6경간 SCP 거더교의 연속화에 따른 중간 지점부 구조거동에 관한 연구

A Study on the Structural Behaviors of
Interior Support of 6 Span SCP Continuous Girder Bridge

임 성 순* 손 석 호** 서 기 홍***
Yhim, Sung-Soon Son, Suk-Ho Seo, Ki-Hong

Abstract

In this paper, 6 span SCP continuous girder bridge's structural behavior were studied by analytic and experimental method To study structural behavior of SCP girder, we used PSC theory and steel girder theory. To examine slab concrete crack, concrete stress, and fatigue stress of steel, we achieved a static load and fatigue test In the result, 6 span SCP girder bridge connected at the interior support about actuality bridge have enough structural capacity under service loads

요 지

본 연구에서는 6경간 SCP(Steel Confined Prestressed Concrete) 거더교의 연속화에 따른 연속지점부의 구조거동에 대해 해석적인 방법과 실험적인 방법으로 콘크리트 바닥판의 균열 및 피로에 대한 사용성과 안전성을 분석하였다 SCP 거더의 구조거동을 분석하기 위해 기존의 PSC 이론과 강 거더 이론을 혼용하여 합성효과를 분석하였고, 정적재하실험과 피로실험에 의해 바닥판 콘크리트의 균열 발생 여부와 콘크리트의 응력 및 강재의 피로응력을 검토하였다. 검토 결과 실제 교량에 대해 내부지점을 연속화한 6경간 SCP 거더교는 공용하중에 대하여 콘크리트의 균열 및 피로에 대해서는 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.

Keywords : SCP Girder, Interior support of SCP continuous girder, Static load test, Fatigue test, Prestressed Concrete

핵심 용어 : SCP 거더, 연속지점부, 정적재하실험, 피로실험, 프리스트레스트 콘크리트

* 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수
** 학생회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정
*** 학생회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

E-mail yhimss@uos ac kr 02-2210-2953

• 본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2005년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다

1. 서 론

산업발전과 함께 물류이동을 위한 각종 기간산업과 교통시설물이 확충되고 이에 따른 교량구조물의 신설이나 확충이 요구되고 있으며 아울러 교량설계기술도 발전을 거듭하고 있다 교량설계기술은 구조재의 개발과 새로운 형식의 교량이나 기존구조물의 사용성을 증가시키는 추세로 발전하고 있다 예를 들어, 교량 위를 주행하는 차량들의 사용성과 안정성을 확보하기 위한 신축이음부의 감소 또는 연속교 형식이나 형고가 낮은 장대 경간장을 이루는 교량구조물을 선호하고 있다

콘크리트와 강판, PS강재의 구조적 장점을 극대화하고, 중장경간 합성거더교에서의 취약점으로 거론되는 처짐 및 진동, 큰 고정하중, 강재 단면의 저효율성 등과 같은 문제점을 개선하여 경간을 장대화하려는 목적으로 개발된 새로운 개념의 합성거더가 소개되었다 이는 "강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더(Steel Confined Prestressed Concrete Girder, SCP Girder)"라 하여, PSC 거더를 강재가 둘러싸는 형태의 합성거더이다 그러나 새로운 재료의 사용이나 새로운 형식의 교량구조물은 구체적인 설계방법이나 기준이 제시되어 있지 않고 공용중인 교량구조물이 없으므로 실측 또는 계측자료도 전무한 상태이다 이러한 이유에서 SCP 거더에 대한 설계의 타당성과 구조적 안전성을 검토하였고(김정호 등, 2002), 피로안전성에 대해서도 검증하였다(김정호 동, 2003)

본 연구에서는 6경간 SCP 연속거더교의 연속지점부에 대하여 실물모형의 정적재하실험과 축소모형의 피로실험을 통해 바닥판 콘크리트의 역학적 거동 및 피로 거동에 대한 사용성과 안전성을 분석하였다

2 SCP 거더의 기본이론

21 SCP 거더의 기본설계개념

SCP 거더는 프리스트레스트 콘크리트를 강판으로 둘러싼 I-형 단면으로서 내부 프리스트레스트 콘크리트와 강판이 완전 일체화한 새로운 개념의 거더이다 내부가 프리스트레스트 콘크리트 거더 형식을 유지하

