

신뢰성에 기초한 콘크리트교량의 균열손상평가

Reliability-Based Crack Damage Assessment of Reinforced Concrete Bridges

조효남* 최영민** 임종권** 옥승범**
Cho, Hyo Nam Choi, Young Min Leem, Jong Kwon Ok, Seung Beom

ABSTRACT

In recent years, the prediction of the deterioration rate of concrete structures has become major research interest. However, there are still many uncertain factors in the deterioration process and the relation between deterioration and durability of structures. This is mainly due to various uncertainties involved in the construction process and the environmental conditions which affect the rate of deterioration of concrete structures.

In this study a limit state model in terms of random crack width due to applied dead and live loads is proposed for the assessment of crack damage of reinforced concrete structures. The AFOSM reliability method is used for the reliability evaluation of the crack durability of concrete bridges. The proposed model for crack durability of concrete bridges is applied to the integrity assessment of a newly constructed segmental PC bridge which constitutes a part of the Seoul interior circuit elevated expressway. The sensitivity analyses are performed for the proposed model.

1. 서론

최근 콘크리트구조물의 조기열화 및 고강도재료의 사용과 강도설계법의 적용 및 시공기술의 발달에 의한 구조물의 장기간의 경량화로 내구성 및 사용성의 문제가 대두 되고 있고 구조물의 설계에서도 강도한계상태보다 사용성 한계상태가 더 문제가 되는 경우도 있으며 보수/보강의 판단에 있어서도 사용성이나 내구성에 대한 판단은 필수적이라 할 수 있다. 특히 콘크리트 구조물에는 몇 가지 열화손상의 특성을 가지지만 정량적으로 판단하기 쉬운 손상은 휩균열이고 일반적으로 허용응력 설계법에 의하여 낮은 철근응력으로 설계된 종래의 구조물에서는 휩균열은 그다지 문제가 되지 않았지만 근래들어 고강도철근을 사용하고 설계법이 정밀해짐에 따라 균열이 문제로 등장하게 되었다.

이러한 균열은 외관상 좋지 않을 뿐아니라, 폭이 큰 균열은 철근을 부식케하며 구조물의 내구성을 저하시킨다. 따라서 콘크리트 구조물에 생긴 균열에 대하여서는 그 균열이 구조내력, 기능, 외관 등에 끼치는 영향에 대하여 합리적인 평가가 선행된 뒤에 보수대책이 강구되어야 하지만 아직까지 균열에 대한 합리적인 평가방법이 체계화 되어 있지 않고 있다.

- * 한양대학교 토목환경공학과 교수
- ** 한양대학교 대학원 박사과정
- *** 한양대학교 대학원 석사과정

균열에 의해 발생하는 유해현상은 일반적으로 균열폭이 커짐으로써 급격히 현저해지는 경향이 있으며, 균열폭이 어느정도 이하로 작으면 실용상 유해현상이 거의 없는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 균열폭에 의한 내구성한계상태 모형을 제안하고 신뢰성 해석기법을 적용하여 정량적인 평가모형을 제안하였다. 특히 사하중 상태에서의 모멘트추정과 균열조사에 관련된 오차, 허용균열폭의 변화, 활하중균열폭 등에 대하여 고찰하고 제안된 평가모형의 실제 구조물에 대한 적용성 및 실용성을 검토하였다.

2. 콘크리트교량의 균열

구조물의 설계하중보다 큰 하중이 일시적으로 작용하면 구조물이 파괴되지는 않아도 구조물에는 치명적인 손상을 입힐 우려가 있다. 균열하중보다 큰 하중의 작용으로 인하여 균열이 발생하게 되면 이균열은 반복하중을 받는 교량구조물에서는 구조물 성능저하의 주요원인으로 작용한다. 즉 반복하중을 받는 콘크리트구조물이 균열단면을 갖는 경우 피로에 의한 누적손상이 크게되므로 구조물의 성능저하를 유발하고, 구조물에 발생한 균열은 철근을 부식환경으로 노출시켜 구조물의 내하력과 내구성같은 구조성능저하의 원인을 제공한다. 콘크리트부재의 균열폭의 증가는 콘크리트의 반복하중에 의한 크리프와 콘크리트와 보강재와의 부착파괴에 의해서

발생하며, 결국 성능저하현상을 일으킨다. 이러한 관점에서 도로교와 같이 과하중으로 균열이 발생할 확률이 높으며 반복하중을 받는 구조물은 균열에 대한 제한이 일반 건축물의 균열제한보다 엄격하게 적용되고 있다.

