

단경간 2-거더교의 여유도 평가 실험-수평브레이싱의 효과

An Experiment on Redundancy in Simple Span Two-Girder Bridge - Effects of Lateral Bracing

박 용 명¹⁾ · 조움돌이^{2)†} · 황 민 오³⁾ · 이 대 용⁴⁾ · 윤 태 양⁵⁾

Park, Yong Myung Joe, Woom Do Ji Hwang, Min Oh Lee, Dae Yong Yoon, Tae Yang

요약 : 본 연구에서는 단계하경로 구조로 인식되는 2-거더교에서 한 개 거더의 손상 시 여유도를 평가하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 실험변수는 하부 수평브레이싱으로 하여 하부 수평브레이싱이 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 단경간 1/5 모형 시험체 2개를 제작하였다. 먼저 균열이 없는 정상상태 시험체에 대해서 탄성범위 내에서 재하실험을 수행하였으며, 이후 시간 중앙부의 한 개 거더에 인위적인 손상을 가한 후 종국상태에 이르기까지 재하 실험을 수행하였다. 실험으로부터 정상상태의 교량에서도 수평브레이싱은 하중 재분배 역할을 수행하였으며, 한 개 거더에 심각한 손상이 발생한 경우에는 가로보와 바닥판이 비균열 거더 측으로 하중 재분배 기능을 일부 수행하였으나, 특히 하부 수평브레이싱은 2-거더교의 손상 시 여유도 향상에 매우 중요한 기능을 하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : This paper presents the results of an experimental study to evaluate the redundancy in two plate-girder bridges, which are generally classified as non-redundant load path structures. The study was performed at a time when one of the two girders was damaged. The bottom lateral bracing was considered the experimental variable, and two 1/5-scale bridge specimens of simple span with and without a lateral bracing system were fabricated. Loading tests were first performed on the intact specimens without a cracked girder, within an elastic range. Thereafter, the ultimate loading tests were conducted on the damaged specimens with an induced crack at the center of a girder. The test results showed that the cross beams and the concrete deck redistributed some of the load to the uncracked girder, but the lateral bracing system played an important role in improving the redundancy during the damage and was also effective for load redistribution even when the bridge was intact.

핵심 용어 : 여유도, 2-거더교, 하부 수평브레이싱, 손상 거더, 하중 재분배

KEYWORDS : redundancy, two-girder bridge, bottom lateral bracing, fractured girder, load redistribution

1. 서 론

소수거더교, 특히 2-거더교는 2 개의 거더만으로 교량 상부 구조를 지지하므로 한 개 거더가 파괴로 균열이나 우발적인 사고 등으로 파손되는 경우 붕괴에 대한 우려로부터 적용을 기피하는 사례가 빈번하다. 이에 따라, AASHTO 기준(2002)과 국내 도로교설계기준(2005)에서는 소수 2-거더교를 한 개 거더의 파손으로 전체 교량이 붕괴될 수 있는 단계하경로 구조(non-redundant load path structure)로 규정하고 있

다. 또한, AASHTO LRFD Specification (2004)에서는 여유도가 없는 구조에 대해 하중수정계수(η_R)를 1.05로 높게 제시하고 있고, 주거더를 붕괴유발부재(fracture critical member)로 간주하여 낮은 피로강도를 적용하도록 하는 등 보수적인 설계를 유도하고 있다.

그러나, 2-거더교에서 한 개 거더에 심각한 손상이 발생하였음에도 곧바로 붕괴된 사례는 없으며(Daniels 등, 1989), 이는 바닥판, 가로보, 하부 수평브레이싱 등 2차 부재들의 종방향 및 횡방향 하중 재분배 기능에 기인한다. 이와 같이 하

1) 정회원, 부산대학교 토목공학과 부교수 (ympk@pusan.ac.kr)
2) 교신저자, 학생회원, 부산대학교 토목공학과 박사과정

(Tel. 051-510-1460, Fax. 051-513-9596, E-mail : woondoji@pusan.ac.kr)
3) 정회원, 포항산업과학연구원 토목구조연구실 책임연구원(mohwang@rist.re.kr)
4) 정회원, 포항산업과학연구원 토목구조연구실 선임연구원(dylee@rist.re.kr)
5) 정회원, 포항산업과학연구원 토목구조연구실장, 수석연구원(tyoon@rist.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2007년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

나의 주거터에 손상이 발생하였을 때 교량 상부구조가 하중을 지탱할 수 있는 능력을 교량의 여유도(redundancy)로 정의하고 있다.

2-거더교의 여유도와 관련한 해석적 연구는 Heins 등(1980, 1982)으로부터 시작되었으며, 이들은 선형 탄성해석으로부터 하부 수평브레이싱이 거더 손상 시 하중 재분배에 중요한 역할을 한다고 제시하였다. ASCE-AASHTO 위원회(1985)는 응력수준의 저감을 통해 여유도가 증가할 수 있음과 2-거더교가 연속교인 경우에는 바닥판과 브레이싱 부재들의 하중 재분배로 인해 여유도에는 문제가 없을 것으로 제시하고 있다. 그리고, Daniels 등(1989)은 하부 수평브레이싱을 갖는 2-거더교의 손상 시 모델에 대한 비선형 해석을 통해 수직 및 수평브레이싱 부재들이 교량의 여유도를 위해 설계되지는 않았지만, 이들 부재가 거더 손상 시 대체하중경로(alternate load path) 역할을 하여 여유도에 중요한 역할을 있다고 강조하였다. 또한, 국내에서는 박용명 등(2006)이 하부 수평브레이싱 설치 유·무에 따른 단경간 및 연속 2-거더교의 여유도를 해석적으로 평가하였는데, 연속교에서는 수평브레이싱의 생략이 가능하나 단순교에서는 설치가 필요하다고 제안하였다.

한편, Idriss 등(1995)은 철거 예정인 3경간 연속 2-거더교의 중앙경간에서 한 개 거더에 인위적인 균열을 가한 후 트력하중을 균열 거더 측에 편재하한 현장실험을 수행하였다. 본 실험으로부터 하중 재분배는 손상 거더의 내민보 거동에 의한 종방향으로의 하중 재분배가 지배적이고 하부브레이싱과 가로보, 그리고 콘크리트 바닥판도 비균열 거더 측으로 일부 하중을 전달하는 것으로 분석되었다. 그리고, 일본과 국내에서는 Tachibana 등(2000)과 길홍배 등(2005)이 하부 수평브레이싱이 없는 단경간 2-거더 모형 교량을 대상으로 먼저 탄성 범위 내에서 균열 정도에 따른 거동을 분석하고, 이후 균열이 하부플랜지와 복부판 상단까지 진전된 상태에서 내하력 평가를 위한 실험을 실시하였다. 이를 실험에 의하면 균열이 복부판에 한정되는 경우에는 거동의 변화가 미소하나, 하부플랜지까지 균열이 발생하면 처짐과 균열부 주위의 부재 응력이 급격히 증가하는 결과를 얻었다. 그리고 길홍배 등(2005)은 한 개 주거더가 거의 파손된 상태에서도 2-거더교가 어느 정도 여유도를 갖고 있다고 제안하였다.

