

활하중 분배계수식 개발을 위한 I형 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 구조해석 모델

Structural Analysis Models to Develop Live Load Distribution Factors of Simply Supported Prestressed Concrete I-Girder Bridge

이 환 우† 김 광 양*

Lee, Hwan-Woo Kim, Kwang-Yang

(논문접수일 : 2007년 11월 22일 ; 심사종료일 : 2008년 1월 9일)

요 지

I형 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 활하중 분배계수식을 개발하기 위한 구조해석 모델은 해석결과와 적정성과 함께 모델링의 용이성도 동시에 가지고 있어야 한다. 그 이유는 활하중 분배계수식의 개발 과정에서 무수히 많은 횡수의 구조해석이 필요하기 때문이다. 본 연구에서는 기존 연구와 설계실무에서 사용하고 있는 모델들을 비교하여 적절한 구조해석 모델을 선정하였다. 또한 수치해석과 재하시험 결과와의 비교를 통하여 방호벽과 가로보의 휨 강성이 활하중분배에 미치는 영향을 분석하였다. 연구결과로서 I형 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 구조해석에는 편심을 반영한 거더, 방호벽 및 가로보를 바닥판에 연결시킨 모델이 해석결과와 정확성과 모델링의 편이성을 동시에 만족시키는 측면에서 적합하였다. 그러나 방호벽은 강성변화에도 불구하고 활하중분배에 미치는 영향이 미소한 것으로 분석되었다. 편심을 고려한 가로보는 휨 강성 25% 이상에서는 강성변화에 따른 영향이 적었다. 따라서 거더는 바닥판과의 편심을 고려하여 강제요소로 연결하고, 방호벽은 무시하고, 가로보는 전 단면이 유효한 것으로 가정한 상태에서 편심을 주지 않는 모델을 I형 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 활하중 분배계수식의 개발을 위한 최종 구조해석 모델로서 선정하였다.

핵심용어 : I형 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량, 구조해석 모델, 활하중 분배, 방호벽, 가로보

Abstract

Structural analysis models to develop live load distribution factors of simply supported prestressed concrete I-girder bridge should have the precision of the analysis results as well as modeling simplicity. This is due to the numerous frequency of structural analysis needed while developing live load distribution factors. In this study, an appropriate structural analysis model is selected by comparing previous researches studies and models used in practical design. Also, the influence by the flexural stiffness of barrier and diaphragm on the live load distribution had been analyzed through comparing the numerical analysis and experimental tests. As a result, the model that the eccentric girder and the barrier and diaphragm are connected to the deck plate was appropriate in satisfying both accuracy and simplicity for structural analysis of simply supported prestressed concrete I-girder bridge. However, the barrier was analyzed to have insignificant influence on the live load distribution in spite of its variation of stiffness. The eccentric diaphragm showed little influence at 25% or higher of flexural stiffness. From the results, a model that the girder is rigidly connected to the deck plate in consideration of the eccentricity, the barrier is ignored and the whole section of diaphragm is supposed to be valid without eccentricity is decided as the most appropriate structural model to develop the live load distribution factors of simply supported prestressed concrete I-girder bridge in this study.

Keywords : simply supported prestressed concrete I-girder bridges, structural analysis model, live load distribution, barrier, diaphragm

† 책임저자, 정희원 · 부경대학교 건설공학부 교수
Tel: 051-620-1452 ; Fax: 051-628-2231
E-mail: hwanwoo@pknu.ac.kr

* 부경대학교 산업과학기술연구소 전임연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2008년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시
면 2008년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

교량 상부단면의 설계단면력은 부재단면을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 설계단면력은 유한요소해석법 등의 정밀수치해석 기법을 사용하여 직접 결정하거나 설계실무의 편이를 위해 도표, 국내의 도로교설계기준(건설교통부, 2005a) 또는 국외 AASHTO(AASHTO, 1996; AASHTO, 2007)에서 제시한 수식 등으로 활하중 분배계수를 산정하여 간접 결정한다.

I형 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량(이하 I형 PSC 거더교)은 25~40m의 중소지간 교량에 적용되는 대표적인 형식 중 하나이다. 이 형식은 설계실무에서 쉽게 활용될 수 있는 표준도면(한국도로공사, 2003)이 있고, 다수의 시공실적도 있다. 따라서 교량의 안전성을 판단하기 위해 설계단면력을 결정할 때도 유한요소해석법을 이용한 정밀해석보다는 단순보 해석과정이나 활하중 분배계수를 이용하는 것이 일반적이다. 즉, I형 PSC 거더교는 활하중 분배의 정확성에 대하여 크게 고민하지 않고도 개인적 주관이나 경험에 따른 다양한 방법들을 통하여 활하중 분배계수를 결정할 정도로 설계자들에게 매우 익숙한 교량이다. 2004년에 준공된 우리나라의 전체 교량 중에서 I형 PSC 거더교는 상판 면적을 기준으로 고속국도에서는 27%, 일반국도에서 33%(건설교통부, 2005b) 정도이다. 따라서 실무에서 활용될 수 있는 보다 정확한 활하중 분배계수식의 개발은 교량의 경제성과 안전성을 동시에 만족시키기 위해 반드시 필요하다.

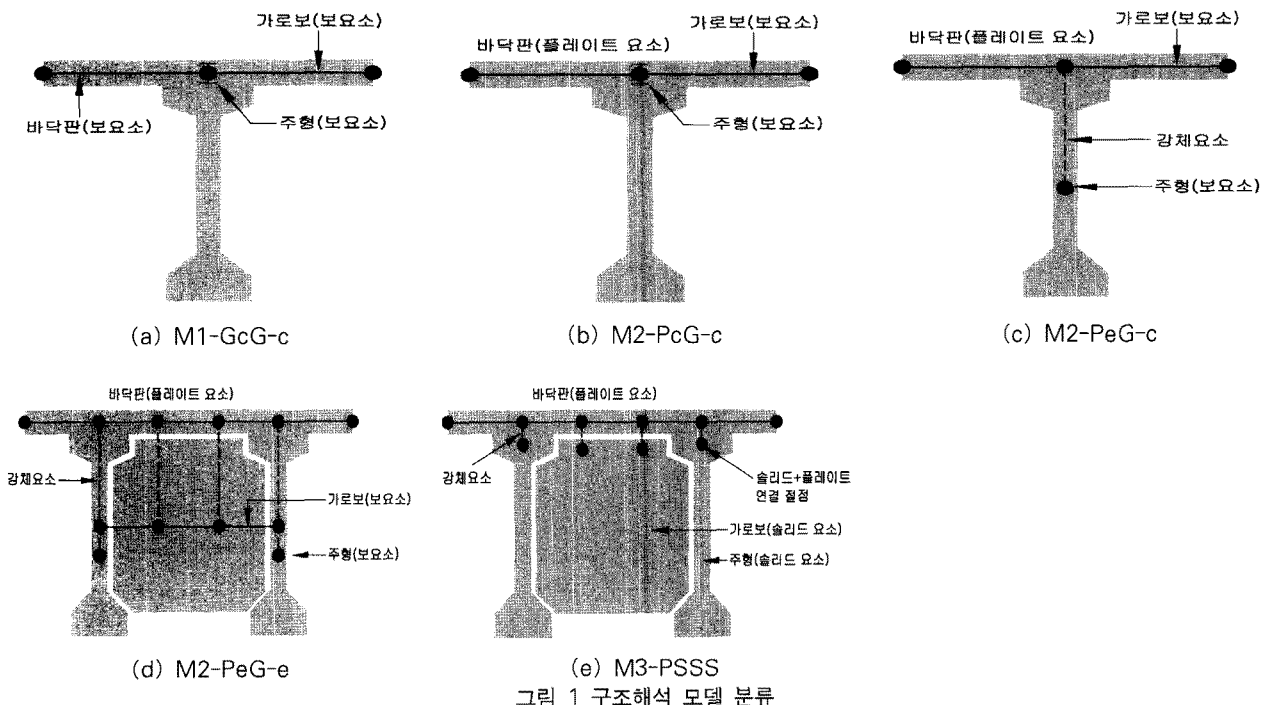
활하중 분배계수식의 개발 과정에서는 무수히 많은 경우의 수치해석이 필요하다. 그래서 이때 사용되는 구조해석 모델은 구조적인 거동을 가장 잘 표현할 수 있는 결과의 정확성과 함께 모델링의 용이성도 동시에 가지고 있어야 한다. 본 논문에서는, 기존 연구들에서 사용하였거나 설계 실무에서 사용하고 있는 여러 가지 구조해석 모델들의 특성분석을 통하여 I형 PSC 거더교용 활하중 분배계수식의 개발을 위한 구조해석모델을 선정하고자 한다.