3. 한계상태 모형

3.1 균열 한계상태

균열에 대한 한계상태는 기본적으로 균열제한에 기초한 $g(\cdot) = W_a - W \leq 0$ 으로 나타낼 수 있다. ACI시방서는 균열한계폭 W_a 를 Gergely-Lutz가 제안한 식에 기초하여 규정하고 있다. 본 연구에서는 신뢰성해석 및 설계시에는 하중과 저항은 각각 같은 차원으로써 이루어져야하기 때문에 균열에 대한 시방서 규준의 최대허용한계에 대하여 Zhao/Li[1989]와 이승재[1995]의 균열한계상태함수토대로 철근콘크리트에 대하여 다음과 같이 제안하였다.

$$W(\cdot) = W_R - (W_D + W_L) \quad (1)$$

여기서 W_R = 구조물에 허용될 수 있는 최대균열폭(확률변량), W_D = 사하중 상태의 균열폭(기타 지속하중 포함), W_L = 활하중에 의한 균열폭이다.

허용균열폭 W_R 은 다음과 같이 표현할 수 있으며 공칭값은 시방서 또는 관리자에 의하여 설정된 허용균열폭을 취할 수 있다. 균열에 대한 제한은 각국의 시방서별로 다르지만 공통적으로 각종환경과 철근의 부식에 의해 구조물에 악영향을 미치지 않을 정도의 적절한 확률이 확보되도록 제한하고 있다.

$$W_R = W_{R_w} N_{R_w} \quad (2)$$

여기서 W_{R_w} = 시방서 및 관리자에 의해 제시된 허용균열폭, N_{R_w} = 허용균열폭선정에 관련한 불확실량

반면 사하중 및 활하중 각각에 의한 실균열폭 W_D, W_L 은 다음과 같이 표현된다.

$$W_D = W_{D_s} N_{D_s} \quad (3a)$$

$$W_L = W_{L_s} N_{L_s} \quad (3b)$$

여기서 W_{D_s} = 사하중상태에서 조사된 균열폭의 실측치, W_{L_s} = 활하중에 의한 공칭균열폭, N_{D_s} = 사하중균열 측정간의 불확실량 보정계수, N_{L_s} = W_{L_s} 을 추정하는데 있어서의 불확실량 및 실제균열폭에 대한 편기를 조정하기 위한 계수 = ZPQA

이때, Z = 최대균열폭에 대한 size effect관련 불확실량, P = 균열폭추정관련 불확실량, Q = 하중효과 관련 불확실량, A = 재료 및 제원관련 불확실량

관련 활하중에 대한 공칭균열폭은 RC부재에 대하여 여러 균열폭산정식이 제안되어 있지만 본 논문에서 사용한 균열폭추정식으로는 Gergely-Lutz가 제안하여 ACI 및 우리나라시방서에 채택된 식에 기초하였으며 교량에서의 공칭균열폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{L_s} = K_w(1+i)W_L \quad (4)$$

여기서 K_w = 균열응답비(실측치/계산치), i_w = 균열충격계수, W_L = 활하중균열폭 = $1.081R\sigma_c^3\sqrt{d_cA} \times 10^{-6}$

