

파괴메카니즘을 고려한 일반도로교의 지진해석모델

Seismic Analysis Models for Typical Roadway Bridges considering Failure Mechanisms

국승규* 김판배**
Kook, Seung Kyu Kim, Pan Bae

ABSTRACT

For the seismic analysis of typical roadway bridges provisions are given in most codes for analysis models, which describes however only fundamental modelling methods according to the basic theories of structural dynamics. In practice even conventional non-seismic analysis models, separate super- and substructure models, are applied, which are not adequate because of neglecting connection elements. In this study three typical roadway bridges, a Steel box bridge, a PC beam bridge and a PC box bridge are selected and simple models integrating super- and substructure as well as connection elements are given. The simple models are composed with frame elements with lumped masses representing stiffness and mass characteristics of the selected bridges. To check the properness of the simple models, analysis results with the simple models are compared with those obtained with detailed models in view of bridge failure mechanisms. It is proved that the simple models can be used in the preliminary design phase for the determination of failure mechanisms of typical roadway bridges.

1. 서론

일반적으로 교량의 해석모델은 예비설계시 정확한 해석을 요구하지 않기 때문에 가능한 단순모델로 해석을 수행하고 실시설계에서는 정밀한 해석을 요구하므로 보다 정확한 설계단면력을 구할 수 있는 상세모델을 사용한다. 내진설계의 목적이 지진발생시 피해를 최소화하기 위해 교량이 연성파괴메카니즘을 갖도록 하는 것이며 이러한 파괴메카니즘의 규명은 예비설계시 수행되어야 하므로 지진해석모델 또한 가능한 단순모델을 사용하여야 하며 단순모델로 결정한 파괴메카니즘이 상세모델에서도 동일하게 제시될 수 있도록 동적거동특성이 해석모델에 적절히 반영되어야 한다. 일반 도로교에 적용할 수 있는 내진설계시방서는 지진해석모델링에 관한 조항을 제시하고 있다. 현재 적용되고 있는 도로교설계기준 제6장 내진설계편^[1] 또한 이러한 사항을 포함하고 있으나 구조동역학의 기본이론에 의거한 원론적인 사항이다. 단일모드스펙트럼해석법을 적용하는 모델은 교량의 동적거동을 교축 및 교축직각방향의 거동으로 분리하여 각기 다른 모델을 제시하고 있으나

* 정회원 · 부경대학교 건설공학부 조교수
** 학생회원 · 부경대학교 건설공학부 석사과정

현재 실무에서 사용되고 있는 해석프로그램의 수준보다 낮은 해석방법으로 적용타당성에 문제가 있다. 또한 기존의 정적해석에 사용하는 상, 하부구조 분리모델을 사용하여 지진해석을 수행하는 경우가 아직 있으나 이는 연결부의 거동이 교량구조물의 진동단위에 포함되어야 하는 것을 무시한 모델로 타당치 못하다. 실무에 적용할 수 있는 지진해석모델은 내진설계편람¹²⁾ 및 Seismic Design Course¹³⁾에서 찾아볼 수 있으나 모델의 타당성분석에 초점을 맞춘 구체적인 연구가 아닌 설계예제를 제시하고 있다. 이 연구에서는 일반적인 형상의 도로교 중 강박스교, PC빔교 및 PC박스교를 선정하여 지진해석모델인 단순모델을 설정하였다. 단순모델의 타당성을 입증하기 위해 단순모델로 결정한 파괴메카니즘이 실시설계에서 사용하는 상세모델을 적용한 해석결과와 동일한가를 검토하였다.

2. 연구내용

2.1 해석모델의 설정

일반적 형상의 도로교로 선정한 강박스교, PC빔교 및 PC박스교의 종단면도와 교각에서의 횡단면도는 그림 1, 그림 2 및 그림 3과 같다. 강박스교의 경우 상세모델과 단순모델은 그림 4와 같다. 상세모델은 셸요소, 보요소 및 연결요소 등을 사용하여 상판, 강박스, 교각, 캡빔 및 받침장치 등 구조물의 실제 기하학적 특성을 반영하고 단순모델은 보요소와 연결요소를 사용하고 각 절점과 요소가 상세모델의 질량 및 강성을 포함하도록 구성하였다. PC빔 및 PC박스교의 해석모델도 표1과 같이 동일한 방법으로 모델링하였다.

