

# 신뢰성에 기초한 PC박스거더교의 내구성평가 모형

## A Model for Reliability-Based Durability Assessment of PC Box Girder Bridges

조 효 남\*  
Cho Hyo-Nam

이 승 재\*\*  
Lee Seung-Jae

이 정 콘\*\*\*  
Lee Jeong-Kon

### ABSTRACT

The deterioration of PC box girder may cause serious effect on the durability of PC structure compared to that of RC structures. In the durability assessment of PC box girder bridges, a quantitative model on crack width is considered as a measure of durability. This study suggests a durability limit state model for PC box girder bridges. This durability limit state model is formulated based on the conventional models on the cracks in concrete. And the allowable crack width is taken as an assumed value established by the design specification or provided by the maintenance authority of the structure.

### 1. 서론

일반적으로 콘크리트 구조물은 강구조물에 비하여 내구성이 훨씬 우수하고 별도의 유지관리가 필요하지 않은 것으로 인식되어 왔다. 그러나, 최근에 보고되고 있는 조기열화의 문제를 비롯하여, 콘크리트의 각종 열화현상을 생각하면 콘크리트의 열화손상은 결코 간과할 수 없는 문제임을 쉽게 알 수 있다. 즉, 콘크리트 구조물은 설계내용, 사용재료, 시공방법이 적절한 경우에는 우수한 내구성을 보유하지만 이 중 어느 하나라도 부적절한 경우에는 단기간에 열화가 진행되고 결국에는 구조물 전체의 수명을

단축시킨다.

최근에 와서 콘크리트 구조물의 내구성문제가 새롭게 제기되고 있는 근본적 원인으로는 재료측면과 시공측면을 들 수 있다. 재료측면의 원인으로는 양질의 하천골재가 고갈됨에 따라 해사나 쇄석의 사용이 불가피하여짐으로써 염분이나 반응성골재의 혼입, 단위수량의 증대 등이 직접적인 원인으로 작용한 것이며, 환경문제에 대한 관심이 고조됨에 따라 시멘트 제조기술이 변천함으로써 알칼리량이 증대하는 것도 하나의 원인인 것으로 사료된다. 시공측면의 원인으로는 콘크리트 펌프의 사용이 보편화됨에 따라서 콘크리트 압송에 필요한 콘크리트 배합의 변화, 물·시멘트비의 증대, 단위수량, 단위시멘트량의 증가 등을 들 수 있다.

\* 한양대학교 토목·환경공학과 교수

\*\* 쌍용양회공업주식회사 진단기술실 과장

\*\*\* 한양대학교 대학원 석사과정

이와 같은 콘크리트 기술의 변화는 콘크리트의 강도면 보다는 내구성면에 상대적으로 더 큰 영향을 미치고 있고, 특히 PC 구조물은 항시 커다란 내력을 받고 있는 상태이기 때문에 열화손상이 구조물의 건전성에 미치는 영향은 RC 구조물보다 상대적으로 크게 된다. 본 연구에서는 PC 박스거더 교량의 내구성 문제에 대하여 집중적으로 고찰한 후에 내구성평가를 위한 한계상태모형을 제안하였다.

콘크리트 구조물은 설계 및 시공불량, 중성화, 염해, 알칼리 골재반응, 건조수축, 동결융해, 하중작용 등 여러가지 열화요인에 의하여 성능이 저하되는데 이에 따른 열화현상은 강재부식과 콘크리트 균열의 두 가지로 나타난다. 본 연구에서는 이들 두 가지의 열화현상 중에서 PC 구조물 열화의 1차적 징후로 나타나는 균열에 대하여 한계상태함수를 설정하였다. 한계상태함수를 사하중 상태의 균열 및 활하중에 의한 균열의 향으로 모형화하였다. 또한 시방서나 관리자에 의하여 설정된 허용균열폭을 확정량으로 취급하였다.