2. 구조해석 모델의 비교

2.1 구조해석 모델의 분류

기존 연구들(김광수 등, 1999; 이환우 등, 2006; Hays 등, 1994; Sotelino 등, 2004)과 설계실무에서 가장 많이 채택되고 있는 I형 PSC 거더교의 구조해석 모델은 크게 3가지 그룹으로 분류할 수 있다.

첫 번째 그룹은 그림 1(a)와 같이 I형 거더인 주형과 바닥판을 동일 평면상에서 보요소로 모델링한 격자해석 모델(이하 M1 모델)이다. 두 번째는 그림 1(b)~(d)와 같이 바닥판은 플레이트나 솔리드 요소를 사용하여 상세하게 모델링하고, 주형 거더는 바닥판과 같은 평면에 배치하거나 바닥판에 편심을 갖는 보요소로 모델링하는 바닥판 상세모델(이하 M2 모델)이다. 그리고 세 번째는 그림 1(e)와 같이 바닥판과 주형 거더를 플레이트나 솔리드요소를 사용한 전체 상세



모델(이하 M3 모델)이다.

그림 1(a)는 평면 격자해석모델 M1-GcG-c의 형상을 나타낸 것으로 기호 GcG-c 중 첫 문자 G는 바닥판을 격자모델로 모델링하고, cG와 -c는 각각 주형 거더와 가로보를 바닥판과 동일 평면에 위치시킨다는 것을 의미한다. 일반적으로 이 모델에서 종방향 요소는 주형 거더와 바닥판의 유효폭을 고려한 합성형 보요소로, 횡방향 요소는 가로보 또는 바닥판을 등가의 강성을 가진 보요소로 모델링한다. 이때 횡방향 요소의 간격은 일반적으로 경간의 1/10이하로 구성된다(Hambly, 1991).

그림 1(b)는 바닥판 상세모델 중 평면모델(Hays 등, 1994; Zokaie 등, 1991)인 M2-PcG-c모델을 나타낸 것이다. 기호 PcG-c 중 P는 바닥판을 플레이트 요소로 모델링하고, cG-c는 주형 거더와 가로보를 바닥판과 동일 평면에 위치시킨 것을 의미한다. 이 모델의 경우에 주형 거더의 강성은 합성 또는 비합성으로 적용한다. 두 경우 모두 단면력의 크기는 동일한 결과값을 주지만 처짐값은 비합성의 경우에 실제보다 과대하게 나타났다. 그림 1(c)는 바닥판 상세모델 중 주형 거더는 편심을 고려하고 가로보는 바닥판 도심에 위치하도록 하는 모델이다. 기호 PeG-c 중 P는 바닥판을 플레이트 요소로, eG는 주형 거더를 바닥판과 편심을 갖도록 배치하고, -c는 가로보를 바닥판의 평면에 위치시킨 것을 의미한다. 그림 1(d)는 바닥판 상세모델 중 주형 거더와 가로보 모두 편심을 고려할 수 있는 모델(구민세 등, 2003; 서종철 등, 1998; 이종재 등, 2006; Barr 등, 2001; Zokaie 등, 1991)인 M2-PeG-e모델의 형상을 나타낸 것이다. 기호 PeG-e 중 PeG는 그림 1(c)에서 PeG와 같은 의미이다. -e는 가로보와 바닥판의 중립축 차이만큼의 편심을 고려한 것을 의미한다.

전체 상세모델 중 주형 거더는 솔리드로 바닥판은 플레이트 요소로 구성된 모델(Mabsout 등, 1997)인 M3-PSSS 모델을 그림 1(e)에 나타내었다. 기호 PSSS 중 P는 바닥판

을 플레이트 요소로 SSS는 거더와 가로보를 솔리드요소로 모델링(최창근 등, 2001)에 적용한 것을 의미한다.

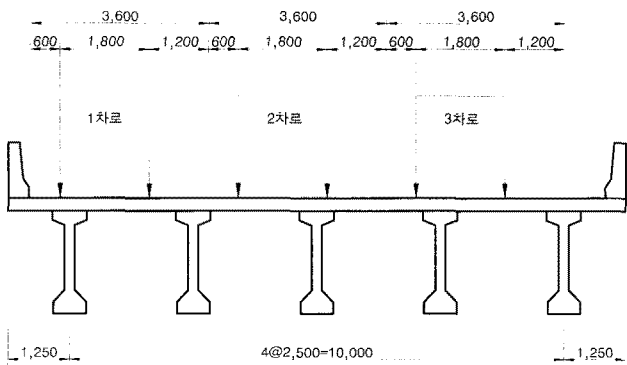
2.2 해석모델의 비교

시간장이 30m이고 교폭이 12.5m인 그림 2와 같은 단순 경간의 1형 PSC 거더교(한국도로공사, 2003)를 대상으로 그림 1에서 분류한 구조해석 모델들의 정확성과 용이성을 비교하였다. 구조해석은 상용프로그램인 MIDAS(마이다스아이티, 2006)를 이용하였다. 하중은 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 맨 좌측 거더가 불리하도록 편재하시킨 3개의 하중 종류와 그림 2(b)와 같이 중앙부 거더가 가장 불리하도록 재하한 3개의 하중 종류를 합하여 총 6가지 하중 경우에 대하여 분석하였다. 하중의 재하는 1~3차로의 경우로 하였다. 1차로 하중경우는 그림 2에서 나타낸 1차로에만 재하된 것을 의미한다. 2차로의 하중경우는 그림 2에 나타낸 1차로와 2차로에 하중이 동시 재하된 것을 의미하고, 3차로의 하중경우는 1~3차로에 하중이 동시 재하된 것을 의미한다. 하중의 크기는 도로교설계기준(건설교통부, 2005a)에서 규정한 DB-24를 적용하였다.

