

# 노후화 교량의 콘크리트 지속응력에 관한 실험적 평가방법

## The Sustained Stress Measurement on Deterioration of Concrete Structures by Experimental Technique

박 대 성\*      명 근 학\*\*      김 우\*\*\*

Park, Dae Sung      Myung, Gun Hak      Kim, Woo

### ABSTRACT

This study describes a practical method of measurement of the sustained stress in concrete structures. In most cases, the sustained stress was determined by various theoretical calculations. However, the theoretical calculations can not always provide sufficient informations about current stress state having lots of uncertainty. Therefore, the present study proposes a practical measuring method, Partial Sectioning Method.

#### 1. 서 론

콘크리트 구조물은 시간 의존적인 재료특성과 지속하중 등에 의하여 장기간에 걸친 변형과 부재응력 상태가 변하는 열화과정을 거친다. 이러한 장기간에 걸친 열화로 인하여 내하성능이 저하된 구조물은 안전성 검토를 위하여 내하력 평가를 수반하게 된다. 이와 같은 기존 구조물의 안전성 평가는 열화 손상된 구조물이 최근 급증하고 특히 콘크리트 교량에서 그 중요성이 점차 강조되고 있으며, 이에 따른 다양한 평가 방법들이 제시되고 있는 실정이다. 그리고, 교량의 내하력 평가는 자중이 차지하는 하중부담률의 올바른 반영여부가 중요한 판단근거가 되고 있으나, 현재까지는 설계단면 제원이나 현장실측 자료에 의한 단순한 이론적인 구조계산에 의존하고 있기 때문에 장기변형이나 자중에 의한 구조물의 현재 상태 응력수준이 제대로 반영하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 기존의 내하력 평가방법들이 합리성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 구조물의 노후화 정도를 정확하게 파악할 수 있는 방법이 제시되어야 할 것이다. 본 연구의 목적은 앞에서 언급한 문제점들을 해결하는 방법으로 고정하중을 포함하는 지속응력에 대한 평가를 기존의 평가방법과 다르게 현장실험을 통하여 측정할 수 있는 부분절단법을 제안하는 것이다.

#### 2. 부분절단법과 실험

##### 2.1 부분절단법

사용하중을 받고 있는 구조물의 내부 응력은 추가적인 하중이 재하 되지 않는 상태에서 부재표면 일부분을 절단하게 되면 부분적으로 이완응력(released stress)이 발생하게 된다. 이때 발생된 이완응력을 기하적인 조건과 부재 내 응력상태에 따라서 절단 전 응력으로 환산하게 되면, 구조물의 현재 상태 응력을 계산할 수가 있게 되는데, 본 연구에서는 이러한 방법을 부분절단법으로 정의한다. 그림 1에 보인 바와 같이 절단간격  $D$ 의 중앙에 스트레인 게이지를 부착하고 절단면  $b-c$ 를 따라서 부분적으로 절단하면, 표면에 부착된 스트레인 게이지를 통해서 지속응력 크기와 절단면의 응력상태에 따라서

\* 정회원, 한국건설안전기술협회

\*\*정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\*정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

이완변형률을 측정할 수 있다. 이때 측정되는 변형률은 다음 식과 같다.

$$\epsilon_g = \int_b^c F_i \cdot f_i \cdot dx \quad (1)$$

여기서,  $F_i$ 는 그림 1(b)의 세로좌표 값이며,  $f_i$ 는 절단깊이  $b$ - $c$ 의 응력분포를 의미하게 된다.