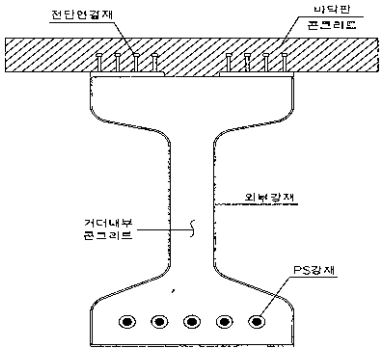


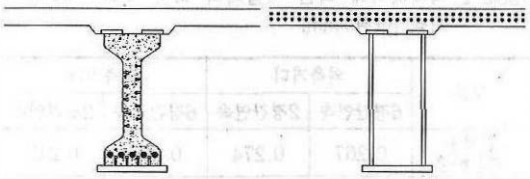
Fig. 1 SCP 거더의 단면형상

므로 제작 및 시공과정은 강교 또는 PSC 거더의 시공방법과 유사하다 SCP 거더의 일반적인 단면형상은 Fig 1과 같으며 거더 외부구조가 강재로 제작되므로 철근가공, 조립, 검측 및 거푸집 시공이 필요없어 콘크리트 타설과 현장에서 품질 관리가 용이하다 또한, 강재외부를 도장하여 미관 향상을 꾀할 수 있으며 동일한 형고의 기존 강교, PSC 거더 및 프리플렉스 거더보다 거더의 강성이 상대적으로 크므로 형고를 낮출 수 있다

22 SCP 거더교의 연속지점부 설계적용

SCP 거더에 대한 기준이 아직까지 완벽하게 제시되어 있지 않기 때문에 기존 강교 및 콘크리트교의 합성거더와 프리스트레스트 콘크리트와 관련된 설계기준을 이용하였고, 구조적 안정성을 고려하여 가장 불리한 조건으로 연속지점부의 설계이론을 적용하였다

SCP 거더는 현장에서 강재 가로보 및 연속 지점부 외부 강재 거더를 연결한 후 콘크리트를 충전함으로서 중간에 2개의 받침부를 갖는 연속거더교가 된다 주거더의 단면응력을 산정할 경우는 정모멘트가 발생하는 지간 중앙부에서는 바닥판 콘크리트를 주거더 단면의 일부로 간주하고 계산하였으며, 부모멘트가 발생하는 연속지점부에서는 구조적 안정성을 위해 충전된 콘크리트를 무시하고 그 속에 배근된 교축방향 철근과 강재거더로 구성된 강단면을 저항단면으로 계산하였다 Fig 2는 SCP 거더의 연속지점부 설계시 고려한 단면형상이다



