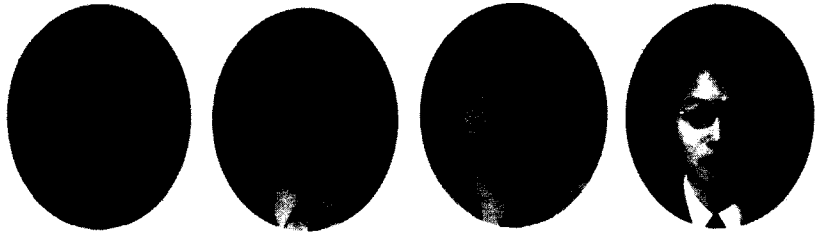

유리섬유를 이용한 손상된 프리스트레스트 콘크리트 보의 보강공법 개발연구

A study on Development of Methods to Rehabilitate
the Damaged Prestressed Concrete beam Using Glass Fiber



강원호*

한만엽**

이택성***

유영민****

Kang, Won-Ho Han, Man-Yop Lee, Taek-Sung Rhu, Young-Min

ABSTRACT

Many composite girder bridges have been constructed for about thirty five years. Nowadays they are aged or deteriorated because of the increase in traffic and vehicle loads. In this study, the effect of strengthening with glass fiber sheet is investigated to estimate the possibility for applying to damaged prestressed concrete bridges. One normal and eight cracked specimens which had been preloaded were tested. The cracked specimens were strengthened with either external prestressing or bonding glass fiber sheet, or using both methods. The results showed that the maximum loads are almost same for both methods. So it seems that the strengthening with glass fiber sheet can be used for strengthening damaged prestressed concrete girders. It is important that proper devices should be selected to prevent glass fiber sheet from premature bonding failure below its maximum load, which is similar to end anchorage problem in external prestressing method. It is proved that the devices proposed in this paper have sufficient anchoring capability to increase load carrying capacity.

Keywords : strengthening, prestressed concrete, glass fiber sheet, bonding

* 정회원, 동아대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 아주대학교 토목공학과 교수

*** 아주대학교 토목공학과 석사과정

**** 동아대학교 토목공학과 석사과정

·본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

철근콘크리트 교량에 대한 보수보강공법에 관한 연구와 실구조물에의 적용은 여러 가지 방법으로 접근과 시도가 이루어져왔으나, 프리스트레스트 콘크리트 교량에 있어서는 외부 프리스트레싱에 의한 보강방법이 일반적이었다. 그러나 외부강선 보강공법에는 단부정착장치의 제작상의 어려움과 외관상, 시공상의 문제 등이 제기 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 근래에 보강재로서 새로이 부각되고 있는 유리섬유를 이용하여 프리스트레스트 콘크리트교량을 부착식으로 보강하는 방법을 검증하고자 하였다.

본 연구에서 보강재로 사용된 유리섬유는 탄소섬유나 아라미드 섬유 등과 함께 신소재로서 그 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이며, 경량으로 운반 및 취급이 용이하고 재단하기 쉬운 장점과 유연성까지 갖추고 있어 국내 생산으로 경제성을 갖추게 될 경우 그 적용범위가 크게 확대될 수 있는 재료이다.

2. 실험

2.1 시험체 제작

실험 부재는 순지간 6m의 단순보로서 건설부 제정 프리스트레스트 콘크리트 빔교 지간 30m의 표준단면을 근거로 하여 대체로 형상비가 비슷하도록 설계하였으며, 실험부재의 지간 중앙부의 설계 단면은 Fig. 1과 같다. 시험체의 제작에 사용된 재료의 물성을 Table 1에 제시하였다.

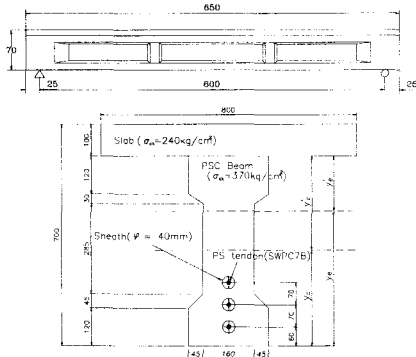


Fig. 1 Detail of middle section

Table 1 Physical Properties of materials

Member	Classification	Strength (kg/cm ²)	Remark	
PSC Beam	Comp	design	370	
		at prestressing	354	14days
		at test	393	28days
Slab	Comp	design	240	
		at test	262	
PS tendon (SWPC7B)	Ultimate(σ_{pu})		18,900	
	Yield(σ_{py})		16,100	
	Allowable (σ_{py})	short time	13,230	$0.7\sigma_{pu}$
		long time	12,880	$0.8\sigma_{py}$
	External tendon (SWPD3)	Ultimate(σ_{pu})		19,700
Yield(σ_{py})		17,400		
Allowable (σ_{pa})		short time	13,800	$0.7\sigma_{pu}$
		long time	13,900	$0.8\sigma_{py}$
Reinforcement		Yield	4,200	

