

연속 프리플렉스 합성형교의 내진해석에 관한 연구

A Study on the Seismic Analysis of Continuous Preflex Composite Bridges

구민세* 정재운** 김훈희***
Koo, Min-Se Jeong Jae Woon Kim, Hun-hee

ABSTRACT

Structural damage during an earthquake is caused by the response of the structure to the ground motion input at its base. The dynamic force produced in the structure are due to the inertia of its vibrating elements. The response of the structure exceeds the ground motion and this dynamic magnification depends on the duration and frequency content of the ground vibration, the soil properties at the site, distance from the epicenter and the dynamic characteristics of the structure. Earthquake load used in this study as a input data was artificially simulated with the design spectrum diagram in the Korean Earthquake Resistant Design Code. This paper presents the seismic analysis of the continuous preflex composite girder bridges according to variation of pier's height and span's length.

1. 서론

최근 들어 세계적으로 지진 활동이 다시 활발해지고 있고 커다란 피해를 동반하면서 많은 관심이 대두되고 있다. 미국 캘리포니아와 일본 고베 대지진에 이어 최근 터키의 이스탄불과 그리스의 아테네에 강진이 발생하는 등 지진으로 인한 인명과 구조물에 대한 피해가 늘어나고 있는 실정이다. 여기서 터키에 비해 그리스에서의 피해는 상대적으로 작았으며 이것은 그리스에서는 구조물의 내진설계가 잘되었기 때문이라는 전문가들의 소견이 있다. 국내에서도 과거 15세기와 18세기 사이에는 많은 지진이 발생했다는 기록이 있으며 20세기 중반이후에 여러차례의 중진이 관측되어 구조물의 내진성능평가 및 향상등에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 우리나라의 경우 과거에 건설된 교량이나 구조물의 대부분이 지진의 영향을 고려하지 않은 설계에 의해 시공되었기 때문에 지진발생의 경우 피해가 클것으로 예상되며 새로 건설되는 교량의 내진 설계는 물론, 기존 교량의 지진에 대한 보수 및 보강 방안이 국내에서도 요구되고 있는 실정이다.

* 인하대학교 토목공학과 교수

** 인하대학교 토목공학과 박사과정

*** 인하대학교 토목공학과 석사과정

구조물의 내진설계를 위한 설계지진하중을 결정하는 방법으로는 크게 실제관측된 파형이나 여러 실측파형을 조합한 인공파형을 이용한 시간이력해석법과 지진파의 진동수 분포 특성과 지반의 동적 특성을 고려하여 작성된 스펙트럼을 이용한 응답스펙트럼해석법으로 나뉘어진다. 동적해석을 하기 위해서는 우선 입력지반운동의 결정이 우선되어야 한다. 지진파형의 결정에는 진앙거리, 강도, 지속시간 등에 따른 다양한 지진기록이 있어야 하지만 국내의 경우 계측지진자료의 부족과 부정확성으로 적절한 지진기록이 부족한 실정이다. 이에 실제 지진과 근사한 인공지진을 발생시키기 위한 합리적인 방법에 관한 많은 연구가 수행되고 있다.

프리플렉스 합성형교는 강형의 인장플랜지를 둘러싼 콘크리트에 미리 압축 프리스트레스를 도입하여 사하중과 활하중에 의하여 발생하는 인장응력을 상쇄시킬 수 있는 경제적인 구조물이며 이에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔고 현재도 진행중에 있으며 최근에 많은 시공이 이루어지고 있다.