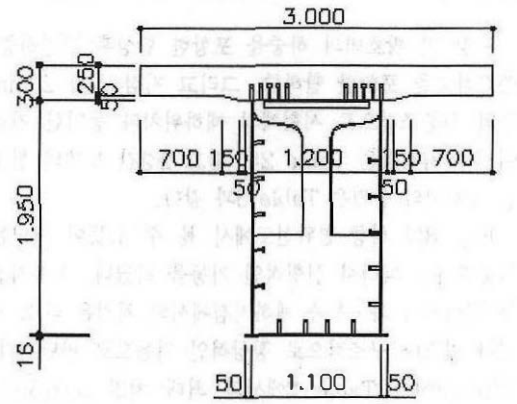
(a) 정(+) 휨모멘트 (b) 부(-) 휨모멘트

Fig. 2 SCP 거더 연속지점부 설계시 고려 단면

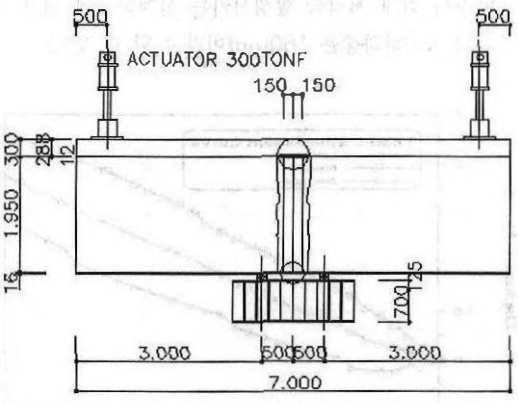
3. 정적재하실험

3.1 시험체 제작 및 하중 재하

시험체는 실제 교량의 연속지점부와 동일하게 길이



(a) 단면도



(b) 하중재하위치

Fig. 3 시험체의 단면도와 하중 재하 위치

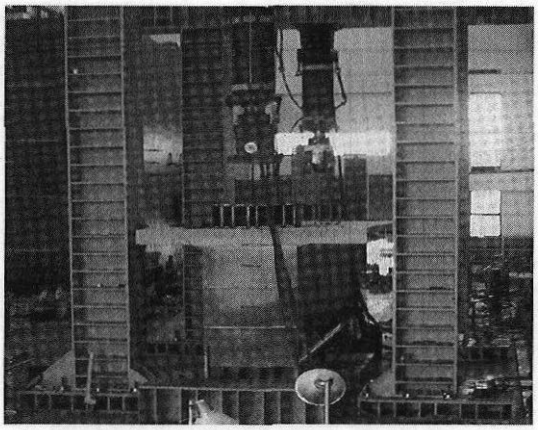


Fig. 4 시험체 전경 및 하중재하 위치

7m로 제작하였다. 사용된 강재는 SM490이며, 거더 콘크리트의 강도는 450 kgf/cm²이고 바닥판 콘크리트의 강도는 270 kgf/cm²이다. 시험체의 단면도와 하중재하 위치는 Fig. 3과 같으며, 정적재하실험 전경은 Fig. 4와 같다.

3.2 계측 방법

연속지점부 정적재하실험에 의한 구조거동을 파악하기 위하여 변형율 게이지를 바닥판 상·하부 철근, 바닥판 콘크리트 상·하부 및 외부강재에 부착하였고 정적하중 재하위치와 지점부 하부에 변위계를 설치하였다. 정적계측에 사용한 데이터 획득 시스템을 간략하게 나타내면 Fig. 5와 같고 사용한 계측장비와 계측센서의 사양은 Table 1과 같다.

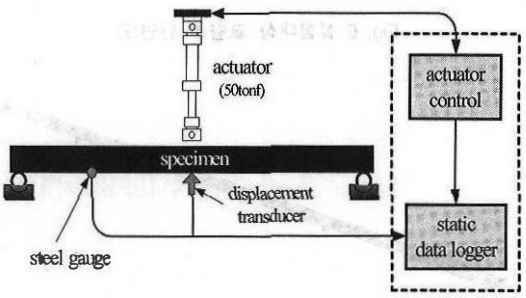


Fig. 5 데이터 획득 시스템 개념도

Table 1 정적재하 실험시 계측장비 및 센서의 사양

구분	가력기	정적 데이터 로거	정적 변위계	콘크리트 변형률 게이지	강재 변형률 게이지
모델 및 규격	300 tonf	TDS-303	DTJ-A-200	WFLA-6-11-5LT	PL-60-11-5L
제작 회사	MTS (미국)	TOKYO (일본)	KYOWA (일본)	TOKYO (일본)	TOKYO (일본)
Measuring Range	-	30 ch	300 mm	30,000 $\times 10^{-6}$	20,000 $\times 10^{-6}$

3.3 실험 결과

3 3 1 하중-변위

실험결과와 비교하기 위하여 실제 적용되어있는 교량에 대해 격자해석을 수행하였다 실험대상 교량은 6경간 연속교이고 지점부는 2개의 받침이 있는 형식이나 구조적 안정성을 고려하여 단면력이 가장 큰 2경간 연속교량에 대해서도 검토하였다 실험대상 연속교의 단면도와 격자모델은 Fig 6~7과 같다

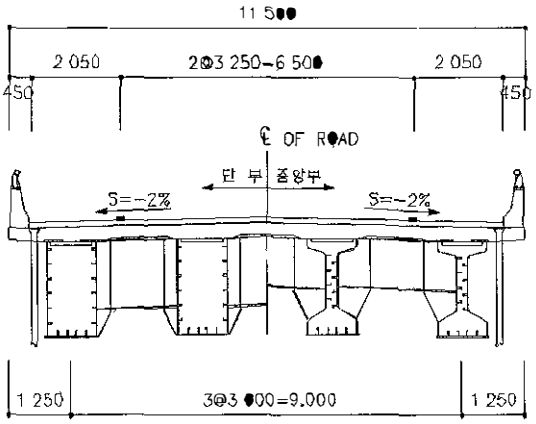


Fig 6 실험대상 교량의 단면도

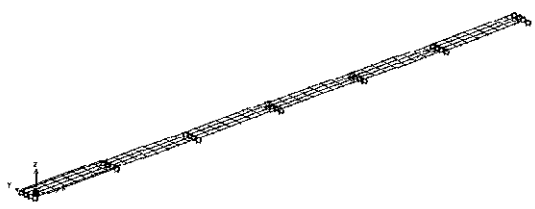


Fig 7 실험대상 교량의 격자 모델

Table 2 격자해석에 의한 시험체의 하중 재하위치에서의 처짐 [단위 mm]

