

정밀계측방법을 이용하는 교각의 보수, 보강법 선택

정 희 영 · 이 창 수
(서울시립대학교 토목공학과)

On the Selection of Reinforcement and Repair Methods of the Bridge Pier by using Precision Measurements Based on Monitoring Techniques

Jung, Hie Young · Lee, Chang Soo

ABSTRACT

The Bridge, which is located at Jangji-dong, has served for about six years. But lots of cracks on its piers are discovered recently. The cause of vertical cracks along the pier column is mainly related to the structural design of the pier. In this paper, we discuss about what kind of reinforcement and repair methods for the cracked piers are appropriate when the monitoring techniques are used, and their results are effectively analyzed.

Key Words : Reinforcement and Repair Method, Monitoring Technique

1. 서론

서울시 송파구에 위치한 B고가교는 분당-송파간 외곽순환 도로상에 위치한 교량으로 1994년에 준공되었다. 그러나 1999년 안전진단결과 교각에 심각한 단일 또는 몇 개의 주된 수직균열이 발견되었다. 이러한 균열은 구조적 결함이란 점에

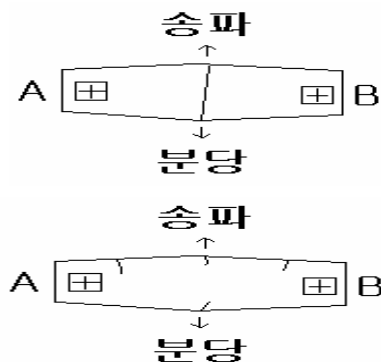
심각성이 있으며, 발생 부위가 응력 집중 부위가 아니라는데 또 다른 문제가 있다.

본 논문에서는 여러 가지 공학적 측면에서 균열의 생성원인을 분석하고, 띠철근의 항복여부와 수명평가를 정밀계측 및

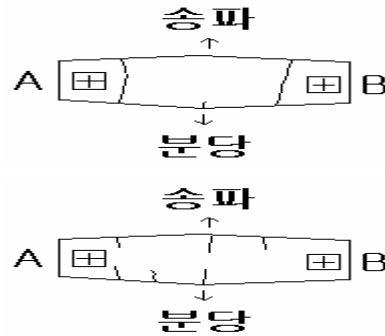
실내실험을 통해 살펴보고자 한다. 또한, 현재의 상황에서 교각의 보강방안을 다각도로 살펴보고, 적절한 보수, 보강 방안을 제시하고자 한다.

2. 교각현황

B고가교는 본선구간과 확폭구간으로 구분할 수 있는데, 본선구간(교각폭4m)과 확폭구간(교각폭7.5m)의 교각은 그림 1에서처럼 두가지 균열 형태를 가지고 있다. 그림1(a)에서 보여지듯이 위쪽 교각의 균열은 중앙 부위에서 분당-송파 방향으로 연결되었고 아래쪽 교각의 균열은 아직 연결되지 않은 상황이다. 그러나 본선구간의 균열 발생 부위는 유한요소해석에서의 최대 응력지점이 아니다. 이 논문에서는 이러한 균열의 원인과 차이점을 규명하고자 정밀계측을 시행하였다. 또한 교각 설계도에는 교각 상단에서 교각 축에 따른 수평철근은 없고 교각측면을 감싸는 띠철근과 수직 주철근이 배근되어 있었다.



〈그림1(a)〉 본선구간교각 상면의 균열 형태



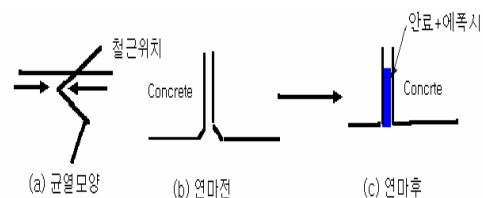
〈그림1(b)〉확폭구간교각 상면의 균열 형태

3. 현장계측 및 결과

3.1 철근탐사와 균열폭 측정

본선구간과 확폭구간 교각중 0.3mm이상의 균열폭을 갖는 교각측면에 철근탐사로써 띠철근의 위치를 확인하였다.