## 2. PC박스거더의 열화손상 특징

PC 구조물은 구조특성상 RC구조물과는 다른 몇가지 열화손상 특징을 가지지만 근본적으로 내구성문제는 RC 구조물과 다를 바가 없다. 그림 2.1에는 콘크리트 구조물의 열화상관도[Kay, 1992]를 나타내었는데 공용 전, 후의 여러가지

표 2.1 PC 박스단면의 전형적인 균열[TRL, 1993]

구조부위	위치	균열방향	원인
하부슬래브	지간단부	종방향	• 급격한 응력발생 • 단부 정착구부근의 횡방향 보강재부족 • 알칼리 골재반응
	지간중간	종방향 횡방향	• 알칼리 골재반응 • 긴장재의 파단 • 긴장력의 손실 • 과다 활하중의 작용
복부	지간단부	대각선방향	• 전단응력 • 긴장력의 손실
		종방향	• 알칼리 골재반응 • 덕트의 부상 • 긴장재의 파단
상부슬래브	받침상단	수직방향	• 긴장력의 손실
	지간중간	횡방향	• 건조수축량의 불균일
	받침상단	종방향	• 알칼리 골재반응 • 긴장재의 파단
횡방향		• 건조수축량의 불균일 • 긴장력의 손실 • 과다활하중의 작용	

열화요인에 의해서 구조물에 나타나는 주요 열화현상은 강재부식 및 콘크리트 균열의 두가지로 나타남을 보여주고 있다. 한편 PC박스거더의 열화손상에 관련된 연구를 살펴보면 Podolny [1985]는 포스트텐션 PC박스거더의 균열의 원인을 (1) 휨 및 전단강성의 부족(2) 온도응력에 대한 검토누락 (3)강선의 profile에 따른 응력검토 누락 (4) 시공기술의 부족 (5) 품질관리의 미

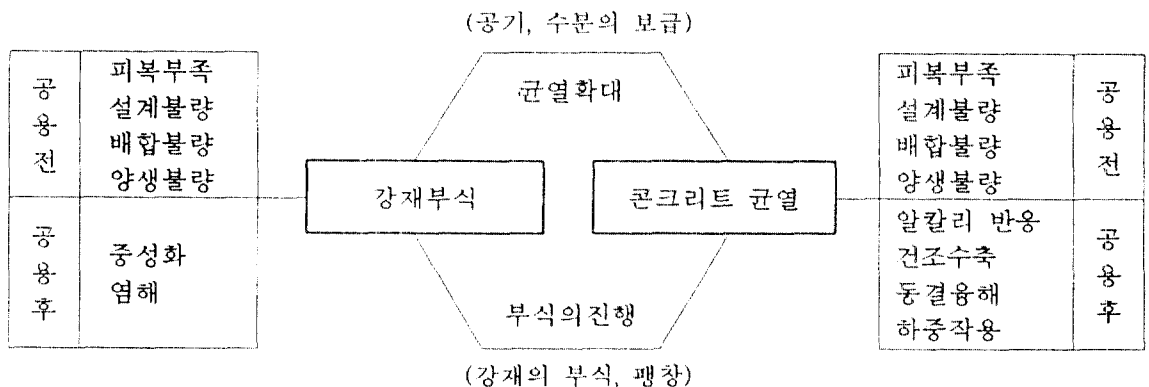


그림 2.1 콘크리트 구조물의 열화상관도

흡 ⑥ 재료강도의 부족 등을 들고, 콘크리트가 삼축방향으로 모두 압축을 받는 것도 아니고 또한 국부적인 건조수축 문제를 제어할 수도 없는 것이기 때문에 PC박스거더에서는 원칙적으로 균열을 피할 수 없다고 언급하고 있다. 뿐만 아니라 미국의 교통연구소 (Transport Research Laboratory; TRL)[1993]에서는 포스트텐션 PC구조물의 특별점검을 위한 계획, 인원구성, 점검요령 등에 대한 실무 지침서를 마련한 바 있는데, 여기에서도 균열을 가장 중요한 점검항목으로 설정하고 표 2.1에 정리한 바와 같이 구조부위별로 균열위치, 방향, 원인에 대하여 체계적으로 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 PC박스거더 열화의 1차적 징후로 나타나는 균열에 대하여 한계상태함수를 설정하고 내구성평가를 수행하였다.