여기서 R = 중립축에서 인장철근 중심까지의 거리에 대한 중립축에서 인장축 외단까지의 거리의 비 ($R=h_2/h_1$), σ_s = 강재의 인장응력 (kg/cm^2), d_c = 인장축 표면에 가장 가까운 강재의 도심으로 부터 인장축 표면까지의 거리 (cm), A_s = 콘크리트의 유효 인장 단면적(강재의 도심과 동일한 도심을 가지는 강재 둘레를 콘크리트 단면적)(cm^2), A = A_s 를 강재의 수로 나눈 값(cm^2)

3.2 통계적 불확실량

신뢰성 방법에서는 저항 및 하중관련 랜덤변량들의 불확실량을 합리적으로 추정하는 것이 매우 중요한 문제이다. 본 논문에서는 균열폭에 대한 불확실량의 본질적 특성이나 관련 데이터의 부족으로 국내외의 관련문헌[Zhio 1994, Cho 1989]을 종합판단하여 통계적 불확실량을 제시하였다.

표.1 에는 본 연구에서 채택한 하중 및 저항의 불확실량을 정리하였는데 여기에서 제시된 자료는 앞으로 균열폭에 대한 저항 및 하중관련 연구가 점차 확대되고 자료가 누적됨에 따라 수정, 보완될 수 있을 것이다.

표.1 균열폭에 대한 불확실량

구분	불확실량		
	평균-공칭비	변동계수	분포형
균열폭 저항	1.0	0.10	normal
사하중 균열폭	1.0	실측조사에 의함(0.34)	normal
활하중 균열폭	0.90	0.44	normal

4. 신뢰성해석

신뢰성은 확률개념에 의해 수치적으로 평가될 수 있고 실제적인 상대적 안전율은 신뢰성지수 β 에 의해 표현되며 신뢰성지수와 한계상태확률과의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_F) \quad (5)$$

여기서, P_F = 한계상태확률 Φ^{-1} = 표준정규분포함수의 역함수

일반적으로 균열에 대한 한계상태함수는 앞에서 살펴본 바와 같이 선형으로 근사화 시킬 수 있고 따라서 종래의 FOSM방법으로도 상당히 정확한 해를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 제안된 한계상태함수에 대한 신뢰성해석방법으로 간편하고 실용적인 AFOSM방법을 사용하였다.

5. 균열손상 평가 방법

콘크리트교량의 균열손상문제는 궁극적으로 내구성 문제로 교량의 유지관리체계문제와 결부되어 대단히 중요하기 때문에, 교량의 현장조사 및 재하시험시 균열에 대한 조사, 시험, 평가 또한 중요하며 균열내구성에 대한 하중, 저항 등의 해석과 관련된 불확실량의 합리적인 추정평가에 기초를 두고 체계적이고 합리적인 방법으로 고려되어야 한다. 그런데 실제 균열손상평가를 위해 사용되고 있는 방법은, 국내는 물론 선진외국에서조차도 아직도 명확한 개념정립이 되지 않고 정성적인 판정규준을 사용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 주관적이고 정성적인 방법에서 탈피하여 보다 신뢰성있는 정량적인방법을 제시하고자 한다.

5.1 허용안전율에 의한 평가방법

허용응력개념에 있어서 안전도를 정의하는 방법은 안전율(safety factor)이고, 구조물의 균열내구성에 대한 조건은 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$\sigma_s < \sigma_{sa} \quad (6)$$

여기서 σ_s 는 구조물에서 외력의 작용에 의한 철근인장응력이며, σ_{sa} 는 인장부 철근의 균열에 대한 허용응력이다. 허용응력 σ_{sa} 는 통상 구조설계규준에서 정의된다. 허용응력개념에 의한 구조물이 안전성을 상실하는 위험상태 즉, 내구성 상실상태는 구조물에서 응력을 받는 부분이 허용응력에 도달할 때 일어나는 것으로 안전율이란 실제구조물에 일어나는 응력에 대한 허용응력의 비로 정의된다.

$$n = \frac{\sigma_{sa}}{\sigma_s} \quad (7)$$

이러한 안전율개념에 의하면 균열내구성에 대해서는 균열폭으로 안전율을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$n_{\sigma} = \frac{W_a}{W_D + W_L} \quad (8)$$