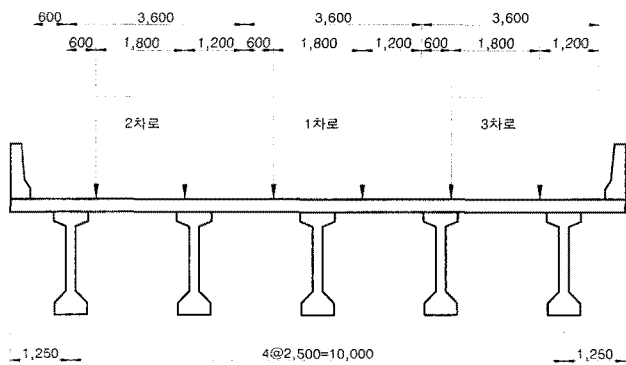
그림 3과 4는 그림 2의 교량을 대상으로 구조해석 한 후에 얻어진 지간 중앙부 거더 하단의 수직 처짐값을 정리한

표 1 구조해석 모델별 처짐값 비율(%)

하중경우		모델			
		M3-PSSS	M1-GcG-c	M2-PcG-c	M2-PeG-e
편재하	1	100.0	109.0	98.2	102.9
	2	100.0	108.4	94.0	101.9
	3	100.0	107.4	92.5	100.1
중앙재하	1	100.0	110.1	107.8	102.2
	2	100.0	108.0	91.8	101.1
	3	100.0	108.5	97.3	97.6

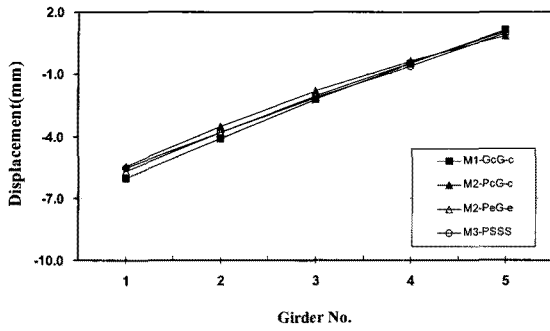


(a) 편재하 하중경우

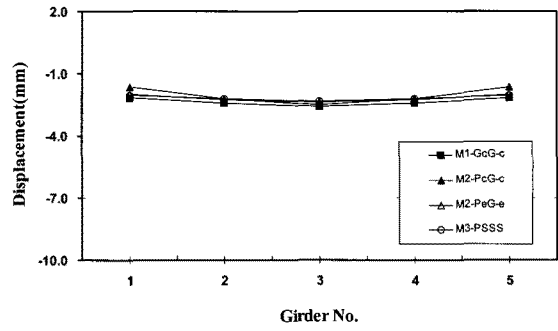


(b) 중앙재하 하중경우

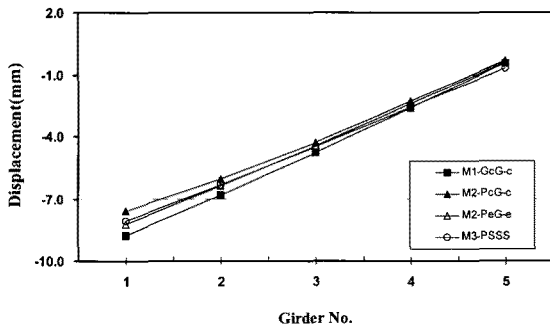
그림 2 대상교량 단면 및 하중위치(단위: mm)



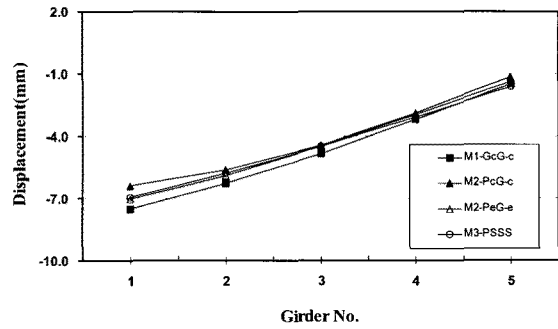
(a) 편측 1차로 재하하중



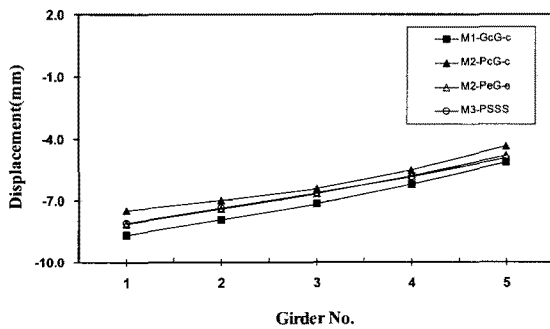
(a) 중앙 1차로 재하하중



(b) 편측 2차로 재하하중

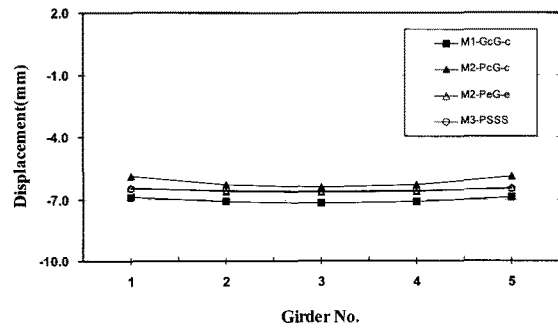


(b) 중앙 2차로 재하하중



(c) 편측 3차로 재하하중

그림 3 편재하 하중경우의 처짐 분포



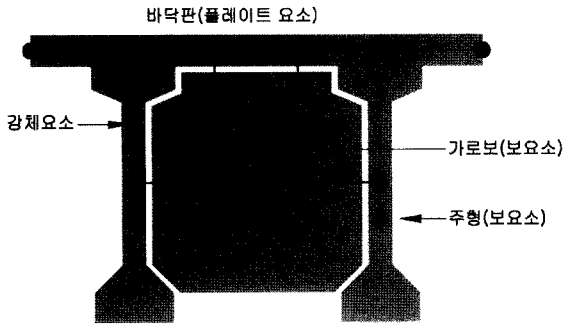
(c) 중앙 3차로 재하하중

그림 4 중앙재하 하중경우의 처짐 분포

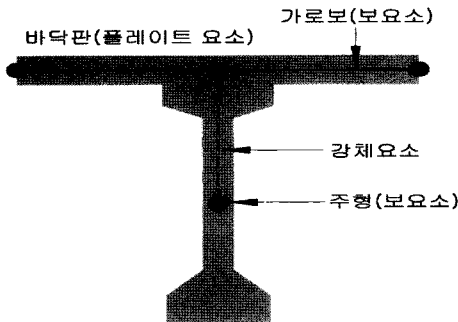
것이다. 본 연구에서는 해석결과의 비교를 위해 처짐값을 이용하였다. 그 이유는 처짐 분포 형상에 따라 활하중의 분배가 비례할 것이고 또한 재하시험에 의한 처짐값 측정 자료가 많아 수치해석 결과와의 비교가 용이하기 때문이다. 그림 3과 4에 나타낸 거더 번호는 그림 2의 거더를 좌측에서 우측으로 부여한 일련번호를 의미한다.

그림 3과 4에 정리된 구조해석 모델들의 처짐값을 보면 M1-GcG-c는 다른 모델들에 비하여 다소 크게, M2-PcG-c는 작게 평가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 M3-PSSS와 M2-PeG-e는 비교적 서로 근사한 값을 주고 있다. 표 1에는 전체 상세모델인 M3-PSSS를 기준으로한 처짐값의 비를 정리하였다. 표 1에서 편재하 하중은 거더 1을 기준으로 처짐비를 나타내었다. 중앙재하에서 1차로와 3차로는 거더 3을

기준으로 하였고, 2차로 경우는 편재하 효과가 나타남으로 거더 1을 기준으로 처짐비를 나타내었다. 표 1에서 보면 M1-GcG-c의 경우에 8~10%정도 크게 나타났다. M1 모델이 전반적으로 큰 처짐을 나타내는 것은 격자를 통하여 하중의 전달경로가 집중되기 때문이다. M2-PcG-c 모델은 중앙 1차로의 경우 실제 가로보 편심을 모델에 반영할 수 없는 영향으로 특히 크게 산정되었고, 이 경우를 제외하면 8%정도 작게 나타났다. M2-PcG-c가 다른 모델에 비해 작은 처짐값을 보이고 있는 것은 바닥판의 유효폭이 종방향 부재의 강성에 합성된 상태에서 바닥판의 강성이 추가적으로 증첩되기 때문이다. 그리고, M2-PeG-e 구조해석 모델은 모든 하중의 경우에 $\pm 3\%$ 이내로 다른 모델들 보다 M3-PSSS 모델과 잘 일치되는 결과를 확인하였다. 활하중 분배계수식의 산출을