2.2 실험 계획

총 9개의 시험체에 대해, 유리섬유 보강 방법 및 외부강선 보강 방법을 사용하여, 무보강시험체 1개와 유리섬유 보강 시험체 5개, 외부강선 보강 시험체 1개, 유리섬유와 외부강선 보강을 병행한 시험체 2개를 제작하였다.

선행하중에 의해 균열을 발생시킨 후 균열이 발생한 부재에서 하중을 제거하여 사하중 상태에서 보강을 실시하였으며, 외부강선으로 보강한 CWES와 유리섬유로 보강한 CWGS 계열의 부재들, 그리고 유리섬유와 외부강선으로 동시에 보강한 CWEGS 계열로 분류한다.

외부강선은 부재 단부에 정착단을 설치하고 지간의 각 1/3점에 방향전환부를 두어 강선의 방향을 변화시켜서 배치하였다. 총 6개의 $\phi 2.9\text{mm}$ 3연선을 배치하였으며 각 강선은 2ton으로 긴장하였다.

유리섬유 보강은 PSC부재의 하부 플랜지 바닥면에 유리섬유를 접착하는 것으로, 폭 23cm, 길이 540cm로 1겹 보강하는 것을 기준으로, 시험체별로 유리섬유의 보강폭과 부착층수를 달리하여 보강한다. CWGSR 시험체는 CWGS와 같은 보강량을 갖고, 외부강선으로 긴장한 상태에서 유리섬유를 보강한 후 외부 강선을 제거한 형태이다. 유리섬유 보강의 시험체들은 보강재의 안정적인 정착을 위해 보강량 외에 유리섬유를 부착한

다. 유리섬유 보강부재의 정착단은, 지점부근에서 50cm 떨어진 부분에서부터 폭 1 m의 유리섬유를 복부의 중앙부까지 둘러싸 정착하였다.

CWGSA는 지점부근의 하면에 정착판을 두고 앵커작업을 하여 정착하였으며, CWGSB는 유리섬유로 부재를 둘러싼 다음 섬유앵커를 사용하여 정착하였다. Table 2에서 각 부재의 보강 방법을 정리하였으며, Fig. 2에서 보강후 부재들의 단면도를 나타내었다.

Table 2 Summary of test specimens

Type of rehabilitation	Series	Quantity		
		Glass fiber		Ex. tendon
		Width	Ply	No
Standard	PWOS	-	-	-
Ex. tendon	CWES	-	-	6
	CWGS	23cm	1	-
Glass fiber	CWGS2	12cm	2	-
	CWGSR	23cm	1	-
	CWGSA	50cm	2	-
	CWGSB	50cm	2	-
Two at once	CWEGS	13cm	1	6
	CWEGS2	7cm	2	2