내진 해석을 통한 설계의 결정조건은 구조물의 변형과 단면력으로, 이들은 서로 상반되는 관계에 있다. 즉 변형을 제한하면 단면력이 증가하고, 단면력을 제한하면 변형이 증가한다. 즉 에너지 보존 법칙이 성립할 경우 외부에서 전달되는 에너지와 구조물 내부 에너지는 동일하다. 따라서 구조물의 내진 구조 계획의 목적은 지진 발생시 구조물에 적절한 변형과 부재력을 유발시켜서 인명의 손상이나 구조물의 붕괴를 방지하고, 허용된 국부적 파괴만이 발생하도록 함에 있다. 본 연구에서는 시간이력해석법을 사용하여 연속 프리플렉스 합성형교의 교각높이와 지간길이의 변화에 따라 발생하는 변형과 부재력을 비교하여 내진 측면에서의 교각의 높이와 지간길이의 관계를 살펴보고 교각의 교축방향의 변위를 바탕으로 낙교를 방지하기 위한 지진하중하에서의 최소받침길이를 산정하였다.

2. 인공지진파의 작성

인공지진이력의 형태는 지진의 형태를 지배하는 포락함수를 이용하여 나타내는데 포락함수는 지진의 발생원인, 규모, 지반조건에 따른 감쇠현상 등 많은 요인에 따라 다르게 나타나지만 한반도에서의 지진에 대한 자료의 부족으로 본 연구에서 적용한 지진이력의 포락함수는 그림 1과 같은 단순한 포락함수를 가정하였다. 인공지진의 전 진행을 3과정으로 분리하면 강도의 상승시간, 강도의 지속시간, 감소구간으로 나눌 수 있다. 그림 1에서 E(t)는 포락함수를 나타내고 상승시간(a)은 3초, 지속시간(b)은 6초, 감소시간(c)은 15초로 결정하였다. 국내의 도로교 시방서의 탄성지진응답계수는 지반가속도와 진동주기에 대하여 지반종류별로 도시한 결과로서 그림 2와 같다.

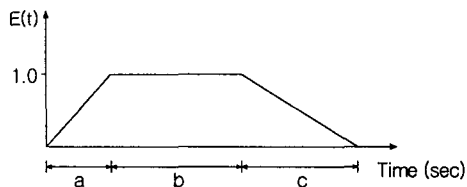


그림 1. 지진파형의 포락함수

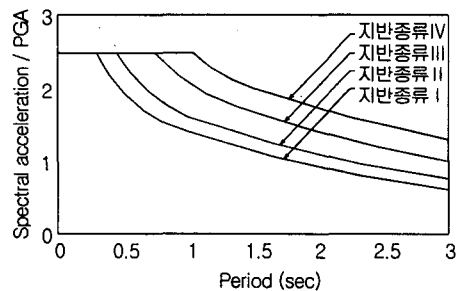


그림 2. 정규화된 탄성지진응답계수

표 1. 지반상태에 따른 지반계수

지반종류	지반계수	지 반 상 태
I	1.0	혈암이나 자연상태에서 결정체를 갖는 암반 또는 토층의 깊이가 60m 이하인 암반 또는 암반위의 매우 단단한 모래 자갈 또는 점토의 안정
II	1.2	지반의 깊이가 60m 이상인 단단한 모래 자갈 또는 점토의 안정된 퇴적물인 지반이거나 비점착토가 두텁게 쌓인 지반
III	1.5	연약 또는 중간 정도의 점토 또는 모래로 구성된 9m 이상의 점토층으로 형성된 지반
IV	2.0	연약점토나 실트층의 깊이가 12m 이상되는 지반