(a) M2-peg-e 모델



(b) M2-peg-c 모델

그림 5 변수해석을 위한 구조해석 모델

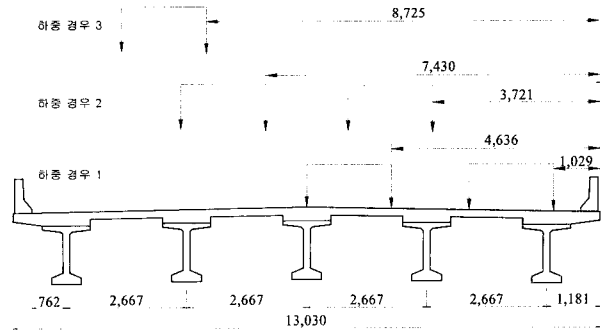
위해서는 수많은 하중경우에 대한 구조해석이 필요하다. 따라서, 비교모델들 중에서는 M2-PeG-e가 해석결과의 정확성과 모델링의 편의성을 동시에 제공할 수 있는 모델로서 가장 적합한 것으로 판단되었다.

3. 방호벽과 가로보의 영향

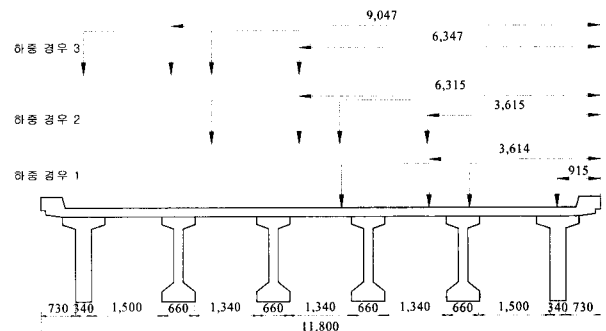
3.1. 해석모델과 대상교량

거더교의 구조해석 모델에 방호벽과 가로보의 영향을 얼마나, 어떻게 반영할 것인가 하는 것도 연구자들의 고민이다(최진유 등, 2000; Cai 등, 2004; Eamon 등, 2002; Kostem 등, 1994). 여기에서는 2장에서 선정한 M2-PeG-e와 M2-PeG-e보다 모델링의 편의성을 개선한 M2-PeG-c 모델에서 방호벽과 가로보가 얼마나 영향을 주는지 알아보기 위해 변수해석을 수행하였다. 그림 5(a)는 M2-PeG-e의 구조해석 모델 형상이고, 그림 5(b)는 M2-PeG-e에서 방호벽과 가로보의 모델링이 편리하도록 바닥판과 같은 평면에 배치한 M2-PeG-c의 형상을 나타낸 것이다.

변수해석 대상 교량은 재하시험 결과가 있는 그림 6의 Br 1과 Br 2로 하였다. 그림 6(a)의 Br 1은 I형 PSC 거더교의 단면과 유사한 HPC(high performance concrete) 단선 경간의 교량이다(Stallings 등, 2002). 지간길이는



(a) Br 1 교량



(b) Br 2 교량

그림 6 대상교량 단면 및 하중재하 위치(단위: mm)

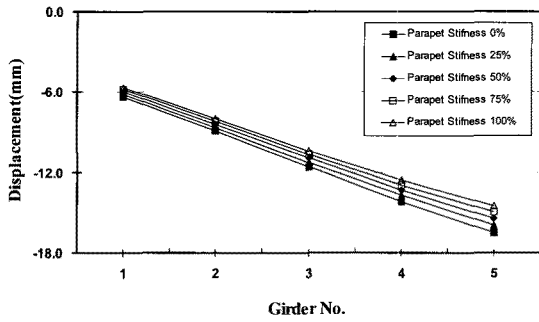
표 2 시험차량의 구성

대상 교량	축 구성	차륜 폭 (mm)	축 간격(mm)		시험차량의 중량(KN)			
			1~2	2~3	1축	2축	3축	총중량
Br 1	3	2,180	5,610	1,470	91	127	128	346
Br 2	3	1,960	3,350	1,310	64	103	103	270

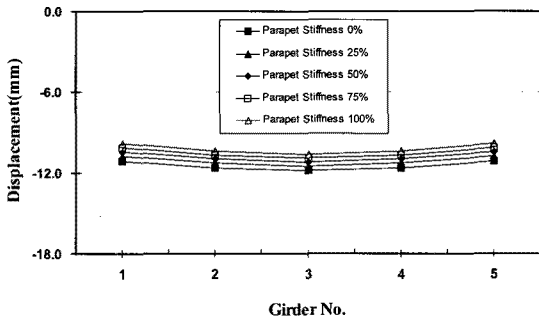
35m, 교폭은 13m, 거더의 높이는 1.4m이며, 거더의 간격은 2.7m이다. 그림 6(b)의 Br 2는 I형 PSC 거더교로 바닥판만 연속화 되어있는 2경간 교량이다(시설안전기술공단, 2001). 지간길이는 30m, 교폭은 11.8m, 거더의 높이는 1.9m이며 거더의 간격은 2.0m이다. Br 1과 Br 2의 재하시험에 사용된 차량의 중량과 제원은 표 2와 같고, 하중재하 위치는 그림 6과 같다.

3.2 방호벽의 영향

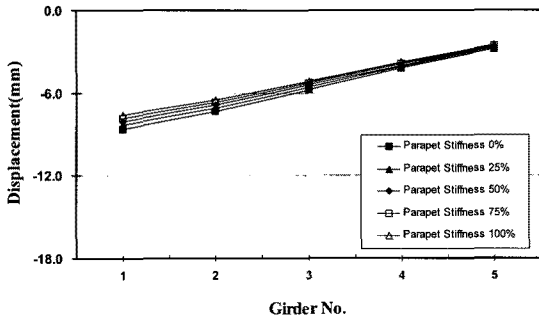
방호벽의 영향을 알아보기 위해 가로보의 휨 강성(EI)을 100%, 0%로 가정한 상태에서 방호벽의 휨 강성은 100%, 75%, 50%, 25%, 0%로 변화시키면서 M2-PeG-e 모델을 사용하여 처짐값과 처짐분포를 비교하였다. 그림 7과 그림 8은 각 거더의 처짐값을 직선으로 연결한 처짐분포이다. 그림 7은 Br 1, 그림 8은 Br 2의 결과를 나타낸 것이다. 이때 그림 7과 그림 8은 가로보의 휨 강성이 100%인 경우이며