여기서 W_a = 허용균열폭, W_D = 사하중에 의한 균열폭(실측값), W_L = 활하중에 의한 균열폭

5.2 공칭안전율에 의한 평가방법

한편 선진국에서는 안전성의 척도로서 신뢰성지수 β 를 종래의 안전율에 대한 대체개념으로서 보편적으로 사용하고 있다. 우리나라와 같이 안전율의 개념이 아직 친숙한 경우에는 안전성의 개념을 신뢰성지수 β 로 전환시키는데 대한 과도적 개념으로서 공칭안전율 n' 를 사용할 수 있다. 구조물의 공칭안전율은 개념상 구조물의 실강도 R 과 최대 작용외력 Q 의 비로 정의되므로 저항 및 하중변수를 정규분포형으로 가정했을 때, 신뢰성지수 β 에 대응하는 등가의 공칭안전율 n' 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$n' = \frac{R}{Q} = \frac{N_R}{N_Q} \left\{ \frac{1 + \beta \sqrt{V_R^2 + V_Q^2 - \beta^2 V_R^2 V_Q^2}}{1 - \beta^2 V_R^2} \right\} \quad (9)$$

여기서, N_R, N_Q : 저항과 하중의 평균-공칭비, R, Q : 실강도 및 하중효과, V_R, V_Q : 저항 및 하중효과의 변동계수

이와 같이 산출한 공칭안전율은 저항 및 하중의 불확실량과 구조물의 실제상태를 고려하고 있기 때문에 허용응력법에 의해 계산되는 재래적인 안전율 보다는 더 실제적인 안전율로서, 실무자들이 이해하기 쉬운 균열내구성의 안전율 개념이다.

6. 적용예

6.1 대상구조물

본 논문에서 제안한 균열손상에 대한 신뢰성 평가방법의 대상은 북부도시고속도로 1공구 교량으로 상판슬래브에는 교축방향으로 균열이 발생되어 있었다. 대상교량은 본 연구의 균열평가 작업을 위하여 사하중상태에서 광학적 균열경으로 균열폭을 측정하였고 균열에 Ω 형 균열게이지를 부착하고 정·동적 재하시험을 실시하여 균열의 확대를 계측하여 데이터를 획득하였다. 그림.1 및 표.2에는 적용교량의 단면 및 세원을 나타내었으며 그림.2에는 균열도를 나타내었다.

표.2 적용교량 제원

대상교량 일반사항	교량명	북부도시고속도로
	위치	성산대교-홍제동간
	등급	1등교
	구조형식	연속 PC 박스거더교
상판 슬래브 제원	공법	PSM
	두께	25cm
	콘크리트덮개	5cm
상판 슬래브 재료	철근간격	20cm
	콘크리트	450 kg/cm ²
	철근	4000 kg/cm ²
	철근량	14.33 cm ² /m

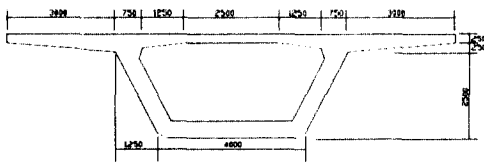


그림.1 횡단면도

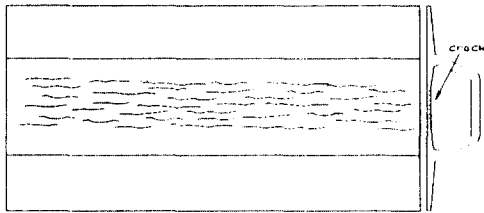


그림.2 균열도

6.2 구조해석

6.2.1 모델링

구조해석시 대상교량과 같은 박스거더의 상판 슬래브는 일방향슬래브의 거동을 하므로 단위폭의 일방향슬래브로 2차원 모델링하는 것도 가능하지만 본 연구에서는 단순화된 일방향 슬래브가 아닌 교량의 상판으로서의 거동을 정확히 해석하기 위하여 3차원FEM해석모델에 의한 상판 슬래브의 응답을 구하였다. 그림.3에는 구조해석 모델을 나타내었다.