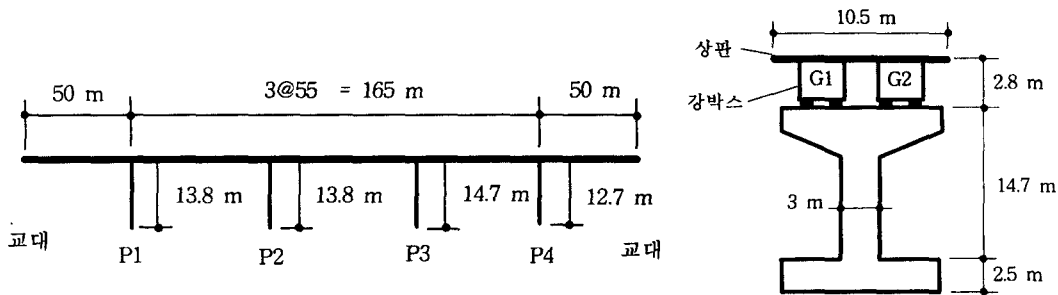


그림 1. 강박스교의 종단면도 및 교각의 횡단면도

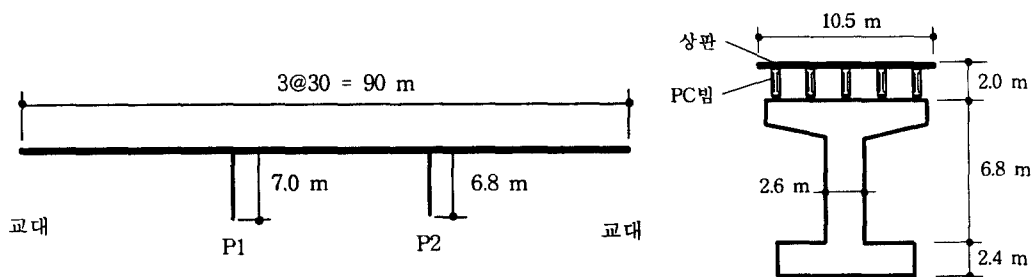


그림 2. PC빔교의 종단면도 및 교각의 횡단면도

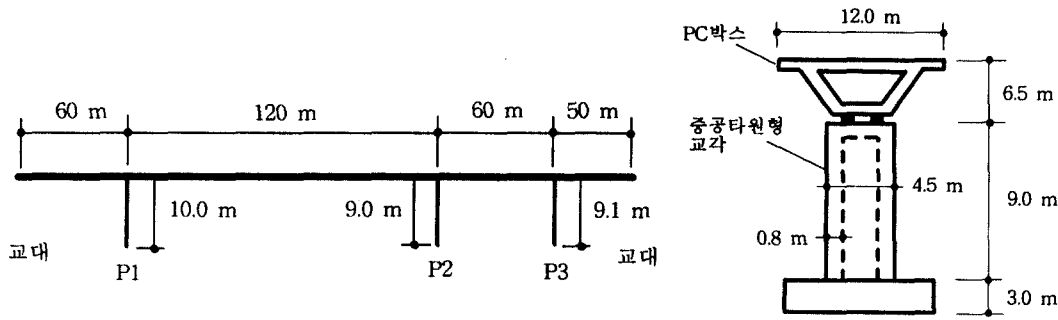


그림 3. PC박스교의 종단면도 및 교각의 횡단면도

표 1. 해석대상교량의 모델링요소

구분	강박스교		PC빔교		PC박스교	
	상세모델	단순모델	상세모델	단순모델	상세모델	단순모델
상부구조	상판 : 셸요소 강박스: 보요소	보요소 점질량	상판: 셸요소 PC빔: 보요소	보요소 점질량	PC박스: 셸요소	보요소 점질량
연결부	무한강성요소 연결요소	무한강성요소 연결요소	무한강성요소 연결요소	무한강성요소 연결요소	연결요소	무한강성요소 연결요소
하부구조	캡빔: 보요소 교각: 보요소	캡빔: 점질량 교각: 보요소	캡빔: 보요소 교각: 보요소	캡빔: 점질량 교각: 보요소	캡빔: 보요소 교각: 보요소	캡빔: 점질량 교각: 보요소