이상에서 언급한 연구자들이 수행한 2-거더교의 여유도 관련 연구는 각 국가의 적용 실태를 감안하여 이루어 졌는데, 여기에는 한 가지 중요한 차이점이 있다. 즉, 미국의 경우 하부 수평브레이싱을 기본적으로 적용하고 있고, 유럽과 일본에서는 이를 생략한 2-거더교 형식을 적용하고 있다는 점이다. 따라서, 앞에서 기술한 해석적, 실험적 연구들은 2-거더교의

여유도와 관련하여 주요 변수로 판단되는 하부 수평브레이싱 설치 유·무에 따른 상대 비교가 불가하다. 또한, 연속교와는 달리 단경간 2-거더교는 한 개 거더 손상 시 종방향으로의 하중 재분배 효과를 기대하기 힘들므로 하부 수평브레이싱이 여유도에 미치는 영향이 매우 클 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 하부 수평브레이싱의 유·무에 따른 여유도의 평가를 위해 두 개의 축소 모형 단경간 교량을 제작하고 먼저 정상상태에 대해 탄성범위 내에서 실험을 수행한 후, 한 개 거더에 인위적인 손상을 가한 손상상태에 대해 내하력 평가 실험을 실시하였다. 본 실험을 통해 하부 수평브레이싱 설치 유·무에 따른 정상상태 시의 거동을 비교하고, 거더 손상 후 내하력을 비교·평가하여 수평브레이싱이 단경간 2-거더교의 여유도에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

2. 축소 시험체의 제작

2.1 시험체 개요

시험체는 도로교설계기준(2005)에 준하여 설계된 지간 50m의 모델 교량에 근거하여 1/5배로 축소 제작하였다. 시험체의 단면도와 측면도, 그리고 주거더 및 가로보의 세원은 그림 1~그림 3에 보인 바와 같다.

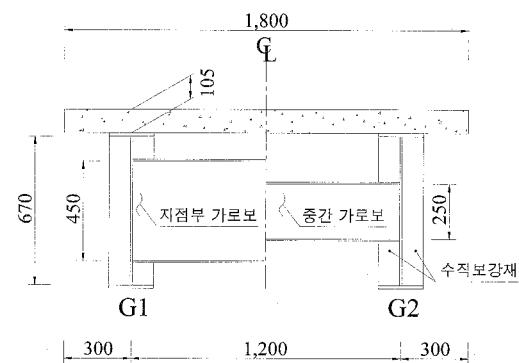


그림 1. 시험체 정면도 (단위: mm)

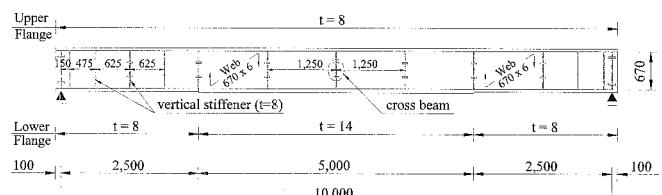


그림 2. 시험체 측면도 (단위: mm)

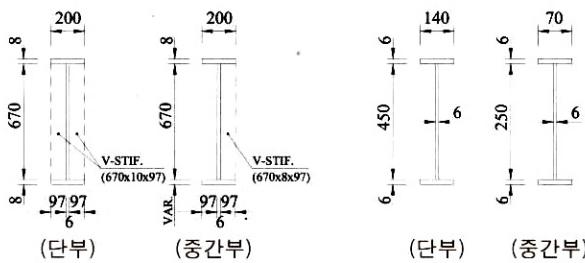


그림 3. 시험체 주거더 상세(좌) 및 가로보 제원(우) (단위: mm)

먼저, 바닥판의 제원(그림 1)은 헌치부를 고려하지 않은 등가의 직사각형 단면으로 치환하여 폭원 1.8m, 두께 105mm로 하였다. 이 때 합성 전·후의 힘강성비는 모델 교량과 동일한 수준으로 2.5 정도(경간 중앙 단면 기준)에 해당한다. 그리고 2-거더교의 바닥판은 일반적으로 PSC 바닥판으로 고려되나, 본 실험에서는 실물 교량의 철근량과 긴장재의 단면 적을 고려한 철근 콘크리트 바닥판으로 하였다. 철근은 교축 및 교축직각방향으로 각각 D10 철근을 간격 80mm, 덤개 20mm로 상·하단에 배근하였다.

전단연결재는 시험체가 극한 상태에 도달하더라도 충분한 강성을 가지도록 산정하여 직경 19mm의 제원을 플랜지폭 당 2열 배치로 하여 경간부에서는 150mm, 단부에서는 120mm 간격으로 설치하였다.

주거더(그림 2, 그림 3)는 복부판 높이 670mm, 상·하부 플랜지의 폭은 200mm로 교량 전장에 걸쳐 등단면으로 고려하였다. 판두께는 상부플랜지는 8mm, 하부플랜지는 중앙부는 14mm, 그 이외 구간은 8mm이며 복부판은 전체 구간에 걸쳐 6mm 판으로 하였다.

가로보(그림 3)는 실교량에서 일반적으로 적용하는 간격이 5~6m 정도인 것을 감안하여 1.25m 간격으로 설치하고, 지점 및 중간 가로보의 복부판 높이는 각각 거더 높이의 2/3와 1/3 정도인 I-단면 보로 고려하였다.

수직보강재는 그림 2에 보인 바와 같이 중간부(2.5~7.5m) 구간에서는 1.25m 간격, 즉 가로보 위치에만 설치하였고, 양단 2.5m 구간에 대해서는 0.625m 간격으로 설치, 그리고 지점에서는 지점부 수직보강재를 추가로 설치하여 전단 좌굴에 적절한 강성을 가지도록 하였다. 한편, 수평보강재는 일반적으로 2-거더교에서 제작 합리화를 위해 생략하므로 설치하지 않았다.

하부 수평브레이싱을 갖는 시험체의 경우 XD-형태로 각 패널마다 설치하였고, 브레이스 부재는 L-50×50×6의 형강을 사용하였다. 그리고 브레이싱이 교차하는 부분은 용접을 통해 강철 연결시켰고, 이때의 세장비는 약 90 정도이다.

표 1. 재료 강도 시험 결과 (단위: MPa)

구분	강판			철근	콘크리트 압축강도
	6mm	8mm	14mm		
항복강도	462.6	398.4	312.3	460.4	34.4
인장강도	548.3	567.0	457.9	642.0	

한편, 시험체 제작에 사용된 재료는 강판은 SM400, 철근은 SD40, 그리고 콘크리트는 35MPa급 고강도 콘크리트를 사용하였다. 강판, 철근 그리고 콘크리트의 강도 시험 결과는 표 1과 같다. 본 표로부터 콘크리트는 거의 설계강도에 도달하였고, 철근은 설계 항복강도 400MPa를 초과하며 강재는 설계 항복강도 240MPa를 크게 상회한다.

2.2 게이지 설치

시험체의 거동을 분석하기 위한 변위계(LVDT)와 스트레인 게이지(strain gauge)는 예비 전산 해석을 통해 전반적인 거동을 파악한 후 다음과 같이 설치하였다.