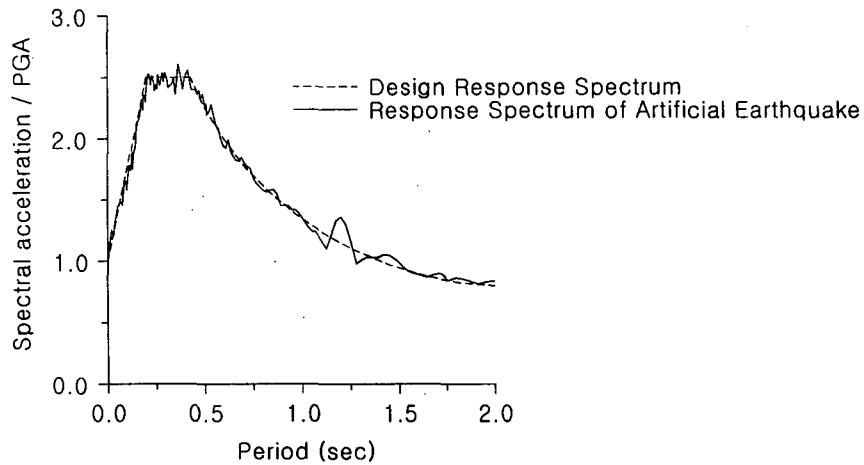


그림 3. 인공지진이력의 응답스펙트럼

표 1은 도로교 시방서에서 정하는 지반종류에 따른 지반계수의 값을 나타내고 본 연구에서는 가장 일반적인 지반종류II에 대해 해석하였다.

구조물의 응답에 영향을 미치는 지진이력의 유효지속시간은 한반도에서 발생한 지진의 최대규모 (M=7)로부터 일본의 지진학자 히사시다(久田)가 제안한 식을 이용하여 24초로 결정하였다.

$$\text{히사시다식} : T = 10^{(M-2.5)/3.23} \quad (1)$$

여기서, T는 지진의 유효지속시간이고, M은 지진의 규모이다.

본 연구에서는 고유진동주기가 0초에서 0.2초사이에서의 스펙트럼은 Eurocode 8에서 제시한 방식을 사용하였고 나머지 부분은 국내규정을 따랐다. 입력데이터는 자연지진의 편중된 Frequency contents 에 의한 불확실성을 배제하고 국내의 내진규준에서 정한 반응스펙트럼도를 충분히 만족시킬수 있는 인공지진을 이용하였으며 인공지진의 합성은 MIT에서 개발한 프로그램 SIMQKE를 이용하였다. 그림 3은 감쇠비가 5%인 경우에 대해 설계응답스펙트럼과 SIMQKE에 의해 작성된 인공지진이력의 응답스펙트럼을 비교하여 나타낸것이다.

그림 4는 그림 3에 보여진 인공지진이력의 응답스펙트럼에 따라 최대 지반가속도가 0.14g이고 유효 지속시간이 24초인 인공지진이력을 보여준다.

