

PC Beam 교의 슬래브 연속화 보강 효과에 대한 연구

A Study on the Continuation Effect of the PC Beam Bridge
Reinforced by Span-Jointing of Slab

선 창 호* 이 종 석** 김 익 현***
Sun, Chang-Ho Lee, Jong-Seok Kim, Ick-Hyun

Abstract

Recently the slab span-jointing method has been employed as one of the retrofit technologies to enhance the capacity of existing simple beam bridges in many cases. In general this method makes simple beam bridges behave like multi-span continuous bridges under service loads excluding self weight in company with external prestress force method in the field. In this paper the continuation effect has been studied for the retrofitted bridges by the experimental and numerical approaches. The results show that the deflections and stresses of members are reduced due to the increase of the total stiffness of bridge system and the efficiency of bridge continuation based on the slab span-jointing method is about 40 % when comparing with the case of continuous bridges.

keywords : Continuation effect, External prestress, Slab span-jointing method

요 지

최근들어, 단순지지 교량의 내하력 증가를 위하여 교량을 연속교의 형식으로 바꾸는 슬래브 연속화공법이 많이 적용되고 있다. 일반적으로 연속화공법은 자중을 제외한 사하중에 대하여 연속교거동을 하게 하는 공법으로서 외부강선 보강공법과 병행해서 많이 사용된다. 본 논문에서는 이러한 연속화공법에 의하여 보강된 교량을 대상으로 하여 현장재하시험과 수치해석을 수행하여 내하력증가와 연속화효율에 관한 연구결과를 나타내었다. 연속화에 의한 교량시스템의 강성증가로 부재의 처짐 및 응력은 다소 감소하였으나 연속화효율은 완전 연속과 대비하여 약 35-45% 수준으로 비교적 낮은 연속화효과를 나타내었다.

Keywords : 연속화공법, 외부강선 보강, 내하력, 정적재하시험

* 학생회원, 울산대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

** 정회원, 울산대학교 지구환경시스템공학부 교수

*** 정회원, 울산대학교 지구환경시스템공학부 조교수

E-mail : sunch@mail.ulsan.ac.kr 052-259-2284

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2003년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

교량 구조물은 공용기간 동안에 끊임없는 반복 차량 하중과 열악한 주위환경으로 인하여 노후화가 촉진되고 있으며, 이로 인하여 균열의 발생, 중성화, 철근 및 강재의 부식 등 다양한 열화손상이 나타나고 있다. 일반적으로 국내 교량의 90%이상이 콘크리트 교량으로서, 그 중에서도 국도 및 지방도의 콘크리트 교량은 상대적으로 손상이 심하고 노후화된 편이다.⁽¹⁾ 국도 및 지방도는 인접 지역간의 산업물자 수송을 분담하는 도로로서 이들 국도 및 지방도상의 노후화 교량은 재시공을 위한 재원확보의 어려움이 있어 재시공 대신에 보수·보강을 통한 교량의 재사용이 꾸준히 증가하고 있다. 교량의 내하력을 증가시키기 위해서 여러 가지 보수·보강공법이 적용되고 있으나, 최근에 들어 단순 지지로 시공된 교량을 콘크리트를 충전하여 연속교 형식으로 바꾸는 슬래브 연속화 공법이 많이 적용되고 있다. 연속화 공법은 통상 자중을 제외한 나머지 하중에 대해 연속교 거동을 하게 하는 공법으로 외부강선 보강공법과 병행해서 많이 사용되며 신축이음장치의 수를 줄임으로써 주행성을 개선할 수 있고, 유지관리에 소요되는 노력과 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 단순교에 비하여 부정정차수가 크기 때문에 붕괴에 대한 안전율이 증가하며 처짐이 작게 발생하는 이점이 있다.⁽²⁾ 국내에서 적용된 연속화 방법은 연결부 상세에 따라 크게 2종류로 나눌 수 있다. 첫 번째는 바닥판만을 연속화하는 방법인데 바닥판의 휨강성이 작기 때문에 사실상 단순교 거동을 하게 된다. 두 번째는 주형 사이에 콘크리트를 충전시킨 후 바닥판과 주형을 모두 일체시키는 방법이다.(Fig. 1)⁽³⁾ 그러나 이렇게 시공된 PC BEAM 합성형 교량은 콘크리트가