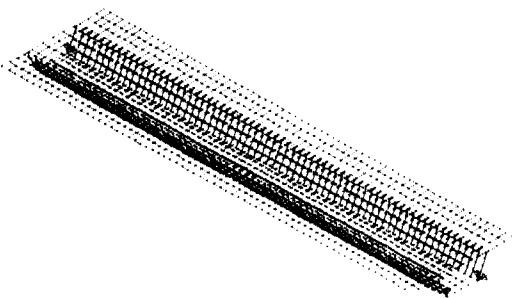


그림.3 구조해석 모델링

6.2.2 철근응력 및 균열폭 선정

활하중에 의한 균열폭의 추정은 구조해석의 단면력을 기초로 구하였으며 표.3에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 사하중에 의한 균열폭은 실제 교량에서 측정된 실측균열폭보다 작음을 알 수 있다. 이 것은 참고문헌[6]에서도 알 수 있듯이 사하중의 균열폭은 교량자체의 하중뿐만 아니라 콘크리트의 건조수축이나 creep 등을 반영하고 있어 계산에 의한 값보다 크기 때문이다.

표.3 상판슬래브의 철근응력 및 균열폭

구분	작용 모멘트 (t·m)	철근응력 (kg/cm ²)	균열폭 (mm)
사하중	2.014	767.55	0.11
활하중	1.450	552.61	0.08
실측사하중 균열폭	-	-	0.14

6.3 신뢰성해석

본 연구에서는 AFOSM에 의한 신뢰성 기법을 사용하여 신뢰성해석을 수행하였으며 결과를 표.4에 나타내었다.

표.4 상판슬래브균열의 신뢰성해석

허용 균열폭	사하중 균열폭	공칭 활하중 균열폭	신뢰성 지수 β	한계상태 확률 P_f
0.39	0.14	0.146	1.40	0.08076

6.4 균열내구성 안전율

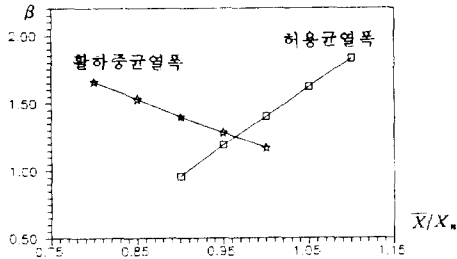
표.5에는 북부도시고속도로 1상구교량의 상판 슬래브균열에 대한 내구성 안전율평가결과를 나타내었다. 표.5에서 알 수 있듯이 철근응력에 의한 내구성안전율보다 균열폭의 내구성안전율이 작음을 알 수 있으며 교량의 실제 균열내구성한계는 균열폭에 의해 제한되므로 안전율 또한 균열폭에 의해 측정되어야하고 설계개념이 한계상태에 의한 개념으로 바뀌고 있는 시점을 고려할 때 본 연구에서 제안한 신뢰성에 기초한 균열손상평가방법은 교량구조물의 유지관리 지침에 있어서 효과적인 방법이 될 것으로 판단된다.

표.5 균열내구성 안전율 평가 결과

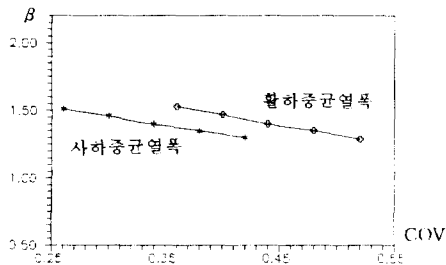
구분	철근응력 (kg/cm ²)	균열폭 (mm)
허용값	3035	0.39
사하중	770	0.14
활하중	1006.72	0.146
안전율 n	1.71	1.36
공칭안전율 n'	-	1.39