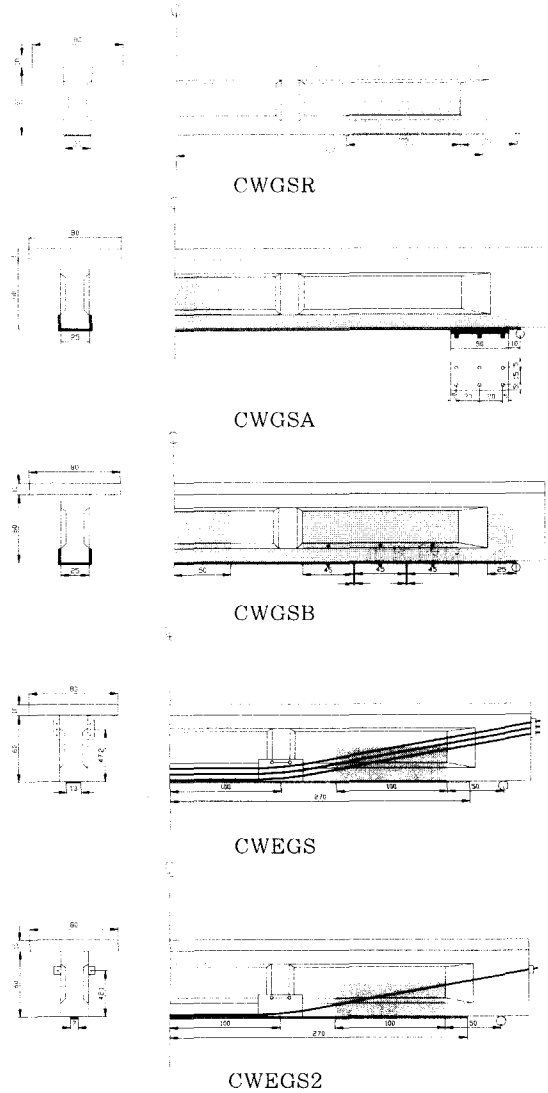
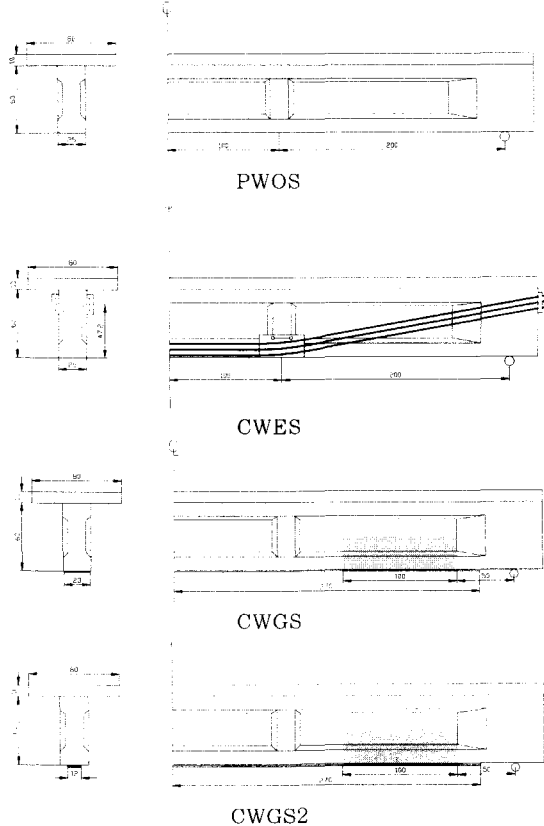


Fig. 2 Detail of strengthened specimens

2.3 재하 및 측정방법

실험 부재는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 단 순보로 지간의 각 1/3점에 4점 재하하고, 하중은 설계항복 하중 M_y 에 이르기까지 단조 증가하였으며, 이후는 변위 증가로 극한 상태의 연성의 증가를 관찰하였다. Fig. 3은 하중재하위치 및 게이지의 부착 위치를 나타내었다.

실험 부재의 거동을 측정하기 위하여 부재 내부의 인장측, 압축측 철근과 스티럽에 접착형 스트레인 게이지를 매설하였다. 즉 부재 중앙 및

1/4지점의 상·하부 주철근, 슬래브철근 스트립의 철근 변형율을 측정하였다. 또한 중앙 및 1/3 지점의 처짐을 LVDT로 측정하였다.

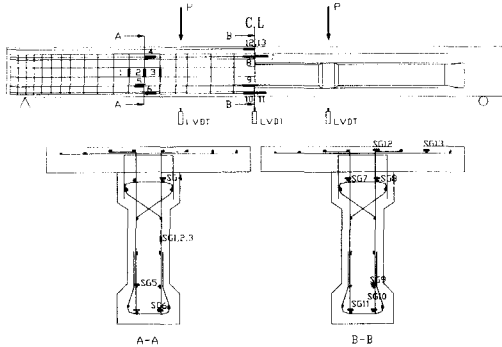


Fig. 3 Loading system of test specimens

3. 실험결과

3.1 하중-처짐

Fig. 4는 중앙점에서의 하중-처짐 곡선을 나타낸 것으로, CWEGS가 약 73ton까지 하중이 증가하여 가장 큰 내하력을 갖는 것으로 나타났으며, 파괴시의 처짐도 100mm로 가장 크게 나타나 연성 확보 측면에서도 문제가 없는 것으로 나타났다. 그 다음으로 최대하중이 큰 시험체는 CWES로서 파괴시 처짐이 100mm일 때 최대하

중이 72ton으로 나타났다. CWGSA와 CWGSB 시험체에서는 단부에서의 정착을 확실히 확보한 결과 외부강선 보강과 유사한 정도의 우수한 보강효과를 보였다.

