

## 보강판으로 외부부착 보강된 교량 바닥판의 성능향상을 위한 변수 해석

심종성<sup>1)\*</sup> · 오홍섭<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 토목·환경공학과

(2002년 1월 28일 원고접수, 2002년 5월 23일 심사완료)

### Analysis of Strengthening Variables for Strengthened Bridge Decks by Externally Bonded Sheet

Jong-sung Sim<sup>1)\*</sup> and Hong-Seob Oh<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil and Environment Engineering, Hanyang University, Ansan, 425-791, Korea

(Received January 28, 2002, Accepted May 23, 2002)

#### ABSTRACT

The concrete bridge decks on the main girder will usually develop initial cracks in the longitudinal or the transverse direction due to dry shrinkage and temperature change, and as the bridge decks age, the crack will gradually develop in different directions due to repeated cyclic loads. The strengthening direction of the concrete bridge deck is a very important factor in improving proper structural behavior. Therefore, in this study, theoretical analyses of strengthened bridge decks were performed using the nonlinear finite element method. To improve the accuracy of the analytical result, boundary conditions and material property of strengthening material was simulated by laboratory condition and test results, respectively. The effect of the strengthening direction and the amount of strengthening material were estimated and compared to the experimental results. The efficiency of the strengthened bridge decks by strengthening variables such as the amount, width and thickness of CFS was observed.

**Keywords :** bridge deck, carbon fiber sheet, nonlinear finite element method, strengthening variables

#### 1. 서 론

최근 국내의 많은 교량들이 사용연한이 경과함에 따라 내구성과 내하력이 저하됨으로써 교량의 보수 및 보강공법의 적용사례가 꾸준히 증가하고 있다. 그러나 현재 적용되고 있는 보강공법들은 보 및 기둥에 대한 시험결과를 기초로 하여 구조물의 특성에 관계없이 적용되고 있는 상태이다<sup>2)</sup>. 특히 교량바닥판의 경우, 손상단계 및 지점과 거더 등의 경계조건 등에 따라 거동 특성이 변화되는 구조물임에도 불구하고 실제 현장에서는 바닥판의 거동 특성을 고려하지 않은 상태에서 보 구조물과 동일한 공법을 적용함으로써 보강재의 보강효과를 충분히 획득하지 못하고 있다<sup>3-5)</sup>. 따라서 최근 교량 바닥판의 보강기법에 대한 연구가 진행되고 있으나, 아직까지는 실험적 연구가 주로 수행되고 있다<sup>3-6)</sup>.

정란 외<sup>5)</sup>는 철근콘크리트 슬래브시험체에 정적 균열(0.5 mm, 3.0 mm)을 유발시킨 후 강판 및 탄소섬유쉬트로 보강을 실시하였으며, 실험결과, 무보강 시험체와 비교하여

보강시험체가 40~108%정도의 보강효과가 있는 것으로 나타났다. 정영수 외<sup>6)</sup>는 20년 이상 사용된 교량바닥판에 보강재량, 보강방향 및 단부정착 유무를 실험변수로 하여 보강효과를 검증하였으나, 보강전의 손상정도에 따라 편차가 큰 것으로 나타났다. 심종성 외<sup>3,4)</sup>는 보강방향과 보강량에 따른 바닥판의 보강효과를 시험적으로 분석하고 이를 항복선 해석을 통하여 해석하고자 하였다.

그러나 현재까지의 연구들이 제한적인 시험변수에 대한 거동분석과 내하력 보강효율성 등에 관심이 집중되어 있기 때문에 보강설계 및 보강기법 제시를 위한 구체적인 보강변수에 대한 영향분석은 이루어지지 않고 있는 상태이다<sup>3-6)</sup>. 따라서 본 연구에서는 바닥판의 보강설계시 고려되어야 하는 보강방향에 대한 보강재량, 보강재 폭과 보강재 두께 등의 변화에 따른 바닥판의 거동 특성을 분석하고자 하였다.

바닥판 보강변수를 고찰하기 위하여 보강재는 탄소섬유쉬트를 기본으로 하였으며, 강판에 의한 영향을 추가적으로 검토하였다. 또한 비선형 유한요소 해석의 정확성은 심종성<sup>4)</sup>의 시험결과와의 검증을 통하여 타당성을 획득하고자 하였으며, 검증된 모델을 적용하여 변수별 유한요소 해석결과를 하중-변위 및 응력분포 등에 대하여 검토하였다.

\* Corresponding author

Tel : 031-400-5143 Fax : 031-400-5140

E-mail : jssim@hanyang.ac.kr

## 2. 보강된 바닥판의 비선형 해석

### 2.1 바닥판의 유한요소해석 모델

본 연구에서는 심중성 외<sup>4)</sup>에 의하여 수행된 바닥판 시험체에 대한 정적 시험 결과와 본 연구에서 적용된 유한요소 모델의 해석결과를 비교 분석하였으며, 그 결과를 기초로 하여 바닥판의 보강변수에 대한 영향을 분석하고자 하였다. 심중성 외<sup>4)</sup>에 의하여 수행된 바닥판 시험체의 제원과 사용된 재료의 성질은 Fig. 1과 Table 1과 같으며, 시험체별 보강변수는 Table 2에 나타내었다.

보강변수 중 DI은 배력철근 방향으로 시험체 하면 전체를 전면보강한 경우를 나타내며, S1은 15 cm의 탄소섬유슈트를 strip 형식으로 보강한 경우를 나타내는 것이다. 변수 중 S2와 D2는 각각 S1과 DI 보강량의 1/2을 strip 형식으로 보강한 것을 의미한다. 해석시 시험체의 하중재하는 정적시험시와 동일한 방법으로 가력하였다.

본 연구에서는 교량 바닥판 시험체의 해석모델을 8개의 적분점을 갖는 3차원 solid요소를 사용하여 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 해석모델 적용시 해석의 정확성을 위하여 슬래브와 양단부의 거더는 각각 3개와 4개의 층으로 구성하였으며, 철근은 실제와 동일한 간격으로 모델링하였다. 콘크리트 매트릭스에 접착되어 있는 에폭시와 보강재는 하중의 크기 정도와 균열형태 등에 따라 slip 또는 debonding 현상이 부분적으로 발생하나 해석시에는 이러한 영향을 미소한 것으로 가정하여 철근과 같이 콘크리트 모체에 완전부착된 것으로 가정하였다.