충전된 연속지점부에서 정모멘트 및 부모멘트에 대하여 각기 다른 거동특성을 나타내고 있어 복잡한 역학적 거동을 나타낸다.⁽⁴⁾ 따라서 연속화된 교량의 보강 효과를 수치해석적으로 파악하기에는 세심한 주의가 필요하다.⁽⁵⁾ 본 논문에서는 현재까지 개발되어 적용되고 있는 공법중, 두 번째 방법에 의한 슬래브 연속화 보강과 외부강선 보강을 병행한 연속화 공법이 교량의 내하력증가와 연속화에 어느 정도의 효과를 가지는지를 실험적 연구를 통하여 분석하였다. 연구 대상 교량은 울산광역시에 위치하는 구명촌교이다.

2. 슬래브 연속화 보강

2.1 대상교량의 특성

실험 대상 교량인 구명촌교는 PC Beam 합성형 교량으로서, 울산광역시 남구 삼산동에 위치하고 있다. 준공년도는 1968년으로 19경간 단순지지교량이며, 교량등급은 2등교인 DB-18로 추정되었다. 보강전과 보강후에 대한 구명촌교의 일반적인 제원특성은 Table 1과 같다.

2.2 보강 방법

준공된지 30년 이상이 된 구명촌교는 2등교인 DB-18 교량으로 1등교인 DB-24이상으로 상향조정하기 위해서 외부긴장제에 의한 보강을 병행하여 슬래브를 2경간 또는 3경간으로 연속화 보강을 실시하였다.(Fig. 1)⁽⁶⁾ 보강 방법은 먼저 단경간으로 구성된 기존상태에서 신축이음장치를 제거하고 주형사이를 콘크리트로 충전하여 연결철근을 배근한 후 바닥판을 연속화시킨다.

Table 1 구명촌교 일반제원 및 이력

준공년도	1968년	평가하중	보강전	DB-18
보수·보강 년도	2001년		보강후	DB-24
교폭	19.8m	연장	550.0m	
상부형식 및 경간구성	보강전	단순지지(19경간) : 20m(단경간)+30m(단경간)×17+20m(단경간)		
	보강후	□자켓을 이용한 외부긴장+교량 상판 연속화 20m(단경간)+2@30m(2경간연속)+3@30m(3경간연속)×5+20m(단경간)		

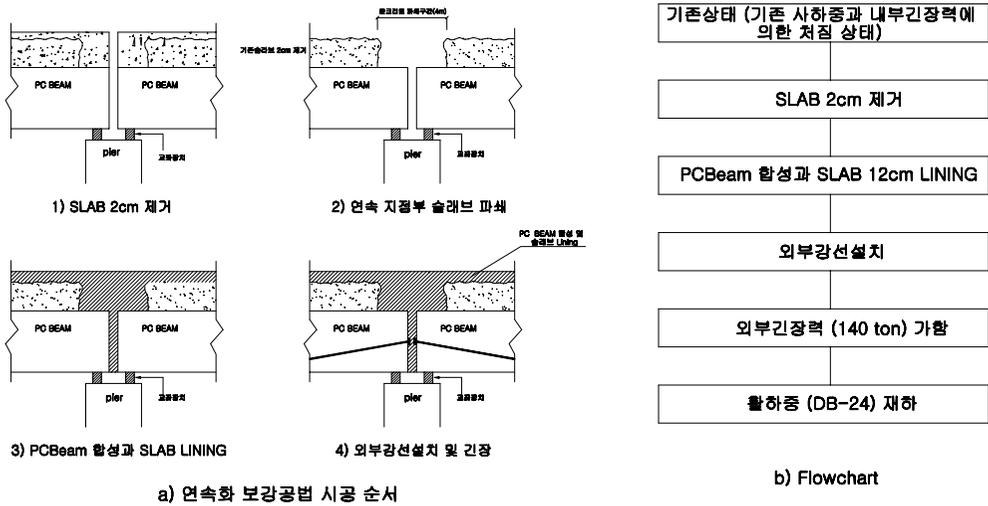


Fig. 1 연속화 보강 공법 시공순서 및 Flowchart

일반적으로 PC Beam은 최적의 단면을 배려하여 설계가 이루어지기 때문에 원설계 이상의 내하력으로 증강할 경우에는 부분적인 단면의 부족이 발생한다. 이를 위하여 PC Beam 단부에 T자 형태의 지압판을 설치하여 외부 긴장(140t)을 도입하여 휨에 대한 내하력을 증강시켰다. Fig. 1은 구명교양에 적용한 공법의 시공순서를 나타내고 있다.