구분	외측거더		내측거더	
	6경간연속	2경간연속	6경간연속	2경간연속
합성후 고정하중	0 267	0 274	0 205	0 212
활하중	0 453	0 462	0 440	0 449
지점침하	0 195	0 102	0 195	0 102
합계	0 915	0 838	0 840	0 763

Table 3 활하중재하에 따른 응력 [단위 kgf/cm^2]

하중 종류	위 치			
	상부슬래브 상면 철근	상부슬래브 하면 철근	상부 플랜지	하부 플랜지
합성후	-585 177	-497 162	-451 395	709 223

포장 및 방호벽의 하중을 포함한 합성후 고정하중, 충격하중을 포함한 활하중, 그리고 지점 침하 20mm 등의 하중조건으로 시험체의 재하위치와 동일한 지점에서의 처짐량은 Table 2와 같고 2경간 모델의 활하중 재하시의 응력은 Table 3과 같다

Fig 8의 하중-변위선도에서 볼 수 있듯이 거더는 하중변화에 따라서 선형적인 거동을 하였다 연속지점부 시험체의 좌·우측 재하지점에서의 처짐은 다소 차이가 있으나 구조적으로 정상적인 거동으로 판단된다 160tonf에서 Table 2에서의 최대 처짐 0.915mm 보다 크게 발생하였다

따라서 최대 처짐을 발생시키는 설계하중에 대한 등가의 정적재하하중은 160tonf이라고 할 수 있다.

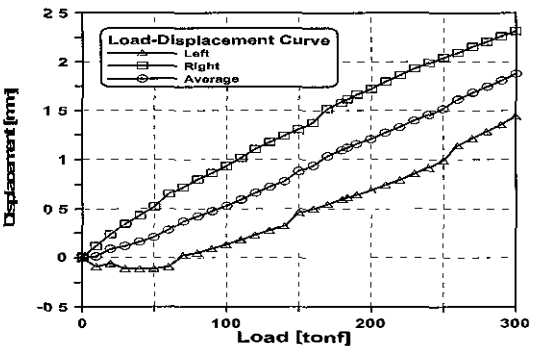


Fig 8 재하하중에 따른 하중-변위선도

3.3.2 육안관찰에 의한 균열 검토

정적 재하하중에 따른 연속지점부 바닥판 균열의 발생을 검토하기 위해 하중을 단계적으로 증가시키며 바닥판의 균열을 육안으로 관찰하였다. 최대하중 300 tonf가 재하되기 전까지는 균열이 발생하지 않았으며, 최초의 균열은 300tonf을 재하한 상태에서 연속지점부 중앙에서 바닥판의 횡방향 중심에서 발견되었다. 최대 처짐 0.915mm를 발생시키는 하중은 최대 하중 300tonf에 크게 못 미치는 160tonf이므로 연속지점부 바닥판은 공용하중이 작용할 때 균열에 대해 충분한 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

3.3.3 하중-바닥판 콘크리트의 응력

바닥판 콘크리트의 변형률 게이지는 Fig. 9과 같이 부착하였다.

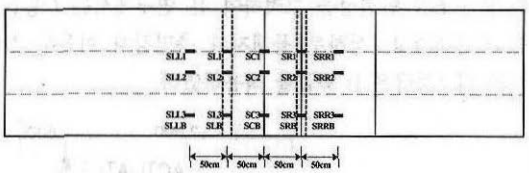
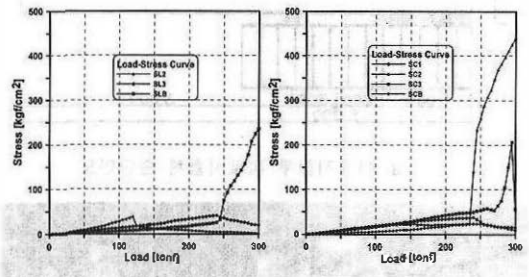
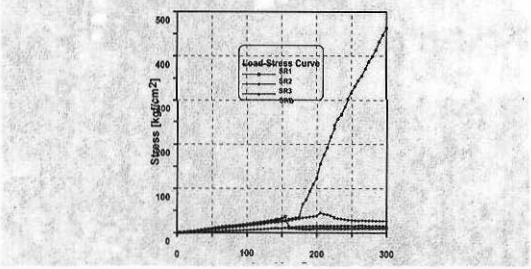