### 2.2 재료모델

#### 2.2.1 콘크리트 및 접착제

본 연구에서 사용한 시험체와 같이 바닥판과 양단의 거더가 일체로 거동하는 콘크리트 구조물을 3차원 솔리드 모델로 해석할 경우 일반적으로 사용되는 일방향 콘크리

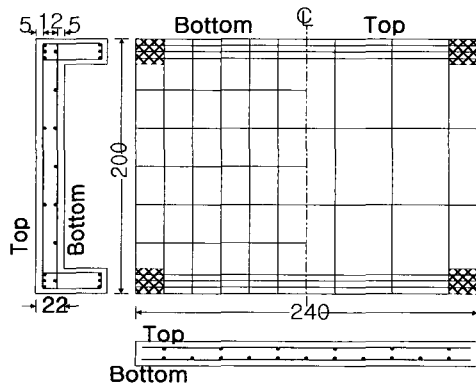


Fig. 1 Detail of specimen(unit : cm)

Table 1 Material properties

	Yielding strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ultimate strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Young's modulus (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ultimate strain (%)
Rebar	3,000	3,500	2.04×10 <sup>6</sup>	-
CFS	-	35,500	2.35×10 <sup>6</sup>	1.5
Epoxy		900	71,400	
Concrete		310	264,102	

Table 2 Test variables of deck specimens

Specimen	Strengthening ratio ( $\frac{A_{cfs}}{h \times b} \cdot 10^{-4}$ )	
	Main rebar direction	Distribution rebar direction
CON	-	-
CS-D1	-	4.688
CS-D2	-	2.344
CS-S1D1	1.875	4.688
CS-S2D2	0.9375	2.344
CS-S1D2	1.875	2.344

where,  $A_{cfs}$  is area of CFS,  $h$  is the height of deck specimen,  $b$  is width of decks

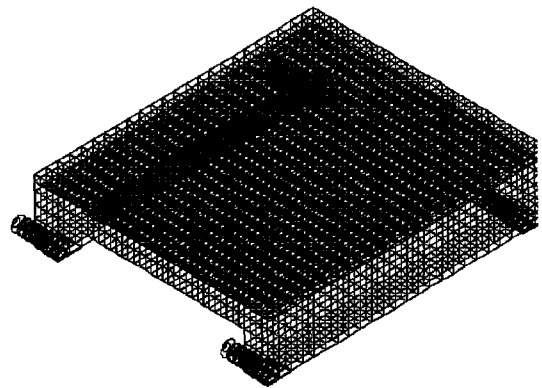


Fig. 2 FE model of deck specimen

트 재료모델은 균열 발생이후 이방향 응력에 의하여 해석 결과가 수렴되지 않는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 콘크리트가 받는 삼축응력을 비교적 정확하게 모사할 수 있고 취성재료의 해석에 적합한 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 변환시킨 Willam-Menétrey<sup>7)</sup>의 모델을 적용하였으며, 적용된 모델의 파괴기준은 식 (1)과 같다.

$$F(\xi_c, \rho_c, \theta) = [\sqrt{1.5} \frac{\rho}{f_{ck}}]^2 + m[\frac{\rho_c}{\sqrt{6}f_{ck}} r(\theta, e) + \frac{\xi_c}{\sqrt{3}f_{ck}}] - c = 0 \quad (1)$$

$$r(\theta, e) = \frac{4(1-e^2)\cos^2\theta + (2e-1)^2}{2(1-e^2)\cos\theta + (2e-1)} \sqrt{4(12-e^2)\cos^2\theta + 5e^2 - 4e} \quad (2)$$

여기서,  $\xi_c$ 와  $\rho_c$ 는 각각 강도상수이며,  $\theta$ 는 응력 축의 각을 나타내고 있다. 이축강도의 파괴기준에서 편심  $e$ 는 CEB에서는  $0.5 < e \leq 0.6$  으로 제한하고 있으며, 본 연구에서는 보통강도 콘크리트에 적합하다고 연구된 0.52를 적용하여 해석을 수행하였다<sup>7,8)</sup>.

해석시 사용된 콘크리트의 일축압축강도는 재료시험시 측정된  $310 \text{ kgf/cm}^2$ 을 적용하였으며, 인장강도와 압축강도의 비가 1/9인 콘크리트 모델을 적용하였다.

모체 콘크리트와 보강재를 접착시키는 에폭시는 재료시험자료를 통하여 강도 및 탄성계수를 도출하여 콘크리트와 유사한 재료모델을 사용하여 모델링하였으며 콘크리트에 완전부착되어 있는 것으로 가정하였다.

### 2.2.2 철근 및 보강재

콘크리트 속의 철근의 응력과 변형률은 철근만의 응력-변형률관계와는 다르며, 일반적으로 Fig. 3과 같은 관계를 나타낸다<sup>9)</sup>.

Fig. 3에서  $f_y$ 는 철근 인장실험을 통한 철근의 항복응력이며,  $f_y'$ 는 철근콘크리트 내의 철근의 항복응력을 나타내는 것이다. 콘크리트내의 철근은 상대적으로 긴 길이 내에 균열 등이 존재하게 되어 평균응력-변형률 분포에 따라 순수철근만의 인장응력-변형률관계 상의 항복강도보다 낮은 응력상태에서 항복하게 되며, 따라서 smeared crack 모델에 의한 구조해석시에는 철근의 항복강도를 적용하는 것보다 Fig. 3의  $f_y'$ 를 철근의 항복강도로 가정하는 것이 타당하다<sup>9)</sup>. 따라서 본 연구에서는 재료시험을 통하여 철근의 항복강도( $f_y$ )를 구하였으며, 구조해석시에는 실제 콘크리트 재료 내에서의 항복응력 저하 현상을 모델링하기 위하여 철근의 항복강도를  $f_y'$ 로 가정한 bilinear 모델을 사용하여 철근을 모델링하였다<sup>9)</sup>. 구조해석시 사용한 철근의 항복강도는 콘크리트 속의 철근의 변형률 경화율을  $0.01 E_u$ 로 가정하여 산정하였으며, 최대 변형률은  $0.07$ 로 모델링하였다<sup>9)</sup>.

CFS 보강재의 이상적인 일축 응력-변형률관계는 Fig. 4와 같이 완전 탄성체로서 보강재 파괴시까지 선형증가하는 것으로 가정할 수 있으나, 교량 바닥판과 같이 이방향 거동을 하는 부재에서는 CFS의 직교 이방성을 정확하게 모델링하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 CFS의 섬유방향으로의 1축 탄성계수는 에폭시에 함침된 CFS의 인장시험을 통한 탄성계수로 가정하였으며, 섬유축에 직각인 2축 탄성계수는 CFS의 강도를 무시하고 에폭시의 탄성계수만을 고려하여 모델링하였다.

유한요소해석시 콘크리트 외부에 부착된 보강재의 slip, debonding 및 rip-off에 의한 초기파괴형태를 정확히 반영하기 위해서는 보강재와 에폭시, 에폭시와 콘크리트의 계

면을 spring 또는 linear bar 등으로 모델링하는 것이 보다 정확한 해석결과를 도출할 수 있으나, 섬유보강재의 신뢰성 있는 bond-slip 모델이 아직 제시되어 있지 않고 3차원 해석시 계면을 spring으로 모델링 할 경우 spring 요소의 간격 및 물성을 등을 고려할 때 해석상의 시간의 비효율성과 수렴성이 정확도보다 현격히 낮아지게 된다. 구조해석시 CFS의 위치는 실제 시험체와 같은 위치 및 폭으로 보강된 것으로 모델링하였으며, 보강재의 slip과 debonding을 고려하지 않고 콘크리트에 완전 부착되어 있는 것으로 가정하였다.