먼저, 변위계의 부착 위치는 그림 4에 보인 바와 같이 수직변위를 측정하기 위한 변위계(D1~D6)는 각 거더의 하부플랜지 아래에 2.5m의 간격으로 설치하였고, 시험체의 수평 거동 정도를 분석하고자 거더 중앙부의 복부판 상·하단부에 교축직각 방향으로 변위계(D7~D10)를 설치하였다.

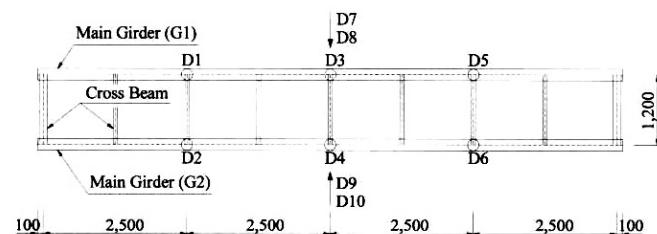


그림 4. 변위계 설치 위치 (단위: mm)

그림 5에는 각 부재에 설치된 스트레인 게이지의 부착 위치를 나타내었다. 먼저, 거더의 변형률을 측정하기 위한 스트레인 게이지는 그림 5(a)와 같이 거더 상·하부플랜지의 주요 위치에 부착하였고, 경간의 3.75~6.25m 구간에서는 복부판으로의 항복 여부를 파악하기 위해 복부판의 높이 방향으로도 설치하였다.

가로보는 힘거동을 분석하고자 그림 5(b)와 같이 가로보 양쪽 단부로부터 50mm 위치의 상·하부플랜지에 스트레인 게이지를 설치하였다.

브레이싱 부재는 그림 5(c)와 같이 두 개의 브레이싱이 만나는 점에서 400mm 떨어진 위치에 각각 1개씩 설치하였다.

바닥판은 지간 중앙부 부근에서 발생하는 콘크리트의 주변

형률을 측정하기 위해 그림 5(d)와 같이 3 방향으로 변형률 게이지를 부착하고, 동 위치의 교축 및 교축 직각방향 상·하단 철근에도 스트레인게이지를 미리 부착한 후 콘크리트를 타설하였다.

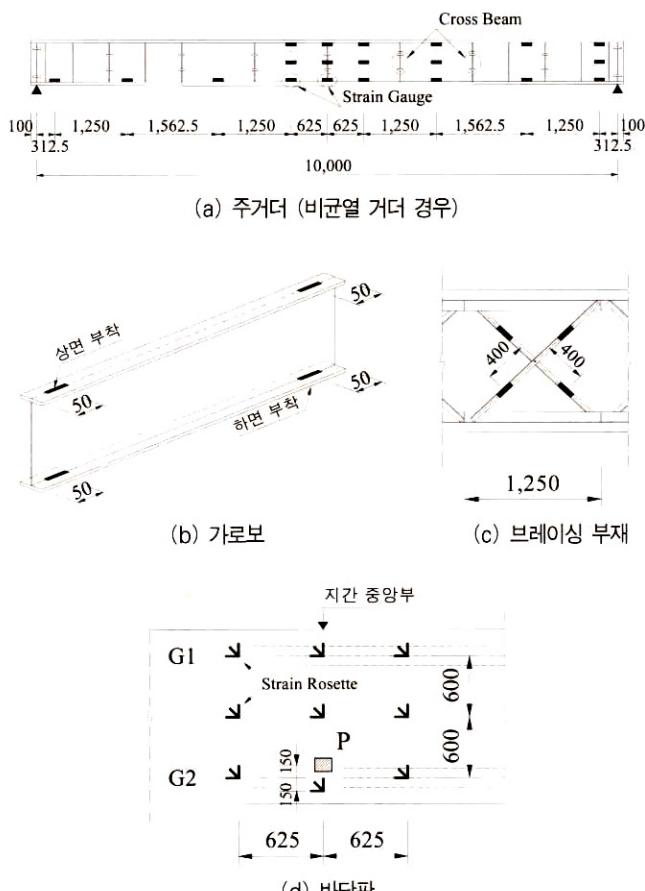


그림 5. 스트레인 게이지 부착 위치 (단위: mm)

그림 5에는 각 부재에 설치된 스트레인 게이지의 부착 위치를 나타내었다. 먼저, 거더의 변형률을 측정하기 위한 스트레인 게이지는 그림 5(a)와 같이 거더 상·하부플랜지의 주요 위치에 부착하였고, 경간의 3.75~6.25m 구간에서는 복부판으로의 항복 여부를 파악하기 위해 복부판의 높이 방향으로도 설치하였다.

가로보는 흔거동을 분석하고자 그림 5(b)와 같이 가로보 양쪽 단부로부터 50mm 위치의 상·하부플랜지에 스트레인 게이지를 설치하였다.

브레이싱 부재는 그림 5(c)와 같이 두 개의 브레이싱이 만나는 점에서 400mm 떨어진 위치에 각각 1개씩 설치하였다.

바닥판은 지간 중앙부 부근에서 발생하는 콘크리트의 주변 형률을 측정하기 위해 그림 5(d)와 같이 3 방향으로 변형률 게이지를 부착하고, 동 위치의 교축 및 교축 직각방향 상·하단 철근에도 스트레인게이지를 미리 부착한 후 콘크리트를 타설하였다.

설하였다.

3. 정상상태 재하실험

3.1 정상상태 실험 개요

먼저, 시험체의 한 개 거더에 인위적인 균열을 가하기 전, 즉 정상상태 시험체에 대해 하부 수평브레이싱의 유·무에 따른 거동을 비교하기 위한 실험을 수행하였다. 시험체의 양단은 롤러 지지의 구현을 위해 원형 강봉 위에 지지시켰다.

시험체의 가력은 용량이 10,000kN인 만능시험기 (Universal Testing Machines)를 사용하였다. 가력점은 그림 6과 같이 지간 중앙부에 한 개의 집중하중을 G2 거더측으로 편재하시키고, 이 때 각 거더에서 부담하는 하중 비(G1 : G2)가 1:7이 되도록 바닥판 지간 중앙에서 0.45m 떨어진 곳에 위치하도록 하였다. 이와 같은 하중 재하 위치는 실물 교량에서 적용되는 설계하중인 DB 하중이 2차선으로 편재하된 경우에 각 거더가 부담하는 하중의 비로부터 결정된 것이다.

가력 헤드와 바닥판에 접하는 부분에서는 하중의 분포를 위해 200mm×300mm의 탄성반침(두께: 30mm)을 설치하였다.

그림 7은 만능시험기를 사용하여 시험체를 가력하는 장면으로 정상상태 재하실험은 전전한 시험체 상태를 유지하기 위해 두 시험체를 대상으로 탄성 범위 내의 하중인 200kN까지 재하하였다.