(a) 하중 경우 1

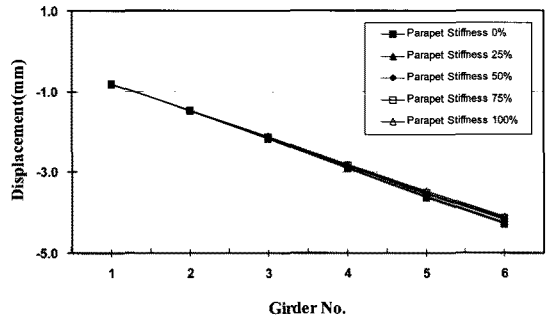


(b) 하중 경우 2

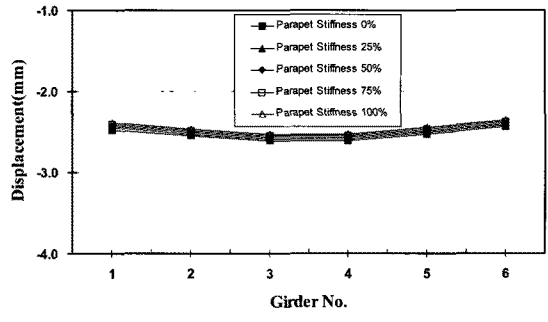


(c) 하중 경우 3

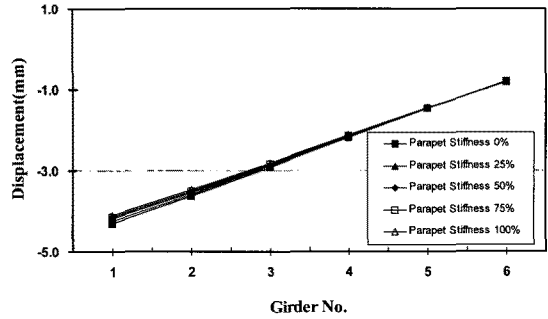
그림 7 Br 1 교량의 방호벽 강성에 따른 처짐 분포



(a) 하중 경우 1



(b) 하중 경우 2



(c) 하중 경우 3

그림 8 Br 2 교량의 방호벽 강성에 따른 처짐 분포

가로보의 휨 강성이 0%에서도 같은 결과를 확인하였다.

그림 7과 8로부터 하중이 편재하되는 하중경우 1과 3에서는 방호벽 휨 강성의 감소와 함께 증가되는 처짐도 하중이 재하되는 거더를 중심으로 편중되어 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 하중이 교량의 횡단면 중앙부에 재하되는 하중경우 2에서는 방호벽 휨 강성이 감소할 때 처짐은 모든 거더에서 균등한 폭으로 증가하는 것을 알 수 있었다.

처짐 분포의 변화를 정량적으로 판단하기 위하여 다음 식 (1)을 이용하였다. 식 (1)에서 기준거더란 처짐값이 가장 크게 발생하는 거더를 의미하고, 인접거더란 기준거더에 인접한 거더중에서 처짐값이 가장 큰 거더를 의미한다. 기준거더와 인접거더의 처짐값을 사용한 이유는 하중이 재하되는 위치 또는 인근의 거더쪽으로 대부분의 하중분배가 이루어지고 이에따라 발생하는 처짐값도 크게 나타나기 때문이다. 따라서 방호벽의 강성변화에도 불구하고 식 (1)의 비율이 같으면

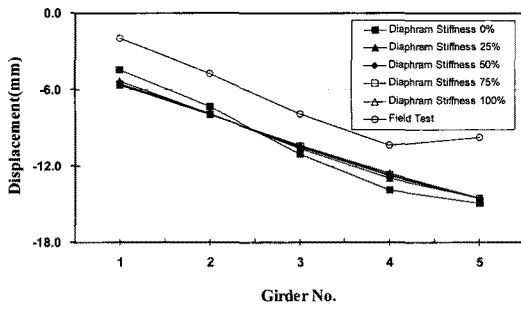
표 3 방호벽 강성에 따른 내·외측처짐값의 비율(Δ_R ,%)

교량	강성	가로보 강성(%)	100		0	
		방호벽 강성(%)	0	100	0	100
Br 1	하중 경우 1		86	87	89	93
	하중 경우 2		98	98	92	91
Br 2	하중 경우 1		84	85	90	92
	하중 경우 2		97	97	80	79

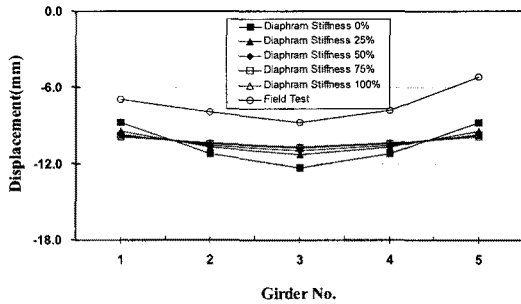
처짐값이 균등한 차이로 변화하는 것을 의미하고, 하중분배율의 변화도 없는 것으로 가정할 수 있다.

$$\Delta_R(\%) = \frac{\text{인접거더 처짐값}}{\text{기준거더 처짐값}} \times 100 \quad (1)$$

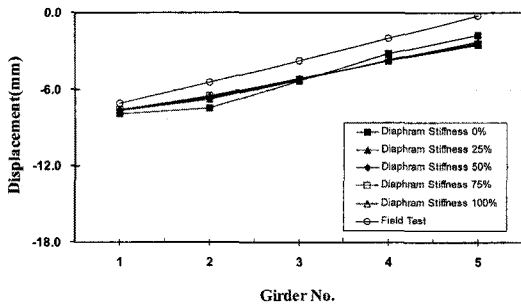
하중 경우 1과 2의 경우에 대해 식 (1)로 계산된 처짐값 비율(Δ_R)을 표 3에 정리하였다. 하중 경우 1에서 Br 1은



(a) 하중 경우 1

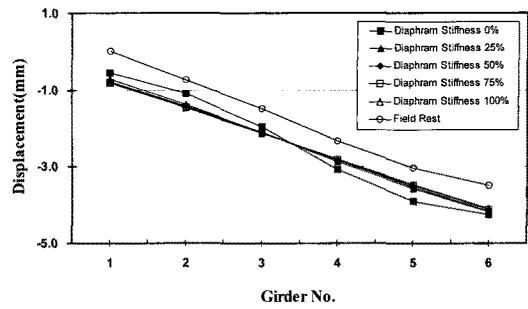


(b) 하중 경우 2

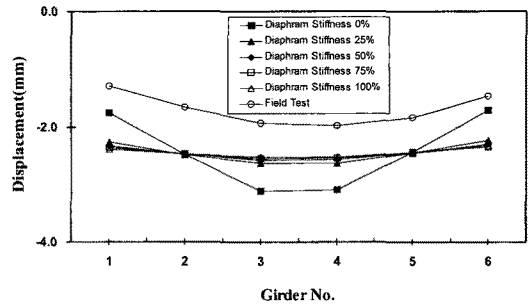


(c) 하중 경우 3

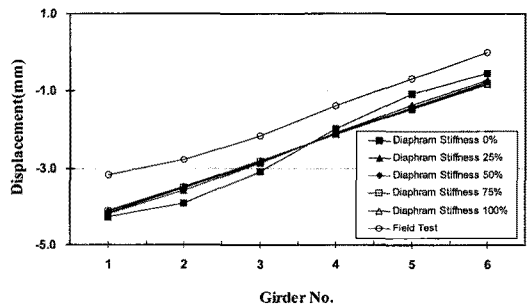
그림 9 Br 1 교량의 가로보 강성에 따른 처짐 분포



(a) 하중 경우 1



(b) 하중 경우 2



(c) 하중 경우 3

그림 10 Br 2 교량의 가로보에 따른 처짐 분포

5번을 기준으로 4번을 Br 2는 6번을 기준으로 5번 거더를 비교하였다. 하중 경우 2에서 Br 1은 3번을 기준으로 4번을 Br 2는 4번을 기준으로 5번 거더를 비교하였다. 표 3에서 보는바와 같이 가로보의 강성이 100% 고려된 경우는 처짐값 비율의 차이가 모든 하중의 경우에서 0~1% 정도로 미소하였다. 또한, 가로보의 휨 강성이 0%로 무시된 경우도 하중 경우 1은 1~4%, 하중 경우 2는 1% 내외로 처짐값의 분포에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다. 따라서 방호벽의 휨 강성 변화가 활하중 분배계수에 미치는 영향은 미소한 것으로 가정할 수 있었다. 즉, 활하중 분배계수 개발을 위한 구조해석모델에 방호벽은 고려하지 않아도 좋을 것으로 판단되었다.