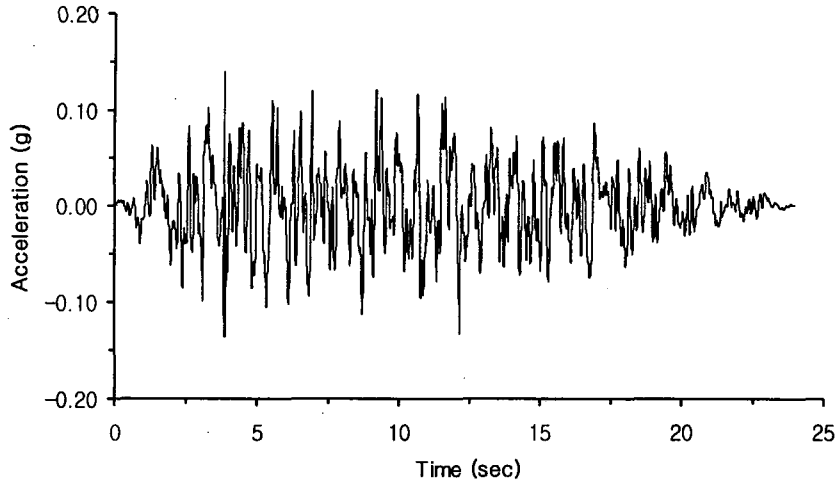


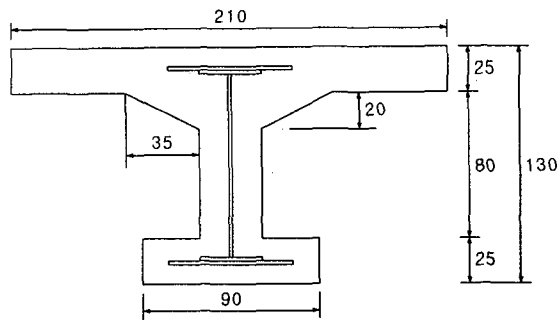
그림 4. 인공지진이력

3. 구조해석 및 해석결과

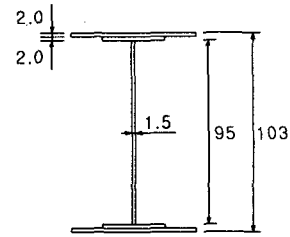
본 연구에서 선정한 구조시스템은 연속 프리플렉스 합성형교에 대해서 2경간, 3경간의 시스템으로 모델링 하였으며, 대수감쇠율(ξ)은 프리플렉스형과 유사한 PS콘크리트의 탄소성영역에서 일반적으로 적용하고 있는 5%를 적용하였다. 표 2는 주요 건설재료의 탄성영역과 탄소성영역에서의 대수감쇠율을 보여준다. 내진등급을 1등급으로 선택하여 가속도계수(A)를 0.14로 하고 지반계수(s)는 1.2로 하였으며 교량폭은 12.6m이고 교각의 형식은 T형 교량으로 채택하였다. 상부모델은 보요소를 이용하여 Girder와 Cross Beam을 Grid로 모델링 하였고 사하중은 consistent mass로 고려하여 입력하였다. 하부모델은 교각을 보요소로 모델링 하였고 지점은 Footing상단으로 고려하여 고정단으로 간주하였다. 연결부위는 상부주형의 중심축으로부터 교좌장치 상단까지 강체보요소, 교좌장치 상하단은 탄성받침, 받침하단부터 교각가로보 중심축까지 강체 보요소로 모델하고 교좌장치 상단은 내부힌지를 이용하여 모델링 하였다.

표 2. 각종 구조물에 대한 대수감쇠율

구 조 물	대 수 감 쇠 율		구 조 물	대 수 감 쇠 율	
	탄성영역	탄소성영역		탄성영역	탄소성영역
철근콘크리트	1~2 %	7 %	강구조(용접)	0.4 %	4 %
PS콘크리트	0.8 %	5 %	목재	1~3 %	-
강구조(볼트연결)	1 %	7 %	조적조	1~2 %	7 %

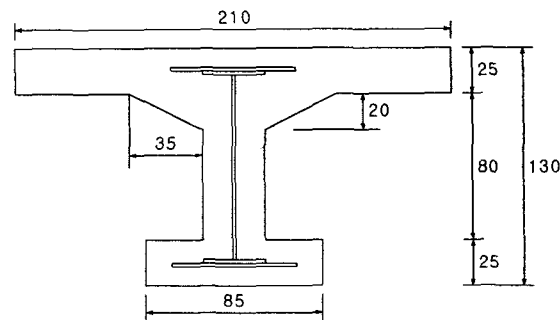


(a) 콘크리트

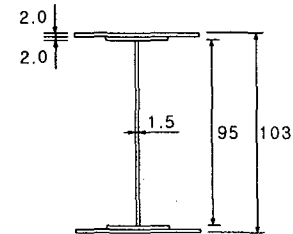


(b) 강형

그림 5. 2경간 Preflex 합성교의 단면 [단위:cm]



(a) 콘크리트



(b) 강형

그림 6. 3경간 Preflex 합성교의 단면 [단위:cm]

표 3. 재료의 특성

구 분		특 성	
		강 도	탄성계수
콘크리트	상부케이싱 및 복부	$\sigma_{ck} = 270 \text{ kg/cm}^2$	$E_c = 2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
	하부케이싱	$\sigma_{ck} = 400 \text{ kg/cm}^2$	$E_c = 3.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
	하부구조	$\sigma_{ck} = 240 \text{ kg/cm}^2$	$E_c = 2.3 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
강 재 (SWS490)		$\sigma_y = 3600 \text{ kg/cm}^2$	$E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

그림 5와 그림 6은 각각 Preflex 합성형교의 2경간, 3경간에서 상부구조의 단면이다. 단면의 결정은 기존의 2경간, 3경간 프리플렉스 해석프로그램을 이용하여 콘크리트의 인장응력을 10kg/cm^2 안에 있게 하여 결정된 단면이다. 표 3은 콘크리트와 강재에 대한 재료의 특성값이다.