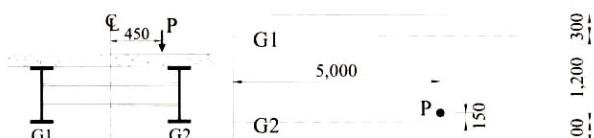


그림 6. 하중 재하 위치 (단위: mm)

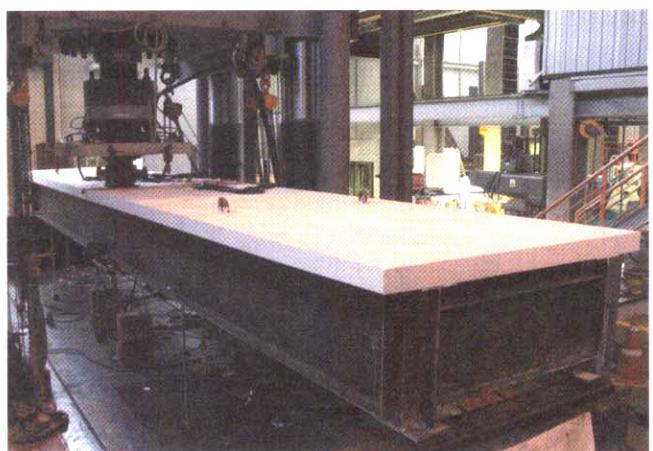


그림 7. 시험체 전경

3.2 정상상태 재하실험 결과

3.2.1 하중-변위 선도 (정상상태)

정상상태 시험체에 대한 200kN까지의 재하실험으로부터 얻어진 각 거더의 지간 중앙부의 하중-변위 선도는 그림 8과 같고, 탄성 범위 내의 하중이 가해졌으므로 하중-변위 관계는 선형적으로 나타남을 알 수 있다. 본 그림으로부터 하부 수평 브레이싱이 설치된 경우 편재하 측의 G2 거더는 브레이싱 미 설치 경우에 비해 처짐량이 20% 감소된 반면, G1 거더는 80% 가량 증가함을 알 수 있다.

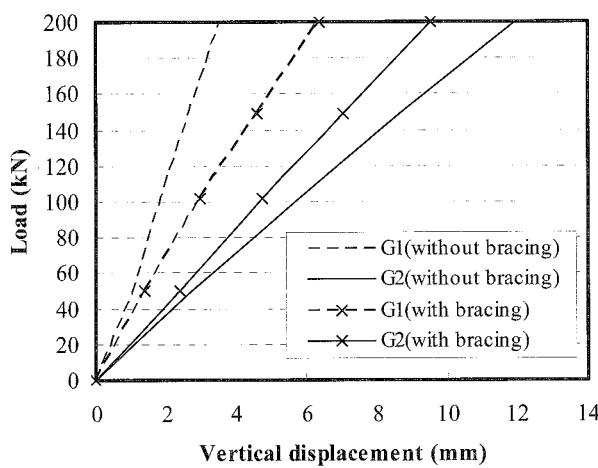


그림 8. 하중-변위 선도 (정상상태 시험체)

한편, 각 경우별 G1 : G2 거더의 처짐비를 정량적으로 비교하면, 수평브레이싱이 없는 경우는 1:3.3, 있는 경우는 1:1.5 정도이다. 이는 당초 G1 : G2 거더 하중비가 1:7임을 감안하면 하부 수평브레이싱이 없는 경우에도 바닥판 및 가로보 등으로 인해 G1 거더 측으로 하중의 재분배가 이루어졌음을 의미하고, 하부 수평브레이싱이 설치된 경우에는 하중 재분배 효과가 크게 증가하였음을 의미한다.

3.2.2 거더 변형률 분포 (정상상태)

200kN 재하 상태에서 각 거더의 하부플랜지에서 측정된 변형률의 크기는 그림 9에 보인 바와 같다. 하부 수평브레이싱이 없는 시험체의 G2 거더 변형률은 브레이싱의 설치로 인해 줄어든 반면, G1 거더의 변형률은 반대로 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 정상상태의 거더에서 측정된 변형률 분포로부터도 하부 수평브레이싱이 횡방향으로 하중 분배 효과를 증대시켰음을 알 수 있다.

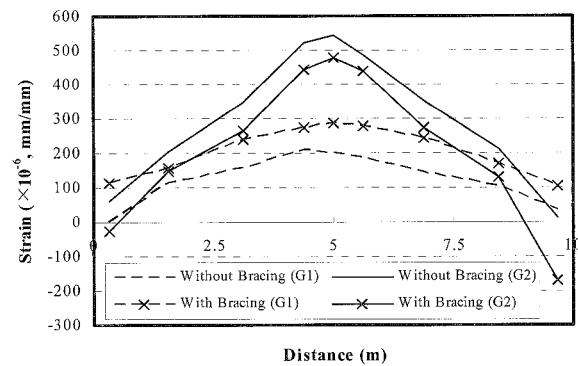


그림 9. 거더 변형률 분포 (정상상태 시험체)

3.2.3 가로보 변형률 (정상상태)

표 2. 정상상태 : 가로보 상 · 하부플랜지 변형률 (단위: $\times 10^{-6}$ mm/mm)

브레이싱 여부	3.75m 위치			5.0m 위치			6.25m 위치					
	G1 측		G2 측		G1 측		G2 측		G1 측		G2 측	
	상	하	상	하	상	하	상	하	상	하	상	하
미설치 (150kN)	30	-7	5	22	105	-17	96	48	28	-4	7	16
설치 (150kN)	86	-72	-49	40	173	-10 5	31	89	92	-93	-41	45

표 2에는 정상상태에서 150kN 작용 시(뒤의 거더 손상 시와 비교를 위함)에 3.75m, 5.0m, 6.25m 위치의 가로보 단부의 상 · 하부플랜지에서 발생한 변형률의 크기를 나타내었다.

정상상태의 두 시험체 간의 상대적인 비교로부터 하부 수평 브레이싱의 효과를 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 표 2로부터 하중의 영향을 상대적으로 많이 받는 5m 위치의 가로보에서 가장 큰 변형률이 발생하였고, 하부 수평브레이싱이 설치된 경우에는 G2측 상부플랜지 위치를 제외한 모든 위치의 변형률이 크게 나왔다. 그리고, 하부 수평브레이싱이 설치된 경우에는 5m 위치 가로보뿐만 아니라 인접 위치의 가로보에도 상대적으로 더 많은 하중 분담이 이루어졌음을 알 수 있다. 즉, 하부 수평브레이싱이 설치될 때 가로보의 횡방향 및 종방향으로의 하중 재분배 기능이 향상되었음을 의미한다.

3.2.4 수평브레이싱 부재의 변형률 분포 (정상상태)

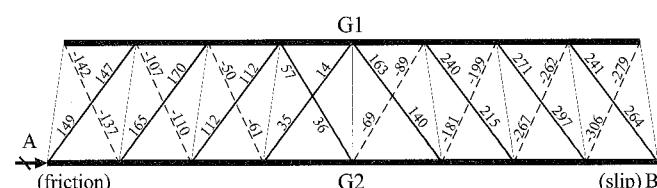


그림 10. 각 브레이싱 부재에 발생한 변형률 분포 (정상상태 시험체)

200kN 재하 시 각 브레이싱 부재에 발생한 변형률의 크기를 그림 10에 나타내었다. G2 거더 측에서 편재하로 인해 경간 중앙을 기준으로 G2 거더 하부는 양방향으로 신장하려고 하므로 실선으로 표시한 브레이싱 부재에는 인장력이, 점선에 해당하는 브레이싱 부재에는 압축력이 발생된다. 그러나, 이상적인 변형률 분포는 지간 중앙부를 기준으로 대칭적인 형태로 나타나야 하지만, 변형률의 크기가 차이를 보이는 것은 여러 가지 요인으로 추정되며, 그 중 교축방향 경계조건의 마찰에 의한 구속력도 한 요인으로 추정된다. 즉, 실험 중에 그림에 표시된 A위치의 지지부에는 마찰에 의한 구속력이 발생하였고, B위치에서는 미끌림이 발생하였다. 이러한 현상은 A위치에서 교축방향으로 압축 하중이 작용한 것과 유사한 상황이 되어 그림과 같은 비대칭적인 결과가 나타난 것으로 추정된다.