3.3 가로보의 영향

가로보의 영향을 알아보기 위해 방호벽의 휨 강성 (EI)을

최대, 최소인 100%, 0%로 가정한 상태에서 가로보의 휨 강성을 100%, 75%, 50%, 25%, 0%로 변화시키며 M2-PeG-e 모델을 사용하여 해석을 수행한다. 그림 9는 Br 1에 대한 결과를 나타낸 것이고, 그림 10은 Br 2에 대한 결과를 나타낸 것이다. 그림 9와 10에서 Field Test는 재하시험에 의한 각 거더의 처짐값을 직선으로 연결한 처짐분포이다. 이때 그림 9와 그림 10은 방호벽의 휨 강성은 100%인 경우이며, 방호벽의 휨 강성이 0%에서도 같은 결과를 확인하였다.

Br 1과 Br 2에서 하중경우 1과 3은 가로보의 휨 강성이 증가할 때 처짐값은 하중이 재하된 부분에서는 감소하고 이외의 구간에서는 증가하였다. 이것은 하중이 재하된 부분에서 국부적 집중현상이 감소되고 교량의 하중분배 능력이 증가됨을 의미한다. 하중경우 2에서는 가로보 휨 강성의 증가와 함께 거더의 처짐이 점진적으로 균등하게 변화하여 하중분배 능력이 향상되는 과정을 확인할 수 있었다. 가로보가

표 4 재하시험에 의한 처짐값(mm)

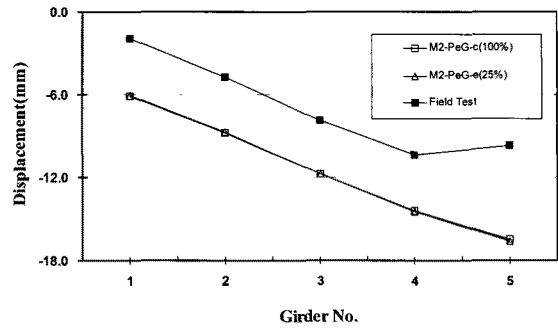
교량	하중 경우	거더					
		거더 1	거더 2	거더 3	거더 4	거더 5	거더 6
Br 1	1	-1.956	-4.750	-7.899	-10.338	-9.703	-
	2	-6.934	-7.950	-8.763	-7.823	-5.131	-
	3	-7.061	-5.461	-3.759	-1.981	-0.254	-
Br 2	1	-0.000	-0.740	-1.490	-2.335	-3.040	-3.495
	2	-1.290	-1.670	-1.945	-1.985	-1.840	-1.470
	3	-3.175	-2.785	-2.155	-1.390	-0.685	-0.015

표 5 재하시험에 대한 응답비 비교

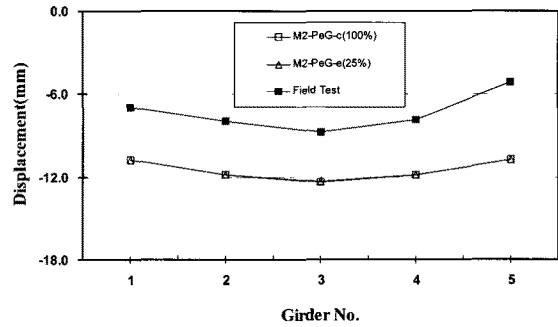
교량	하중 경우	가로보 강성 (%)	R(%)					
			주형 1	주형 2	주형 3	주형 4	주형 5	주형 6
Br 1	하중 경우 1	25	32	55	67	71	58	-
		100	31	53	68	73	59	-
	하중 경우 2	25	64	67	71	66	48	-
		100	62	68	74	67	46	-
	하중 경우 3	25	81	72	65	48	10	-
		100	82	74	65	47	10	-
Br 2	하중 경우 1	25	-	53	69	79	82	79
		100	-	50	68	80	84	81
	하중 경우 2	25	55	65	72	73	72	63
		100	52	65	74	76	73	60
	하중 경우 3	25	72	75	73	65	49	-
		100	74	77	74	64	46	-

무시된 경우는 증가 또는 감소되는 처짐값 변화의 폭이 크게 나타나지만, 25%~100%경우는 무시해도 좋을 만큼 미소하였다.

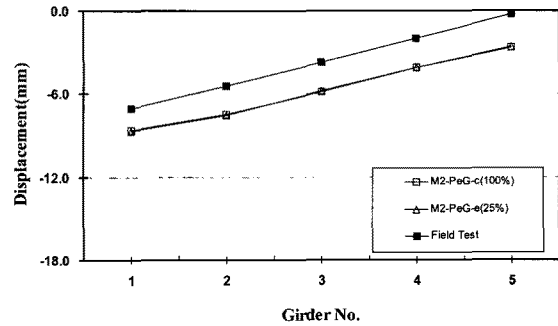
처짐값 변화의 폭을 알아보기 위해 휨 강성이 25%(이하 M2-PeG-e(25))와 100%(이하 M2-PeG-e(100)) 모델을 비교하였다. 그리고 재하시험에 의한 처짐값을 해석모델의 정확성 확인을 위해 비교하였다. 재하시험에 의한 처짐값은 표 4에 정리하였다. 비교는 식 (2)의 응답비를 이용하였다. 응답비는 재하시험값과 구조해석 모델에 의한 처짐과 내하력 차이를 보정하는데 이용되고, 구조물의 정밀진단에서 일반적으로 사용되는 개념이다. 응답비가 100%에 근접할수록 재하시험값과 구조해석 모델의 처짐값이 잘 일치하는 것이고, 각 거더간의 응답비가 일정한 비율이면 처짐 분포가 일치하는 것을 의미한다.