콘크리트와 같은 취성 복합재료의 균열폭을 계측하기란 쉽지 않다. 일반적으로 콘크리트는 그림 2(a)와 같이 균열이 꺾이는 부위에서 뚜렷한 균열 파단 모양이 보존되므로 이 부위를 측정 대상으로 선정하여, 표면이 마모되어 있는 경우 균열 부위를 갈아 측정해야 한다. 이때 균열면 사이에 염료를 섞은 에폭시를 넣고 양생시킨 후 이를 갈아주면 균열면이 뚜렷하고 측정하기도 쉬워진다.



〈그림 2〉 교각의 균열폭 측정 방법

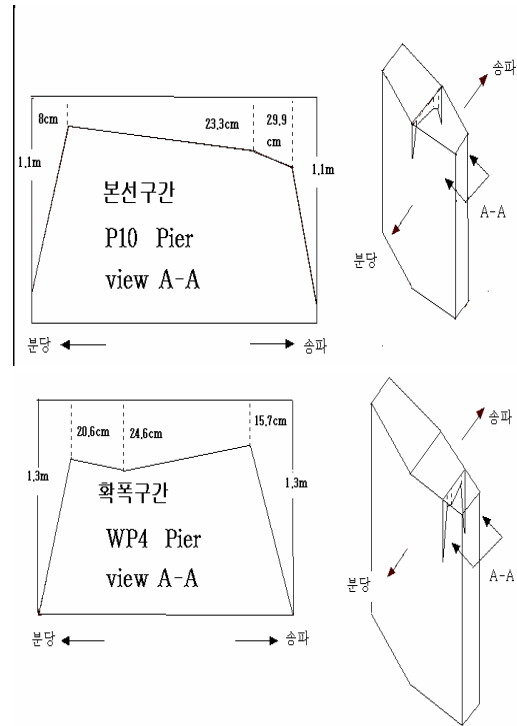
이동식 광학 현미경(0.01mm resolution)을 사용하여 균열폭을 측정한 결과, 교각상부로부터 첫번째 띠철근 부위의 최대 균열폭은 본선구간교각에 대해서는 1.40mm, 확폭구간교각에 대해서는 1.38mm인 것으로 측정되었다. 그러나, 이들의 수치는 단지 현장에서 육안 측정방법을 사용한 정밀안전진단 보고서의 데이터 보다 더 큰 것으로 확인되었다.

3.2 초음파 탐사

본선구간과 확폭구간의 교각에 대해 분당-송파 방향으로의 균열깊이 측정을 위해 초음파 탐사를 실시하였다. 초음파방법을 선택할 때 콘크리트 표면의 균열깊이는 일반적으로 $T_c \sim T_0$ 법으로 구한다. 이 방법은 종파용 발, 수신자를 균열 개구부를 중심으로 등간격($L/2$)으로 설치하여 균열 선단부를 회절한 초음파의 전파시간 T_c 를 구한다. 또한 균열이 없는 부분에서 발, 수신자를 똑같은 거리($L/2$)만큼 설치하여 전파시간 T_0 를 구한다. 측정된 $T_c \sim T_0$ 로부터 아래식을 적용하여 균열의 깊이를 구한다.

$$C = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{(T_c)^2}{(T_0)^2} - 1} \quad \text{-----}(1)$$

그림 3은 본선 및 확폭구간 교각에서의 초음파 탐사 자료를 이용하여 교각내부에서의 균열 관통 모습을 보여준다. 탐사자료의 분석 결과, 상단에서 30cm아래까지 균열이 관통되어 있고, 양쪽 측면 표면에서는 약 1m이상의 균열전파가 진행되었음이 측정되었다.