3. 정적 재하 시험

대상교양에 대해 2000년 8월과 2001년 4월에 슬래브 연속화 전, 후에 대해 각각 정적현장재하시험을 실시하였다. 시험차량으로는 1대의 적재중량 15.0톤 덤프트럭에 토사를 적재하여 각각 총중량 28.52톤(연속화전), 31.46톤(연속화후)의 시험차량을 사용하였고, 이를 교양상판에 정적으로 재하시켜 변형율, 처짐 등의 실용답을 측정하였다. 재하시험의 대상경간은 외관조사 결과와 작업여건을 고려하여 3번째 경간을 시험구간(이하 시험구간)으로 15번째 경간을 임의구간(이하 임의구간)으로 선정하였다. 시험구간과 임의구간은 모두 3경간 연속으로 보강된 구간이다.

3.1 시험 방법

현장 재하시험에 사용된 시험차량은 15t 덤프트럭을 사용하였으며, 좌·우측 바퀴간격은 1.8m, 전륜과 중륜 사이는 3.3m, 중륜과 후륜 사이는 1.3m이다. 보강전과 보강후에 대한 재하시험차량의 차륜하중은 Table 2와 같다. 재하시험을 보강전에는 시험구간에 대해서만 수행하였으며, 보강후는 시험구간과 임의구간에서 각각 수행하였다.

Table 2 재하시험차량의 차륜 하중

구분	15ton 차량	슬래브 연속화 재하시험차량의 차륜별 측정 (ton)			
		전륜	중륜	후륜	총중량
보강전	합계	5.08	12.41	11.03	28.52
보강후	합계	3.14	15.36	12.96	31.46

Table 3 정적 재하위치에 대한 설명

재하위치	위치설명(울산역에서 경주방향으로)
재하경우1(LC1)	G2 위치에 우측 중륜 재하
재하경우2(LC2)	G3 위치에 우측 중륜 재하
재하경우3(LC3)	G4 위치에 우측 중륜 재하
재하경우4(LC4)	G5 위치에 우측 중륜 재하

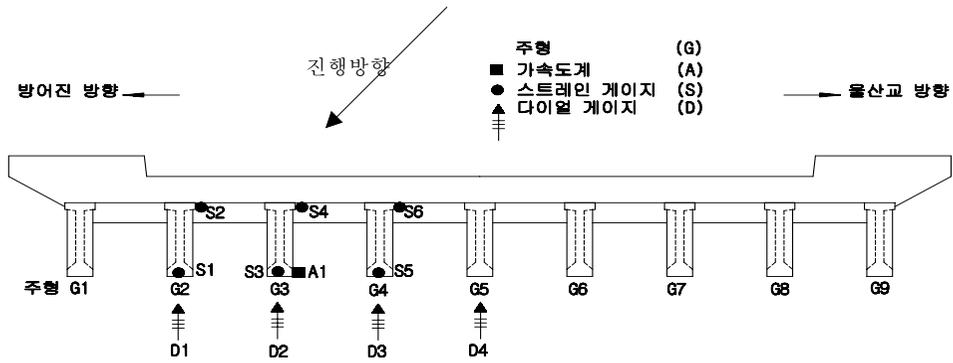


Fig. 2 측정계이지 부착위치

보강전·후에 대해 재하위치와 측정위치, 그리고 재하시험차량의 진행방향(울산역에서 경주방향)은 동일하며 재하위치는 최대변형 및 최대처짐을 얻을 수 있도록 경간 중앙부에 재하하였다. Table 3에 정적재하위치에 대한 설명을 나타내었으며 Fig. 2는 측정계이지 부착위치를 나타내고 Table 4는 측정항목에 대한 설명을 나타내고 있다.

3.2 슬래브 연속화 보강전 현장재하시험

시험구간에 대해서만 현장시험이 수행되었다. 처짐은 Fig. 3과 같이 재하경우1(LC1)에서 1.98mm로 G2주형에서 가장 크게 나왔다. 이것은 재하경우1이 G2주형에 가장 가까운 위치에 하중이 재하되었으며, 또한 G2주형은 외측주형(G1)과 가까운 위치에 있어서 중앙쪽의 다른 주형에 비해 재하경우에 따른 변위

의 변동폭이 크게 나타나는 경향이 있다. 응력부분에 있어서도 Fig. 4, Fig. 5와 같이 재하경우1에서 주형하단 11.29kgf/cm²(인장), 주형상단 8.87kgf/cm²(압축)으로 가장 크게 발생하였다. 응력은 측정된 변형률과 콘크리트의 탄성계수를 이용하여 계산하였다.