### 2.2.3 해석모델

바닥판과 같은 슬래브 구조를 Fig. 2와 같은 3차원 solid모델로 해석할 경우, 지점조건에 따라 실제 구조물의 거동과 많은 차이를 나타내는 것으로 기존의 연구에서 나타나고 있다<sup>10,11)</sup>. 특히 실제 구조물에서는 단부의 국부 파괴 등을 피하기 위하여 구조물의 지점부에 강판 또는 탄성 지점 등을 설치하나 구조해석시에는 이를 무시하고 이상적인 힌지-로올러로 모델링하거나 무한 강성의 스프링으로 지점 경계조건을 가정하여 구조해석을 수행하고 있다. 이 경우에는 해석결과가 실제 구조물의 강성보다 크게 해석되거나 지점부의 국부 파괴로 인하여 정확한 해석이 어려운 것이 사실이다. 따라서 몇몇 연구자들이 실제와 유사한 지점 경계조건을 가정할 수 있도록 Fig. 5와 같은 회전 스프링을 이용한 구조해석모델을 사용하였으나,

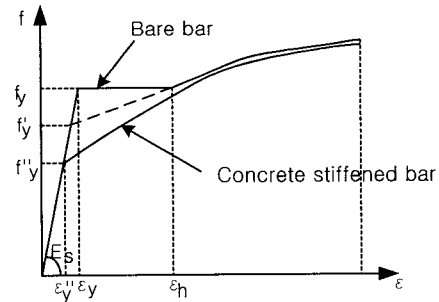


Fig. 3 Stress-strain curve of rebar

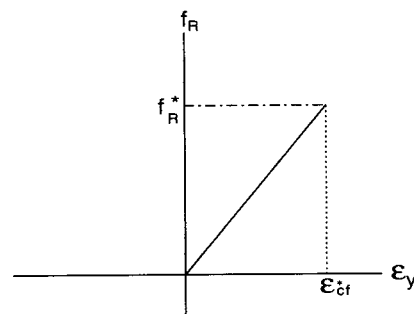


Fig. 4 Stress-strain curve of carbon fiber sheet

스프링의 강성을 정확하게 모델링하기 위해서는 사전 해석을 수행하여야만 정확한 재료성질을 도출할 수 있는 문제점이 있다<sup>11)</sup>. 따라서 설계 및 사전 해석시 이와 같은 방법을 적용하기에는 많은 가정과 사전 반복해석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 지점경계조건을 보다 정확하게 모델링 할 수 있도록 탄성지점을 Fig. 6과 같이 일정 응력 이상에서는 변형이 발생하지 않는 고탄성 압축재료를 가정하였으며, 응력-변형률관계는 시험시 지점부의 변형을 측정하여 모델링하였다.

Fig. 1의 바닥판 시험체에 대하여 Fig. 2와 같은 해석모델과 동일한 재료모델을 사용하고 지점조건을 변화시켜 해석한 결과 힌지-롤러 조건의 경우 시험시 발생하는 거더의 교축직각방향 변형을 정확히 반영할 수 없기 때문에 시험결과보다 강성이 크게 나타났으며, 비선형 스프링에 의한 해석에서도 이와 유사한 결과를 나타내는 것으로 관찰되었다. 즉, Fig. 7과 같이 비선형 스프링을 사용할 경우 시험체의 교축방향 회전( $\theta_x$ )과 함께 거더의 교축직각방향 회전각( $\theta_z$ )을 정확히 결정하여야 하기 때문에 실제 결과와는 상이한 해석결과가 나타나게 된다. 이에 반하여 본 연구에서 사용된 비선형 탄성지점의 경우에는 실제 시험시의 조건과 동일한 변형이 발생할 수 있도록 모델링하였기 때문에 회전각에 대한 추가적인 구속 또는 분석이 필요하지 않으며, 시험결과와도 거의 일치하는 것으로 해석되었다. Fig. 8에는 힌지-롤러, 비선형 스프링 및 본 연구에서 사용된 탄성지점에 대한 바닥판시험체의 해석결과를 나타내었으며 탄성지점의 경우가 시험체와 가장 유사한 해석 결과를 나타내었다.

### 3. 구조해석모델의 검증

#### 3.1 하중-변위관계

앞에서 기술된 모델을 적용하여 시험체의 거동을 해석하였으며, 무보강시험체 및 보강시험체의 해석 결과는 Table 3과 Fig. 9~11에 나타내었다.

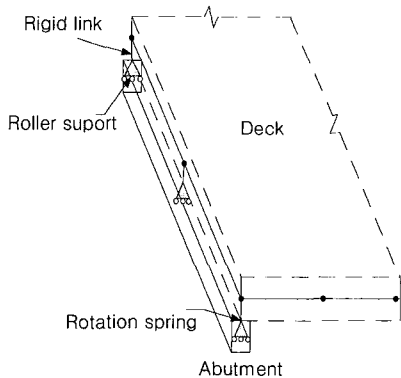


Fig. 5 Rotation spring model of deck support<sup>11)</sup>

보강판으로 외부부착 보강된 교량 바닥판의 성능향상을 위한 변수 해석

CON시험체의 경우 시험체 콘크리트 균열하중인 13 tonf까지는 해석에 의한 강성이 상대적으로 크게 나타났으나, 이후 주철근 및 배력철근 항복전 영역에서는 시험결과와 거의 유사한 것으로 나타나 본 연구에서 적용된 모델이 실제 바닥판 시험체 해석에 적합한 것으로 나타났다. 그러나 항복이후의 거동에서 시험 결과와 해석치가 차이가 있는 것으로 나타났으며, 이는 콘크리트모델과 탄성지점에 의한 차이인 것으로 판단되며, 특히 본 연구에서 적용한 콘크리트모델은 인장과 압축응력에 대하여 충분한