본 연구에서는 2경간, 3경간 모두 같은 지간길이를 가진 합성형교에 대해 해석변수는 일정한 지간 길이에 대한 교각의 높이와 일정한 교각의 높이에 대한 지간길이를 하였다. 교각높이의 변화는 지간 길이 30m에 대해서 7.5m~20m까지 2.5m의 간격을 두었고, 지간길이의 변화는 교각의 높이 15m에 대해서 25m~35m까지 2.5m의 간격을 두고 해석하였다. 적용한 진동모드의 수는 15개로 하였다.

그림 7은 교각높이의 변화에 대한 각 모드에서의 고유진동주기이다. 2경간에서는 교각의 높이가 변함에 따라 주기가 비슷한 형태를 띠며 변화하였지만, 3경간에서는 교각의 높이가 10m이하부터는 모드형상에 따른 주기가 변화함을 보여준다. 그림 8은 지간길이의 변화에 대한 각 모드에서의 고유진동주기이다. 2경간과 3경간 모두 유사한 형태로 고유진동주기가 각 모드에 따라 변화하는데 대체적으로 교각높이가 커지고 지간길이가 길어질수록 고유진동주기가 커짐을 알 수 있다.

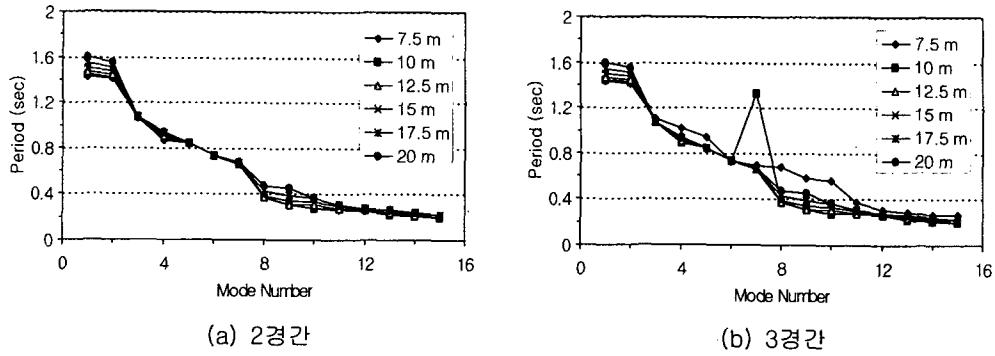


그림 7. 교각높이에 대한 고유주기

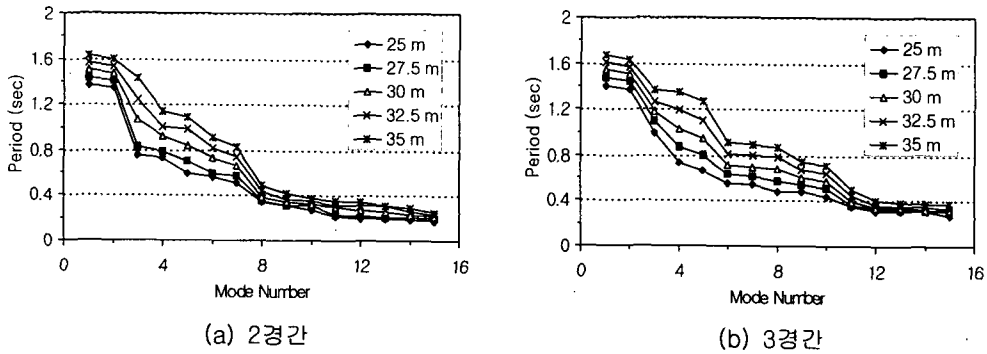


그림 8. 지간길이에 대한 고유주기