### 2.2 유한요소 해석

부분절단법의 적용을 위하여 비선형 유한요소해석 프로그램인 ADINA를 이용한 사전 해석을 수행하여 기하적인 실험조건과 절단깊이를 제시하고, 실험을 통하여 부분절단법의 적용성을 검증하여 보았다. 해석에 사용된 콘크리트

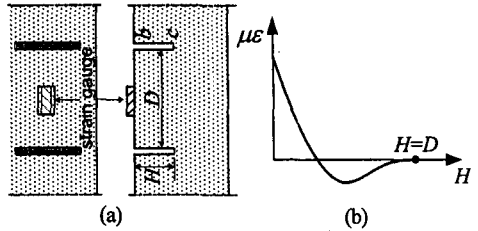


그림 1 부분절단형상 및 변형을 이완곡선

압축강도  $f_{ck}$ 는 20.6MPa 탄성계수  $E_c$ 는 212.6GPa, 프와송 비는  $\nu$ 는 0.18를 사용하였으며, 구조부재의 일부를 모델링하고 이완응력의 주변수가 되는 응력분포상태와 절단간격에 대한 절단깊이의 비  $H/D$ 를 일정하게 증가시키면서 절점*i*에서 이완응력을 계산하였다(그림 3참조).

### 2.3 실험

본 연구에서 수행하고자 하는 실험 시험체의 순경간은 1.9m, 단면치수는 50cm×15cm이며, 골재 최대치수는 25mm를  $f_{ck}$ 는 25.87MPa를 사용하였다. 시험체는 구조물에 균열이 발생되어 있는 상태를 반영하기 위하여 선행하중에 의해 미리 균열이 형성된 상태에서 실험을 수행하였다. 그림 2에서 나타난 것과 같이 하중은 2점 재하하였으며, 외력이 가해지기 전에 스트레인 게이지를 부착하고, 시험체에 일정하중을 재하한 상태에서 절단간격  $D$ , 절단깊이  $H$ 를 1차 부분절단을 실시하고, 2차 부분절단을 실시하였다. 게이지는 골재 최대치수보다는 큰 30mm 게이지를 사용하였다. 절단에 의한 추가적인 응력의 영향을 제거하기 위하여 각 절단깊이마다 이완응력값이 안정이 되도록 충분한 시간적인 여유를 두고 측정하였으며, 절단면의 수직도와 절단깊이는 절단간격내에서 동일하게 유지하였다.

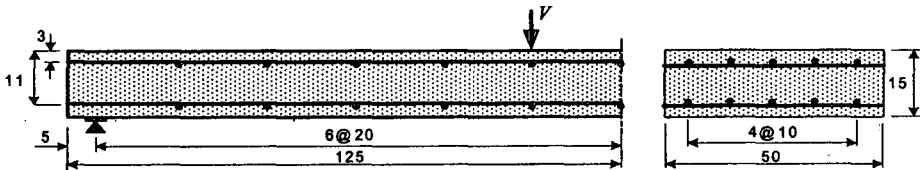


그림 2 시험체 제원

## 3. 해석 및 실험 결과 분석

### 3.1 유한요소 해석결과

식(1)에서 절단면 응력분포  $f_i$ 가 절단깊이에 따라 다르게 형성되면 측정된 이완변형률에 차이가 발생하며 이 결과는 표 1에 정리하였다.

표 1 응력분포에 따른 이완변형률

CASE	등분포	삼각형	2차포물선	3차포물선
잔류 응력 분포				
$\epsilon = \int F_i \cdot f_i \cdot dx$	0.197	0.179	0.159	0.133
비교	100	91	80.5	67.5

그림 3(a)는 절단간격  $D$ 를 기준으로 하여 절단면 응력분포상태와 절단깊이를 변수로 한 1차 부분절단법에 대한 절점  $i$ 의 이완응력곡선 결과이다. 절단깊이비 0.8이후로는 절단깊이비와는 상관없이 표

면응력에 변화가 거의 없는 상태로 수렴하였다. 2차 부분절단법의 이완응력곡선은 그림 3(b)에 표현하였고 최대이완응력값은 절단면 응력분포에 관계없이 절단깊이비 0.6에서 발생을 하였으며, 1.4이후에는 이완응력변화가 거의 없으며 표면의 응력이 제거된 '영응력(zero stress)' 상태로 수렴하였다.