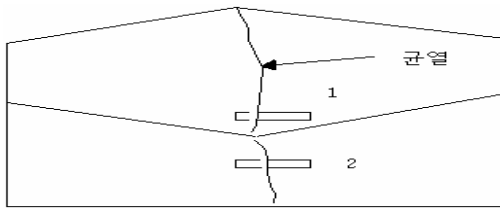


〈그림 3〉 초음파탐사를 근거로 한 균열 관통 모습

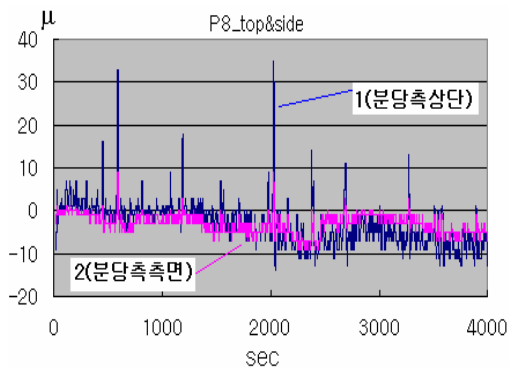
3.3 교각의 변형률 측정

실시간 통행차량 하중이 교각 상단면 및 측면의 균열을 열고 닫게 만들 것으로 추정되어 균열이 열릴 때 철근의 응력을 측정하고자 이 부위에 대한 변형률을 측정하였다. 이를 위해 HP VXI, Concrete용 Strain Gauge(Tokyo sokki, 120 ohm)를 사용하여 변형률을 측정하였다. 그림 4,5는 센서위치와 측정된 변형률값을 도시한 것이다. 실시간 교통 통과 하중에 대한 변형률 측정 결과, 본선구간교각은 최대 100 μ , 확폭구간교각은 200 μ 인 것으로 측정되었다. 확폭구간교각의 큰 수치는 본선과 Ramp의 합류 지점으로 송파 방향으로 40tonf이상의 중차량이 많이 통행하기 때문이며 보수, 보강 후에도 이 교각에 대해 집중적으로 보수, 보강효과를 감시해야할 것으로 판단된다. 또한, 그림

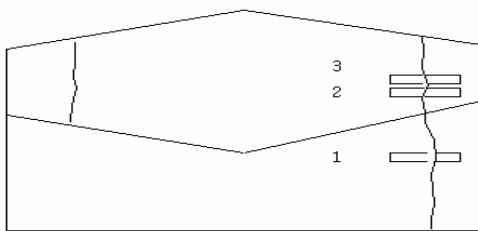
5의 결과에서 보여지듯이 3(교각 상단안쪽)의 위치에서 최대, 1(교각 측면)의 위치에 최소 변형률이 측정되어 띠철근의 위치에서 변형률이 작으므로 띠철근이 어느 정도 균열 열림에 저항하는 수평력을 받고 있는 것으로 보여진다.



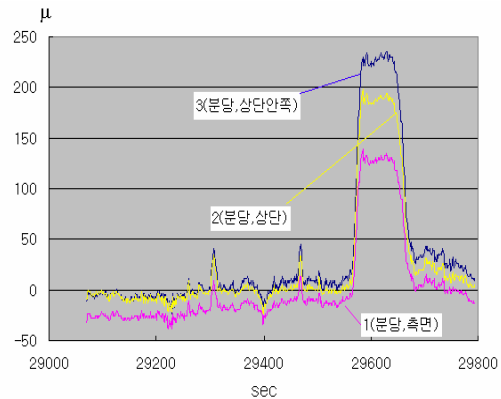
Gauge	1(분당측상단)	2(분당측측면)
Strain(μ)	40	10



〈그림 4〉 본선구간교각의 변형률계 위치 및 결과



Gauge	1(분당, 측면)	2(분당, 상단)	3(분당, 상단안쪽)
Strain(μ)	140	196	230



〈그림 5〉 확폭구간 교각의 변형률계 위치 및 결과

4. 유한요소해석과 실험

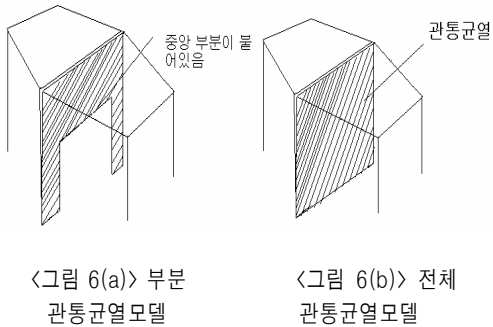
4.1 유한요소해석 물성치와 모델링

〈표 1〉 유한요소해석을 위한 물성치와 띠철근 위치

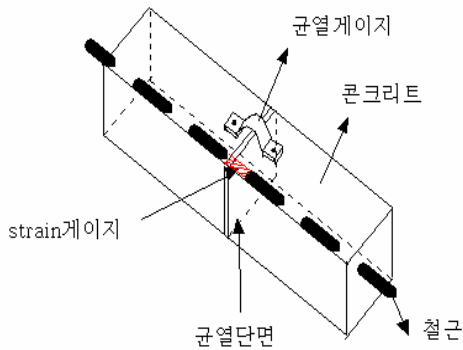
교각	응력과 띠철근 배근 위치	poisson ratio	Density	탄성계수
콘크리트	240kgf/cm ²	0.167	2.5tonf/m ³	230,000 kgf/cm ²
본선구간	상단에서 30cm 간격으로 배근	0.3	0.008 kgf/cm ³	1,500,000 kgf/cm ²
확폭구간	1st 철근, 상단에서 132mm, 2nd 철근, 상 단에서 281mm, 3rd 철근, 상단에서 423mm			