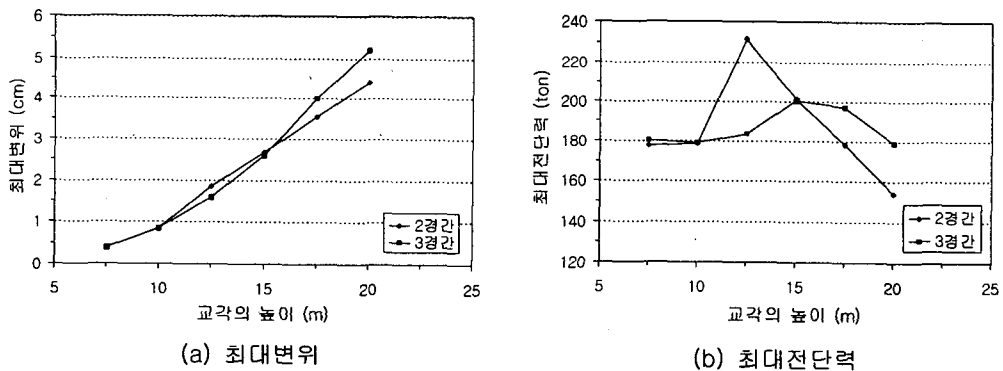
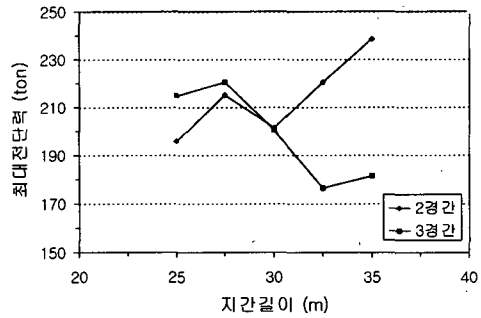
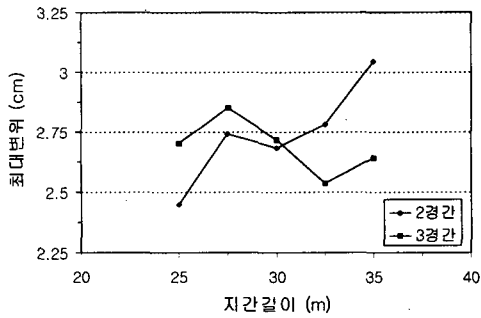


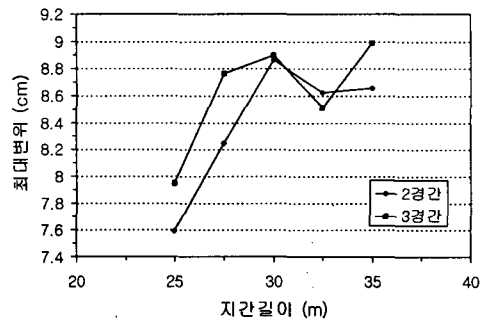
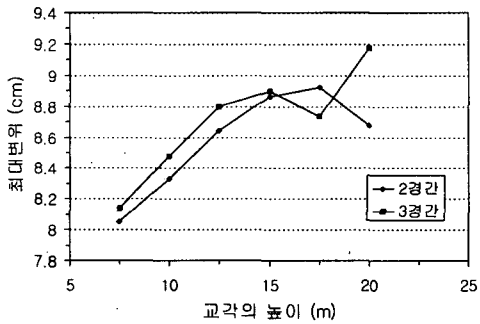
그림 9. 교각높이에 대한 변위와 전단력



(a) 최대변위

(b) 최대전단력

그림 10. 지간길이에 대한 변위와 전단력



(a) 교각높이에 대해

(b) 지간길이에 대해

그림 11. 낙교방지를 위한 최소지지길이

그림 9는 교각의 높이에 따른 교각 상단에서의 최대변위와 최대전단력을 비교한 도표로서 교각의 높이가 증가할수록 변위는 2경간에서는 거의 직선적으로 증가하고 3경간에서는 2차함수적으로 증가하고 있음을 보여준다. 최대전단력은 2경간과 3경간이 모두 처음에는 증가하다가 일정한 높이 이상이 되면 다시 감소되는데 2경간은 12.5m, 3경간은 15m로 나타났다. 그림 10은 지간길이에 따른 교각 상단에서의 최대변위와 최대전단력을 비교한 도표로서 지간의 길이가 증가할수록 2경간은 변위와 전단력이 증가하고, 3경간은 감소하는 성향을 보여준다.

