

노후 콘크리트 구조물의 실용적 유지관리를 위한 콘크리트 구조물 안전진단 지침 분석

Analysis of Safety Evaluation Guidelines for Practical Maintenance of Existing Concrete Structures

이주형* · 조재열**

Joo-Hyung Lee · Jae-Yeol Cho

Abstract

In South Korea, problems caused by material deterioration of time-worn concrete structures have been increased recently. Because severe material deterioration could damage the structure's safety, it's important to evaluate the old structure's condition and structural capacity regularly to keep its proper performance. The safety evaluation of concrete structures has been initiated and performed periodically since 1995 according to a guideline in accordance with a law in Korea. The guideline prescribes the evaluation types, intervals and methods of the target structure. A lot of cost and labor have been invested every year to carry out the regular safety evaluation. However, it's not clear that the current manual could inspect the old structure's condition and assess the structural capacity precisely. Thus, the verification study initiated to figure out the Korean safety evaluation manual's practicalness. First, the Korean manual was analyzed and then compared with that of other countries for concrete bridges which are representative concrete structure. After that, the previously written evaluation reports were collected and analyzed to find out how the safety evaluation has been carried out. Based on the study results, the parts requiring verification of the manual were drawn. A research program is in progress in order to verify the parts by performing tests with actual structural members from decommissioned concrete bridges.

Keywords: Existing Concrete Structures(공용 중 콘크리트 구조물), Safety Evaluation(안전진단), Condition Inspection(상태평가), Structure Assessment(구조성능평가), Deterioration(재료열화)

1. 서론

건축 및 토목 구조물은 준공 이후 공용년수 증가에 따른 노후화가 발생하게 된다. 특히 콘크리트 구조물은 그 재료적 특성과 공정의 대부분이 현장에서 이루어지는 시공 상의 이유로 노후화로 인한 손상 및 열화가 발생하는 빈도가 강구조물에 비해

많다(국토해양부, 한국건설교통기술평가원, 2009). 콘크리트 구조물에서 발생하는 대표적 손상 및 열화는 균열, 백태/누수, 박리/박락, 재료분리 등이 있다.

이런 콘크리트 구조물의 노후화로 인한 안전성 저하 문제가 국내에서 최근 증가하고 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 2018년 11월 서울에 위치한 대중빌딩의 경우, 내부 인테리어 공사 과정

* 서울대학교 건설환경공학부 박사과정

** 서울대학교 건설환경공학부 교수(교신저자: jycho@snu.ac.kr)

에서 기둥의 균열과 피복 탈락 등 심각한 구조적 결함이 발견되어, 빌딩 사용이 금지되었다. 토목 분야에서는 서울의 대표적 간선도로인 동부간선도로에 위치한 정릉천고가에서 2016년 2월 긴장재 파단이 발견되는 사건이 발생하였다. 파단 긴장재 발견 직후, 수행된 긴급점검에서 해당 경간의 추가 긴장재 파단 및 손상이 발견되었다. 정릉천고가의 구조형식(PSC 박스거더)상 긴장재 파단은 교량의 안전성을 크게 저하하므로 상태가 불량한 긴장재의 교체가 즉시 수행되었다. 이 과정에서 동부간선도로 해당 구간이 약 한 달간 통제되는 등 시민들이 큰 불편을 겪게 되었다(서울특별시 외, 2017).

콘크리트 구조물의 공용년수 증가에 따른 노후화 문제가 점차 중요시되는 것은 통계자료에서도 확인할 수 있다. 한국의 경우, 1970~80년대의 급속한 경제 성장과 더불어 교량 건설이 본격화되기 시작되었다. 따라서 2020년에는 공용년수 30년 이상의 교량 비율이 15%에 불과하지만, 향후 10년 이내에 공용년수 30년 이상의 교량 비율이 44%에 도달하게 되는 등 노후 교량의 비율이 급속히 증가할 것으로 예상된다(국토교통부, 2019). 건축물의 경우에도 2020년을 기준으로 서울 건축물의 49.5%가 공용년수 30년을 초과하였으며, 5년 이내에 그 비율은 65.8%에 이를 것으로 조사되었다(뉴시스, 2020). 이렇게 구조물 노후화가 진행되는 상황에서 적절한 유지관리 시스템을 구축하는 것은 매우 중요하다.