현 교각의 실제 균열은 그림 6(a)와 같지만 그림 6(b)와 같이 큰 손상을 줄 수 있는 모델을 해석 대상으로 정한다. 또한 본 논문에서는 본선구간과 확폭구간교각 중 1개씩의 대표적인 모델을 선정하여 구조해석을 하였다. 본선구간교각에 대해서는 설계하중 800tonf(1shoe)+ 교각자중, 확폭구간교각에 대해서는 설계하중 1300tonf (1shoe)+ 교각자중을 각각 작용시킨 상태에서 교폭 방향 응력을 살펴보았다. 표 1은 유한요소해석을 위한 재료의 물성치와 띠철근 위치를 나타낸다. 유한요소의 모델링은 콘크리트교각 본체에 대해서는 solid element로, 띠철근은 bar

element로 구성하여 교각 교좌장치에 등분포 하중을 작용시키는 것으로 하였다.



4.2 실험



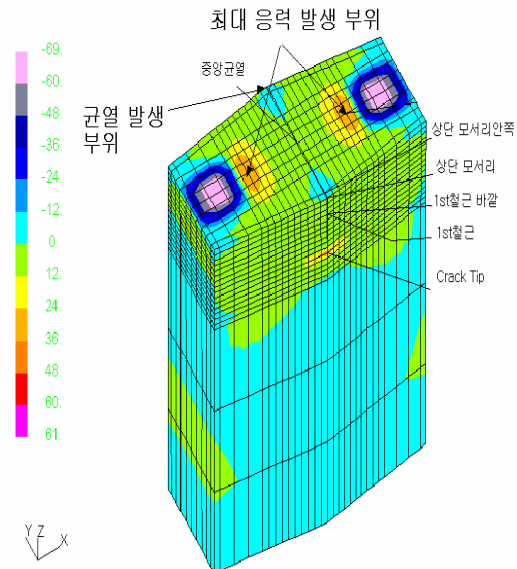
〈그림 7〉 균열면을 내포한 모형 시험체

현 교각의 균열에 대해 계측한 균열폭 데이터를 이용하여 띠철근의 항복여부로서 교각의 손상 정도 및 범위를 파악하고자 그림 7과 같이 단순한 균열면을 내포한 콘크리트 인장 시험체(100x100x500mm)를 제작하였다. D16의 철근과 28일 양생의 콘크리트 시험체에 미리 균열면을 만들어 균열면을 가로질러 균열게이지를 설치하고 MTS 인장 시험기를 이용하여 단순 인장 실험과 피로실험을 수행하였다.

5. 유한요소해석 및 실험결과

5.1 모델별 응력 비교

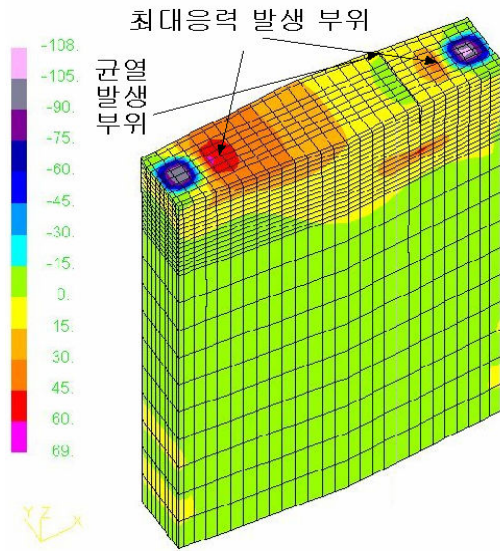
그림 8(a), 8(b)에서 볼 수 있듯이 모두 교좌장치 근처에서 응력이 최대로 발생한다. 또한, 교각의 모서리에서보다는 상단 안쪽에서의 응력이 더 크다. 이것은 현장 계측결과(그림 4,5)와 일치한다. 따라서 유한요소해석결과에 의한 최대응력 위치와 관찰된 균열 발생 위치가 일치하지 않음을 알 수 있다.