일반적으로 교량의 설계시에 영구하중이나 일반적인 활하중에 대해서는 교량이 설계수명동안 그 기능을 충분히 발휘하게 하기 위하여 완전탄성거동을 하도록 설계를 하지만 지진하중과 같이 하중의 크기에 비하여 발생빈도가 낮은 하중에 대해서는 완전탄성거동을 하게 설계하게 되면 비경제적일 수가 있다. 따라서 지진하중에 대해서는 어느정도 손상을 허용하는 설계를 하게되는데 교량의 부분파괴는 교대에서도 허용되며 이때 낙교 방지를 위한 최소지지길이는 확보되어야 한다. 교축방향의 변위를 바탕으로 낙교를 방지하기위한 최소지지길이를 교각의 높이와 지간길이에 따라 산정해보면 그림 11과 같다. 교각의 높이와 지간길이가 증가할수록 필요한 최소지지길이가 증가하지만 어느 한계에 도달하면 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 최대지반가속도가 0.14g이고 유효지속시간이 24초인 인공지진을 SIMQKE프로그램을 이용하여 합성하였으며 지진하중을 받는 연속 프리플렉스 합성형교에 대하여 교각의 높이와 지간의 길이를 변화시키면서 동적 좌굴 모드와 지진응답 특성을 시간이력해석법에 의해 규명하였다.

2경간과 3경간에 대하여 교각의 높이와 지간의 길이를 변화시키면서 해석한 결과 본 연구에서 채택한 단면에 대해서는 교각의 높이가 커질수록 교각상단의 변위는 증가하였고 전단력은 일정한 높이 이상이 되면 오히려 감소됨을 알 수 있었다. 2경간에서는 12.5m, 3경간에서는 15m의 교각높이에서 이 현상이 발생하였다. 경간의 길이가 길어질수록 2경간의 변위와 전단력은 증가하는 것으로 나타났지만 3경간에서는 오히려 감소하였다. 지진하중에 의한 낙교방지를 위해 추가된 최소지지길이는 교각의 높이에 따라 대체로 증가하다가 일정한 높이와 지간길이가 되면 점차 어느 정도에 수렴하게 됨을 알 수 있다.

본 연구에서는 2경간, 3경간의 단면을 일정하게 하여 해석을 하였지만 추가로 단면의 변화에 대한 연구도 보충되어야 할 것으로 보인다.

참 고 문 헌

1. Alan Williams, Ph.D., S.E. and C.Eng, "Seismic Design of Buildings and Bridges", Engineering Press, 1998.
2. Anil K. Chopra, "Dynamics of Structures; Theory and Applications to Earthquake Engineering", Prentice-Hall, 1995.
3. Clough, R. W. and Penzien, J., "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, 1993.
4. Eurocode 8, "Common unified rules for structures in seismic regions", Commission of the European, 1983
5. Mario Paz, "Structural Dynamics; Theory and Application", Van Nostrand Reinhold, 1991.
6. 구민세, 양창현, 신동기, "Semi-Rigid 연결체의 특성을 고려한 강구조물의 정·동적 해석", 한국강구조학회, 1993.
7. 대한토목학회, "도로교 표준시방서", 대한토목학회, 1996.
8. 인하대학교 산업과학기술연구소, "연속보 구조용 합성보와 이를 이용한 P.S. 연속합성보 구조물의 시공법(최종보고서)", 인하대학교 산업과학기술연구소, 1995.
9. 한국도로공사, "고속도로 교량의 내진설계 지침", 한국도로공사, 1996.
10. 한국전산구조공학회, "교량의 내진설계", 전산구조공학회 기술강습회 교재 18-1, 1998.