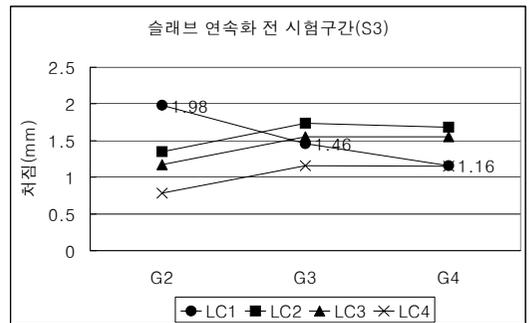


Fig. 3 슬래브 연속화 보강전 처짐

Table 4 측정항목

계측기 채널번호	위치 설명	측정항목
D1	울산역→경주 S3 경간 G2 중앙부 (처짐측정기)	정적 처짐
D2	울산역→경주 S3 경간 G3 중앙부	정적 처짐
D3	울산역→경주 S3 경간 G4 중앙부	정적 처짐
D4	울산역→경주 S3 경간 G5 중앙부	정적 처짐
S1	울산역→경주S3경간G2중앙하부(변형률측정계이지)	휨변형률
S2	울산역→경주 S3 경간 G2 중앙 상부	휨변형률
S3	울산역→경주 S3 경간 G3 중앙 하부	휨변형률
S4	울산역→경주 S3 경간 G3 중앙 상부	휨변형률
S5	울산역→경주 S3 경간 G4 중앙 하부	휨변형률
S6	울산역→경주 S3 경간 G4 중앙 상부	휨변형률
A1	울산역→경주 S3 경간 G2 중앙부 (가속도계)	가속도

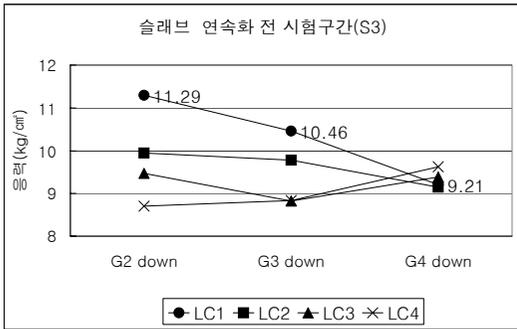


Fig. 4 슬래브 연속화 보강전 응력(주형하단)

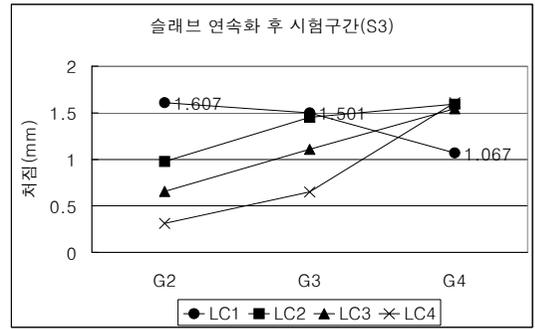


Fig. 6 슬래브 연속화 보강후 처짐

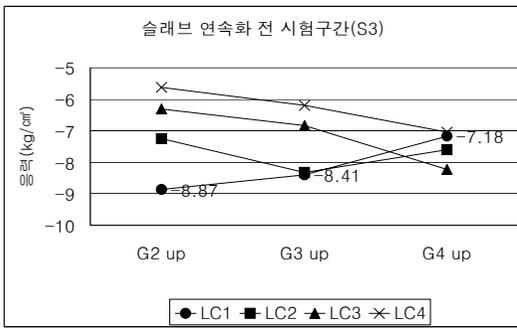


Fig. 5 슬래브 연속화 보강전 응력(주형상단)

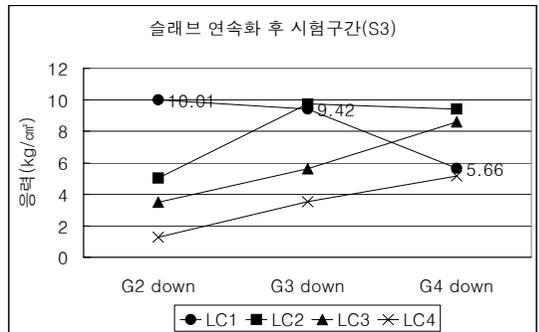


Fig. 7 슬래브 연속화 보강후 응력(주형하단)