(a) 하중 경우 1



(b) 하중 경우 2



(c) 하중 경우 3

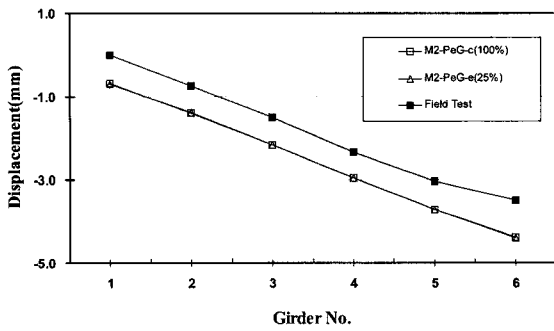
그림 11 Br 1 교량의 경우 구조해석 모델의 비교

$$R(\%) = \frac{\Delta_{TEST}}{\Delta_{FEM}} \times 100 \quad (2)$$

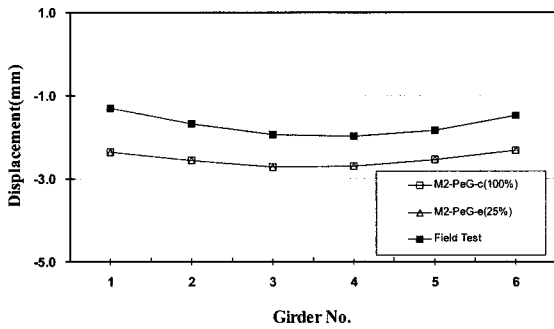
여기서, Δ_{FEM} : M2-PeG-e 모델 처짐값

Δ_{Test} : 재하시험 처짐값

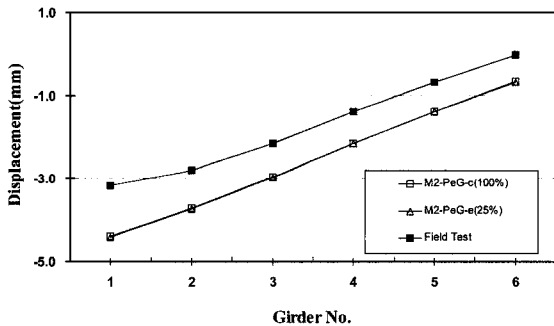
계산된 응답비는 표 5에 정리하였다. 재하시험의 처짐값이 거의 0으로 측정된 Br 2에서 하중경우 1의 1번 거더와 하중경우 3의 6번 거더의 응답비는 제외하였다. 가장 큰 응답비를 25%, 100%순으로 정리하면, Br 1에서 하중경우 1은 71%, 73% 하중경우 2는 71%, 74%이며, 하중경우 3은 81%, 82%였다. Br 2에서 하중경우 1은 82%, 84%, 하중경우 2는 73%, 76%이며, 하중경우 3은 75%, 77%였다. Br 1의 하중경우 1에서 휨 강성에 따른 응답비 분포는 32~71%, 31~73%의 범위로 넓게 발생하였다. 그러나 대부분



(a) 하중 경우 1



(b) 하중 경우 2



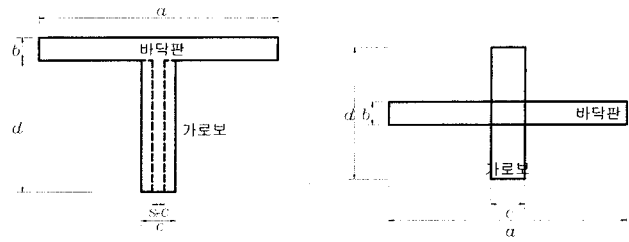
(c) 하중 경우 3

그림 12 Br 2 교량의 경우 구조해석 모델의 비교

의 하중이 전달되는 거더들의 경우에는 70%~80%로 일정한 비율을 유지하였다. M2-PeG-e(25)와 M2-PeG-e(100)의 응답비의 차이는 2%이하로 미소하여 가로보의 영향은 휨 강성이 25%이상이면 충분히 반영되는 것을 알 수 있었다.

3.4 가로보의 모델링 방법에 따른 영향

그림 11과 12는 Br 1과 Br 2에 대하여 재하시험값과 M2-PeG-e(25)와 M2-PeG-c(100) 모델을 비교한 것이다. 이들 모델을 비교한 것은 M2-PeG-e보다 사용이 간편한 M2-PeG-c 모델에서 가로보의 영향을 알아보기 위해서이다. 그림 11과 12에서 보는바와 같이 M2-PeG-c(100)와 M2-PeG-e(25)의 처짐값과 처짐 분포가 일치하는 것을 알 수 있었다. 즉, 가로보의 영향이 같음을 의미한다. 또한 재하



(a) M2-PeG-e 모델(합성) (b) M2-PeG-c 모델(단순중첩)
그림 13 구조해석 모델의 가로보 배치

표 6 바닥판과 가로보의 제원

대상교량	바닥판과 가로보의 제원 (m)				s_r (%)
	a	b	c	d	
Br1	2.30	0.18	0.20	1.22	22
Br2	2.60	0.20	0.20	1.70	23

시험값과의 비교에서도 Br 1의 하중경우1의 5번 거더를 제외하면 처짐 분포가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 5번 거더의 경우는 재하시험과정에서 다소 오류가 포함된 것으로 판단되었다.

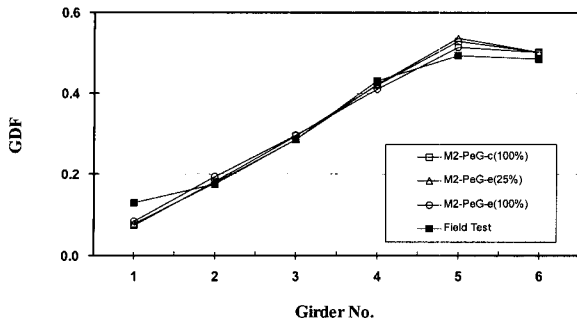
그림 13은 해석 모델에서 가로보의 배치방법에 따른 휨 강성의 차이를 설명하기 위한 것이다. 휨 강성의 차이는 가로보의 폭을 비교한 식 (3)의 s_r 을 이용한다. s_r 은 바닥판과 가로보의 합성작용에 의한 것과 단순 합에 의한 휨 강성이 같다고 두면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{s_r}{1-s_r} = \frac{\{(ab+s_r cd)cd^3\}}{3abcd(b+d)^2} \quad (3)$$

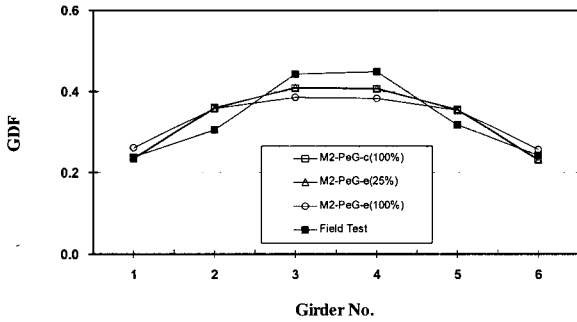
바닥판 및 가로보의 제원과 s_r 은 표 6에 정리하였다. 대상교량 Br 1의 경우 단순하게 더해진 휨 강성값은 합성작용에 의한 휨 강성값의 22%, Br 2 교량의 경우는 23%이다. M2-PeG-c(100)와 M2-PeG-e(25) 모델에서 가로보의 영향이 서로 근사하게 나타났던 것은 이 결과로부터도 알 수 있었다.

4. 활하중 분배계수 비교

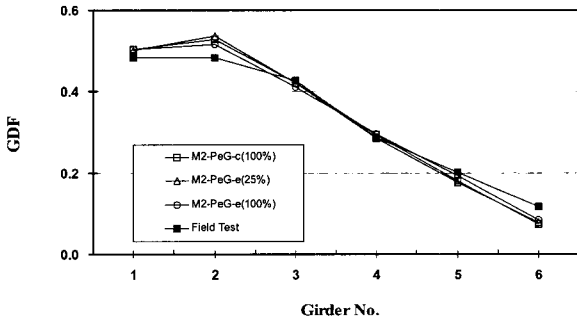
해석 모델의 적합성을 확인하기 위하여 M2-PeG-e(25), M2-PeG-e(100)와 M2-PeG-c(100)를 이용한 활하중 분배계수를 재하시험값과 비교하였다. 비교에 사용된 교량은 Br 2 교량이다. Br 1 교량은 변형률 측정 자료가 충분하지 않아 비교하지 않았다. 재하시험은 식 (4)를 이용하고 해석 모델은 식 (5)에 의해 계산하였다.