Fig. 9 바닥판 콘크리트의 변형률 게이지 배치도



(a) 좌측지점부 (b) 연속지점부 중앙



(c) 우측지점부

Fig. 10 재하하중에 따른 하중-바닥판 콘크리트 응력

Fig. 10은 정적재하 하중이 작용할 때 바닥판 콘크리트의 응력을 나타낸 것이다. 등가의 최대 설계하중 160tonf에 대한 연속지점부 바닥판 콘크리트의 응력은 2003년도 도로교설계기준에서 규정한 허용균열응력 32.86 kgf/cm²을 넘지 않는 것으로 나타났다. Fig. 10에 나타나는 응력의 급격한 감소는 게이지의 부착상태가 불량한 것에 원인이 있는 것으로 판단되며, 급격한 증가는 콘크리트가 불균질한 특성에 의해 발생한 게이지 인접부의 미세균열에 의한 영향으로 판단된다. 그러나 발생한 균열들이 육안으로 관찰되지 않는 미세균열이므로 구조물의 사용성에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

3.3.4 하중-바닥판 철근 응력

바닥판 상부철근의 변형률 게이지는 Fig. 11과 같이 부착하였다.

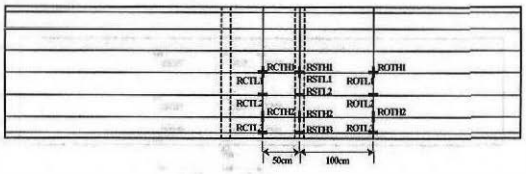
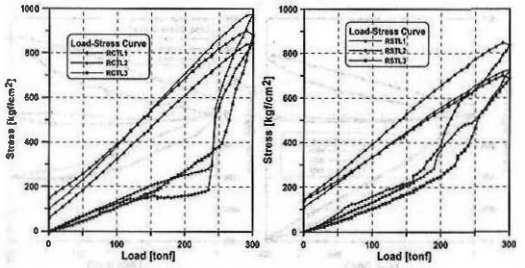
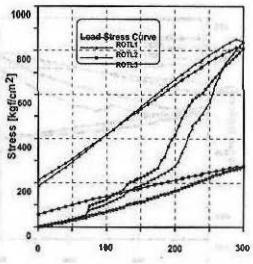


Fig. 11 바닥판 상부철근의 변형률 게이지 배치도



(a) 연속지점부 중앙 (b) 우측지점부



(c) 우측 지점부 외측 100cm 지점

Fig. 12 재하하중에 따른 하중-바닥판 상부철근 응력 선도

재하 하중에 따른 바닥판 상부철근의 응력은 Fig. 12와 같다. 응력선도에 나타난 응력의 급격한 증가는 콘크리트와 강재의 계면 사이에 존재하는 부착에 의한 구속효과가 하중이 증가함에 따라 급속히 제거되었기 때문인 것으로 판단된다. 하중-응력선도에서 볼 수 있듯이 하중을 재하 및 제거하여도 거더는 선형적인 거동을 하였다. 바닥판 상부철근의 최대 응력은 연속지점부에서 975.3 kgf/cm², 우측지점부에서 813.7 kgf/cm² 그리고 우측지점부 외측 100cm 지점에서 850.28 kgf/cm²가 발생하였다.

3.3.5 하중-강재 응력

외부강재의 변형률 게이지는 Fig. 13과 같이 부착하였다. 재하 하중에 따른 외부강재의 응력은 다음 Fig. 14와 같다.