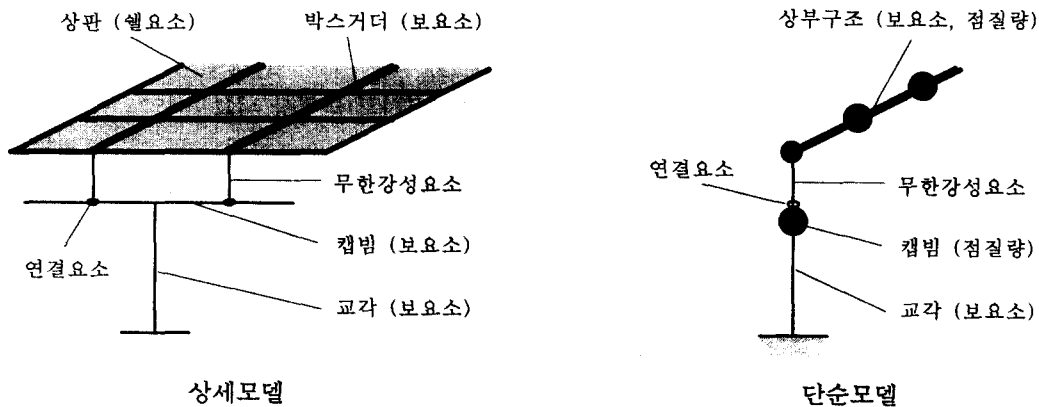


그림 4. 강박스교의 해석모델

2.2 응답스펙트럼해석

각 해석모델을 대상으로 다중모드스펙트럼해석을 수행하고 모드해석결과인 주기와 모드형상을 비교하였다. 해석프로그램은 SAP2000^[4]을 사용하였다. 표 2는 주기를 비교한 것이며 그림 5와 그림 6은 강박스교의 상세모델과 단순모델의 교축방향 및 교축직각방향 1차모드 형상을 비교한 것으로 표 2의 결과와 함께 단순모델에 질량과 강성의 분포가 적절하게 변환되었음을 알 수 있다. PC빔 및 PC박스교의 해석모델도 동일한 방법으로 모델링의 적절성을 검토하였다.

표 2. 해석모델의 1차모드 주기 비교

교량	구분	교축방향		교축직각방향	
		주기 (sec)	비 (-)	주기 (sec)	비 (-)
강박스교	상세모델	1.37	1.00	0.80	1.00
	단순모델	1.35	0.99	0.76	0.95
PC빔교	상세모델	0.52	1.00	0.40	1.00
	단순모델	0.48	0.92	0.34	0.83
PC박스교	상세모델	0.60	1.00	0.75	1.00
	단순모델	0.65	1.08	0.79	1.05

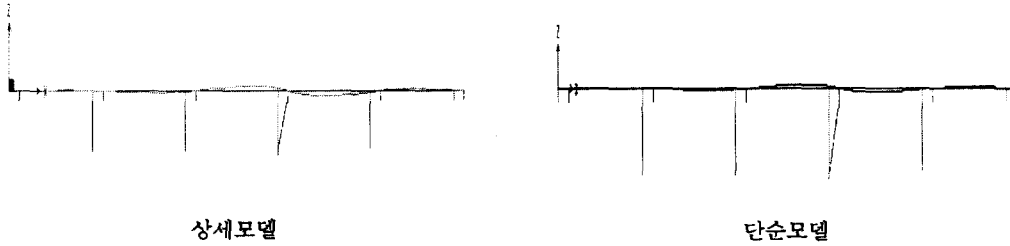


그림 5. 강박스교의 교축방향 1차모드 형상 비교

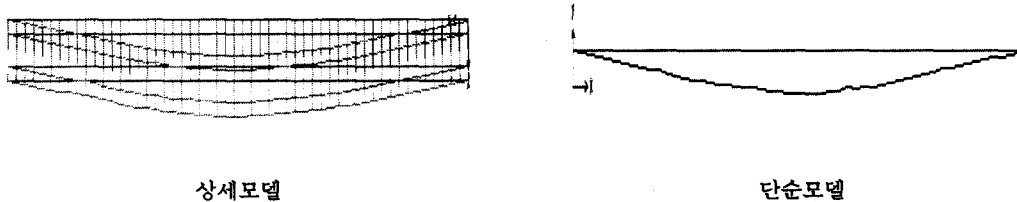


그림 6. 강박스교의 교축직각방향 1차모드 형상 비교

설계조건은 내진 1등급교 및 지반종류II를 모든 교량에 동일하게 적용하였으며 설계조건에 따라 가속도계수(A) 0.154, 지반계수(S) 1.2를 적용하여 탄성지진응답계수를 결정, 스펙트럼해석을 수행하였다. 도로교설계기준에 의거하여 교축 및 교축직각방향 해석결과로부터 하중조합을 수행하여 탄성지진력을 산출하였다. 표 3, 표 4 및 표 5는 고정단교각에서 구한 탄성지진력이다. 이 연구에서는 기 설계된 교량의 성능을 검토하는 것이므로 응답수정계수는 적용하지 않는다.