3.2.5 바닥판 변형률 분포 (정상상태)

그림 11에는 150kN 하중(뒤의 거더 손상 시와 비교하기 위함) 하에서 발생한 바닥판 콘크리트 주변형률의 크기를 하부 수평브레이싱 유·무에 따라 비교하였다.

그림 11에 의하면 수평브레이싱을 설치한 경우가 설치하지 않은 경우에 비해 G2 거더측의 주변형률(압축)은 상대적으로 작게, G1 거더측에서는 상대적으로 크게 나타났다. 이는 앞의 '3.2.2 거더 변형률 분포'와 연계하여 분석하면 수평브레이싱 설치 시 G2 거더의 모멘트는 상대적으로 작게, G1 거더의 모멘트는 상대적으로 크게 발생하였음을 의미하므로 수평브레이싱 부재가 G2측에 편재하된 하중을 G1측으로 재분배하는데 역할을 하였음을 의미한다.

한편, 그림 11로부터 주변형률의 방향은 두 경우 모두 비슷하며, G2 거더 선상(CL, CC, CR 점)과 경간의 중앙 선상(AC, BC, CC 점)에서는 거의 교축방향으로, 그 이외의 위치에서는 하중 재하점에서 G1 거더의 중앙점 방향으로 궤적을 보인다. 이는 G2 거더 위의 바닥판은 교축방향 흄모멘트로 주로 저항하며 내측의 바닥판은 G1 거더 중앙점 방향으로 하중을 전달함을 의미한다.

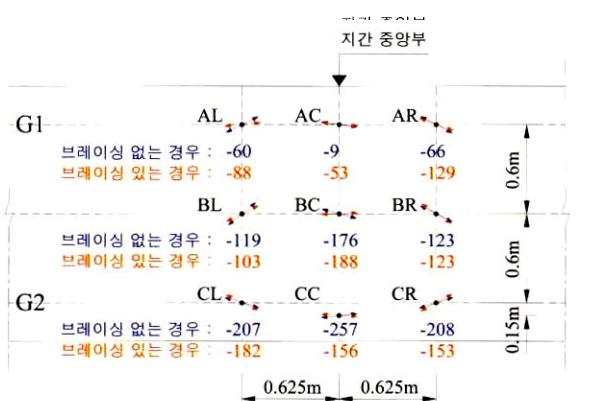


그림 11. 정상상태 바닥판 주변형률 (150kN 재하, 단위: $\times 10^{-6}$ mm/mm)

4. 손상상태 재하실험

4.1 손상상태 실험 개요

본 장에서는 한 개 거더 손상 시 하부 수평브레이싱의 유·무에 따른 각 시험체의 종국 내하력의 차이를 비교하고자 한다. 하중 재하 위치는 정상상태 재하실험과 동일하다.

거더의 손상 위치는 그림 12에 보인 바와 같이 거더와 가로보가 접하는 부분이 피로에 취약할 것으로 가정하여 G2 거더의 지간 중앙부에서 50mm 떨어진 곳으로 하였고, 가스 절단 작업을 통해 인위적인 균열을 가하였다. 손상의 정도는 심각한 균열 상태를 모사하고자 하부플랜지로부터 복부판 상단까지 폭 3mm 내외로 절단하였다. 이 때 절단 직후 자중에 의한 처짐을 방지하기 위해 임시 서포트를 설치하였으며, 이 시점을 기준으로 데이터 로거(data logger)의 영점을 맞추고 서포트 제거 후 재하를 실시하였다.

수평브레이싱이 없는 시험체에 대한 재하실험 중 하중이 160kN 정도에서 콘크리트 바닥판에 편침 파괴가 발생하였다. 이후 재하에 따라 균열 거더(G2)의 과다한 처짐으로 인해 시험체 단면의 회전이 크게 발생하였고, 이로 인해 G2 거더부의 콘크리트가 많이 파괴되어 190kN 하중에서 실험을 종료하였다. 한편, 수평브레이싱이 있는 시험체에서는 430kN 정도에서 콘크리트 바닥판의 편침 파괴가 발생하였다. 이후 재하에서 하중이 480kN에 도달하였을 때 6.25m~8.75m 구간의 브레이싱 부재의 좌굴로 인한 변형이 육안으로 확인 가능하였다. 그러나, 브레이싱재의 좌굴로 인해 내하력이 급격히 감소하는 현상은 없었으며, 이후 520kN의 하중까지 내하 성능을 발휘하였다.

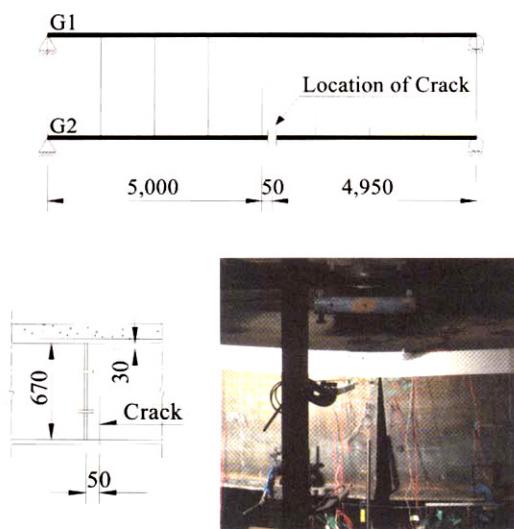


그림 12. 균열의 위치와 상세 (사진은 재하 중 장면, 단위: mm)

4.2 손상상태 재하실험 결과

4.2.1 하중-변위 선도 (손상상태)

손상상태 실험으로부터 얻어진 각 거더의 지간 중앙부에서 발생한 하중-변위 선도는 그림 13에 보인 바와 같고, 수평브레이싱을 설치한 경우가 약 2.7배 큰 내하력을 보였다. 그럼에서 내하력 곡선이 일시적으로 감소되는 현상은 콘크리트의 편성 과정으로 인한 것으로 두 시험체 모두 최대 내하력의 80% 수준에서 발생된 것으로 나타났다.