(a) 하중 경우 1



(b) 하중 경우 2



(c) 하중 경우 3

그림 14 Br 2 교량의 활하중 분배계수 비교

$$GDF_i = \frac{E \cdot \frac{Z_i}{Z_l} \cdot \epsilon_i}{\sum_{j=1}^k \left(E \cdot \frac{Z_j}{Z_l} \cdot \epsilon_j \right)} \cdot n \quad (4)$$

여기서, GDF_i : i 번째 거더의 활하중 분배계수

E : 탄성계수

ϵ_i : i 번째 거더에서의 하부플랜지 변형률

Z_i : i 번째 거더의 단면계수

Z_l : 표본이 되는 거더의 단면계수

k : 거더의 수

n : 재하 차량의 수

$$GDF_i = \frac{M_i}{\sum_{j=1}^k M_j} \cdot n \quad (5)$$

표 7 Br 2 활하중 분배계수의 상대 오차

구분	Re(%)			
	하중 경우 1	하중 경우 2	하중 경우 3	
M2-PeG-c(100)	외측 주형	3.4	-0.5	4.0
	내측 주형	6.8	-8.8	8.6
M2-PeG-e(100)	외측 주형	3.4	8.7	3.9
	내측 주형	4.3	-15.2	6.2

여기서, GDF_i : i 번째 거더의 활하중 분배계수

M_i : i 번째 거더에서의 휨모멘트

n : 재하 차량의 수

그림 6에서 보는바와 같이 외측거더는 내측거더와 단면의 제원이 다르므로 식(4)에서의 단면계수비 (Z_i/Z_l)를 0.831로 적용하였다. 그림 14는 구조해석과 재하시험으로부터 얻어진 활하중 분배계수를 보여주고 있다. 그리고 표 7에는 식(6)으로부터 산정된 구조해석 결과와 재하시험 결과간의 상대오차를 나타내었다.

$$Re(\%) = \frac{GDF_{FEM} - GDF_{Test}}{GDF_{FEM}} \times 100 \quad (6)$$

여기서, GDF_{FEM} : 해석 모델에 의한 활하중 분배계수

GDF_{Test} : 재하시험에 의한 활하중 분배계수

그림 14에서 보는바와 같이 처짐값의 분포가 동일한 M2-PeG-e(25)와 M2-PeG-c(100) 모델은 활하중 분배계수도 같다. 표 7에서 보는바와 같이 M2-PeG-c(100) 모델의 경우 재하시험에 의한 활하중 분배계수와와의 상대오차가 외측거더는 하중경우 1과 3에서 3.4%, 4.0% 크게 산정되고, 내측거더는 하중경우 2에서 8.8% 작게 분석되었다. M2-PeG-e(100) 모델의 경우 외측거더는 3.4%, 3.9% 크고, 내측거더는 15.2% 작게 분석되었다. M2-PeG-c(100) 모델은 M2-PeG-e(100) 모델보다 안전측으로 활하중 분배계수를 평가 하였다. 또한 재하시험값과의 비교에서도 5~10% 미만으로 좋은 결과를 예측할 수 있음을 확인하였다. 따라서 M2-PeG-c(100) 모델이 활하중 분배계수 개발을 위한 구조해석모델로 가장 적합한 것으로 판단되었다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) I형 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량의 구조해석에 는 편심을 반영한 거더, 방호벽 및 가로보를 바닥판에

연결시킨 M2-PeG-e 모델이 해석결과의 정확성과 모델링의 편이성을 동시에 만족시키는 측면에서 적합하였다.

- 2) 방호벽의 휨 강성 변화가 활하중 분배에 미치는 영향은 1~4%정도로 미소하게 나타났다.
- 3) 편심을 고려한 가로보의 휨 강성은 반영비율이 25%이상일 때에는 그 크기에 관계없이 활하중 분배에 미치는 변동 폭이 2%이하로 나타났다.
- 4) 한편, 바닥판과 거더와의 편심은 고려하고, 방호벽 및 가로보의 편심은 고려하지 않는 M2-PeG-c(100) 모델이 M2-PeG-e(100) 모델보다 안전측의 활하중 분배계수값을 주었고 재하시험과도 잘 일치하였다.
- 5) 따라서, 본 연구에서는 방호벽의 영향을 무시하고 가로보의 휨 강성을 100% 반영한 M2-PeG-c(100) 모델이 활하중 분배계수식의 개발을 위한 구조해석 모델로서 가장 적합한 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2005a) 도로교설계기준, 한국도로교통협회.
- 건설교통부 (2005b) 2005교량현황조사, 건설교통부.
- 구민세, 연정흠, 정재운, 강동현 (2003) 2경간 연속 프리스트레스트 콘크리트 사교의 운하중 분배에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 23(6A), pp.1057~1066.
- 김광수, 박선규, 김형열 (1999) PSC보 교량의 유한요소 모델링방법에 관한 연구, 한국콘크리트학회논문집, 11(5), pp.33~40.
- 마이다스아이티 (2006) MIDAS/CIVIL, 마이다스아이티.
- 서종철, 이성우 (1998) 유한요소 해석을 통한 운하중 분배계수의 적정성 분석, 1998 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp.47~50.
- 시설안전기술공단 (2001) 원효대교 정밀안전진단 보고서, 서울특별시 건설안전관리본부.
- 이종재, 윤정방 (2006) 해석모델의 불확실성을 고려한 교량의 손상추정기법, 한국전산구조공학회논문집, 19(2), pp.125~138.
- 이환우, 김광양, 한상준, 고동원 (2006) I형 PSC 거더교를 위한 구조해석 모델의 비교, 2006 정기 학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회, pp.725~732.
- 최진유, 양기재, 박남희, 강영중 (2000) 매크로 요소를 사용한 바닥판의 휨거동 해석, 한국전산구조공학회논문집, 13(1), pp.13~24.
- 최창근, 김경호, 김재범 (2001) 정적해석에 의한 표준적인 P.S.C 거더 교량의 적정 가로보 수에 관한 연구, 한국전산구조공학회논문집, 14(1), pp.43~55.
- 한국도로공사 (2003) 고속도로건설공사 표준도, 한국도로교통협회.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (1996) *Standard Specifications for highway bridges, Sixteenth Edition*, Washington, D.C.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (2007) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Third Edition*, Washington, D.C.
- Barr, P.J., Eberhard, M.O., Stanton, J.F. (2001) Live-Load Distribution Factors in Prestressed Concrete Girder Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, pp.298~306.
- Cai, C.S., Shahawy, M. (2004) Predicted and Measured Performance of Prestressed Concrete Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 9(1), pp.4~13.
- Eamon, C.D., Nowak, A.S. (2002) Effects of Edge-Stiffening Elements and Diaphragms on Bridge Resistance and Load Distribution, *Journal of Bridge Engineering*, 7(5), pp.258~266.
- Hambly, E.C. (1991) *Bridge Deck Behaviour, Second Edition*, E & FN Spon. U.K.
- Hays, C.O., Consolazio, C.R., Hoit, M.I., Kakhandiki, A. (1994) *Bridge Rating of Girder-Slab Bridges Using Automated Finite Element Technology*, University of Florida, Structures Research Report No. 94-1, Florida.
- Kostem, C.N. (1994) *Effect of Diaphragms on Load Distribution in Beam-Slab Bridges*, Transportation Research Record, Washington W.C.
- Mabsout, M.E., Tarhini, K.M., Frederick, G.R., Tayar, C. (1997) Finite-Element Analysis of Steel Girder Highway Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 2(3), pp.83~87.
- Sotelino, E.D., Liu, J., Chung, W., Phuvoravan, K. (2004) *Simplified Load Distribution Factor for Use in LRFD Design*, Purdue University, FHWA/IN/JTRP-2004/20, Indiana.
- Stallings, J.M., Porter, P. (2002) *Live Load Tests of Alabama's HPC Bridge*, Auburn University Highway Research Center, Alabama.
- Zokaie, T., Osterkamp, T.A., Imbsen, R.A. (1991) *Distribution of Wheel Loads on Highway Bridges*, NCHRP 12-26/1, Transportation Research Board, Washington D.C.