이러한 결과는 손상된 구조물에 필요한 적절한 보강설계를 하게되면 안전성이 확보된 보강효과를 기대할 수 있으나, 보강재가 제 기능을 다 할 수 있도록 보강재의 단부정착을 확실히 해야함을 의미한다.

각 시험체의 계산된 공칭모멘트와 실험에서 측정된 최대 휨모멘트를 Table 3에서 비교하였으며 무보강보에 대한 각 보강방법에 따른 보강보의 증가율과 공칭모멘트 이후 최대 휨모멘트까지의 증가율을 제시하였다.

계산된 공칭모멘트의 경우 무보강 보에 대해 28%에서 114%까지 증가하는 것으로 나타났으며, 실제 측정된 최대 휨모멘트는 최소 0%에서 최대 26%까지 증가한 것으로 측정되었다. 이론치에 대한 실험결과치를 비교해 보면, PS강선에 대한 충분한 안전율이 적용되어 강선보강에 의한 실제측정에서의 내하력의 증가가 크게 나타난 것으로 사료된다.

단부의 부착을 강화시킨 CWGSA와 CWGSB의 경우는 외부강선 보강 시험체인 CWES와 CWEGS2와 거의 비슷한 정도의 최대 휨모멘트가 관측되어 부착식 보강 공법도 외부강선 보강

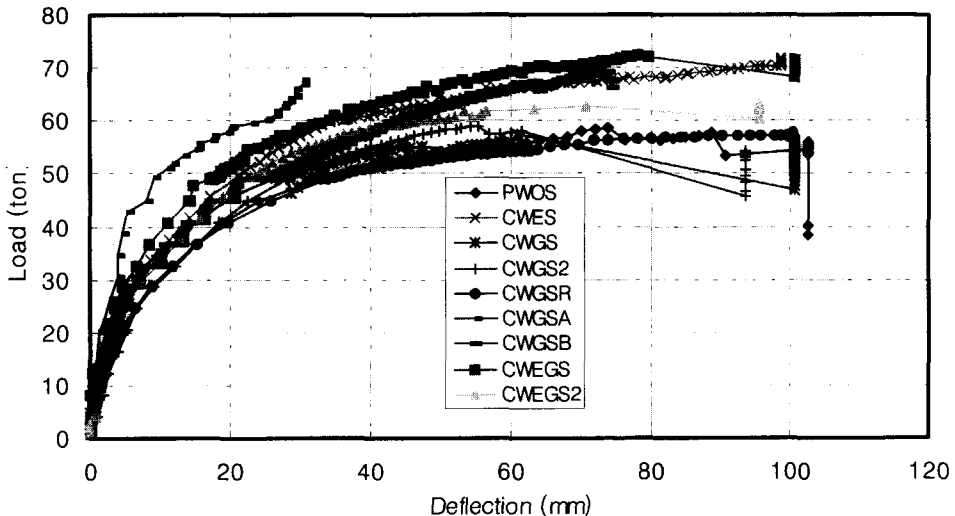


Fig. 4 Load-deflection curves at midspan

공법과 유사한 정도의 보강 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 시험된 단부 부착 방법은 보강재의 보강효과를 발휘하는데 충분한 정도의 단부정착 강도를 갖고 있는 것으로 평가할 수 있다.

공칭모멘트 이후 최대 휨모멘트까지의 증가량을 비교하기 위하여 두 모멘트의 비를 비교하면, 유리섬유 보강의 경우보다는 외부강선 보강의 경우가 더 큰 것으로 나타나 안전성 확보에서 유리한 것으로 나타났으며 두 가지 보강 방법을 병행한 경우는 이들 사이의 중간 값으로 나타났다.

Table 3 Experimental and theoretical moment

Series	Theoretical Moment		Experimental Moment		Mmax/Mn (%)
	Mn (t·m)	Rate (%)	Mmax (t·m)	Rate (%)	
PWOS	30	100	58	100	190
CWES	44	144	72	124	164
CWGS	39	128	58	100	149
CWGS2	39	129	59	102	150
CWGSR	39	128	58	100	149
CWGSA	65	214	69	119	106
CWGSB	65	214	69	119	106
CWEGS	49	156	73	126	150
CWEGS2	41	133	64	110	158

3.2 하중-변형률

실험 부재의 철근에 매설한 스트레인 게이지의 측정 결과를 정리하여 하중에 대한 변형률의 관계를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5에서는 본 연구에서의 주안점인 유리섬유 보강 시험체 중 CWGSA에 대한 결과만을 제시하였다.