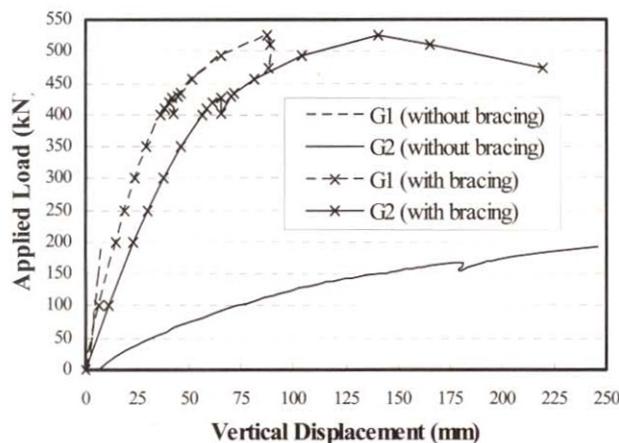


그림 13. 하중-변위 선도 (손상상태 시험체)

그림 13에서 하부 수평브레이싱이 없는 시험체의 경우 균열 거더(G2)와 비균열 거더(G1)의 처짐량은 상당한 차이를 보이고 있다. 하중의 영향을 많이 받는 균열 거더(G2)는 선형과 비선형 구간의 뚜렷한 구분없이 245mm 정도의 큰 처짐량이 발생한 반면, 하중을 전달받는 비균열 거더(G1)는 선형 거동을 하고 처짐량은 8mm에 불과하였다. 이에 비해 하부 수평브레이싱이 설치된 시험체는 양쪽 거더 모두 초기에는 선형성을 유지하였고, 400kN 이후의 하중에 대해서는 비선형적인 거동을 보였다. 그리고 거더 간의 처짐량 차이도 하부 수평브레이싱이 없는 경우에 비해 대폭 감소된 것을 알 수 있다. 이는 정상상태 재하 실험 결과와 같이 하부 수평브레이싱이 설치됨으로 인해 가로보와 바닥판 등 구성 부재들의 구조적 기능이 향상되어 비균열 거더(G1)로 하중이 많이 분배되었기 때문으로 설명할 수 있다.

한편, 각 시험체의 지간 중앙부에 설치한 수직 및 수평방향 변위계에서 측정된 값으로부터 도출한 단면의 거동은 그림 14와 같다. 그림 14의 변위는 각 시험체의 극한 하중에서 측정된 값이며, 각 시험체의 거동을 분석하면 다음과 같다.

먼저, 하부 수평브레이싱이 없는 시험체는 강체 회전운동과 유사한 거동을 보인다. 이는 G2 거더 측으로 편재하된 하중

이 가로보를 통해 G1 거더 측으로 전달되어야 하는데, 비균열 거더(G1)의 비틀림 강성이 작기 때문에 이와 같은 거동을 보인 것이라 할 수 있다.

반면, 하부 수평브레이싱이 설치되면 그림 15에 보인 바와 같이 각 패널마다 공간 트러스 구조계가 형성되어 구성 부재들의 구조적 기능이 향상된다. 즉, 균열 거더(G2)가 교축방향으로 벌어지고자 하는 변위는 하부 수평브레이싱이 지지하여 변위가 줄어들게 되며, 또한, 가로보와 바닥판 그리고 수평브레이싱 부재가 유사 폐합단면(pseudo-closed section)을 이루어 전체 단면의 비틀림 강성이 증가되어 그림 14(b)와 같은 거동을 보임에 따라 수직 및 수평 변위가 상대적으로 크게 감소하게 된다.

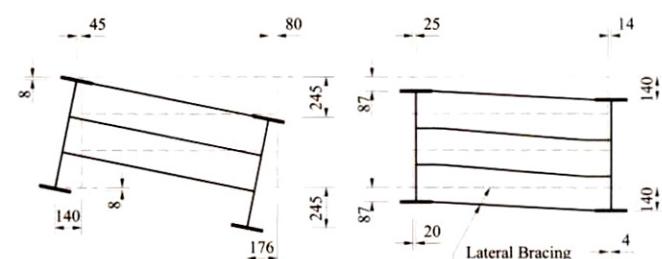


그림 14. 하부 수평브레이싱 유·무에 따른 단면 변화 형상
(손상상태 시험체, 단위: mm)

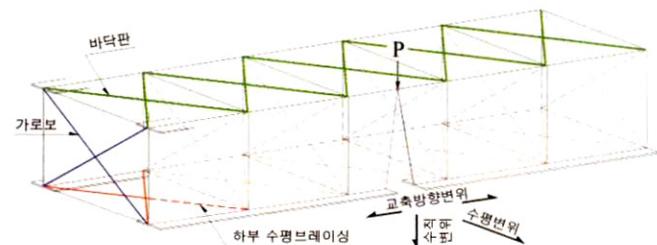


그림 15. 손상 모델에 대한 공간 트러스 구조계의 개념도

4.2.2 거더 변형률 분포 (손상상태)

그림 16은 하중 증가에 따른 각 시험체의 비균열 거더(G1) 하부플랜지에서 발생한 변형률 분포이다. 그림 16(a)에 보인 바와 같이 하부 수평브레이싱이 없는 시험체는 경간 중앙부 부근에서 집중적으로 큰 변형률이 발생하였고, 하중이 극한 수준에 도달하였을 때 4~6m 구간에서 항복이 발생한 것으로 나타났다.

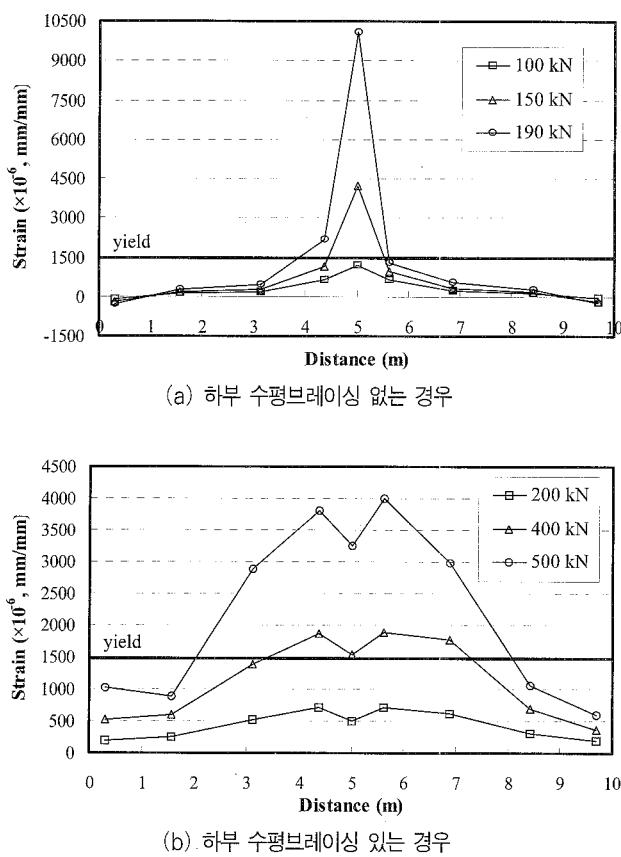


그림 16. 하부 수평브레이싱 유·무에 따른 비균열 거더의 변형률 분포 (손상상태 시험체)

반면, 하부 수평브레이싱이 설치된 시험체는 그림 16(b)와 같이 변형률의 분포가 거더 전반에 걸쳐 폭넓게 발생하였고, 경간 중앙부 복부판에 설치된 계이지로부터 항복이 복부판 상단까지 진행된 것으로 분석되었다. 이는 수평브레이싱이 횡방향 뿐만 아니라 종방향으로도 하중을 재분배하는데 중요한 기능을 하였다고 할 수 있다.