### 3. 내구성한계상태

#### 3.1 기존의 연구내용

내구성 한계상태의 수립에 앞서 현재까지 개발되고 있는 콘크리트 구조물의 내구성평가에 관련된 연구동향을 살펴보면 표 3.1과 같다[宮本文穗, 1988]. 즉, 내구성평가에 관한 연구는 크게 열화현상의 개별적 평가와 종합적 평가에 관한 연구로 나눌 수 있다. 이 중에서 본 연구는 개별적 열화현상의 확률적 방법에 의한 내구성평가에 관련된다고 볼 수 있다.

이와 같은 확률적 방법에 의한 내구성평가에서도 한계상태함수에서 대상으로 하는 기본변수의 종류에 따라 두가지의 연구동향을 보이고 있다. 하나는 균열모멘트를 대상[Nowak/Groni, 1986; Al-Harthy/Frangopol, 1994]으로 하는 것이고 다른 하나는 허용균열폭을 대상[Naman/Siriaksorn, 1982; Shiraishi/Fruta, 1989; Zhao/Li, 1989]으로 하는 것이다. 그런데 지금까지의 연구는 내구성설계를 위한 이상적인 상태에서의 단순보의 휨 균열만을 대상으로 하고 있으며 고속철도 교량과 같은 포스트텐션 PC박스거더에 발생할 수 있는 각종 환경외력이나 다른 구조적 원인에 의한 실제 균열의 평가에 관련된 연구는 찾아볼 수 없다.

다음에는 본 연구에서 제안한 균열에 대한 한계상태함수의 토대가 된 허용균열폭을 대상으로한 Zhao/Li[1989]의 균열한계상태함수를 나타내었다.

$$g(\cdot) = W_a - W \quad (3.1)$$

표 3.1 내구성평가의 연구 동향 [宮本文穗, 1988]

구분	기법	특징
열화현상의 개별적 평가	확정적 방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항목별 점수제</li> <li>• 기준설정상의 문제</li> <li>• 불확실한 사항 발생시 평가곤란</li> </ul>
	확률적 방법	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 열화손상모델에 의거</li> <li>• 보수효과 고려하여 정량화 가능</li> <li>• 합리적 잔존수명 추정가능</li> </ul>
열화현상의 종합적 평가	Fuzzy 집합론	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현수준에서 주관적 판단을 내릴 수 없는 경우에 적용</li> <li>• 전문가시스템과 연계가능</li> </ul>
	전문가 시스템	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전산화 진단시스템에서 사용</li> <li>• 전문가로부터의 지식전달의 문제</li> </ul>

여기서,  $W_a$  = 구조물에 허용될 수 있는 최대균열폭 (확률변량);  $W$  = 작용외력에 의한 균열폭 =  $K_Z K_F K_Q K_A W_k$

이때,  $K_Z$  = 최대균열폭에 대한 size effect 관련 불확실량;  $K_F$  = 최대균열폭 추정식 관련 불확실량;  $K_Q$  = 하중효과관련 불확실량;  $K_A$  = 재료와 제원 관련 불확실량;  $W_k$  = 최대균열폭 추정식의 특성치

#### 3.2 본 연구의 방법

본 연구에서는 포스트텐션 PC박스거더의 내구성평가를 위한 한계상태함수 Zhao/Li[1989]에 의한 방법을 토대로 균열폭에 대하여 수립하되, 각종 열화요인에 의한 사하중 상태의 균열과 통행열차에 의한 균열의 향으로 하중변수를 구성하였다. PC박스거더에는 이상적으로 작용외력에 의한 휨 균열만이 발생하는 것이 아니라 Podolny[1985]가 언급한 바와 같이 다른 여러가지 외적조건에 의하여 균열은 피할 수 없는 것