7. 민감도 분석

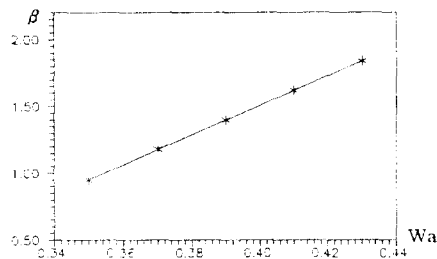
본 연구에서는 제안된 균열손상평가모형에 대해 허용균열폭, 활하중균열의 평균공칭비와 허용균열폭, 사하중균열 및 활하중균열의 변동계수의 변화에 따른 신뢰성지수 β 의 민감도와 허용균열폭변화에 따른 β 의 민감도를 분석하여 정리하여 그림.4에 나타내었다. 그림.4로부터 활하중의 평균공칭비 10%의 변화에 대하여 β 의 변화는 15%정도이지만 허용균열폭의 평균공칭비 10%의 변화에 대하여는 30%정도로 변화의 정도가 2배정도 크며 또한 허용균열폭을 0.39mm를 기준으로 10%씩 가감할 때마다 신뢰성지수는 약 30%정도 가감되어 허용균열폭의 선정이 구조물의 관리에 커다란 영향을 미치게 될 것임을 알 수 있고, 따라서 허용균열폭에 대한 합리적인 추정모형 및 불확실량에 대한 통계적 연구가 필요함을 알 수 있다.



(a) 평균공칭비 vs. β



(b) 변동계수 vs. β



(c) 허용균열폭 vs. β

그림.4 민감도 분석

8. 결론

콘크리트교량의 내구성판단은 1차적으로 균열에 의하기 때문에 본 연구에서는 내구성평가모형을 균열에 의한 한계상태모형으로 제안하였고 실제구조물에 적용하여 타당성 및 실용성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트교량의 유지관리와 보수/보강의 판단을 위한 균열내구성평가기준으로서 신뢰성에 기초한 실용적인 평가방법을 제안하였다.
- 2) 균열폭에 의한 균열손상 평가방법은 사하중에 의한 균열의 향이 실측에 의해 측정되므로 균열안전도 또는 균열신뢰성지수의 추정이 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 합리적인 방법임을 알 수 있었다.
- 3) 균열손상에 대한 내구성의 신뢰성지수는 허용균열폭의 변화에 가장 민감하므로 허용균열폭의 선정이 구조물의 관리에 커다란 영향을 미치게 될 것임을 알 수 있고, 따라서 허용균열폭에 대한 합리적인 추정모형 및 불확실량에 대한 통계적 연구가 필요함을 알 수 있었다.
- 4) 교량의 내구성문제는 교량의 유지관리체계문제와 결부되어 대단히 중요하기 때문에 제안된 균열손상평가방법은 교량의 유지관리에 있어서 적절한 판단을 할 수 있는 효과적인 방법이라 생각한다.

참고문헌

1. 이승재(1995) "고속철도 교량의 진산화 유지관리를 위한 신뢰성에 기초한 건전성평가모형" 한양대 토목공학과 박사학위 논문
2. 조효남, 이승재, 이정곤(1995). "신뢰성에 기초한 PC박스거더교의 내구성평가 모형" 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제 7권, 1호 pp.286~291.
3. 조효남(1989) "체계신뢰성방법에 기초한 도로교 설계규준 개발 및 시설교량의 신뢰성 평가" 과학재단 연구보고서, 한양대학교 토목공학과 구조연구실.
4. 삼성건설(1995) "북부도시고속도로 1공구 상부구조 재하시험 및 건전성평가"
5. Zhao G. F. and Li, Y. (1989). "Reliability analysis of reinforced concrete structures for serviceability limit states." Proc. of ICOSAR '89, pp. 2067~2070.
6. 石橋忠良, 津吉 毅(1991) "コンクリート桁のひびわれ幅算定法の提案" 日本鐵道施設協會誌 pp 15~18.