CWGSA의 인장측 하중-변형률 관계 그래프에서 각 게이지의 변화는 실험이 진행됨에 따라 0 $\mu\epsilon$ 에서 2600 $\mu\epsilon$ 까지 변화하였으며, 10번 게이지의 변형률 곡선이 상대적으로 급하게 변화함을 확인할 수 있다. 이는 지간중양단면에서 최하단에 10번 게이지가 위치했기 때문에, 하부플랜지 상단부분에 매설된 9번 게이지보다 큰 변형률이 나타남을 보여준다. 각 게이지의 부착위치는 Fig. 3에서 제시되어 있다.

압축측에서의 하중-변형률 관계 그래프는 PSC 보의 상부플랜지에 위치한 스트레인 게이지의 결과를 보인 것으로, 압축 변형이 일어남에 따라 (-)값으로 결과치가 진행됨을 볼 수 있다. 하중이 50ton에 달했을 때, 변형률이 인장변형으로 변화하는 것을 볼 수 있으며, 이것은 가력하중의 증가에 따라 중립축이 상단으로 이동하여 상부플랜지에서도 인장변형이 발생한 것으로 판단된다.

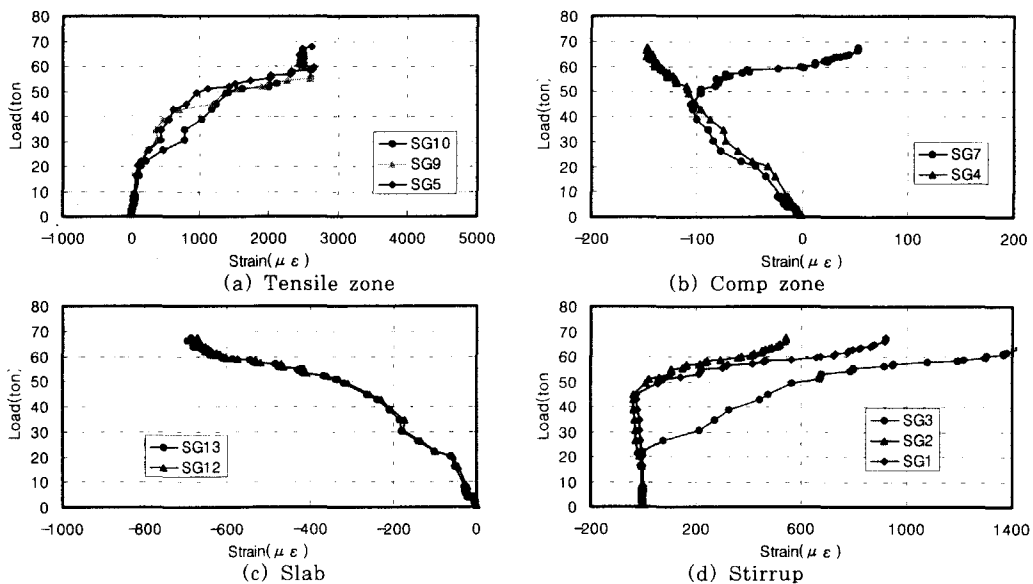


Fig. 5 Load-Deflection

철근콘크리트 슬래브에서의 하중-변형을 관계 그래프에서는 변형율의 진행 방향이 (-)측으로 나타났고, 이는 가력하중이 증가함에 따라 합성단면의 상부에 위치한 슬래브에서 압축변형이 발생함을 나타낸다.

스터럽에서의 실험결과에서는 전단균열이 발생하기 전, 재하점에 작용하는 하중에 의하여 스텐더럽에 약간의 압축응력이 작용하다가 전단균열이 발생한 후에 인장변형을 일으키며 빠른 속도로 변형율이 증가하는 것을 나타낸다.

3.3 단면의 변형

Fig.6, Fig.7은 슬래브, PSC보의 상하단에 매설된 게이지로부터 얻은 변형률 값을 합성단면의 단면도와 함께 도시하여 하중 증가에 따라 단면의 변형을 보여준다.

같은 하중에서 부재 상하단의 변형율을 연결한 값이 선형적으로 변화하므로, 측정오차를 고려하면 모든 단면에서 평면 유지의 가정이 대체로 성립함을 알 수 있다.