한편, 균열 거더(G2)에서는 휨성능의 상실로 인해 종국 상태에 이르기까지 비교적 적은 크기의 변형율이 측정되었다.

4.2.3 가로보 변형률 (손상상태)

거더 손상 시 가로보의 하중 분담 능력을 비교하고자 하중의 영향을 가장 많이 받는 5m 위치의 가로보와 인접 가로보에서 측정된 변형률을 표 3에 제시하였다. 정상상태와의 비교를 위해 150kN에서의 측정값과 브레이싱 설치 시에는 400kN에서 측정된 결과를 추가로 제시하였다.

거더 손상 시 가로보의 변형률은 앞의 표 2에서 제시한 정상상태의 가로보 변형률에 비해 수평브레이싱 유·무에 관계 없이 두 경우 모두 크게 증가하였다. 이는 거더 손상 시 가로보가 켄터레버 보로서 비균열 거더(G1) 측으로 하중을 전달하는데 기여하였음을 의미한다.

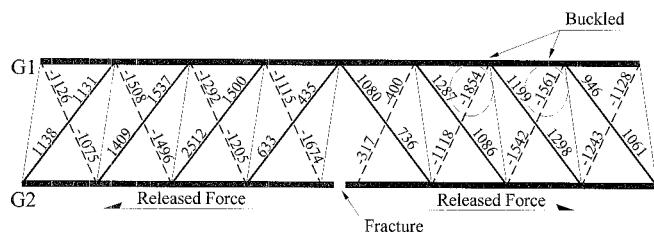
한편, 수평브레이싱이 없는 경우에 150kN의 하중은 종국 하중 190kN의 약 80%에 해당하는 하중임을 감안할 때 가로보의 최대 변형률 486 microstrain은 비교적 작은 변형률로서(탄성범위 이내) 가로보가 하중 전달에 큰 역할을 하지 못하였고, 이는 G1 거더의 비틀림 강성 부족 때문으로 설명 할 수 있다. 이에 비해, 수평브레이싱이 설치된 경우 400kN의 하중은 역시 종국하중 520kN의 약 80%에 해당하고, 이 때 가로보의 최대 변형률은 3,671 microstrain으로 항복변형률을 훨씬 초과한 값이다. 이는 브레이싱 설치 시 그림 14(b)와 같은 변형을 보임에 따라 가로보에 큰 휨모멘트가 발생하게 되고, 따라서 브레이싱이 설치되지 않은 경우에 비해 가로보가 하중 재분배에 크게 기여하였음을 의미한다.

표 3. 손상 상태 : 가로보 상·하부플랜지 변형률 (단위: $\times 10^{-6}$ mm/mm)

브레이싱 여부	3.75m 위치				5.0m 위치				6.25m 위치			
	G1 측		G2 측		G1 측		G2 측		G1 측		G2 측	
	상	하	상	하	상	하	상	하	상	하	상	하
미설치 (150kN)	-135	111	186	-189	463	-486	-211	184	-23	155	138	-25
설치 (150kN)	102	-75	-89	78	287	-233	-304	749	252	-236	-125	112
설치 (400kN)	275	-293	-434	464	1893	640	-702	3671	1985	-397	-279	738

4.2.4 수평브레이싱 부재의 변형률 분포 (손상상태)

수평브레이싱 부재의 좌굴 직전 하중 단계(480kN)에서 측정된 브레이싱재의 변형률은 그림 17에 보인 바와 같다. 본 그림으로부터 브레이싱 부재에는 전체 지간에 걸쳐 전반적으로 큰 변형률이 발생한 것을 알 수 있다. 이는 앞의 그림 15에서 설명한 바와 같이 수평브레이싱의 설치 시 공간 트리스 구조계가 형성되어 비균열 거더(G1) 측으로의 하중 재분배가 종방향으로도 이루어 졌음을 의미한다.

그림 17. 각 브레이싱 부재에 발생한 변형률 (단위: $\times 10^{-6}$ mm/mm)

4.2.5 바닥판 변형률 분포 (손상상태)

바닥판의 변형률은 하중 150kN 작용 시, 그리고 브레이싱이 설치된 경우는 콘크리트 펀칭 파괴 전의 하중 400kN에 대한 주변형률의 크기와 방향을 그림 18에 나타내었다. 그림

18에서 '손실'이라고 표기한 것은 일부 데이터가 손실되어 주변형률의 도출이 불가한 경우이다.

그림 18(a)에서 150kN 작용 시 앞의 그림 11의 정상상태와 비교하면 바닥판에서 가장 큰 변형률이 발생된 CC 점에서 하부 수평브레이싱이 없는 경우는 주변형률이 약 17배 증가하였고, 브레이싱이 설치된 경우는 약 3.4배 증가하였다.

한편, 콘크리트 편침 파괴 이전의 하중 수준에서 비교하면 수평브레이싱이 없는 시험체는 150kN 하중에서 CC 점의 변형율이 4,346 microstrain으로 측정된 반면, 하부브레이싱이 있는 시험체는 400kN 하중에서 1,766 microstrain 수준이다.

이러한 차이는 실험 중 관측된 G2 거더의 종방향 변형 형태로 설명할 수 있는데, 수평브레이싱이 없는 시험체에서는 균열 위치를 내부한지로 한 강체 회전 변형 형태를 보여 CC 점에서 교축방향으로 큰 변형률이 발생하였고, 수평브레이싱이 설치된 시험체는 완만한 곡선 형태의 변형을 보여 변형률이 상대적으로 작게 도출되었다.

한편, 그림 18에서 표기된 AC 및 CC 위치에서의 콘크리트와 교축방향 하부철근, 그리고 거더 상부플랜지에서 발생된 변형률을 그림 19와 그림 20에 하중-변형률 관계로 나타내었다. 이들 그림으로부터 변형률의 부호를 분석하면, 비균열 거더(G1)에서는 합성 단면의 도심이 거더 복부판 내에 존재하고, 따라서 콘크리트는 전단면이 압축 상태에 있다. 반면, 균열 거더(G2)에서는 하부 수평브레이싱을 설치한 경우에도 하부 철근 및 거더의 상부플랜지가 인장 상태에 있음을 알 수 있다. 즉, 거더에 심각한 균열이 발생되면 수평브레이싱을 설치하더라도 합성거더로서의 거동은 기대할 수 없음을 뜻한다.

그러나, 이상의 결과들로부터 수평브레이싱의 설치 시 동등한 하중 수준에 대해서 콘크리트, 철근, 그리고 거더에 발생하는 변형률은 현저히 줄어들고, 바닥판이 극한 강도에 이르기까지 하중을 재분배하는데 기여함을 알 수 있다.