이기 때문에 본 논문에서 제안한 방법은 PC박스거더의 진단을 위한 실제적 내구성평가에 합리적으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서 허용균열폭은 시방서나 관리자에 의하여 설정된 관리한계치를 채택하는 것이 바람직하다고 판단하여 확정량으로 취급하였고, 작용외력에 의한 균열폭은 활하중의 균열폭에 사하중상태의 균열폭을 추가하여 다음과 같은 새로운 균열한계상태함수를 제안하였다. [이승재, 1995]

$$g(\cdot) = W_a - (W_D + W_L) \quad (3.2)$$

여기서,  $W_a$  = 시방서 또는 관리자에 의하여 설정된 허용균열폭 (확정량);  $W_D$  = 여러 열화요인의 복합작용에 의한 사하중 상태의 균열폭;  $W_L$  = 활하중에 의한 균열폭

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

$$W_D = W_{D_s} N_{D_s} \quad (3.3)$$

$$W_L = w_L L_n K_W (1 + i_w) N_{L_w} \quad (3.4)$$

여기서,  $W_{D_s}$  = 사하중상태에서 조사된 균열폭의 실측치;  $w_L$  = 열차하중에 의한 균열폭 영향계수;  $L_n$  = 공칭활하중;  $K_W$  = 균열응답비 (계산치/실측치);  $i_w$  = 균열충격계수;  $N_{D_w}$  = 측정간의 불확실량 보정계수;  $N_{L_w} = L_n$ 을 추정하는데 있어서의 불확실량 및 실제 균열폭에 대한 편기를 조정하기 위한 보정계수 = ZPQA

이때,  $Z$  = 최대균열폭에 대한 size offset 관련 불확실량;  $P$  = 균열폭추정 관련 불확실량;  $Q$  = 하중효과 관련 불확실량;  $A$  = 재료 및 제원 관련 불확실량

한편 활하중에 대한 공칭균열폭은 휨, 전단, 비틀림 각각에 따라 틀리게 되는데 특히 휨균열에 대하여서는 지금까지 여러가지 제안된 식 [Siriaksorn, 1980]이 있으나 본 연구에서는 식 (3.5)와 같이 Zhao/Wang[1993]이 제안한 PC구

조물에 대한 균열폭 산정식에 기초하였다.

$$W_L = w_L L_n = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_s}{E_s} \left( \frac{30+d}{0.28+10\rho} \right) \quad (3.5)$$

여기서,  $C_1, C_2, C_3$  = 각각 하중효과특성, 부착특성, 하중작용특성에 관련된 계수;  $\sigma_s$  = 강재의 인장응력;  $E_s$  = 강재의 탄성계수;  $d$  = 강재의 직경;  $\rho = A_s / [bh_0 + (b_i - b)h_i]$ ,  $\rho \geq 0.02$  이면  $\rho = 0.02$  로 일정;  $A_s$  = 강재의 면적;  $b$  = 복부폭;  $h_0$  = 단면의 유효높이;  $b_i$  = 인장플랜지 폭;  $h_i$  = 인장플랜지의 두께

#### 4. 적용예제 및 고찰

##### 4.1 대상교량

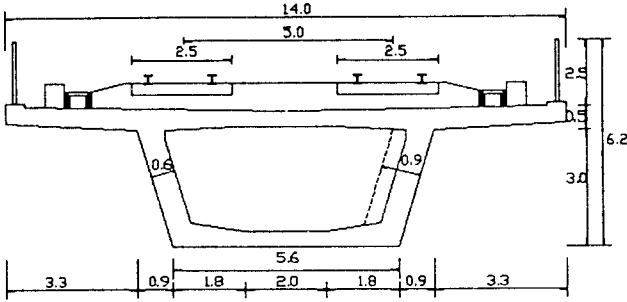
본 논문의 대상교량은 정부고속철도의 천안-대전간 시험선 구간에서 시공중인 연체교로서, 총 연장은 1915m이며 3경간 및 4경간 연속 PC박스거더를 MSS(Movable Scaffolding System) 공법에 의하여 시공하는 것으로 설계되어 있다. 본 논문에서는 이 중 3경간 연속교량을 대상으로 제안된 내구성평가 모형을 적용하고 고찰하였다. 일반사항은 표 4.1과 같으며 단면제원은 그림 4.1에 나타내었다.