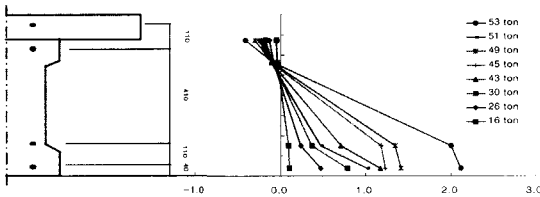


Fig. 6 Strain of section(CWGSA)

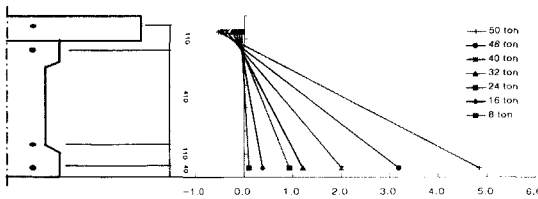


Fig. 7 Strain of section(CWGSB)

하중별 변형을 선도가 변형을 0인 Y축을 지날 때 그 하중에서의 중립축임을 감안하면 하중의 증가에 따라 점차 중립축이 PSC보의 상단으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 하중 재하 초기에 단면의 중앙 부근에서 형성된 중립축의 위치는 하

중이 증가함에 따라 압축측 철근이 위치한 곳까지 이동한다.

3.4 사용성 검토

실험 부재의 설계에 있어서 무보강부재의 설계 사용하중은 10.63t이며 보강부재는 목표 사용하중을 14.17t으로 하였다. Table 4는 부재의 사용하중에서의 중앙점의 처짐과 일정 처짐이 진행한 상태에서의 하중을 비교 가능토록 정리한 것이다. 극한 하중에서의 거동과는 달리 유리섬유 보강시험체의 중앙점 처짐은, 무보강 시험체인 PWOS의 50% 이하이며, 외부강선 보강부재는 강선 긴장으로 인한 솟음을 고려하지 않을 때 무보강부재와 비슷한 처짐을 보인다. CWGSA와 CWGSB의 경우 단부 부착을 위해 복부까지 유리섬유를 부착한 결과로 사용하중에서의 처짐이 특히 적게 나타나 사용성 측면에서의 보강효과 역시 주요함을 볼 수 있다.

병행보강이 이루어진 CWEGS 시험체에서도 유리섬유에 의한 보강에서 나타난 결과와 유사한 정도의 처짐 제어 효과가 나타났으며 유리섬유 부착 후 강선을 제거한 CWGSR의 경우에는 외부강선 보강 시험체와 같은 정도의 결과를 보인다.

처짐 20 mm에 도달하는 하중의 크기를 비교하면 앵커 작업을 실시하여 유리섬유로 보강한 부재가 가장 큰 값을 보이고, 외부 강선으로 보강한 부재는 무보강부재에 비하여 하중이 약 25% 정도 큰 값으로 유리섬유 보강부재보다는 강성이 약간 작은 것을 알 수 있다.

Table 4 Deflection and load on usability

Series	Deflection at service load (mm)	Load at deflection 20 mm (t · m)	Load at crack width 0.3 mm (t · m)
PWOS	2.8	41	40-49
CWES	2.5	49	51-56
CWGS	1.4	45	33-43
CWGS2	4.2	42	31-35
CWGSA	0.71	59	-
CWGSB	1.13	49	-
CWGSR	2.5	41	21-29
CWEGS	1.0	52	51-52
CWEGS2	2.5	47	30-50

Table 5 Summary of cracks

Series	Load(ton)	16	20	24	28	32	36	40	44	48
	No	4	8	12	14	22	27	29	31	34
PWOS	total length	42	122	355	433	621	889	1040	1172	1354
	No	-	-	3	6	11	19	21	28	29
CWES	total length	-	-	82	179	286	545	684	983	1097
	No	-	2	4	9	15	18	20	23	24
CWGS	total length	-	70	120	272	479	618	749	903	999
	No	-	5	8	16	20	26	32	32	34
CWGS2	total length	-	92	162	370	524	704	925	1030	1095
	No	-	6	11	14	19	21	24	25	31
CWGSR	total length	-	84	165	255	428	644	767	888	1166
	No	-	-	-	2	7	14	21	24	29
CWEGS	total length	-	-	-	25	103	296	545	761	1000
	No	-	-	-	10	15	16	19	23	27
CWEGS2	total length	-	-	-	292	437	514	673	826	1050