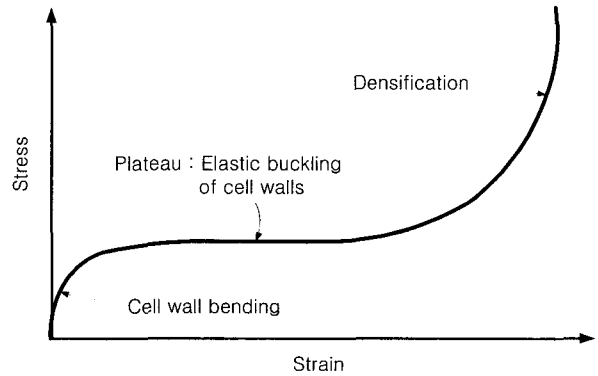


Fig. 6 Compressive stress-strain curve of elastic support

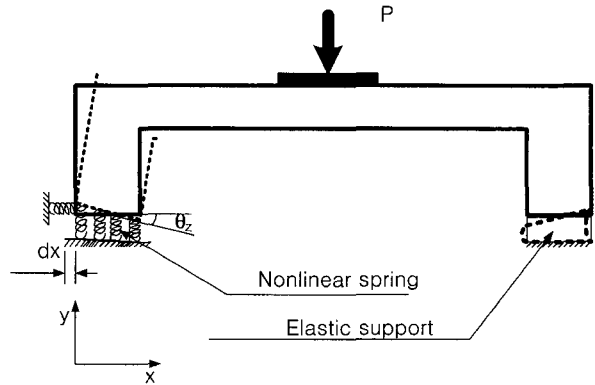


Fig. 7 Effect of deformation and support condition

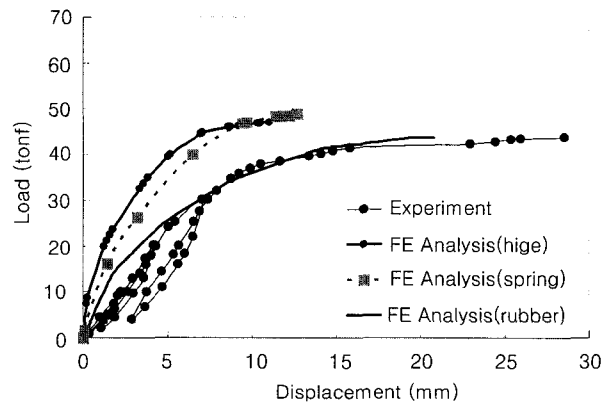


Fig. 8 FE analysis of deck specimen with varying support conditions

Table 3 Test and FE analysis results of deck specimens

	Failure pattern	Yield loads(tonf)				Peak loads(tonf)	
		Main rebar		Distribution rebar		Exp.	FEA
		Exp.	FEA	Exp.	FEA		
CON	Two-Directional crack and flexural-Shear	25	24	37.5	37	47	52
CS-D1	One-Directional crack, Interface debonding of CFS and compressive failure	37	35	-	-	54	55
CS-D2	One-Directional crack and flexural-Shear	32	35	40.0	-	54	55
CS-S1D1	Punching shear failure and Interface Debonding of CFS	34	37	-	-	53	72
CS-S1D2	Two-Directional crack and flexural-Shear	45	35	58.6	55	59	71
CS-S2D2	Two-Directional crack and flexural-Shear	36	35	46.1	45	56	65

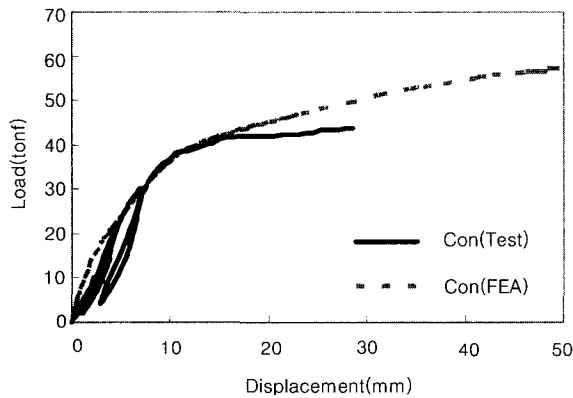


Fig. 9 Load-displacement relationship of non-strengthened specimen

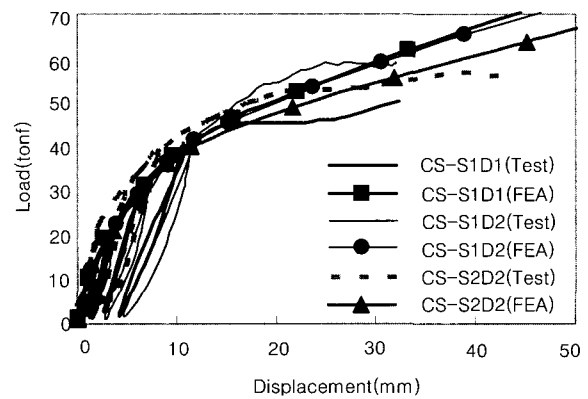


Fig. 11 Load-displacement relationship of two directionally strengthened specimens

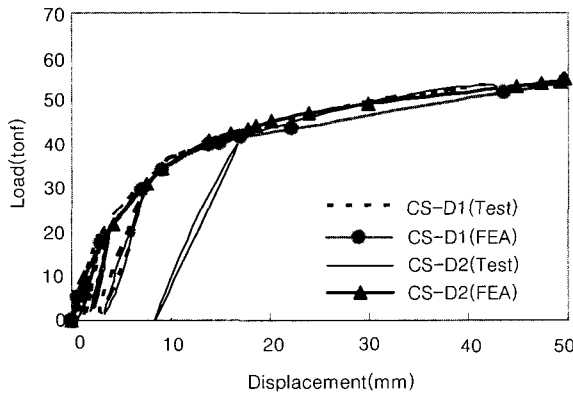


Fig. 10 Load-displacement relationship of one directionally strengthened specimen

연성을 갖도록 모델링되었기 때문에 실제 콘크리트 구조물에서 발생하는 균열 후 또는 압축단에서의 파괴가 충분히 모사되지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

배력철근 방향으로만 보강된 일방향 보강시험체의 경우 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 시험결과와 해석결과 모두 보강량에 관계없이 전체적인 거동이 유사한 것으로 나타났으며, 이는 주철근방향에 비하여 배력철근 방향의 보강량(배력철근+보강재) 이 상대적으로 높았기 때문에 하중 증가에 따라 주철근 항복 후 배력철근의 항복으로 이르는

무보강 바닥판의 일반적인 파괴양상을 따르지 않고 주철근 항복 일방향 파괴되는 형태를 나타내었기 때문인 것으로 판단된다.

이에 반하여 이방향으로 보강된 시험체의 경우는 시험과 해석 모두 Fig. 11과 같이 보강량이 증가함에 따라 내하력이 증가하는 것으로 나타났으나, 콘크리트 전단내력 부족에 의하여 시험시 펀칭전단 파괴된 CS-S1D1 시험체의 해석결과는 콘크리트의 전단파괴가 충분히 모사되지 않은 것으로 나타났다. 그러나 표 3과 같이 CS-S1D2와 CS-S2D2 시험체의 항복강도는 시험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 파괴하중과 파괴 양상의 경우에는 보강재의 bond-slip 관계와 debonding 파괴가 반영되지 않았기 때문에 실제 결과와는 차이가 있는 것으로 나타났다.

### 3.2 하중변화에 따른 응력분포

Fig. 12에는 무보강(CON) 시험체의 변위분포를 나타내었으며, 다른 시험체의 경우에도 보강방향 및 보강량에 관계없이 유사한 결과를 나타내었다. 무보강(CON) 시험체의 파괴시 처짐형태는 일방향 처짐이 지배적인 것으로 나타났다.