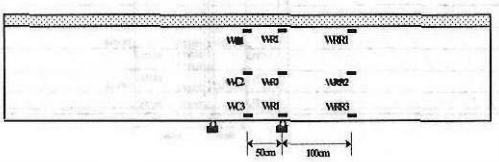
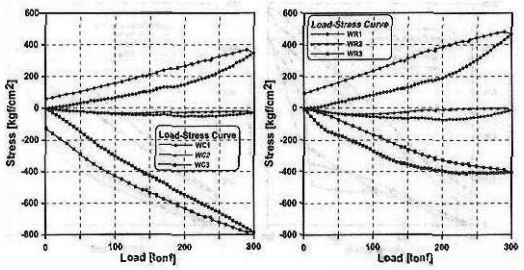
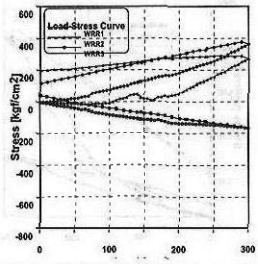


Fig. 13 외부강재의 변형률 게이지 배치도



(a) 연속지점부 중앙 (b) 우측지점부



(c) 우측지점부 외측 100cm 지점

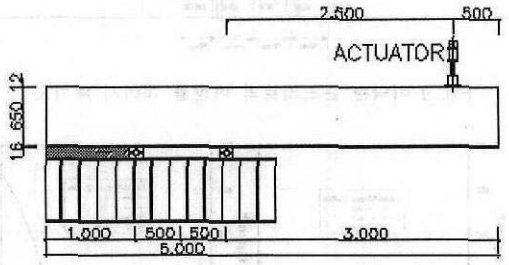
Fig. 14 재하하중에 따른 하중-외부강재 응력 선도

하중-외부강재 응력 선도에서 볼 수 있듯이 최대 응력은 연속지점부 하부플랜지에서 785.85 kgf/cm², 우측지점부 상부플랜지에서 482.8 kgf/cm² 그리고 우측지점부 외측 100cm지점 상부플랜지에서 378.2 kgf/cm²가 발생하였다.

4. 피로실험

4.1 시험체 제작 및 하중재하

시험체는 교량의 연속지점부와 같은 용접상세를 적용한 길이 5m의 축소모형을 제작하여 사용하였다. 시험체의 전경 및 하중재하위치는 Fig. 15와 같다. 2003년도 도로교설계기준에 의해 측면강재의 종단면 연결부는 상세 범주가 B′또는 C등급에 해당된다. 그러나 구조적 안전성을 고려하여 본 연구에서는 C등급을 적용하였고, 상하부 플랜지와 측면강재 이음부 상세의 피로등급은 B′등급을 적용하였다.



(a) 연속지점부 피로시험체 종단면도

(b) 피로시험체 전경 및 하중재하 위치

Fig. 15 피로시험체 전경 및 종단면

Table 4 피로시험체 하중조건

구 분	고정단측 측면 용접부		캔틸레버측 측면 용접부		지점 상부 플랜지 용접부	
	좌측면	우측면	좌측면	우측면	좌측면	우측면
최소하중	2 tonf					
최대하중	22 tonf					
최대응력(Pmax) (kgf/cm²)	1000 1	1045 6	1194 1	1198 1	1269 4	1268 5
최소응력(Pmin) (kgf/cm²)	909 1	950 5	1085 6	1089 2	1154 0	1153 2
응력비 (Pmax/Pmin)	0 91					

연속지점부에서의 실제거동을 모사하기 위하여 Fig 15와 같이 연속지점부에서 부모멘트가 발생하도록 캔틸레버보의 단부에 하중을 재하하였다 본 연구에서는 종단면 연결부 상세가 C등급이므로 200만회 허용피로응력범위 910 kgf/cm² 이상의 응력이 용접부에 발생할 때까지 점진적으로 재하히중을 증가시켰다

피로실험의 하중조건은 Table 4와 같고 일정 진폭의 하중을 시험체별 재하지점의 변위에 따라 진동수 4.0Hz로 재하하였다 피로시험체는 최대하중에 따라 상당히 큰 처짐이 발생하게 되므로 변위를 제어하여 반복하중을 재하하도록 하였다

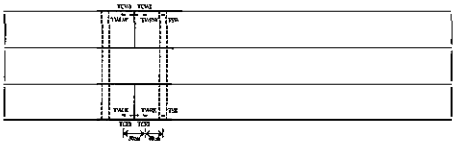
4 2 계측 방법

연속지점부 피로실험에 의한 구조거동을 파악하기 위하여 외부강재의 플랜지 상하단 및 웨브에 변형률 게이지를 Fig 16과 같이 부착하여 변형률을 측정하였으며 하중재하 위치 하부에 정적변위계를 설치하였다 일정 피로 반복회수마다 반복재하를 멈추고 단계적으로 하중을 재하하여 계측을 하였으며 데이터 획득 시스템의 구성은 정적재하실험의 데이터 획득시스템과 동일하다 피로실험에 사용된 계측장비와 계측센서의 시양 및 제원은 Table 5와 같다