우리나라보다 경제 성장이 앞선 미국의 경우 1920~30년대부터 본격적인 교량 건설이 시작되었고, 전체 교량의 67%가 콘

크리트 교량으로 구성되어 있다. 따라서 다수의 콘크리트교(2017년 기준 63%)가 공용년수 30년을 초과하는 등 교량 노후화 현상이 이미 상당히 진행되었다. 하지만 그동안 예산 문제 등으로 발생한 손상 및 결함에 대한 적절한 유지관리 조치가 시행되지 않았다. 결국 전체 교량의 9.1%가 'Structurally deficient'로 분류되는 등 심각해진 노후화로 인하여 구조물 안전성이 위협받게 되었다. 뒤늦게 수립된 유지관리 계획에 따라 산정된 노후교량 유지관리 비용은 2017년 기준 1,230억 달러로 천문학적인 예산이 필요한 것으로 추정되었다(AASHTO, 2017). 미국과 같이 적절한 유지관리에 실패하여 구조물의 안전성 저하뿐만 아니라 막대한 예산 소요문제를 겪지 않으려면 지금부터 합리적이고 효율적인 유지관리 시스템 구축이 필요하다고 판단된다.

적합한 구조물의 유지관리를 위해서는 먼저 사용 중인 구조물의 현재 상태와 구조성능을 정확히 평가하는 것이 중요하다. 구조물의 현재 성능을 알아야 그에 맞는 유지관리 계획을 수립하고 필요한 보수·보강을 실시할 수 있기 때문이다. 공용 중 콘크리트 구조물의 현재 성능은 안전진단 수행을 통해 평가되고 있다. 우리나라의 경우, 1995년에 '시설물의 안전관리에 관한 특별법'(이하 시특법)이 제정되었으며, 2017년에 '시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법'(이하 시설물안전법)으로 전면 개정되어 법령에 따라 정기적인 콘크리트 구조물의 안전진단을 수행해오고 있다(국토교통부, 2020). 현행 국내 콘크리트 구조물 안전진단 지침은 외관 육안조사와 비파괴 재료시험을 통한 '상태평가와 안전율 및 공용내하력 평가를 통한 '안전성평가' 수행을 통해 구조물의 안전등급을 산정하고 있다. 하지만 앞서 언급한 강남 대종빌딩과 정릉천고가의 경우, 심각한 결함이 발견되기 직전의 안전진단에서 각각 A 등급 및 B 등급으로 평가받는 등 현행 안전진단 시스템으로는 노후 구조물의 문제점이 제대로 조사되지 못하였다. 따라서 현행 안전진단 시스템이 노후 구조물의 성능을 정확히 평가할 수 있는지에 대한 검증이 필요하다고 판단된다. 이를 위하여 본 연구에서는 국내 콘크리트 구조물 안전진단 지침을 분석하였고, 국외 안전진단 지침과 비교 분석하였다. 추가로 국내 콘크리트교 안전진단 사례를 수집 및 분석하여 추후 검증이 필요한 사항을 확인하였다.

2. 국내 콘크리트 구조물 안전진단 분석

2.1 국내 콘크리트 구조물 안전진단 개요

1994년 성수대교와 1995년 삼풍백화점 붕괴사고 등과 같이 1990년대에 구조물 붕괴참사가 연달아 발생하였다. 이런 사고를 방지하기 위하여 1995년에 구조물의 유지관리에 관한 시특법



Fig. 1. Defects of Concrete Building and Bridge (Chosunilbo, 2019) (Seoul Metropolitan Government, 2017)

이 제정되었다. 이 법에 의거하여 정기적인 콘크리트 구조물 안전진단이 현재까지 수행되어 오고 있다. 2018년 이전에는 안전진단 수행 지침으로 ‘안전점검 및 정밀안전진단 세부지침’(이하 세부지침)이 적용되었으며, 2018년 이후에는 기존 안전진단에 성능평가가 추가되면서 안전진단 지침이 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(안전점검·진단 편)’과 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)’으로 구분되어 적용되고 있다. 각 세부지침은 공통편과 시설물(교량, 터널, 항만 등)에 해당하는 시설물 편으로 구분되어 있으며, 세부지침 내에 구조물의 상태평가와 구조성능평가 및 안전등급 산정에 관한 모든 내용이 수록되어 있다.