표 3. 강박스교 고정단교각(P3)의 설계단면력

구분	모델	하중조합 1				하중조합 2			
		전단력 (t)	비	모멘트(t·m)	비	전단력(t)	비	모멘트(t·m)	비
받침장치	3차원	351	1.00			242	1.00		
	2차원	344	0.98			268	1.11		
교각	3차원	713	1.00	10585	1.00	248	1.00	5560	1.00
	2차원	722	1.01	10693	1.01	278	1.12	5599	1.01

표 4. PC빔교 고정단교각(P2)의 설계단면력

구분	모델	하중조합 1				하중조합 2			
		전단력 (t)	비	모멘트(t·m)	비	전단력(t)	비	모멘트(t·m)	비
받침장치	3차원	150	1.00			167	1.00		
	2차원	151	1.01			230	1.38		
교각	3차원	677	1.00	4631	1.00	282	1.00	2484	1.00
	2차원	797	1.01	5433	1.01	357	1.12	2751	1.01

표 5. PC박스교 고정단교각(P2)의 설계단면력

구분	모델	하중조합 1				하중조합 2			
		전단력 (t)	비	모멘트(t·m)	비	전단력(t)	비	모멘트(t·m)	비
받침장치	3차원	1132	1.00			575	1.00		
	2차원	971	0.86			678	1.18		
교각	3차원	2086	1.00	18800	1.00	847	1.00	9164	1.00
	2차원	1967	1.01	17754	1.01	906	1.12	9955	1.01

교량의 파괴메카니즘은 작용력에 대한 설계강도, 공칭강도 및 초과강도의 비를 검토하여 규명하며 설계강도와 공칭강도 그리고 초과강도의 산정은 다음과 같이 수행하였다.

- 받침장치 : 공칭강도는 제작사가 제시한 값이며 공칭강도의 80%를 설계강도, 120%를 초과강도로 산정한다.
- 교각의 전단력 : 콘크리트표준시방서^[5]에 의해 공칭강도를 산정하고 공칭강도의 80%를 설계강도, 130%를 초과강도로 산정한다.
- 교각의 모멘트 : P-M상관도에 의해 공칭강도와 설계강도를 산정하였으며 초과강도는 공칭강도의 130%로 산정한다. 그림 7은 강박스교의 경우 P-M상관도를 예시한 것이다.

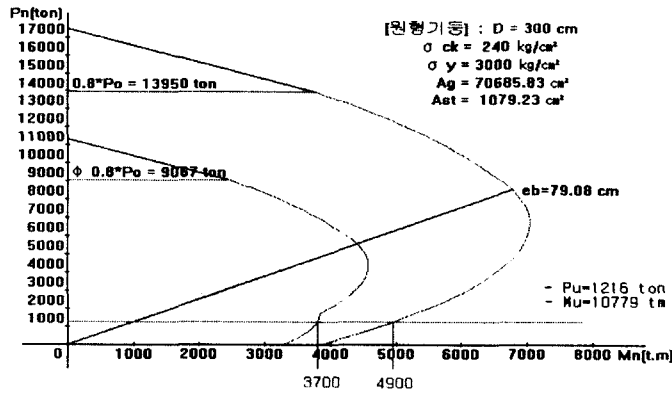


그림 7. 강박스교 교각 P3의 P-M상관도

표 6은 받침장치와 교각의 설계강도, 공칭강도 및 초과강도를 정리한 것이며 해석대상교량의 파괴메카니즘 검토는 작용력에 대한 설계강도, 공칭강도 및 초과강도의 비를 정리한 표 7, 표 8 및 표 9로 수행할 수 있다.