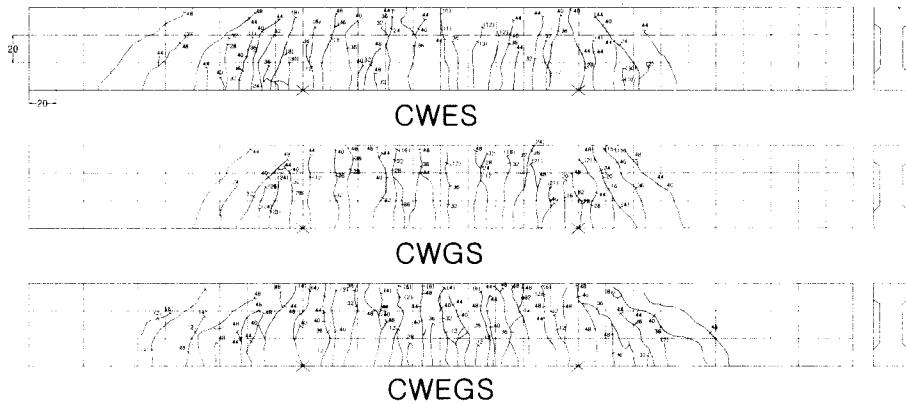


Fig. 8 Crack patterns

제한 균열폭 0.3mm에 도달하는 하중을 비교해 보면, 다소 편차가 크기는 하나 무보강 시험체나 외부강선 보강 시험체보다 유리섬유 보강 시험체가 약간 작은 값을 보인다. 가력하중이 증가함에 따라 사용하중 이후로 유리보강 시험체에서 보강재의 탈락이 발생하여 균열제한 하중이 적게 나타난 것으로 판단된다. CWGSA와 CWGSB는 균열의 측정이 이루어지지 않아 이들 시험체와의 비교는 생략되었다.

3.5 하중-균열양상

보강부재는 모두 24t·m로 재하한 뒤 하중을 제거하고 다시 재하하였으며, 최초의 균열폭은

0.02mm 정도이다. 그러나 외부강선으로 긴장후 보강한 경우는 최초의 균열폭이 0으로 된 이후에 하중의 재하에 따라서 다시 균열폭이 증가하게 된다.

하중과 균열과의 관계에서의 각 시험체의 비교를 이루기 위해 Table 5에 균열의 개수와 부재에 나타난 균열의 수직높이의 합을 정리하였다.

균열의 개수에서도 무보강부재에 비해서 유리섬유 보강이나 외부강선 보강이 이루어진 부재에서 숫자가 줄어든 것으로 나타났으며, 한결의 유리섬유를 넓게 부착하는 것이 적은 보강단면적으로 두겹을 부착하는 것보다 균열조절 측면에서 우수한 효과를 보임을 알 수 있다. 충분한 유리섬유 보강으로 하부플랜지를 감싸는 형태의 보강이

이루어진 CWGSA와 CWGSB의 시험체에서는 보강재가 덮여 있는 관계로 균열의 측정이 이루어지지 않았다.

Fig. 8에서 최종 파괴후 시험체의 균열도를 나타내었으며, 보강종류별 대표되는 시험체를 선별하여 CWES, CWGS, CWEGS를 도시하였다. 또한 Fig. 9는 각 시험체의 균열양상의 비교를 위하여 시험체별 하중과 균열의 총길이의 관계를 도시한 것으로, CWEGS 시험체의 균열제어 효과가 가장 좋게 나타났으며, 외부강선보강 시험체와 유리섬유보강 시험체의 순인 것으로 판단된다.

이는 외부강선에 의한 보강이 이루어진 경우 강선에 의한 압축력이 부재에 가해지는 반면 유리섬유보강이 이루어진 경우는 유리섬유가 하부 플랜지에서 인장력을 받아줌으로써 철근콘크리트 보 내지는 파셜프리스트레스트보의 거동을 하므로 유리섬유보강에서 균열제어효과가 다소 떨어지는 것으로 해석할 수 있다.

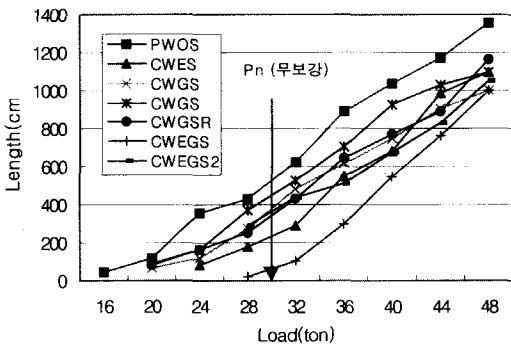


Fig. 9 Crack total length

4. 결론

본 연구는 손상된 프리스트레스트 콘크리트 교량에 대한 유리섬유의 보강 효과를 검증하기 위하여 무보강 시험체와 선행 하중의 재하로 균열이 발생한 8개의 보강시험체등 총 9개의 시험체에 대하여 유리섬유 보강, 외부강선 보강 및 두가지 보강 방법을 병행한 보강을 실시하여 각 보강 방법의 효과를 비교하여 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1) 파괴에 이르기까지의 최대 하중을 비교한 결과, 외부강선 보강이 이루어진 시험체와 유리섬