국내 콘크리트 구조물의 안전진단 종류는 정기안전점검, 정밀안전점검 및 정밀안전진단으로 구성되어 있다. 진단대상 구조물의 종에 따라 진단 종류가 결정되며, 표 1과 같이 전차 진단에서 산정된 안전등급에 따라 진단 주기가 결정된다.

Table 1. Type and Interval of Evaluation

Grade	Regular safety inspection	Full safety inspection	Full safety examination
A	More than once a half year	At least once every 3 years	At least once every 6 years
B, C	More than once a half year	At least once every two years	At least once every 5 years
D, E	3 or more times a year	At least once a year	At least once every 4 years

국내 콘크리트 구조물 안전진단은 외관조사와 재료시험을 통한 상태평가와 안전율 또는 공용내하력 평가로 구조성능을 평가하는 안전성평가로 구성되어 있다. 콘크리트 교량과 건축물 모두 기본적으로 안전율(=설계강도/소요강도)을 통해 그 구조성능을 평가한다. 콘크리트 교량의 경우, 평가된 안전율이 0.9에서 1.0으로 나온 경우 C등급이 부여된다. 이때 재하시험을 통한 공용내하력을 평가하여 공용내하력이 설계 하중 이상으로 확인된 경우에는 B등급을 부여한다. 콘크리트교량의 안전진단 흐름도는 그림 2에 나타나 있다.

2.2 상태평가

상태평가는 공용 중 콘크리트 구조물의 현재 상태를 외관조사 및 재료시험을 통해 평가하는 것이다. 외관조사와 재료시험 수행으로 구조물의 문제점(결함, 손상, 열화 등)을 파악하고 구성 재료의 상태변화를 추적하게 된다(국토교통부, 한국시설안전공단, 2019). 외관조사는 주로 육안을 통해 수행되며 구조물의 상태변화를 조사하여 기록하고 전차 상태평가 결과와 비교하여 그 진전성을 평가한다. 정밀안전진단에서 수행되는 재료 시험 종류는 표 2와 같다.

철근 부식은 콘크리트 구조물의 안전성을 크게 저하할 수 있기 때문에 수행되는 재료시험 항목의 상당수는 철근 부식과 관련되어 있는 것을 알 수 있다. 철근 부식은 배근된 철근을 둘러싼 콘크리트의 건전도에 큰 영향을 받는다. 따라서 콘크리트의 탄산