〈그림 8(a)〉 본선구간교각의 교좌방향 응력

5.2 균열의 원인 규명

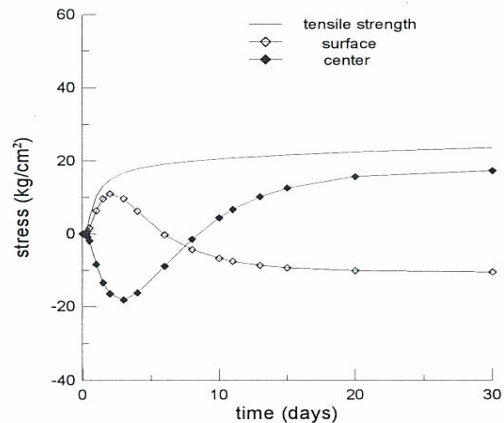
위에서와 같이 응력계산결과, 최대 응력은 교좌 장치근처(교각폭의 1/4지점)에서 가장 크고 교각의 모서리보다는 안쪽에서 인장응력이 더 큼을 알 수 있다.



〈그림 8(b)〉 확폭구간교각의 교폭방향 응력

그러나 B고가교 외관조사에서도 보여지듯이 균열은 교각의 중앙 상단과 측면의 모서리에서 안쪽으로 하는 것으로 관찰되었다. 그림 1(a), (b)의 아래쪽) 이것은 균열이 최대 인장응력 산출지점에서 발생되지 않았음을 보여준다. 그림 1의 아래쪽 교각의 모서리 균열은 시공시 수화열이나 시공후 건조수축에 의한 것으로 볼 수도 있다. 이를 확인하기 위해 수화열에 대한 응력 분석을 수행하였다. 수화열 검토 결과(그림 9), 수화열에 의한 교각 내 또는 측면의 인장응력이 콘크리트 인장 저항 응력을 초과하지 않았다. 따라서 교각 시공후 교좌장치에 상부거더가 놓이면 지점이 고정단(fixed boundary condition)으로 바뀌어 교좌장치 안팎으로 콘크리트의 자유로운 건조수축을 방해하게 되어 교각의 상단면과 측면의 모서리에서 초기 균열이 발생한 것으로 추정된다. 또한, 계속되는 통행 하중에 의해 반복적으로 균열의

열림이 생기고 교각의 좌우 비틀림에 의해(그림 1(a), (b)위쪽과, 그림 3의 관통균열) 점진적으로 균열이 전파되어 최종적으로 연결된 것으로 판단된다.



〈그림 9〉 시간에 따른 수화열 응력

5.3 실제 균열을 가로지르는 띠철근에 작용하는 응력

띠철근의 응력을 산출하기 위해 유한요소해석과 모형실험을 수행하였다. 균열전파와 열림의 원인은 교축 직각 방향의 수평력에 의한 것이므로 유한요소해석에서는 실제 본선구간교각의 상단으로부터 첫 번째 띠철근 위치에서의 균열폭(1.08mm, 확폭구간은 1.38mm)을 만들기 위한 가상 수평력을 교좌 장치에 작용시켜 띠철근이 받는 응력을 산출하였다. 또한 인장 시험체(그림 7)를 만들어 양단에 인장력을 가하여 중앙 균열면에서 똑같은 균열 폭을 만들었을 때 띠철근이 받는 응력을 산출하여 유한요소법 결과와 비교하였다. 표 2에서 보여 지듯이 유한요소법에 의한 철근의 강도나 응력이 실험에서 보다는 훨씬 작게 산출되었다. 이는 유한요소에

〈표 2〉 F.E.M과 실험에서의 철근 응력과 강도 비교

철근 본선구간교각	1st철근응력(kgf/cm ²)	2nd철근응력(kgf/cm ²)	3rd철근응력(kgf/cm ²)
FEM CASE 1 *	2106(4182kgf)	1382(2745kgf)	522(1036kgf)
실험	4084(7370kgf)	4002(7220kgf)	3933(7100kgf)