3.3 슬래브 연속화 보강후 현장재하시험

슬래브 연속화 보강후 현장재하시험은 시험구간과 임의구간에 대해 각각 현장시험이 수행되었다. 처짐은 시험구간에서는 Fig. 6과 같이 재하경우1(LC1)에서 1.607mm로 G2주형에서 가장 크게 발생하였으며 임의 구간에서는 Fig. 9와 같이 재하경우1에서 1.705mm로 G2주형에서 가장 크게 발생하였다. 슬래브 연속화 보강후에도 보강전과 같이 재하경우1이 G2주형에 가장 가까운 위치에 하중이 재하되었으며, 또한 G2주형은 외측주형(G1)과 가까운 위치에 있어서 중앙쪽의 다른 주형에 비해 재하경우에 따른 변위의 변동폭이 크게 나타나는 경향이 있었다. 응력에 있어서도 시험구간에서는 Fig. 7, Fig. 8과 같이 재하경우1에서 주형하단 10.01kgf/cm²(인장), 주형상단 0.77kgf/cm²(압축)으로 가장 크게 발생하였으며 임의구간에서도 Fig. 10, Fig. 11과 같이 재하경우1에서 주형하단 10.11kgf/

cm²(인장), 주형상단 0.8kgf/cm²(압축)으로 가장 크게 발생하였다.

3.4 실험 결과의 비교 분석

슬래브 연속화 보강전과 후에 대해서 각각 현장재하시험을 수행하였으며 처짐과 응력에 대한 정적재하시험 결과를 Table 5와 Fig. 12, 그리고 Fig. 13에 정리하였다. 보강전과 후 모두 재하경우1(LC1)에서 가장 큰 값이 나타나며 G2주형에서 처짐과 응력이 가장 크게 발생하였다. 시험구간에 대해서 슬래브 연속화 전과 후를 비교했을 때, 처짐은 약 22~26%정도 감소했으며 응력은 약 19~20%정도 감소하였다. 또한 보강전과 후에 대해 재하시험차량의 중량차이를 고려하여 처짐값을 이용하여 강성을 비교해보면 평균 약 21%정도 강성이 증가하였음을 알 수 있다.

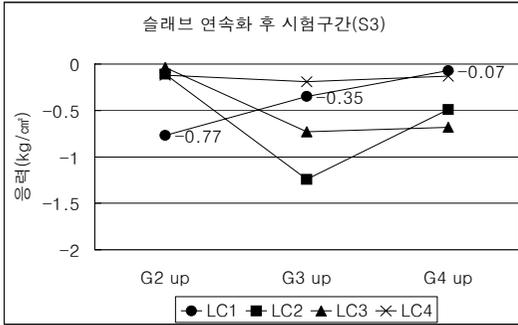


Fig. 8 슬래브 연속화 보강후 응력(주형상단)

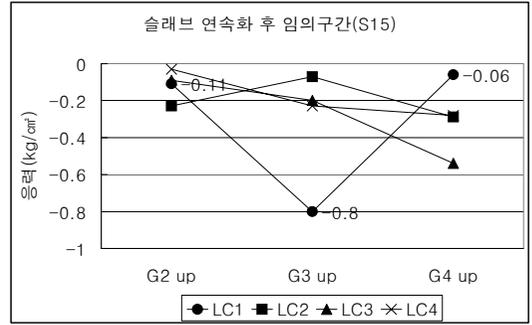


Fig. 11 슬래브 연속화 보강후 응력(주형상단)

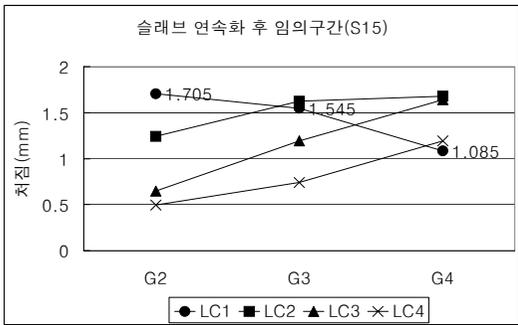


Fig. 9 슬래브 연속화 보강후 처짐

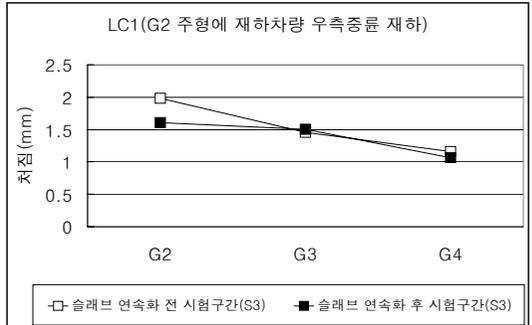


Fig. 12 처짐에 대한 실측값 요약 (LC1)