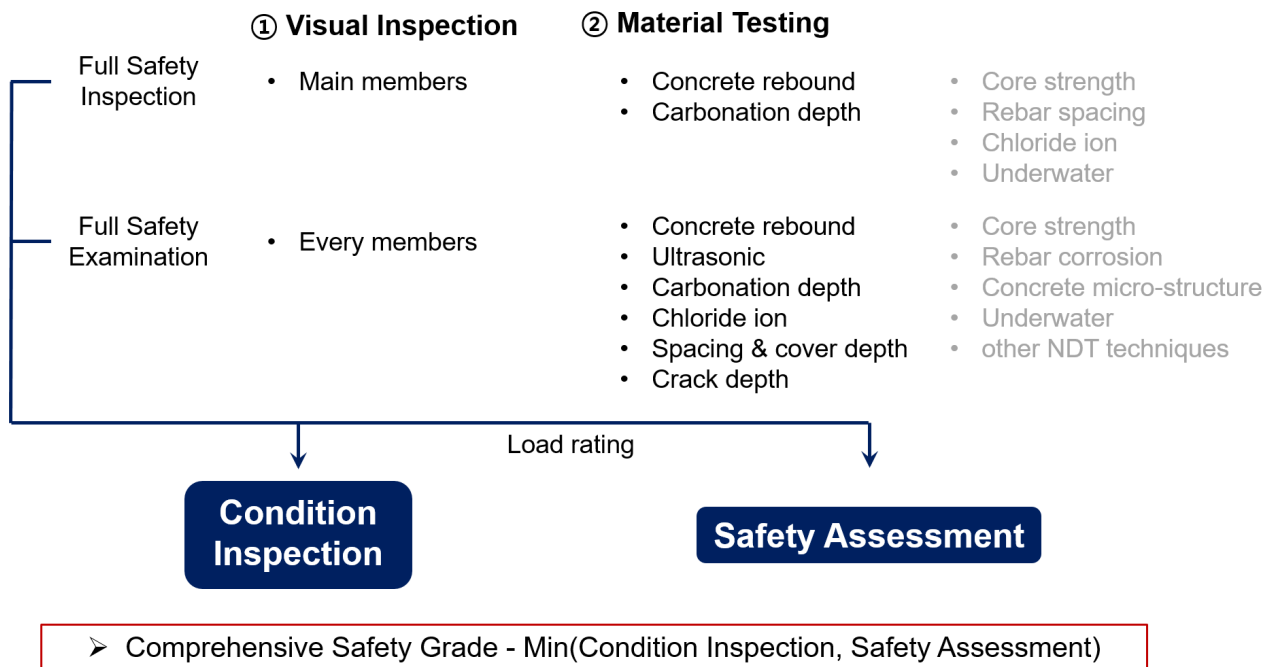


Fig. 2. Flow Chart of Concrete Bridge Safety Evaluation in South Korea

Table 2. Material Testings in Condition Inspection

Type	Material	Required task	Optional task
Full safety examination	Concrete	Rebound strength, Ultrasonic	Core strength
		Carbonation depth, Chloride ion	Material properties and Micro-structure
	Rebar	Spacing and cover depth	Corrosion degree
		Crack depth	

화 깊이와 염화물 함유량을 측정하고 균열 깊이를 조사하게 된다. 외관조사와 재료시험 수행 후 각 부재의 상태평가 결과를 a~e 등급으로 산정한다. 부재 별 상태평가 등급 산정 후, 구조 형식에 따른 부재별 가중치를 적용하여 구조물 전체의 상태평가 등급을 A~E등급으로 산정한다.

2.3 안전성평가

공용 중 콘크리트 구조물의 안전성평가는 구조물의 현재 상태를 반영하여 고정하중 및 활하중에 대한 구조물의 구조성능을 평가함으로써 이루어진다. 이때 구조성능은 구조물의 설계 개념(콘크리트 교량의 경우, 강도설계법)을 적용하여 기본적으로 안전율을 평가하고, 필요 시 내하력평가를 수행하도록 규정하고 있다. 구조물의 현재 상태는 상태평가에서 수행된 외관조사 결과를 적용하며, 재료 강도는 기본적으로 설계기준 강도를 적용한다. 단 재료열화가 심각한 것으로 추정되어 콘크리트 코어강도 압축시험 및 철근 인장시험 등과 같이 재료시험을 수행한 경우에는 시험 값을 적용한다. 안전율과 내하력평가 방법을 표 3에 정리하였으며, 상세 내용은 다음과 같다.

2.3.1 안전율(Safety Factor) 평가

콘크리트 부재의 안전율은 식 (1)을 적용하여 평가한다.

$$\frac{\phi M_u}{M_u} = \frac{\text{설계강도}}{\text{소요강도}} \tag{1}$$

설계강도 산정 시, 도로교 설계기준(국토해양부, 2010)의 강도감소계수와 강도계산식을 동일하게 적용하며, 재료강도는 해당 구조물의 설계기준 강도를 적용한다. 소요강도 산정 시, 고정하중으로 인한 효과는 실측 제원에 재료별 단위중량을 적용하여 계산하고, 활하중으로 인한 효과는 설계기준의 하중계수를 동일하게 적용하여 계산한다.

2.3.2 공용내하력 평가

1) 내하율(Rating Factor)

$$RF = \frac{\phi M_u - \gamma_d M_d}{\gamma_r M_f (1+i)} \tag{2}$$

콘크리트 교량의 내하율은 위 식 (2)를 적용하여 산정한다. 내하율의 기본 개념은 부재 강도에서 고정하중으로 인한 효과를 제거한 후, 활하중으로 인한 효과로 나누는 것이다. 안전율 평가 시와 동일하게 강도감소계수와 하중계수는 설계기준과 동일한 값을 적용한다. 활하중 효과 고려 시 충격계수를 적용하며, 충격계수는 건설기준코드의 값을 동일하게 적용한다. 충격계수를 적용하는 이유는 도로교의 경우, 노면 상태에 따른 차량의 진동으로 교량 상판과 주형에 차량 하중이 정적으로 작용할 때보다 더 큰 하중이 작용하기 때문이다(한국도로공사 도로연구소, 1997). 이와 같이, 내하율은 활하중에 대한 부재의 구조성능을 평가하는 개념으로 이해할 수 있다.