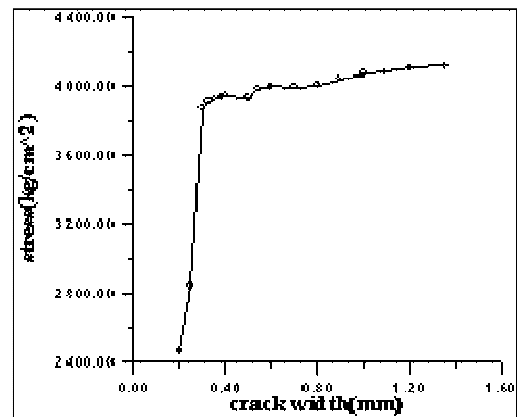
철근 확폭구간교각	1st철근응력(kgf/cm ²)	2nd철근응력(kgf/cm ²)	3rd철근응력(kgf/cm ²)
FEM CASE 2 **	1089(2162kgf)	976(1939kgf)	868(1723kgf)
실험	4118(7430kgf)	4105(7410kgf)	4084(7370kgf)

* FEM case 1: 1st 철근부위의 균열폭을 1.08mm발생시키기 위해(800tonf+교각자중+수평력 350tonf)하중을 본선구간교각에 작용시킨 모델

** FEM case 2: 1st 철근부위의 균열폭을 1.38mm발생시키기 위해(1300tonf+교각자중+수평력 124tonf) 하중을 확폭구간교각에 작용시킨 모델
() 값은 철근 강도값

의한 전체 교각 stiffness가 대부분 콘크리트에 의하여 생성되므로 철근이 콘크리트 보다 10배정도 탄성계수가 크지만 인장 단면이 작아서 철근의 응력이 작게 산출된 것으로 판단된다. 또한, 교좌장치에서 수평 집중하중이 띠철근에 대해 영향을 작게 미치기 때문이기도 하다. 다시 말하면, 교좌장치의 집중하중보다 띠철근 주변의 콘크리트 인장응력이 띠철근의 응력을 더 크게 산출시키기 때문이다. 또한, 시험체의 철근응력이 큰 이유는 콘크리트의 인장 응력에 대한 영향이 고려되지 않거나 아주 작게 나타났기 때문이다.

상이 되어 철근이 항복하는 것으로 나타난다. 본 교각에 대해 이전의 띠철근에 대한 응력이 모두 4000kg/cm²이상으로 산출되었으므로 보수적으로 판단해 볼 때, 조사한 세번째 철근까지 모두 항복한 것으로 간주한다.



〈그림 10〉 균열폭-띠철근의 응력

5.4 띠철근의 항복여부 판별

띠철근 균열폭에 대한 응력을 알아보기 위해 그림 7의 시험체에 대해 실험한 결과 그림 10과 같은 데이터를 얻었다. 그래프에서 보여지듯이 균열폭이 0.3mm 이상이면, 응력이 약 3800 kg/cm²이

5.5 보수, 보강에 필요한 설계단면력

보수, 보강은 그림 11에서의 하중평형 개념을 이용하여 생각할 수 있다. 그림 11의 왼쪽은 균열이 생기지 않았을 때 교각 상부의 콘크리트와 띠철근에서의 인장응

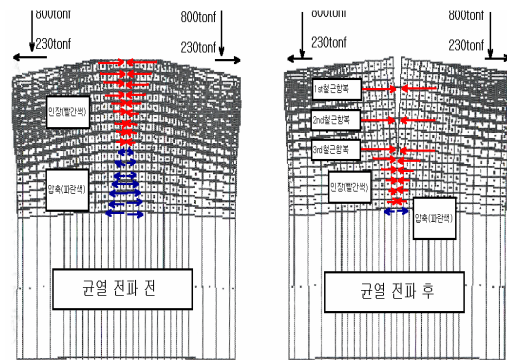
력 분포를 보여주고 있다. 그림 11의 오른쪽은 보수, 보강에 대한 하중이 퍼져 있다.