### 3.2 시험체 실험결과 분석

#### 3.2.1 최적절단깊이비

앞 절에서 정의한 바와 같이 부분절단시 절단깊이비 1.4 이상을 절단하여 지속응력을 측정하는 것이 바람직하지만 절단기의 용량으로(직경 20.32cm) 실험시 6cm 이상을 절단할 수가 없고 콘크리트 게이지의 크기 30mm, 60mm는 굵은 골재 최대치수와 관계가 있으므로 이를 고려한다면, 최소절단간격 8cm를 기준으로 한 절단깊이비 1.4(11.2cm) 이상을 절단할 수가 없다. 따라서 콘크리트 게이지 30mm, 절단깊이비 0.6을 기준으로 하여 최적절단깊이비 5cm를 제시하였다.

#### 3.2.2 보정계수

절단깊이비 0.6에서는 표면의 응력이 완전제거되지 않았기 때문에 영응력으로 표현하기 위해 이완된 응력에 대한 절단전 응력으로 표현되는 응력보정계수  $C_s$ 를 제안하였다.

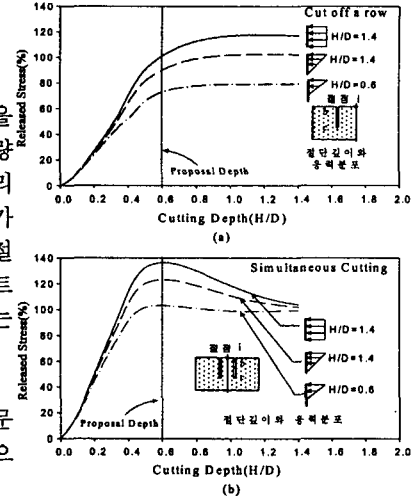


그림3 이완응력곡선

$$f_{surf} = -\epsilon_g \cdot E \quad C_s = f_{sustained} / f_{surf} \quad f_{sustained} = -C_s \cdot \epsilon_g \cdot E \quad (2)$$

여기서  $C_s$  : 응력보정계수  $f_{surf}$  : 이완응력,  $f_{sustained}$  : 지속응력

절단깊이비를 0.6으로 고정 시킨 후에 절단면의 응력분포상태(1: 절단깊이응력  $f_c$  / 표면응력  $f_b$ )를 변화시켜가면서 해석한 결과를 표 2에 정리하였다. 표3는 Strain gauge의 길이에 대한 보정계수를 나타낸 것으로 gauge의 지시값은 길이에 대한 평균 변형률이므로 중앙의 변형률로 보정되어야 한다.

그림 4와 같이 Strain gauge의 변형률 분포가 형성된다고 하면 보정계수를 다음과 같이 구할수 있다..

$$\alpha \times \epsilon_m = \epsilon_c \quad \therefore \alpha = \epsilon_c / \epsilon_m \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \epsilon_m = \frac{1}{X_3 - X_1} \int_{X_1}^{X_3} \epsilon dx$$

$\epsilon_m$  : 평균 변형률

$\epsilon_c$  : 중앙의 변형률

$a$  : Strain gauge 보정계수

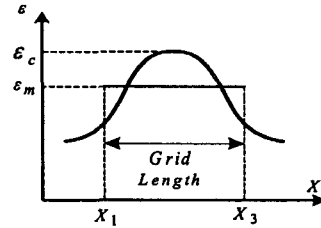


그림4 Strain gauge 변형률 분포

표 2. 응력보정계수표

보정계수	부분절단법	
	1차	2차
절단면(b-c) 응력분포	절단깊이비(H/D=0.6)	
1 : 0	1.371	0.969
1 : 0.2	1.280	0.912
1 : 0.4	1.197	0.858
1 : 0.6	1.126	0.810
1 : 0.8	1.061	0.768
1 : 1	0.990	0.732

표 3. 스트레인 게이지 보정계수

절단면(b-c) 응력분포	부분절단법			
	1차		2차	
게이지 길이(mm)	30	60	30	60
1 : 0	1.01	1.011	1	1
1 : 0.2	1.01	1.021	1.003	1.017
1 : 0.4	1.01	1.035	1.01	1.033
1 : 0.6	1.015	1.045	1.013	1.053
1 : 0.8	1.017	1.057	1.018	1.067
1 : 1	1.019	1.065	1.021	1.08

#### 3.3.3 시험결과 분석

시험체의 중립축 거리가 상면에서 4.63cm이고 응력분포는 1:0.03(=1:0)관계에 있으므로 1:0에 해당

하는 해석결과와 비교해 보면 그림 5와 같은 경향을 보이고 있다.