표 4.1 대상교량의 일반사항

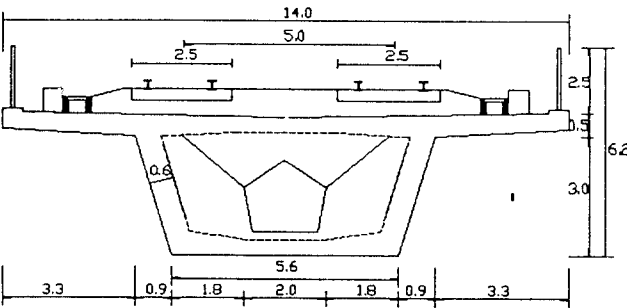
교량명		연체교
위 치		정부고속철도 시험선 구간 내
총길이		1915m
구조형식		3경간, 4경간 연속 PC박스거더교
공 법		MSS
대상구간		3경간 연속구간
제원	지간	L = 3@40 = 120m
	형고	h = 3.50m
	폭원	B = 14.0m
	케도	1.435m(복선, 케도중심간격:5.0m)
설계속도		350km/hr
활하중		HL하중
재료	PC 강재	SWFC-7B, $\phi=12.7\text{mm}$ , $A_p=98.71\text{mm}^2$
	콘크리트	$\sigma_{rk} = 400\text{kg/cm}^2$
	철근	$\sigma_v = 4000(\text{SD40}) \text{ kg/cm}^2$

표 4.1 확률변수의 가정치

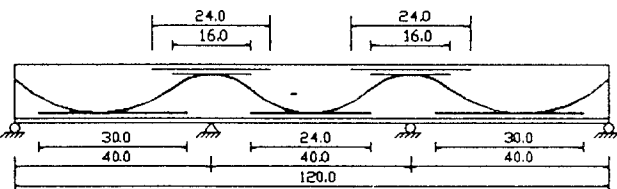
구 분	기 호	공칭값 (mm)	통 계 량		
			평균공 칭비	변동 계수	분포형
허 용 균열폭	$W_a$	0.2	-	-	-
사하중 균열	$W_D$	0.1	1.0	0.2	Log-normal
활하중 균열	$W_L$	0.06	1.0	0.2	Log-normal



(a) 중앙부



(b) 지점부



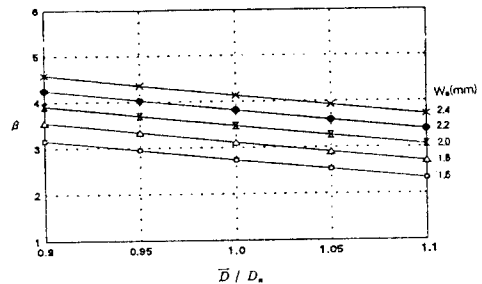
(c) 강선배치도

그림 4.1 상부구조 단면제원 (단위: m)

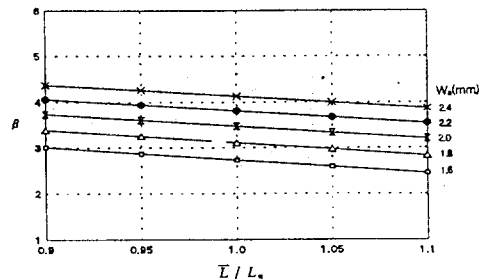
#### 4.2 민감도분석

제안된 내구성평가 모형의 민감도분석을 위한 수치예제를 표 4.2에 나타내었다. 이때 허용균열폭은 콘크리트 구조물에서 일반적으로 제한되는 균열폭인 0.2mm로서 확률값으로 가정하였다. 또한 실측균열폭과 계산균열폭의 비로 나타나는 균열응답비  $K_W = 0.9$ , 균열충격계수  $i_W = 0.02$ 로 가정하였다.