2) 응답보정계수 (Ks)

$$K_s = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \times \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} \text{ 또는 } \frac{\epsilon_{\text{계산}}}{\epsilon_{\text{실측}}} \times \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} \tag{3}$$

- 여기서, $\delta_{\text{계산}}$: 구조해석을 통해 얻은 처짐값
- $\delta_{\text{실측}}$: 정적재하시험에서 측정된 처짐값
- $\epsilon_{\text{계산}}$: 구조해석을 통해 얻은 변형률값
- $\epsilon_{\text{실측}}$: 정적재하시험에서 측정된 변형률값
- $i_{\text{계산}}$: 건설기준코드 충격계수 ($= \frac{15}{40+L} \leq 0.3$)
- $i_{\text{실측}}$: 동적재하시험에서 측정된 충격계수

이론적인 구조계산을 통해 산정된 내하율에 평가대상 교량의 설계 활하중을 곱하면 교량의 기본 내하력을 얻을 수 있다.

Table 3. Structure Capacity Assessment of Concrete Bridges

	Safety factor	Load carrying capacity
1	SF & RF	$SF = \frac{\phi M_u}{M_u}$ $RF = \frac{\phi M_u - \gamma_d M_d}{\gamma_r M_f (1+i)}$
2	Load combination	1.30D+2.15L
3	P_r	DB&DL load
4	ϕ	0.85 (Flexure)
5	K_s	$\frac{\delta_{\text{analysis}}}{\delta_{\text{test}}} \times \frac{1+i_{\text{analysis}}}{1+i_{\text{test}}}$
6	P	$K_s \times RF \times P_r$

기본 내하력으로 교량의 구조성능을 충분히 평가되지 못한다고 판단되는 경우, 재하시험 수행을 통해 얻은 응답보정계수를 적용해서 공용내하력을 평가하도록 규정하고 있다. 응답보정계수는 정적재하시험에서 측정하는 처짐 또는 변형률과 동적재하시험에서 측정하는 충격계수 부분으로 이루어진다. 따라서 정적 및 동적재하시험을 모두 수행해야 한다.

3) 공용내하력

산정된 내하율과 응답보정계수는 해당 구조물의 설계 활하중 (P_r)에 곱해져서 공용내하력을 계산하게 된다. 이렇게 얻어진 공용내하력을 설계 활하중과 비교하여 교량의 구조성능을 평가한다.

$$P = K_S \times RF \times P_r \quad \text{식 (4)}$$

2.4 안전등급 산정

안전진단 대상 구조물의 상태평가와 안전성평가 결과 등급을 비교하여 더 낮은 등급을 구조물의 종합평가 등급으로 산정한다. 산정된 등급을 토대로 보수·보강 계획을 수립하고 필요 사항을 조치하여 유지관리를 실시하고 있다.

3. 국내·외 안전진단 지침 비교 분석

3.1 국외 콘크리트교 안전진단 분석 개요

국내 콘크리트 구조물 안전진단 지침 분석에 이어 국외 콘크리트 교량 안전진단 지침을 분석하여 국내·외 지침을 비교 분석하였

다. 국외 콘크리트 안전진단 지침은 도로교에 관한 것으로 한정하였다. 분석한 국외 콘크리트교 안전진단 지침 목록은 표 4와 같다.

3.2 상태평가

국외 콘크리트 구조물 안전진단 지침을 분석한 결과, 우리나라와 동일하게 정기적으로 상태평가를 수행하도록 법에 의해 규정되어 있는 것을 확인하였다. 교량의 경우, 국가의 주요 시설물이므로 법령으로 그 유지관리를 수행하는 것으로 판단된다. 다만 상태평가를 수행하는 주기 및 조사방법은 국가별로 차이가 있는 것으로 조사되었다. 국가별 상태평가 지침에서 규정하는 내용을 표 5에 정리하였다.