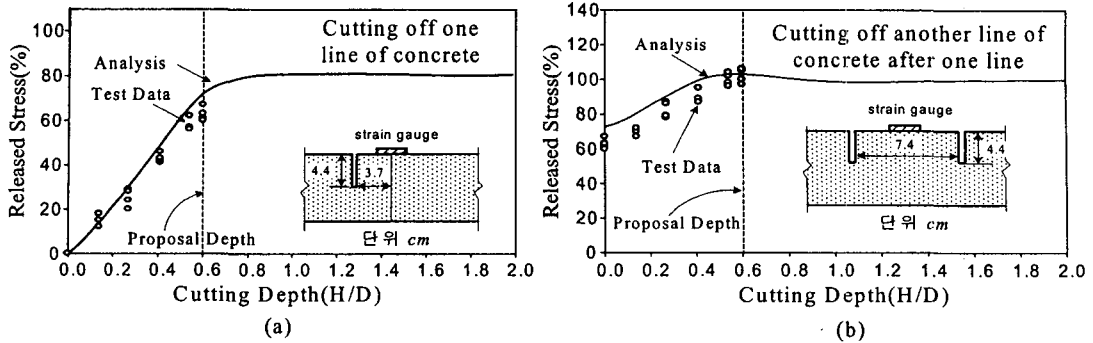


그림 5 절단법의 해석과 실험결과

측정된 이완응력을 Gage 크기와 응력보정계수를 적용하여 계산한 결과는 표 4에 나타내었다. 표 4와 그림 5를 보면 1차 부분절단법의 경우에는 절단깊이비 0.6부근의 이완응력 경사가 절단깊이비에 대해 매우 민감하여 해석과는 다소 다른 결과를 나타내고 있으나, 2차 부분절단방법의 경우에는 최대 6%의 편차를 나타내며 비슷한 경향을 나타내고 있다.

해석과 실험을 통해서 알 수 있는바와 같이 부분절단법으로 응력수준 평가가 가능함을 알 수가 있었다. 이러한 방법으로 구조물의 응력수준을 측정하게 된다면, 이론적인 구조계산에 의한 것보다 현재 상태의 응력에 대한 신뢰성과 정확성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 실험결과

절단선 시험체 표면응력 (100%) 기준	부분절단법 게이지 길이 = 30mm			
	1차 부분절단법		2차 부분절단법	
결과비교	측정	보정결과	측정	보정결과
1	61	83.6	100	96.9
2	67	91.8	97	94.0
3	63	86.4	105	101.7
4	60	82.3	106	102.7
평균	62.8	86.0	102	98.8

#### 4. 결론

본 연구는 구조물의 지속응력을 구조적 계산에 의존하지 않고 실험적으로 측정할 수 있는 부분절단법을 제안하였으며 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 부분절단법은 구조물의 현재 상태 응력수준을 측정하게 되므로 구조물의 열화나 손상정도를 반영할 수가 있다.
2. 구조물의 손상을 최소화 할 수 있고, 현장 적용성이 용이하며, 추가적인 외부하중재하가 필요없는 방법이므로, 실질적으로 차량재하를 할 수가 없는 지중구조물 등에 적용 가능한 방법이다.
3. 절단깊이비와 내부응력상태에 따른 보정계수가 제시되어 있으므로 다양한 구조물 크기에 적용이 가능한 방법이다.

#### 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 “한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술 연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)”의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.”

#### 참고문헌

1. Joseph, Schwaighofer.(1964), "Determination of Residual Stresses on the Surface of Structural Parts", *Experimental Mechanics*, Vol.4, No.2, pp.54-56.
2. 민호기, 박대성, 김우,(1998) “부분절단법에 의한 콘크리트 구조물의 지속응력 측정에 관한 연구” '98가을학술발표회 논문집 제10권 2호, pp.749-754.