유 부착에서 정착단의 앵커 작업으로 충분한 부착력을 확보한 시험체에서 가장 우수한 보강효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 외부 긴장력의 크기에 한계가 있으므로 이들 두가지 방법을 병용하는 보강방법도 효과적인 것으로 나타났다.

2) 유리섬유 보강부재의 경우에는 최대 하중 도달 이전에 정착 파괴가 발생하여 단부정착장치의 보강이 매우 중요함을 알 수 있었다. 본 실험에서와 같이 섬유 앵커나 볼트 앵커 작업, 또는 부재하단을 둘러싸는 형태의 재킷앵커를 부착하여 단부에서의 부착력을 강화하여야 한다.

3) 외부강선에 의한 보강은 전형적인 프리스트레스트보의 거동이지만 유리섬유보강에 의한 보강은 철근콘크리트보와 같은 거동을 하므로 효과적인 균열제어를 위해서는 두가지 보강이 병행되는 것이 유력하다.

감사의 글

본 실험을 수행함에 있어서 실험장비 및 인력을 아낌없이 지원해주신 부산대학교 정진환교수님 이하 연구원 여러분들께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한만엽, 강원호, 정영수, 정진환, "유리섬유를 이용한 손상된 프리스트레스트 콘크리트보의 보강공법 개발연구", 아주대학교 토목기술연구센터, 1998.
2. 한만엽, 박선규, 황의승, "당첨교가교의 보강방안 및 보강 후 내하력평가 연구", 아주대학교 토목기술연구센터, 1998.
3. Philip A.Ritchie, David A.thomas, Le-Wu Lu Guy M.Connolly, "External Reinforcement of Concrete Beam using Fiber Reinforced Plastics", ACI Structural Journal, July-August, 1991, pp.490~500
4. Saadatmanesh H., Ehsani M. "RC beams strengthened with GFRP plates" Part I and Part II Journal of Structural Engineering, ASCE, vol.117, no.11, Nov. 1994, pp.3434~3455
5. Arduini M., Di Tommaso A., Manfroni O., "Fracture Mechanisms of Concrete Beam bonded with composite plates", 2.Int.

Symposium on: Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures FRPRCS-2, Ghent, 1995, pp.483~491

6. Chajes M.J., Thomson T.A., Januszka T.F., Finch W., Flexural strengthening of concrete beams using externally bonded composite materials". Construction and Building Materials, 1994, Vol. 8, No.3 pp.1212~1225

요 약

현재 국내에는 지난 35년간 프리스트레스트 콘크리트보를 이용한 합성형 교량이 매우 널리 건설, 사용되어 왔으나, 교통량의 증가와 차량하중의 증가로 노후화가 점차 가속화되고 있는 형편이다. 본 연구에서는 유리섬유를 이용하여 손상된 프리스트레스트 콘크리트 교량을 보강하는 방법의 효과를 평가하기 위하여 무보강 표준시험체와 선행 하중의 재하로 균열이 발생한 8개의 시험체에 대하여 유리섬유 보강, 외부강선 보강 및 두가지 보강 방법을 병행한 보강을 실시하여 각 보강방법의 효과를 비교, 분석하였다. 실험결과, 최대하중은 외부강선 보강 시험체와 유리섬유 보강 시험체가 모두 거의 유사한 정도의 보강효과를 발휘함으로써 유리섬유 보강공법이 손상된 프리스트레스트 콘크리트 교량의 보강에 적용될 수 있는 것으로 판명되었다. 외부강선 보강공법에서의 가장 큰 문제가 단부의 정착장치인 것과 마찬가지로 유리섬유 보강 공법의 경우에도 최대하중에 도달하기 이전에 보강재의 부착이 파괴되지 않도록 적절한 방법을 선정하는 것이 매우 중요하며, 본 연구에서 검증된 두가지 방법이 단부의 정착기능을 충분히 발휘하는 것으로 판명되어, 이들 방법들이 적절히 사용될 경우에는 설계된 내하력의 증가를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

(접수일자 : 1998.11.11)