‘상시조사’는 비정기적으로 교량의 외관 상태를 육안으로 간단히 점검하는 조사이다. ‘정기조사’와 ‘상세조사’에서 본격적

Table 4. Guidelines of Concrete Bridge Safety Evaluation

	Condition Inspection	Structure Capacity Assessment
Korea	- MOLIT, KISTEC (2019)	
USA	- AASHTO (2018) - FHWA (2012)	- AASHTO (2018)
Canada	- Alberta Infrastructure and Transportation (2008)	- CSA (2014)
UK	- Highways England (2020)	- Highways England (2020)
France	- SÉTRA (2010) - IQOA (1996)	- fib (2003) - EN 1990 (2002) - EN 1992-2 (2005)
Japan	- MLIT (2019)	- JRA (2012)

Table 5. Interval and Methods of Condition Inspection

Inspection type	South Korea	USA	Canada	UK	France	Japan	
Superficial	Name	Regular Safety Inspection	-	-	Safety Inspection	Routine Inspection	-
	Method	- Visual inspection	-	-	- Visual inspection	- Visual inspection	-
	Interval	3~6 months			Frequently	Frequently	
Routine	Name	Full Safety Inspection	Routine Inspection	Level 1 Inspection	General Inspection	IQOA Inspection	Periodic Inspection
	Method	- Visual inspection - Material testing	- Visual inspection - Acoustic	- Visual inspection	- Visual inspection	- Visual inspection - Acoustic	- Visual inspection - Acoustic
	Interval	1~3 years	2 years	21~57 months	2 years	3 years	5 years
Principal	Name	Full Safety Examination	In-depth Inspection	Level 2 Inspection	Principal Inspection	Detailed Inspection	Special Inspection
	Method	- Visual inspection - Material testing	- Visual inspection - Acoustic - Material testing	- Visual inspection - Material testing	- Visual inspection - Acoustic	- Visual inspection - Acoustic - Material testing	- Visual inspection - Acoustic - Material testing
	Interval	4~6 years	If necessary	If necessary	6~12 years	3~9 years	If necessary

인 교량의 상태를 평가하게 된다. 앞서 살펴보았듯이 한국에서는 정기조사 수준(정밀안전점검)에서도 재료시험을 수행하였다. 하지만 외국의 경우, 정기 조사에서는 육안조사와 타음검사(망치 등으로 표면을 타격하여 소리로 상태 이상 여부를 확인하는 검사)를 수행하고, 재료시험의 경우 상세조사에서 필요 시에만 수행하고 있었다. 재료시험은 콘크리트교 구성 재료의 내구성을 평가하기 위해 수행하는데, 구조물 표면에 발생하는 손상 및 열화는 육안조사와 타음검사로 확인이 가능하기 때문이다. 육안조사와 타음검사를 수행해서 문제점이 발견되면 이를 상세히 조사하기 위하여 재료시험을 수행하도록 하고 있다. 그리고 상태평가의 수행 주기 역시 한국이 외국에 비하여 대체로 짧은 것을 알 수 있다. 한국의 경우, 전차 안전진단 등급에 따라서 정기조사는 1~3년, 상세조사는 4~6년마다 수행하도록 되어있다. 반면 외국의 경우, 정기조사를 2~5년마다 수행하며 상세조사는 프랑스를 제외하고는 6년 이상의 주기를 갖고 있었다. 심지어 미국, 캐나다 및 일본에서는 정기조사에서 심각한 문제가 발생한 경우에만 상세조사를 수행하도록 규정하고 있었다.

국내외 상태평가 지침을 비교 분석한 결과, 모든 국가에서 정기적으로 상태평가가 수행되고 있으며, 육안조사가 기본적인 평가방법인 것을 확인하였다. 반면 외국에 비하여 국내에서는 재료시험이 주기적으로 수행되고 있으며, 수행 주기 역시 가장 짧은 등 요구되는 상태평가 수준이 높은 것을 알 수 있었다.

3.3 구조성능평가

3.3.1 구조성능평가 비교 분석 개요

각 국의 콘크리트교 구조성능평가 지침 분석 결과, 모두 평가 교량의 현재 상태를 반영하여 설계 개념과 동일한 방법으로 활하중에 대해 어느 정도의 구조성능을 가지고 있는지에 대해 평가하고 있다는 것을 확인하였다. 하지만 상태평가와 마찬가지로 정기적인 구조성능평가(정밀안전진단)를 수행하는 한국과 달리, 국외에서는 필요 시에만 구조성능을 평가하고 있었다. 여기서 ‘필요 시’는 설계 활하중 변경, 교통량 급격한 변화, 특정 과적 차량의 통행여부 판단, 구조적 안전에 영향을 끼칠 수 있는 결함 및 손상 발견 시를 의미한다(AASHTO, 2018). 국가별 구조성능평가 내용은 표 6에 정리하였다.