Fig. 13~15에는 무보강(CON) 시험체와 보강방향에 따

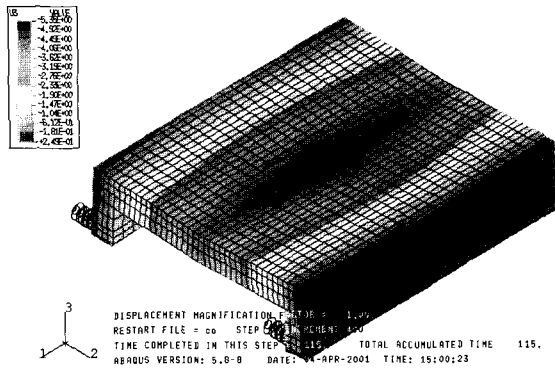


Fig. 12 Deformed shape of CON specimen

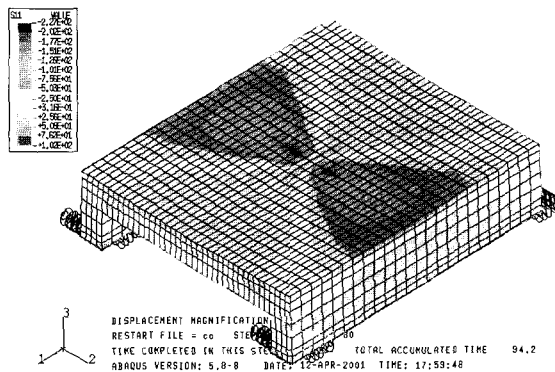


Fig. 13 Stress contour of CON specimen

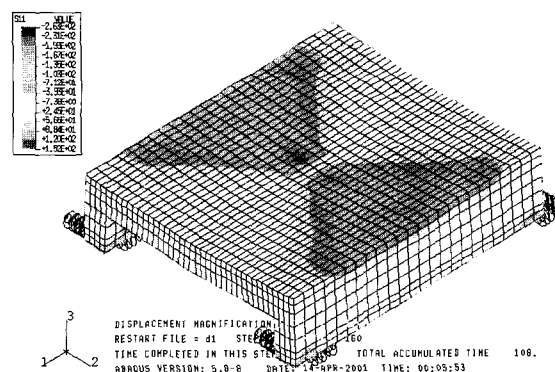


Fig. 14 Stress contour of CS-D1 specimen

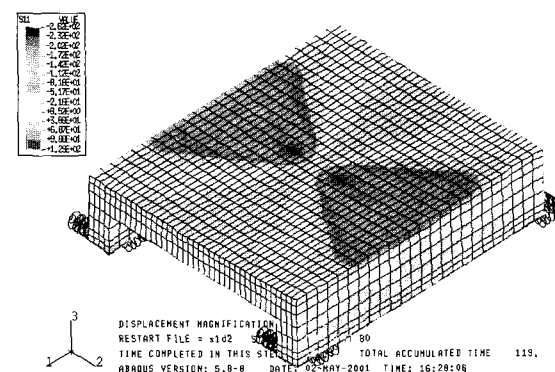


Fig. 15 Stress contour of CS-S1D2 specimen

른 각 시험체의 항복 하중 작용시의 응력분포를 나타낸 것으로 보강변수에 따라 파괴형태가 변화되는 것으로 나타났다.

특히 CON시험체와 S1D2시험체의 경우 일방향 파괴형태에서 이방향 파괴형태로 변화되는 것으로 나타났으나, D1시험체의 경우에는 상대적으로 일방향 파괴형태에서 파괴가 발생하는 것으로 해석되었다. 따라서 파괴형태의 경우 시험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 응력분포를 고려하여 항복선 해석에 의한 설계시의 내하력평가가 가능한 것으로 판단된다.

#### 4. 설계변수 분석

본 연구에서는 보강변수에 따른 거동 차이 및 응력분포의 영향을 보다 정확하게 고찰하기 위하여 각 보강변수별 유한요소해석을 실시하였다. Table 4에는 유한요소해석시 고려된 각 보강변수와 해석에 의한 각 변수의 항복하중 및 최대하중을 나타내었으며, 해석 후 보강재량, 보강방향 및 보강재 종류 등에 대한 영향을 하중 변위 및 하중 변형률 분포에 대하여 비교, 분석하였다.

##### 4.1 보강방향의 영향

Fig. 16에는 본 연구에서 적용된 바닥판 시험체에 주철근방향 만을 보강한 경우(SALL, 2-SALL 그리고 2-S1)와 배력철근방향만을 보강한 경우(D1)의 구조해석에 의한 하중-변위관계를 나타낸 것이다. 기존의 바닥판의 가정과 같

Table 4 Strengthening variables and results of FE analysis

Variables	Strengthening ratio		Strengthening type	Yield loads(tonf)	
	$\frac{A_{plate}}{h \times b}, \times 10^{-4}$			M	D
SALL	5.25	-	All	32	41
SA-ST	5.25	-	Strip	36	55
2-SALL	10.	-	All	33	47
2-S1	3.75	-	Strip	31	41
SDA-ST	5.25	2.67	Strip	37	57
2-S1D2	3.75	4.69	Strip	35	58
2-S2D2	1.875	4.69	Strip	33	55
S1-2D2	1.875	4.69	Strip	34	50
S2-2D2	0.9375	4.69	Strip	33	50
S1D2-5	1.875	2.344	Strip	32	57
S1D2-25	1.875	2.344	Strip	30	45
STEEL	91.0	91.0	Strip	-	-

where,  $A_{plate}$  means area of the strengthening material,  $h$  is height of deck,  $b$  is width of decks in the transverse and longitudinal direction,  $M$  and  $D$  means main rebar direction and distribution rebar direction, respectively

이 배력철근방향 만을 보강하는 경우에 비하여 주철근방향 만을 보강하는 경우가 Table 4에 나타낸 것과 같이 상대적으로 강도를 증진시키는 것으로 나타났다.

그러나 SALL 및 2-S1에 비하여 보강량이 2배 이상 증가된 2-SALL의 경우, 보강효과는 크지 않은 것으로 나타났으며, 전면보강된 SALL과 상대적으로 보강량이 작으나 strip 형식으로 보강된 2-S1의 경우 2-S1의 내하력이 상대적으로 큰 것으로 해석되어 strip 보강방법의 경우가 응력분배 등에 있어 전면보강방법에 비하여 효율적인 것으로 판단된다.

Fig. 17에는 Fig. 16에 나타낸 각 변수들의 하중 30 tonf 부근에서의 시험체 중앙의 전체 시간에 대한 철근변형률 분포를 나타낸 것으로서 보강방향에 따라 철근의 변형률 감소 정도는 크게 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 SALL과 2-S1의 경우 하중-변위관계에서 나타난 것과 같이 배력철근의 변형율이 약간의 차이가 있는 것으로 나타났으며, D1시험체의 경우에도 배력철근 방향 보강량으로 인하여 변형이 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 보강방법의 영향

Fig. 18은 보강방법에 따른 하중-변위관계로서 동일한 보강량에 대하여 전면보강인 경우와 strip 보강인 경우를 보강방향에 대하여 각각 비교한 것으로서 전면보강방법보다는 strip으로 보강한 경우의 강도 및 강성이 우수한 것으로 나타나고 있다.