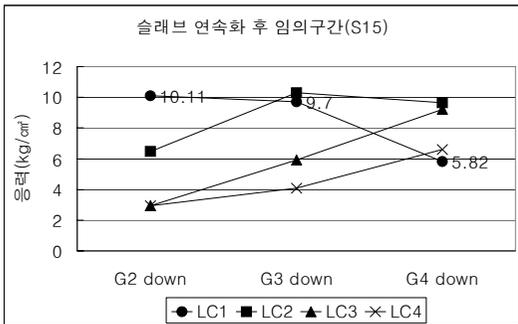


Fig. 10 슬래브 연속화 보강후 응력(주형하단)

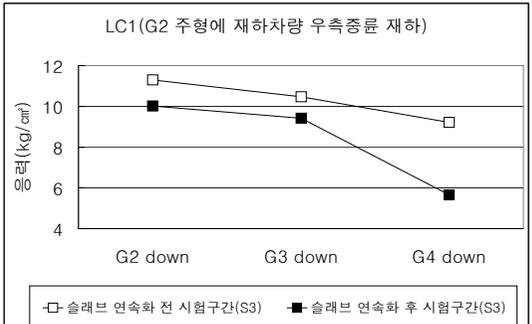


Fig. 13 응력에 대한 실측값 요약 (LC1)

Table 5 실험 결과(재하경우1)

구분	슬래브 연속화 전			슬래브 연속화 후						강성증가량(%)				
	28.52t			31.46t										
재하시험차량중량	시험구간(S3)			시험구간(S3)			임의구간(S15)			시험구간(S3)				
구간	G2	G3	G4	G2	G3	G4	G2	G3	G4	G2	G3	G4	평균	
주형	G2	G3	G4	G2	G3	G4	G2	G3	G4	G2	G3	G4	평균	
처짐(mm)	1.98	1.46	1.16	1.607	1.50	1.07	1.705	1.55	1.09	36	7	20	21	
응력(kgf/cm ²)	주형하단	11.29	10.46	9.21	10.01	9.42	5.66	10.11	9.70	5.82	-	-	-	-
	주형상단	-8.87	-8.41	-7.18	-0.77	-0.35	-0.07	-0.11	-0.8	-0.06	-	-	-	-

또한 슬래브 연속화 효과를 분석하기 위해 실패량에 대해서 구조해석을 수행하였으며 처짐에 대한 실측값과 해석값을 이용하여 연속화 보강에 따른 연속화 효과를 분석하였다. 구조해석은 보요소와 판요소를 사용하여 완전연속과 단순지지에 대해 가능한 실패량과 유사하게 모델링하여 수행하였다. 해석시 사용된 시험 차량의 중량과 재하위치는 정적현장재하시험과 동일한 조건으로 하였으며 사용프로그램은 COSMOS/M이다. 대상교량이 완전연속거동을 할 때의 실측값은 측정할 수가 없으므로 이때 사용된 추정값은 식(1)과 같이 완전연속의 구조해석값(1.710cm)과 단순지지의 구조해석값(3.672cm), 그리고 단순지지일 때의 실측값을 사용하여 추정하였다. 이는 재하차량의 중량에서는 대상교량이 탄성거동을 하기 때문에 완전연속과 단순지지에 대한 강성변화의 비가 구조해석값과 실측값에서 동일하다는 가정에서 추정한 값이 된다.

완전연속의 추정값

$$= \frac{\text{완전연속의 구조해석값}}{\text{단순지지의 구조해석값}} \times \text{단순지지의 실측값} \quad (1)$$

구조해석과 실험결과를 바탕으로 슬래브 연속화의 효율성을 판단하여 슬래브 연속화에 의한 시공방법이 완전연속과 단순지지에 비해 어느 정도의 보강효과를 가지는지 알아보기 위해 식(2)를 사용하여 그 효율성을 판정하였다.