* FEM case 1: 1st 철근부위의 균열폭을 1.38mm 발생시키기 위해(1300tonf+교각자중+수평력 124tonf) 하중을 확폭구간교각에 작용시킨 모델

** FEM case 2: FEM case 1+ 변동하중 120tonf를 상재하 시킨 모델

응력 부위가 하부로 이동한 응력 재분포를 도시화하여 보여주고 있다. 상부의 띠철근이 항복함으로써 과도한 변형이 생기고 균열을 유발시켜 변형에너지를 균열면으로써 흡수한 후, 안정된 평형 상태를 이루고 있다. 따라서 사하중에 의한 평형이 이루어졌으므로 추가적인 활하중에 대하여 균열 전파를 막는 수동적인 보수, 보강을 생각한다면 본선구간교각(3차선)에 대하여 90tonf, 확폭구간교각(4차선)에 대하여 120 tonf를 제하시켰을 때, 추가적인

수평력을 보수, 보강에 필요한 설계단면력으로 간주할 수 있다. 이로부터 본선구간과 확폭구간 교각의 보강 수평력을 설계단면력으로 간주할 수 있다. 이로부터 본선구간과 확폭구간 교각의 보강 수평력을 설계 추가하중에 대해 계산하면 본선구간은 20tonf, 확폭구간은 23tonf(표



〈그림 11〉 보수, 보강 개념도

〈표 3〉 유한요소법에 의한 본선구간교각 수평력산출

모델	위치	1st철근부위 균열폭(mm)	2nd철근부위 균열폭(mm)	3rd철근부위 균열폭(mm)	1st 철근부위 균열폭을 발생시키기 위한 수평력(tonf)
FEM case 1 *		1.08	0.71	0.25	600 tonf
FEM case 2 **		1.108	0.724	0.257	620 tonf (20tonf 추가)

* FEM case 1 : 1st 철근부위의 균열폭을 1.08mm 발생시키기 위해(800tonf+교각자중+수평력 350tonf) 하중을 본선구간교각에 작용시킨 모델

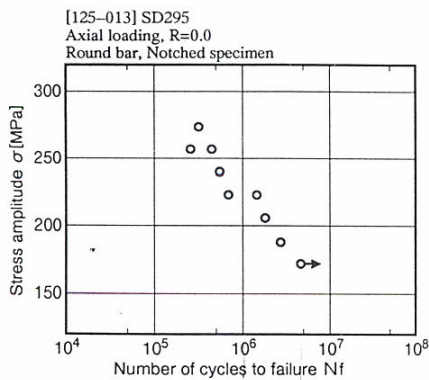
** FEM case 2 : FEM case 1+ 변동하중 90tonf를 상재하 시킨 모델

〈표 4〉 유한요소법에 의한 확폭구간교각 수평력산출

모델	위치	1st철근부위 균열폭(mm)	2nd철근부위 균열폭(mm)	3rd철근부위 균열폭(mm)	1st 철근부위 균열폭을 발생시키기 위한 수평력(tonf)
FEM case 1 *		1.38	1.24	1.1	574 tonf
FEM case 2 **		1.43	1.28	1.14	597 tonf (23tonf 추가)

5.6 띠철근의 수명 평가

그림 12는 D16띠철근과 동일한 물성을 갖는 재료의 하중변화와 횡수에 대한 피로시험결과(JSMS, JAPAN¹⁾)이다. 본선구간 추가하중 90tonf, 확폭구간 추가하중 120tonf에 대하여 띠철근의 응력변화는 $\Delta\sigma$ 가 각각 73.5N/mm², 131.3 N/mm²인 것으로 계산되는데, 그림 11에서 $\Delta\sigma$ 가 150N/mm²의 피로한도를 나타내므로 본선구간과 확폭구간 교각의 띠철근은 피로하중 대해 안전한 것으로 판단된다.²⁾