그러나 SDA-ST와 같이 보강량이 일정량을 초과하는 경우에는 보강효과의 증가정도가 감소하는 것으로 나타났으며, 상대적으로 전체 보강량이 작은 SID2-5의 경우 SA-ST와 SDA-ST의 하중-변위관계와 크게 차이가 없는 것으로 나타나 방향에 따른 보강량을 적절히 변화시킴으로써 내하력을 효율적으로 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

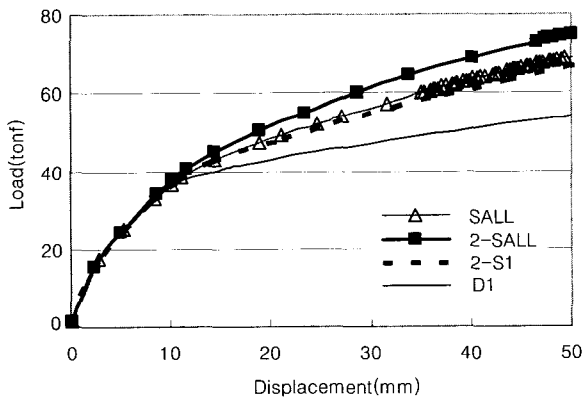
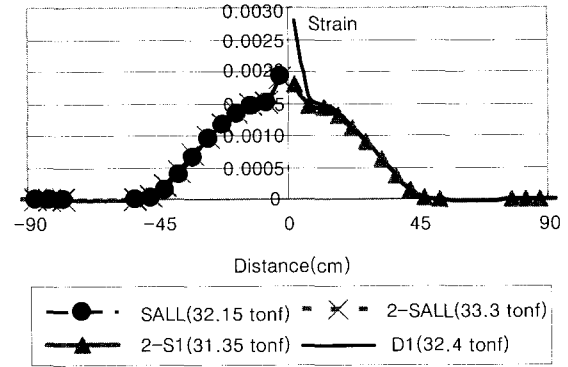
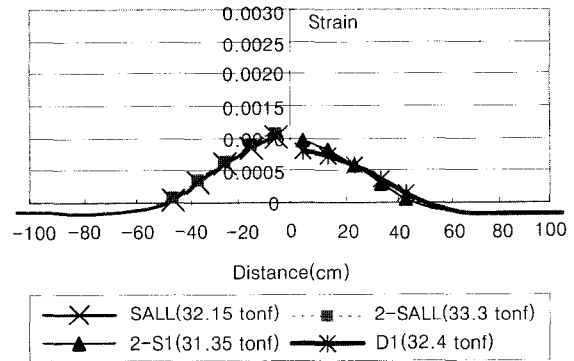


Fig. 16 Load-displacement relationship of deck specimens depending on strengthening direction of CFS

Fig. 19는 Fig. 18의 각 변수의 바닥판 중앙지간에서의 주철근과 배력철근 변형률 분포를 나타낸 것이다. 주철근의 경우, 전면보강 및 strip 보강방법 상의 차이가 나타나고 있으며, SA-ST와 SDA-ST의 경우와 같이 strip 보강방법을 적용한 경우 주철근의 응력부담을 줄일 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 배력철근의 경우에는 하중의 크기가 배력철근 항복하중까지는 도달하지 못하였기 때문에



(a) Strain of main rebar



(b) Strain of distribution rebar

Fig. 17 Strain distribution of rebar at mid span of deck specimens depending on strengthening direction of CFS

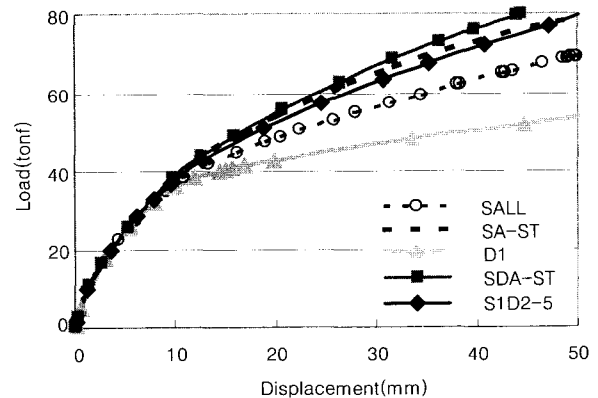
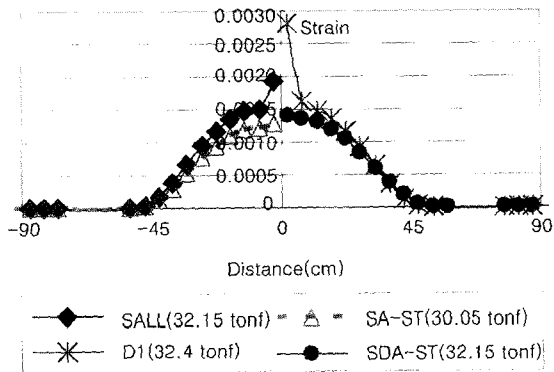


Fig. 18 Load-displacement relationship of deck specimens with varying strengthening type of CFS

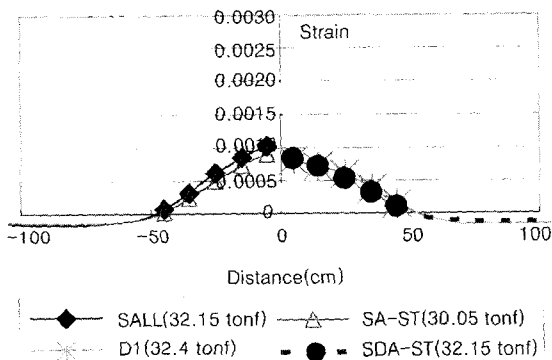
보강방법에 따라 변형률의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

### 4.3 보강량 및 보강두께의 영향

Fig. 20에는 방향에 따른 보강량이 변화할 경우의 거동상의 차이를 보인 것이다. 전면보강방법과는 달리 strip



(a) Strain of main rebar



(b) Strain of distribution rebar

Fig. 19 Strain distribution of rebar at mid span of deck specimens with varying direction of strengthening type of CFS