표 6. 받침장치와 교각의 설계강도, 공칭강도 및 초과강도

교량	구분		설계강도		공칭강도		초과강도	
			조합1	조합2	조합1	조합2	조합1	조합2
강박스교	받침장치	수평력[t]	240		300		360	
		교각(P3)	전단력[t]	510	514	637	643	828
		모멘트[t·m]	3700		4900		6370	
PC빔교	받침장치	수평력[t]	33		41		53	
		교각(P2)	전단력[t]		666	786	832	1022
		모멘트[t·m]	2300		2900		3770	
PC박스교	받침장치	수평력[t]	432		540		648	
		교각(P2)	전단력[t]		1865	1955	2331	2542
		모멘트[t·m]	5900		8100		10530	

표 7. 강박스교의 파괴메카니즘 검토

구분			상세모델			단순모델		
			설계강도 작용력	공칭강도 작용력	초과강도 작용력	설계강도 작용력	공칭강도 작용력	초과강도 작용력
조합 1	받침장치	수평력[t]	0.68	0.85	1.03	0.70	0.87	1.05
		교각(P3)	전단력[t]	0.72	0.89	1.16	0.71	0.88
		모멘트[t·m]	0.35	0.46	0.60	0.35	0.46	0.60
조합 2	받침장치	수평력[t]	0.99	1.24	1.49	0.90	1.12	1.34
		교각(P3)	전단력[t]	2.07	0.90	0.89	1.85	1.17
		모멘트[t·m]	0.67	0.88	1.15	0.66	0.88	1.14

표 8. PC빔교의 파괴메카니즘 검토

구분			상세모델			단순모델		
			설계강도 작용력	공칭강도 작용력	초과강도 작용력	설계강도 작용력	공칭강도 작용력	초과강도 작용력
조합 1	받침장치	수평력[ton]	0.22	0.27	0.35	0.22	0.27	0.35
		교각(P2)	전단력[ton]	0.93	1.16	1.51	0.79	0.99
		모멘트[t·m]	0.50	0.63	0.81	0.42	0.53	0.69
조합 2	받침장치	수평력[ton]	0.20	0.25	0.32	0.14	0.18	0.23
		교각(P2)	전단력[ton]	2.36	2.95	3.84	1.87	2.33
		모멘트[t·m]	0.93	1.17	1.52	0.84	1.05	1.37

표 9. PC박스교의 파괴메카니즘 검토

구분			상세모델			단순모델		
			설계강도 작용력	공칭강도 작용력	초과강도 작용력	설계강도 작용력	공칭강도 작용력	초과강도 작용력
조합 1	받침장치	수평력[ton]	0.38	0.48	0.57	0.44	0.56	0.67
		교각(P2)	전단력[ton]	0.75	0.94	1.22	0.80	0.99
		모멘트[t·m]	0.31	0.43	0.56	0.33	0.46	0.59
조합 2	받침장치	수평력[ton]	0.75	0.94	1.13	0.64	0.80	0.96
		교각(P2)	전단력[ton]	2.20	2.75	3.58	2.06	2.57
		모멘트[t·m]	0.64	0.88	1.15	0.59	0.81	1.05

해석대상교량의 상세모델과 단순모델에서 결정한 파괴메카니즘의 비교는 표 10과 같이 모두 동일한 결과를 제시하였다.

표 10. 해석대상교량의 파괴메카니즘

구분	강박스교		PC빔교		PC박스교	
	하중조합1	하중조합2	하중조합1	하중조합2	하중조합1	하중조합2
파괴메카니즘	연성 (교각 힌지)	판정 불가	취성 (연결부 파괴)	취성 (연결부 파괴)	판정 불가	판정 불가

3. 결론

이 연구에서는 일반적 형상의 도로교를 선정하여 지진해석모델을 제시하였다. 교량 파괴메카니즘의 규명은 예비설계에 수행되어야 하므로 단순모델을 사용하는 것이 합리적이며 일반적 형상을 갖는 도로교의 경우 이러한 단순모델로 결정한 파괴메카니즘이 상세모델을 사용하여 결정한 파괴메카니즘과 동일하다는 것을 제시하였다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-311-005)지원으로 수행되었으며 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2000), "도로교설계기준 (6장 내진설계편)", 한국도로교통협회.
2. 한국도로공사 (2000), "고속도로 교량의 내진설계편람".
3. BERGER/ABAM Engineers Inc. (1996), "Seismic Design Course", National Technical Information Service.
4. E.L. Wilson and Habibullah (1995), "SAP2000 - A Series of Computer Programs for the finite Element Analysis of Structures", Computers and Structures Inc., Berkeley, California.
5. 건설교통부 (2000), "콘크리트표준시방서", 대한토목학회.