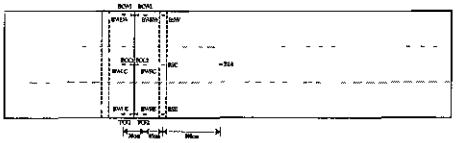
4 3 실험 결과

4 3 1 피로거동과 변위 및 응력

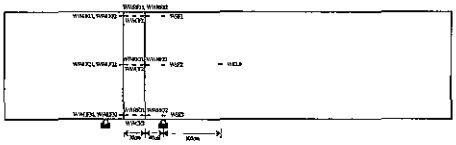
콘크리트의 초기 균열은 반복회수 60만회에서 캔틸레버측 지점부에서 고정단측으로 45mm 떨어진 위치에서 발생하였으며 강재의 초기 균열은 96만회에서 캔틸레버측 지점부에서 고정단측으로 115mm 떨어진 위치에서 상부플랜지의 전 길이에 걸쳐 균열이 발생하였다



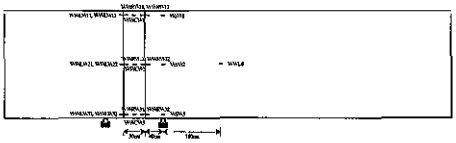
(a) 상부플랜지



(b) 하부플랜지



(c) 좌측면웨브



(d) 우측면웨브

Fig 16 피로 시험체 강재 게이지 배치도

Table 5 정적재하 실험시 계측장비 및 센서의 사양

구분	가력기	정적계측 데이터로거	정적변위계	변형률게이지
모델 및 규격	100 tonf	TDS-303	DTJ-A-200	WFLA -6-11-5LT
제작회사	MTS (미국)	TOKYO (일본)	KYOWA (일본)	TOKYO (일본)
Measuring Range	-	30 ch	300 mm	30,000 $\times 10^{-6}$

Fig. 17의 반복회수-변위선도에서 볼 수 있듯이 변위는 초기에는 피로반복회수의 증가에 따라 거의 일정한 값을 보이다가 콘크리트의 균열이 발생한 시점인 반복회수 60만회에서 약간의 증가를 보였으며 강재의 초기균열이 발생한 시점인 96만회에서 급격히 증가하였다. 이러한 결과로부터 콘크리트의 균열에 의하여 거더의 변위는 다소 증가하지만 그 영향은 미소한 것으로 판단되나, 강재의 초기균열 발생 이후 시험체의 강성이 급격히 저하되었다고 판단할 수 있다.

Fig. 18은 피로 반복회수에 따른 주요 용접부에서의 응력변화를 나타낸 것이다. 용접부의 응력은 거더 콘크리트 균열이 발생한 시점에서 다소 증가하는 경향을 보이나 그 변화량이 미소하여 용접부의 거동에 큰 영향은 미치지 못하는 것으로 판단된다. 피로 반복회수 90만회에서 용접부의 응력이 다시 증가하는 경향을 보였다. 이것은 내부 콘크리트의 균열은 구조물의 거동에 미치는 영향은 미소하지만 내부 콘크리트의 강성 분담 비율이 감소하여 상대적으로 강재의 응력이 커진 것으로 판단된다.

4.3.2 피로수명

피로실험 결과로 거더 외부 강재의 균열은 캔틸레버측 지점부 상부플랜지에서 피로반복회수 96만회에서 발생하였다. 이를 2003년도 도로교설계기준의 S-N곡선과 비교하여 나타내면 Fig. 19와 같다. 실험 계획 단계에서 검토하고자 했던 연결부의 피로강도는 검토부위에서 균열이 발생하지 않았고 미처 고려하지 못한 상부플랜지 이음부의 균열 발생으로 인하여 도로교설계기준의 피로등급을 만족하는지의 여부를 판단할 수 없었다. 하지만 검토하고자 하였던 연속지점부의 용접부에서는 균열이 발생하지 않았고 또한 격자해석으로부터 계산된 합성 후 활하중에 의한 응력은 Table 3에서와 같이 반복회수 200만회에서의 허용응력범위인 910 kgf/cm²의 약 50%정도 작은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 6경간 SCP 연속교의 연속지점부에 대하여 정적재하실험과 피로실험으로 사용성과 안정성에 대한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻

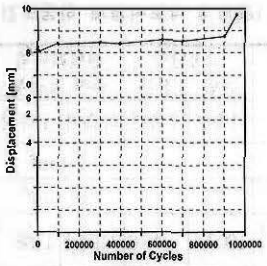
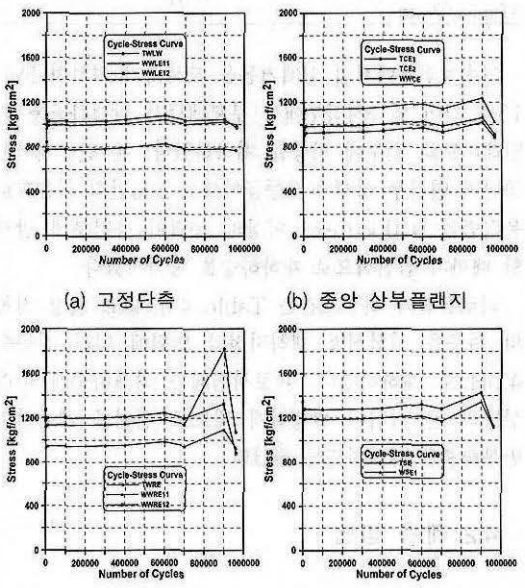


Fig. 17 반복회수-변위선도



(a) 고정단측 (b) 중앙 상부플랜지

(c) 캔틸레버측 (d) 지점부 상부플랜지

Fig. 18 피로 반복회수에 따른 주요 용접부에서의 응력변화

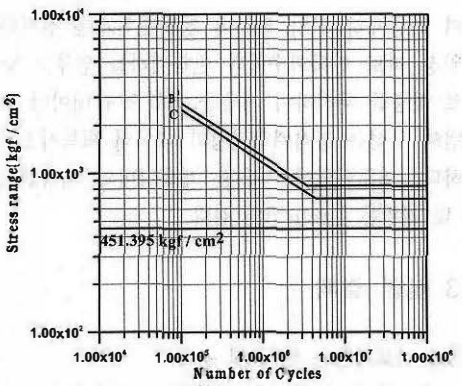


Fig. 19 피로수명 곡선

을 수 있었다

첫째, 시험체에 등가의 정적재하하중을 가하였을 때 연속지점부 바닥판 콘크리트에 균열이 발생하지 않았다. 또한 최대 재하하중 300tonf을 가하였을 때 비로소 미세한 균열이 발생하였다 이러한 실험결과로 볼 때 단경간 SCP 거더교의 지점부를 연속화하여도 바닥판 콘크리트는 균열에 대하여 충분한 안전성을 확보하며 공용중 콘크리트 균열에 대하여 구조적 문제를 야기하지 않을 것으로 판단된다

둘째, SCP 거더 연속지점부의 용접부에 대한 피로실험결과, 설계하중보다 큰 재하하중에 의해 캔틸레버 측 상부이음부에 균열이 발생하였지만 검토하고자한 부위에는 균열이 발생하지 않았다 또한 설계활하중에 의한 연속지점부 상부플랜지의 최대응력은 451 395 kgf/cm^2로서 허용피로응력 910 kgf/cm^2보다 약 50%작으므로 연속지점부 측면 강재 용접부는 피로에 대하여 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단된다

따라서 SCP 연속교의 연속지점부에 대한 콘크리트 바닥판의 균열 및 피로 안전성을 검토한 결과, 실제 교량에 대해 내부지점을 연속화한 6경간 SCP 거더교는 공용하중에 대하여 균열 및 피로에 대해서는 구조적으로 안전한 것으로 판단된다

참고문헌

1 대한토목학회, "도로교설계기준·해설", 건설교통부, 2003

2 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준", 건설교통부, 1999

3 김정호, 박경훈, 황윤국, 최영민, 조효남, "강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 개발을 위한 실험연구", 한국강구조학회, 한국강구조학회 논문집 제14권 5호, 2002, pp 593~602

4 김정호, 박경훈, 황윤국, 이상윤, 조효남, "강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 피로실험", 한국강구조학회, 학술발표대회 논문집, 2003, pp 681~684

(접수일자 . 2004년 6월 8일)