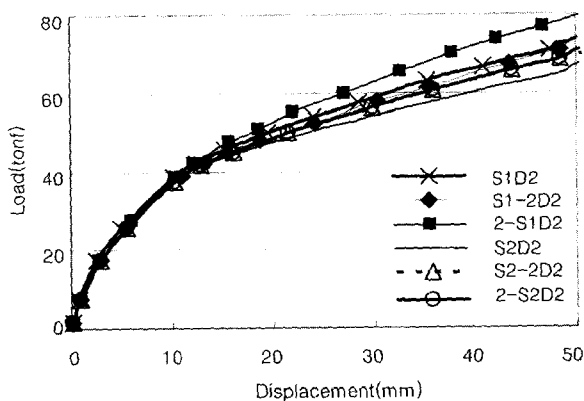


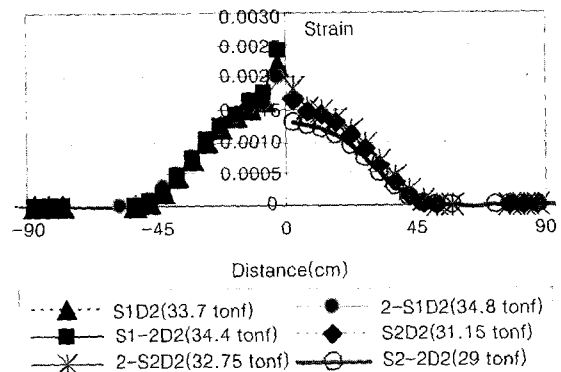
Fig. 20 Load-displacement relationship of deck specimens with varying amount of CFS

형식으로 보강한 경우의 전체 보강량에 따른 내하력의 차이는 두드러지지 않았으나, 주철근방향과 배력철근방향 보강량의 비에 의하여 내하력의 크기가 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 특히 상대적으로 보강량이 작은 S1D2가 배력철근 보강량이 많은 S2-2D2 또는 S1-2D2에 비하여 내하력이 큰 것으로 나타나 철근을 포함한 상태의 보강량이 등방보강(주철근+주철근방향 보강재  $\approx$  배력철근+배력철근방향 보강재)된 경우가 보다 효율적인 거동을 하는 것으로 판단된다.

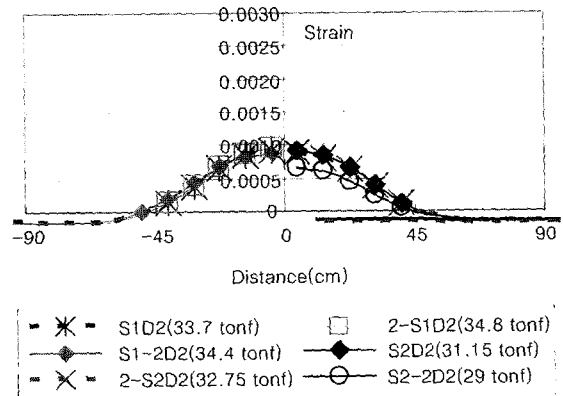
이러한 형태는 Fig. 21의 철근 변형률 분포에서도 찾아볼 수 있다. 상대적으로 보강량이 작은 S1D2의 경우가 보강량이 상대적으로 많은 변수와 비교하여 변형률의 크기가 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 바닥판의 내하력은 전체 보강량의 변화보다는 주철근방향과 배력철근방향의 보강비율이 상대적으로 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 4.4 보강재폭의 영향

Fig. 22에는 동일한 보강량에 대하여 보강재폭을 변화



(a) Strain of main rebar



(b) Strain of distribution rebar

Fig. 21 Strain distribution of rebar at mid span of deck specimens with varying amount of CFS



시킨 경우의 거동 차이를 하중-변위관계로 나타낸 것이다. 정적 시험시 가장 효율적인 거동을 하는 것으로 나타난 보강재 폭 15cm로 보강한 S1D2에 대하여 보강재폭을 각각 5cm(S1D2-5)와 25cm(S1D2-25)로 변화시켰을 때의 거동 차이를 분석한 것이며, 보강재폭이 클수록 내하력이 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 23에 나타낸 것과 같이 중앙부 주철근의 변형률 분포는 하중-변위관계와 같이 S1D2-25에 비하여 S1D2와 S1D2-5의 경우가 상대적으로 낮게 나타났으나, 배력철근의 경우에는 항복하중 이전이기 때문에 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

#### 4.5 보강재료의 영향

보강재 종류에 따른 바닥판의 거동을 비교하기 위하여 강판보강공법(STEEL)을 적용한 경우의 하중-변위관계를 S1D2 및 S2D2시험체와 비교하여 Fig. 24에 도시하였다. 적용된 강판보강량은 실제 교량 보강공사 현장에서 많이 사용되고 있는 45mm 강판을 적용한 것으로서 탄소섬유 보강시험체보다 약 9배 이상의 보강비를 갖고 있으며 최대철근비를 초과하는 과대보강 변수이다.

해석결과 STEEL 시험체가 탄소섬유 보강시험체와 비교하여 강도 및 강성의 증대가 큰 것으로 나타났다. 그러나, 심중성 외<sup>12)</sup>의 시험결과, 과대보강된 강판시험체의 경우에는 상대적으로 저보강된 탄소섬유 및 유리섬유슈트 보강시험체와는 달리 주철근과 배력철근의 항복 전에 콘크리트가 취성적으로 편칭전단파괴되는 것으로 나타나 실제 현장에서 적용하고 있는 보강방법에 중대한 문제가 있는 것으로 판단된다.

Fig. 25에는 무보강 상태에서 주철근 항복하중 정도인 30 tonf 부근에서의 철근변형률 분포를 나타내었으며, 주철근과 배력철근 모두 강판보강된 경우가 탄소섬유로 보강된 경우보다 작은 것으로 나타나고 있다. 이는 보강재의 보강량이 상대적으로 크기 때문이며, 콘크리트의 전단 내하력을 초과하는 경우 취성적인 편칭전단 파괴의 위험이 있는 것으로 판단된다.

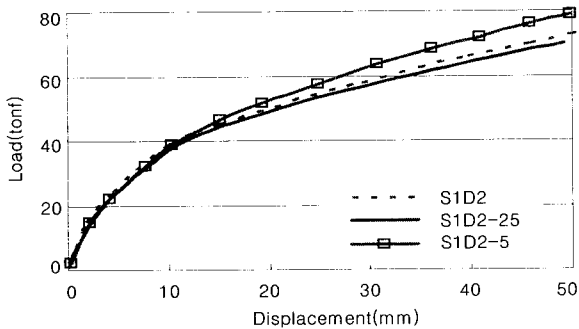


Fig. 22 Load-displacement relationship of deck specimens with varying width of CFS

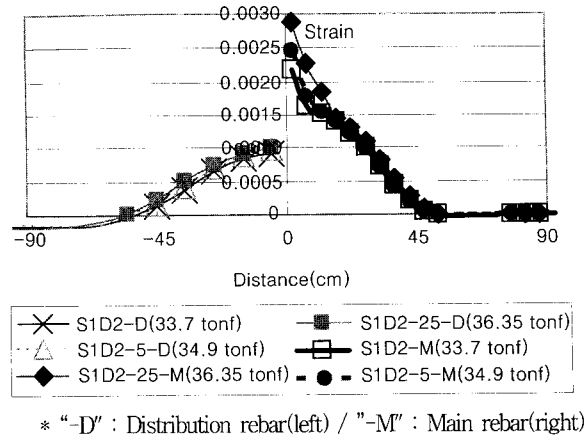


Fig. 23 Strain distribution of rebar at mid span of deck specimens with varying width of CFS