그림 4.2 와 4.3에는 사하중 및 활하중균열의 평균공칭비 변동계수의 변화에 따른 신뢰성지수  $\beta$ 의 민감도를 정해진 허용균열폭에 따라 정리하여 분석하였다. 그림 4.2로부터 하중의 평균공칭비가 커지면 신뢰성지수  $\beta$ 는 당연히 감소하지만 감소비율은 평균공칭비 10%의 변화에 대하여  $\Delta\beta/\Delta(\bar{D}/D_n) = -4.1$ ,  $\Delta\beta/\Delta(\bar{L}/L_n) = -2.9$ 로서 수치예제의 특성상 사하중 균열폭이 활하중 균열보다 상대적으로

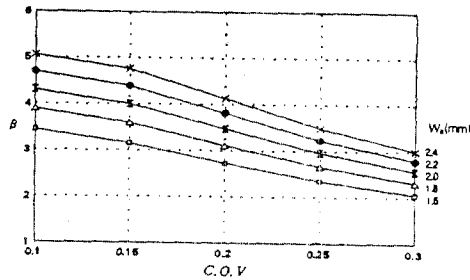


(a) 사하중

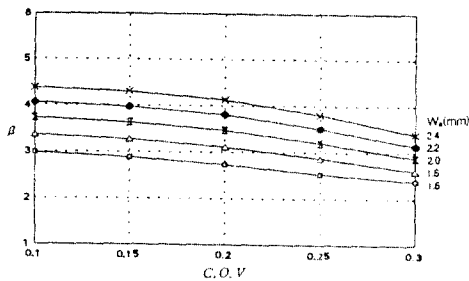


(b) 활하중

그림 4.2 신뢰성지수  $\beta$ 의 민감도  
(평균공칭비 vs. 신뢰성지수)



(a) 사하중



(b) 활하중

그림 4.3 신뢰성지수  $\beta$ 의 민감도  
(변동계수 vs. 신뢰성지수)

크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 그림 4.3으로부터 변동계수가 증가하면 신뢰성지수는 당연히 감소하지만 허용균열폭이 크면 감소비율도 크게됨을 알 수 있었다. 또한 허용균열폭을 2.0mm를 기준으로 10%씩 가감할 때마다 신뢰성지수는 약 20%정도 가감되어 허용균열폭의 선정이 구조물의 관리에 커다란 영향을 미치게 될 것임을 짐작할 수 있다.

#### 4.3 고찰

PC박스거더교량에 대한 열화의 1차적 징후는 균열로 나타나기 때문에 본 연구에서는 내구성 평가를 균열에 대한 한계상태모형으로 제안하였다. 본 논문에서 제안된 내구성평가 모형은 고속철도 교량과 같은 중요구조물의 유지관리를 위한 전산화 시스템에서 내구성평가를 위한 기본모형으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

고속철도 교량과 같은 중요구조물은 점점자에 의하여 균열의 발생 및 진전이 주기적으로 점검된다는 전제 아래, 하중변수를 사하중 상태

의 균열 및 활하중에 의한 균열의 향으로 모형화하였고 시방서나 관리자에 의하여 설정된 허용균열폭은 확정량으로 취급하였다.

#### 5. 참고문헌

1. 박석균 (1992). "철근 콘크리트 구조물의 내구성 진단." 콘크리트학회지(기술기사), 제 4 권, 제 3 호, pp. 61~69.
2. 이명우, 김영식, 김희완 (1990a). "콘크리트교량의 온도변화에 의한 균열과 대책 1." 대한토목학회지(학술기사), 제 38 권, 제 4 호, pp. 8~14.
3. 이승재 (1994). "고속철도 교량의 전산화 유지관리를 위한 신뢰성에 기초한 건전성평가 모형." 한양대학교, 박사학위논문. pp. 132 ~ 139
4. 한만엽 (1993). "콘크리트 건조수축의 이론적 예측에 관한 연구." 콘크리트학회지, 제 5 권, 제 1 호, pp. 157~164.
5. Al-Harthy, A. S. and Frangopol, D. M. (1994). "Reliability assessment of prestressed concrete beam." J. of Struct. Engrg., ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 180~199.
6. Beeby, A. W. (1979). "The prediction of crack widths in hardened concrete." The Structural Engineer, Vol. 57A, No. 1, Mar., pp. 9~16.
7. Freyermuth, C. L. (1991). "Durability of post-tensioned prestressed concrete structures." Concrete International, Oct., pp. 58~65.