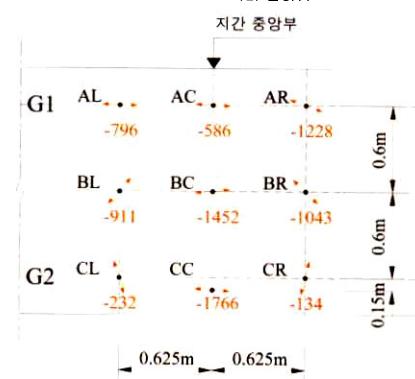
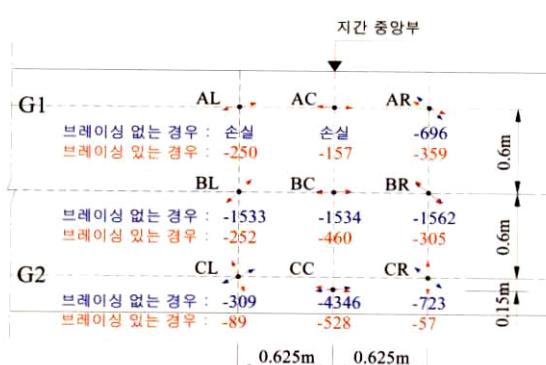
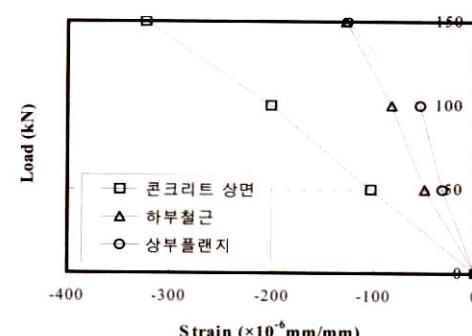
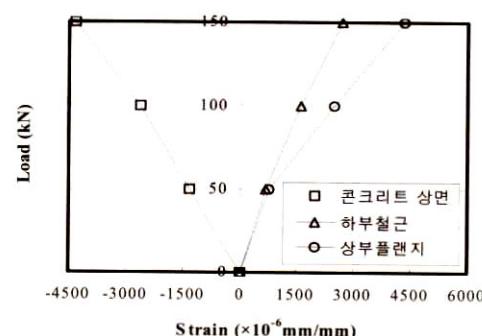


그림 18. 하부 수평브레이싱 유·무에 따른 바닥판 주변형률 분포 (단위: $\times 10^{-6}$ mm/mm)

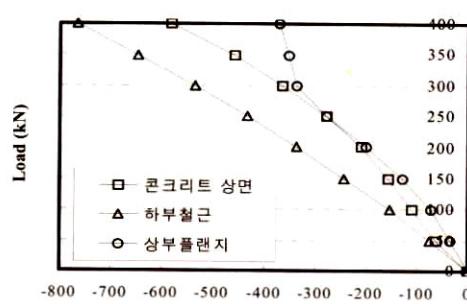


(a) 비균열 거더(G1) 지간 중앙부



(b) 균열 거더(G2) 지간 중앙부

그림 19. 하부 수평브레이싱이 없는 경우 지간 중앙 단면의 각 위치에서 측정된 하중-변형률 관계



(a) 비균열 거더(G1) 지간 중앙부

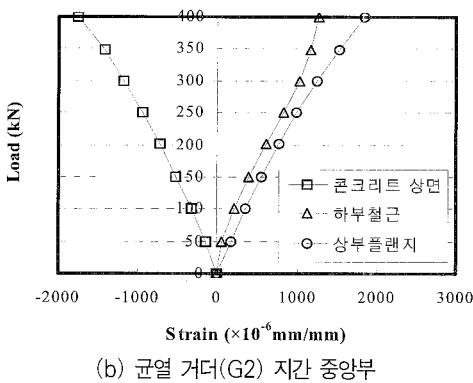


그림 20. 하부 수평브레이싱이 설치된 경우 지간 중앙 단면의 각 위치에서 측정된 하중-변형률 관계

5. 결 론

본 연구에서는 단순교 형식의 2-거더교를 모사한 축소 시험체를 이용하여 하부 수평브레이싱의 유·무에 따른 정상상태의 거동 및 거더 손상상태의 여유도를 비교 평가하였다. 본 실험 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 정상상태 시험체를 대상으로 한 편재하 재하실험 결과, 하부 수평브레이싱의 설치는 편재하 측 거더의 하중 재분배 효과를 약 20% 정도 원활하게 하는 것으로 나타났다.
- (2) 손상상태 시험체를 대상으로 한 내하력 실험 결과, 하부 수평브레이싱이 없는 시험체에 비해 설치된 경우가 2.7배 정도 높은 내하 성능을 보였다. 이는 하부 수평브레이싱의 설치로 각 패널 당 공간트러스 구조계가 형성되어 종방향으로의 하중 재분배가 이루어졌고, 또한 하부 수평브레이싱 부재가 상자형교의 하부 플랜지와 같은 역할을 하여(유사 폐합단면이 되어) 시험체의 비틀기 강성이 증대됨으로 인해 바닥판 및 가로보와 더불어 횡방향 하중 분배 기능이 향상되었기 때문이다.

이상으로부터 하부 수평브레이싱은 단경간 2-거더교의 손상 시 하중재분배에 중요한 기능을 수행하고, 이는 연속교에 비해 상대적으로 여유도가 부족한 단경간 2-거더교의 여유도 확보 방안으로 고려해 볼 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술핵심사업 “차세대 시설물용

신재료 활용기술 개발” 과제(과제번호: 05건설핵심D09)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 길홍배, 강상규 (2005) 실험을 통한 2주거더교의 여유도 평가, 대한토목학회논문집, 제25권, 제2A호, pp.337~345.
- 박용명, 조움돌이 (2006) 강합성 플레이트 2-거더교의 여유도 평가, 대한토목학회논문집, 제26권, 제4A호, pp.611~620.
- 한국도로교통협회 (2005) 도로교설계기준.
- American Association of State Highway & Transportation Officials (2002) *Standard Specifications for Highway Bridges*.
- American Association of State Highway & Transportation Officials (2004) *LRFD Bridge Design Specifications*.
- Daniels, J. H., Kim, W. and Wilson, J. L. (1989) *Recommended Guidelines for Redundancy Design and Rating of Two-Girder Steel Bridges*, NCHRP Report 319, TRB.
- Heins, C. P. and Hou, C. K. (1980) Bridge Redundancy: Effects of Bracing, *J. of the Structural Division, Proceedings of ASCE*, Vol. 106, No. ST6, pp. 1364-1367.
- Heins, C. P. and Kato, H. (1982) Load Redistribution of Cracked Girders, *Journal of the Structural Division, Proceedings of ASCE*, Vol. 108, No. ST8, pp.1909-1915.
- Idriss, R. L., White, K. R., Woodward, C. B., and Jauregui, D. V. (1995) After-fracture Redundancy of Two-Girder Bridge: Testing I-40 Bridges over Rio Grande, *Proceedings of the Fourth International Bridge Engineering Conference*, pp.316-326, TRB.
- Tachibana, Y., Tsujikado, M., Echigo, S., Takahashi, S., and Miki, C. (2000) A Study of After-Fracture Redundancy for Two-Girder Bridges, *J. of Construction Management and Engineering, JSCE*, pp.241-251. (in Japanese)
- Task Committee on Redundancy of Flexural Systems of the ASCE-AASHTO Committee on Flexural Members of the Committee on Metals of the structural Divisions (1985) State-of-the-Art Report on Redundant Bridge Systems, *J. of the Structural Engineering, ASCE*, Vol. 111, No. 12, pp.2517-2531.

(접수일자 : 2006. 8. 8 / 심사일 2006. 9. 6 /

심사완료일 2007. 4. 11)