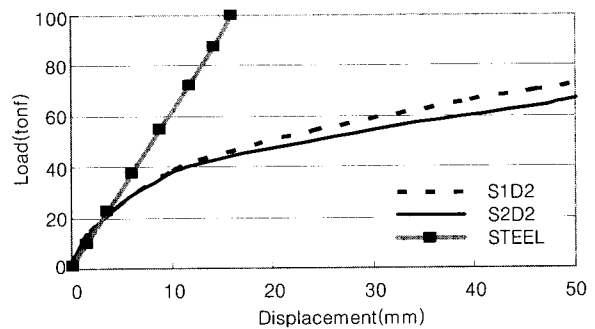


Fig. 24 Load-displacement relationship of deck specimens with varying strengthening material

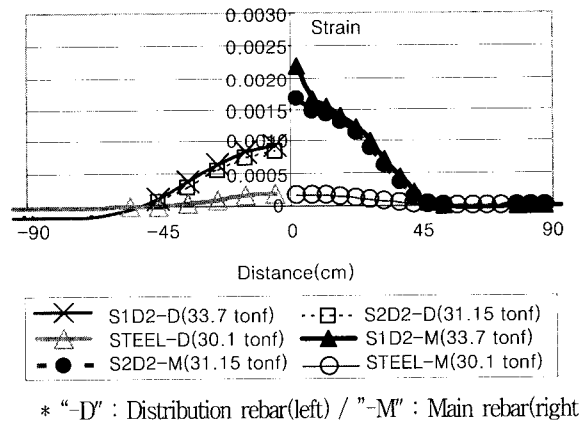


Fig. 25 Strain distribution of rebar at mid span of deck specimens with varying strengthening material

## 5. 결 론

보강된 바닥판의 비선형 유한요소해석을 통한 분석결과를 요약하여 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 본 연구에서는 3차원 solid모형을 적용하여 바닥판

시험체의 거동을 해석하고자 하였으며, 항복전 거동의 명확한 해석을 위하여 바닥판 지점부를 고탄성 재료로 모델링하였다. 해석결과 무보강(CON)시험체의 경우 시험결과와 거의 동일한 해석 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타나 실제 교량 바닥판 해석시 이를 응용한 구조물의 내하력에 측이 가능한 것으로 판단된다.

2) 일방향 보강의 경우 주철근방향보강과 배력철근방향보강에 의한 거동의 차이는 크지 않은 것으로 나타났으며, 일방향 보강만을 적용하는 경우에도 주철근방향을 strip 보강하는 경우가 강도향상효과가 가장 큰 것으로 해석되었다.

3) 유한요소해석에 의한 보강변수별 거동 특성을 분석한 결과 전체 보강량에 의한 내하력 차이보다는 보강방향에 따른 차이가 큰 것으로 나타났으며, 등방성으로 보강한 경우가 이방성으로 보강한 경우보다 응력분배의 효율성이 보다 효과적인 것으로 나타났다. 또한 보강재폭의 영향에서도 보강재폭이 상대적으로 작을 수록 동일보강량에 대하여 내하력 향상효과 및 강성 증대효과가 큰 것으로 나타났다.

4) 해석결과 보강후의 응력집중 현상을 최소화하고 부재의 강도향상을 위한 효율적인 보강방법은 이방향 strip 보강방법인 것으로 나타났으며, 보강설계시 철근을 포함한 주철근방향의 강도와 배력철근방향의 강도가 동등한 것보다 효율적인 거동을 하는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 배인환, "강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 휨해석 및 설계기법연구," 한양대학교 박사학위논문, 1998
- Swamy, R. R. N., Jones R., and Charif, A., "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams," *Struct. Engr.*, Vol. 67, No.3, Feb., 1989, pp.45~56.
- 심종성, 오홍섭, "항복선 이론을 적용한 성능향상된 철근콘크리트 교량 바닥판의 해석적 연구," 대한토목학회 학술 발표회논문집(I), 2000. 10, pp.67~70.
- 심종성, 오홍섭, 임채욱, "교량바닥판의 구조거동을 고려한 보강기법의 실험적 제안," 한국구조물진단학회 학술 발표회논문집, Vol. 3, No. 2, 1998. 11., pp.195~200.
- 정관, 정상진, 이경언, 이영재, 문희중, "강판, 탄소섬유, 탄소섬유판으로 휨보강된 철근콘크리트 슬래브의 구조적 거동," 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, Vol. 10, No. 1, 1998. 5., pp.601~606.
- 정영수, 이광명, 송재필, 김철우, 김기봉, "TYFO 유리섬유로 보강된 노후 교량바닥판에 대한 정적실험," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, Vol. 9, No. 2, 1997. 11., pp.621~627.
- Willam, K. J. and Menétrey, Ph., "Triaxial Failure Criterion for Concrete and Its Generalization," *ACI, Structural Journal*, Vol. 92, No. 3, May, 1995, pp.311~318.
- Comite Euro-International Du Beton, "CEB-FIP Model Code," Thomas Telford, 1993.
- Hsu, T. T. C., "Unified Theory of Reinforced Concrete", CRC, 1993, pp.205~218.
- Hu, M. T. and Schmobrlich, W. C., "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Plates and Shells under Monotonic Loading," *Computer & Structure*, Vol. 38, No. 16, 1991, pp.637-651.
- Shahrooz, B. M., Ho, A. E., and Aktan, A. E., "Nonlinear Finite Analysis of Deteriorated RC Slab Bridge," *ASCE, Journal of Struct. Eng.*, Vol. 120, No. 2, Oct., 1992, pp.422~440.
- 심종성, "콘크리트 교량 바닥판에 대한 보수·보강 공법의 효과분석 연구," 연구보고서, 한국도로공사, 2000.

### 요 약

콘크리트 교량 바닥판은 건조수축 및 온도변화 등에 의하여 초기 일차균열이 발생하고, 사용기간 동안 반복되는 차량하중의 크기와 철근 간격 등에 의하여 초기 균열이 이방향 균열로 점차 진전하게 된다. 바닥판의 거동을 효율적으로 향상시키기 위해서는 보강방향에 대한 고려가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유쉬트를 보강재로 사용한 경우의 보강된 바닥판에 대한 비선형 유한요소해석을 실시하였으며, 해석의 정확성을 높이기 위하여 보강된 바닥판의 경계조건과 재료성질을 시험조건과 부합될 수 있도록 모사하였다. 보강방향과 보강량에 대한 해석결과는 시험결과와 비교, 분석함으로써 정확성을 검증하였으며, 이와함께 보강된 바닥판의 효율성을 검증하기 위하여 보강재량, 폭과 두께 등과 같은 보강변수에 의한 보강후의 구조적 효율성을 고찰하였다.

**핵심용어 :** 교량 바닥판, 보강변수, 비선형 유한요소해석, 탄소섬유쉬트