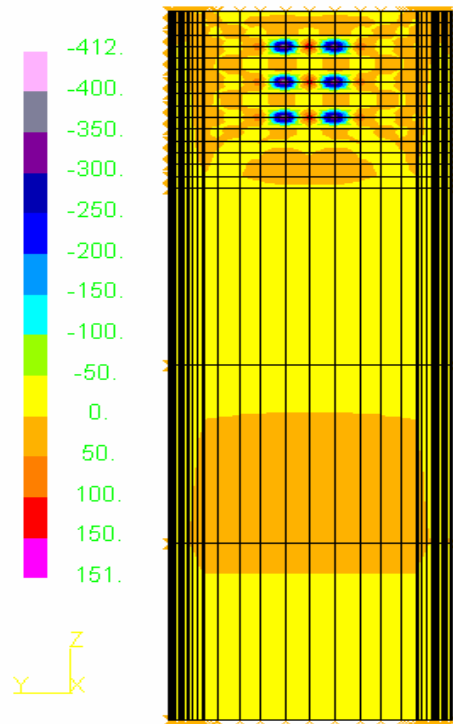


〈그림 12〉 띠철근 S-N Curve

6. 보수, 보강법 제시

이러한 B고가교의 균열에 대한 보강을 위해 안전진단기관에서는 본선구간의 경우 300tonf (50tonf, 6개), 확폭구간의 경우 400tonf(50tonf, 8개)의 강선긴장방안을 권장하고 있다. 하지만 이러한 강선긴장방안은 그림 13에서와 같이 강선긴장으로 인한 교각측면의 국부적인 응력집중을 유발시킨다. 이로인해 콘크리트교각측면이 파단으로 진행될 수도 있다. 또한,

하중평형 개념에서 볼 때, 부족한 인장력의 보충을 안전진단보고서에서 행했듯이 교각상부 전 단면의 인장력을 합산한 300tonf이나 400tonf까지 과다하게 산정할 필요는 없다. 이는 콘크리트의 인장저항력을 무시했기 때문이다. 따라서 교각을 측면에서 감싸는 유리섬유 보강법이나 추가적인 띠철근 보강방안이 비틀림에 의한 하중에도 대처할 수 있는 전단보강방안이기도 함으로 본 교각에 적합한 것으로 판단된다.



〈그림 13〉 PC강선 도입에 의한 응력 분포

7. 결론

본 연구에서는 교각의 수직균열원인을 다각도로 분석하고 손상의 범위와 정도를 파악하여 이에 따른 적절한 보수, 보강법을 제시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 교각 수직균열의 원인

B고가교 교각에 대한 수화열 검토 결과(그림 9), 비록 수화열에 의한 교각 내의 인장응력이 콘크리트 인장저항 응력을 초과하지 않았지만 교각시공후 교좌장치에 상부거더가 놓이면 지점이 고정단(fixed boundary condition)으로 바뀌어 교좌장치 안팎으로 콘크리트의 자유로운 건조수축을 방해하게 된다. 이 때문에 교각의 상단면과 측면 모서리의 초기균열이 발생되고, 계속되는 통행 하중에 의해 반복적으로 균열의 열림이 생기며 교각의 좌우 비틀림에 의해 점진적으로 균열이 전파되어 최종적으로 연결된 것으로 판단된다.

2) 띠철근의 항복여부, 피로수명

유한요소해석과 실험에 의하면 교각의 수직 균열폭이 0.3mm이상이면 항복으로 볼 수 있으며, 변동응력($\Delta\sigma$)이 150MPa미만이므로 보강후에는 어떠한 피로하중에 대해서도 안전할 것으로 판단된다.

3) 균열의 진전여부

교각 상단부의 균열활동을 계측한 결과 중심부에서 균열의 열림이 최대가 되고 띠철근 위치에서는 최소가 되는 것으로 나타났다. 또한 균열단에서의 균열 전파는 급속한 변화를 보이지 않는데 이는 사하중에 의해 균열이 발생되었으나 평형상태로 안정화되었고, 추가적인 활하중에 대한 띠철근의 피로 강도가 강하게 나타났기 때문이다. 또한, 유한요소해석 결과 균열단의 진행

정면방향에서 발생한 광범위한 압축 응력의 영향인 것으로 판단된다.(그림 8(a), 8(b)) 따라서 현재까지의 계측결과로 볼 때 발생한 균열은 현재 안정화되어 있으며 균열의 전파속도는 매우 작은 것으로 추정되고 있으므로 현재 상태의 교각구조물 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

4) 보수, 보강방안

강선 긴장 방안은 교각 중앙부에 균열이 관통되지 않았고 추가적인 활하중에 대한 수평력이 작으므로 커다란 효율성을 기대하기 어려울 뿐만 아니라 교각 상단부에 강선 주입구 관통으로 인해 수직 주철근 등에 대한 손상 및 정착부의 부분적인 콘크리트 파손을 유발시키므로 적절한 보수 보강방법이 아닌 것으로 판단되고, 유리섬유 또는 추가적인 띠철근에 의해 교각의 상단을 감싸는 방안이 더 효율적인 것으로 판단된다.

<참고문헌>

1. Julie A.Bannantine, Jess J. Comer, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Prentice Hall, 1990
2. "Databook on Fatigue Strength of Metallic Materials", Vol.1-3, JSMS, Japan, 1996