슬래브 연속화 효율성

$$= \frac{|\text{단순지지에 의한 값}| - |\text{슬래브 연속화에 의한 값}|}{|\text{단순지지에 의한 값}| - |\text{완전연속에 의한 값}|} \times 100(\%) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 사용하여 대상교량인 구명촌교에 대해서 슬래브 연속화 효과를 분석·요약하면 Table 6과 같다. 단순지지 상태의 임의구간에 대해서는 정적재하시험을 수행하지 않았기 때문에 임의구간의 연속화 효율은 시험구간의 단순지지 실측값을 사용하여 추정하였다.

실측값에 있어서 슬래브 연속화 효율은 Table 6과 같이 완전연속거동에 비해서 약 35~45%정도의 연속화 효율을 보이고 있으며 이는 연속지점부가 정모멘트에 의해 발생하는 압축력을 충전콘크리트가 완벽하게 전달하지 못한다는 것을 알 수 있으며, 이것은 완전연속보다는 오히려 단순지지에 가깝게 거동한다고 볼 수 있다.

4. 결론

교량의 보수보강 공법 중 외부강선 보강을 병행한 슬래브 연속화 공법에 대한 내하력 증가와 연속화 효과를 비교·분석해 보기 위해 실제 교량을 대상으로 연속화 보강전과 후에 대해서 각각 정적재하시험을 수행하였으며 현장시험에 의한 처짐과 응력, 그리고 구조해석을 통한 처짐과 응력값을 비교하여 슬래브 연속화 보강공법의 효율성을 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 슬래브 연속화 보강전과 후, 모두 재하경우1에서 가장 큰 값이 나타나며 G2주형에서 처짐과 응력이 가장 크게 발생하였다. 슬래브 연속화 전과 후를 비교했을 때, 처짐은 약 22~26%정도 감소했으며 응력은 약 19~20%정도 감소하였다.
- 2) 정적재하시험에 의한 실측값의 경우 슬래브 연속화 효율은 완전연속에 비해 약 35~45%정도로 나타났다으며, 이러한 연속화 효과는 활하중을 포함한

Table 6 실측값을 이용한 슬래브 연속화 효과(G2주형)

주형하단	완전연속 (추정값)	슬래브 연속화(실측값)		단순지지* (실측값)	연속화 효율(%)		평균
		시험구간	임의구간		시험구간	임의구간	
처짐	1.017	1.607	1.705	2.184	49	41	45
응력	5.603	10.01	10.11	12.45	35	34	34.5

* 재하시험차량의 중량차이를 고려한 시험구간의 실측값

모든 재하하중에 대해 완전연속화 거동이 이루어지지 않는다는 것을 의미한다.

- 3) 충전콘크리트를 사용한 슬래브 연속화 공법은 연속 지점부가 정모멘트에 의해 발생하는 압축력을 충전 콘크리트가 완벽하게 전달하지 못한다는 것을 알 수 있으며, 이것은 완전연속보다는 단순지지에 가깝게 거동한다고 볼 수 있다.
- 4) 시험결과 외부강선 보강을 병행한 슬래브 연속화 보강은 단순지지에 비해서는 평균 약 21% 정도의 강성 증가 효과를 얻을 수 있었으며, 이것은 대상 교량의 내하력 증강에 효과가 있다는 것을 의미한다.

참고문헌

1. 건설교통부 콘크리트 교량의 보수·보강방법의 표준화, 시설 안전기술공단, 1999.
2. 이재만, 슬래브 연속화 보강에 따르는 P.C Beam교의 연속화 효과에 대한 해석적 및 실험적 연구, 울산대학교, 석사학위논문, 2001.
3. 박영하 등 PSC Beam 교의 연속화 방안에 관한 연구, 연구 보고서, 도로연 99-47-30, 한국도로공사 도로연구소, 1999.
4. 송명관, 단순 PC빔교의 연속 바닥슬래브에 발생하는 응력집중에 관한 연구, 한국과학기술원, 석사학위논문, 1996.
5. 정재민 P.C 교량 슬래브 연속화에 따르는 비선형 해석 모델 개발에 관한 연구, 울산대학교, 석사학위논문, 2000.
6. Narendra Taly, Ph.D., P.E Design of Modern Highway Bridges. McGraw-Hill, New York, N.Y. 1998.

(접수일자 : 2002년 8월 26일)