University of Nevada, Reno, 2005.
23. 김태훈, 박창영, 정영수, 신현목, "진동대 실험을 통한 철근콘크리트 교각의 지진거동에 관한 해석적 연구," 한국지진공학회 논문집, 제11권, 제5호, 49-59, 2007.
24. Hilber, H. M., Hughes, T. J. R., and Taylor, R. L., "Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 5, 282-292, 1977.
25. Hughes, T. J. R., *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, 1987.