3.3.2 공용 중 콘크리트 교량 구조성능 평가

국내 지침의 안전율 및 내하율과 기본 개념은 동일하였지만 각각의 산정식에서 적용되는 강도 및 하중 관련 계수는 지침마다 다르게 적용되었다. 따라서 각 지침의 구조성능평가 정확성을 확인하기 위해서는 각 산정식을 상세히 비교 분석할 필요가 있다.

1) 하중계수

국내의 경우, 기본적으로 설계기준과 동일한 하중계수를 적용하고 있다. 하지만 미국과 캐나다의 경우, 구조성능평가의

Table 6. Summary of Structure Capacity Assessment Methods

		Korea	USA AASHTO MBE		Canada	UK	Japan JRA
		Detailed Guideline	LRFR	LFR	CSA S6-14	CS 454	Specifications
Structure capacity assessment	RF	$\frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_t M_i (1+i)}$	$\frac{C - (\gamma_{DC})(DC) - (\gamma_{DW})(DW) \pm (\gamma_P)(P)}{(\gamma_{LL})(LL+IM)}$		$\frac{UR_r - \alpha_D D - \alpha_A A}{\alpha_L L (1+I)}$	-	-
	SF	$\frac{\phi M_n}{M_u}$	-	-	-	$R_\alpha^* \geq S_\alpha^*$	$\frac{M_d}{M_u}$
Load combination		1,30D+2,15L	1,25D+1,75L 1,25D+1,35L	1,30D+2,17L 1,30D+1,30L	(1,03~1,11)D+ (1,35~1,77)L	1,15D1+1,75D2 + 1,50L	1,3D+2,5(L+1) 1,0D+2,5(L+1) 1,7(D+L+1)
Live load	Design	DB / DL	HL-93	HS	CL1-W	-	T-load / L-load
	Evaluation	-	Type 3, 3S2, 3-3	-	Special load	ALL 1, ALL 2	-
Member strength	ϕ	Same as design code					
	Condition good	Design strength					
	Condition poor	Material testing	Condition factor or Material testing	Material testing	Material testing	Material factor or Material testing	Material testing

목적에 따른 하중계수를 규정하고 있다. 예를 들어 미국 AASHTO MBE에는 Inventory Level과 Operating Level 두 가지 수준의 평가가 있는데, Inventory Level은 설계와 동일한 신뢰도 지수($\beta=3.5$)를 적용하고 Operating Level에서는 그보다 낮은 신뢰도지수($\beta=2.5$)를 적용하여 구조성능을 평가하게 된다. 이는 공용 중 구조물은 설계 시 보다 강도와 하중의 불확실성이 감소하기 때문에 설계와 동일하게 보수적인 신뢰도지수를 적용하면 유지관리 비용이 과다해질 수 있기 때문이다(AASHTO, 2018). 캐나다 역시 목표 신뢰도지수에 따른 하중계수를 선택할 수 있게 규정하고 있고, 영국의 경우에는 설계 시보다 낮은 값의 하중계수를 적용한다.

2) 활하중

한국의 경우 설계기준과 동일한 활하중을 적용하는 것과 달리, 미국, 캐나다 및 영국의 안전진단 지침은 설계 활하중에 추가로 평가 활하중을 제시하고 있다. 따라서 공용 중 교량의 구조성능을 평가 시, 평가 목적에 맞는 활하중을 선택할 수 있다. 평가 활하중의 경우, 설계 활하중보다 그 값이 작아서 해당 교량이 설계기준의 구조성능은 만족하지 못하더라도 공용 중에 요구되는 구조성능은 확보하였는지를 검토할 수 있다.

3) 부재 강도

부재 강도 산정 시에 강도감소계수 또는 재료계수는 모든 지침에서 설계기준과 동일한 값을 적용하고 있었다. 공용 중 구조물의 경우, 설계 시 보다 부재 강도의 불확실성이 감소하지만 이를 정량적으로 평가하기 어렵기 때문에 동일한 계수를 적용하고 있다(국토교통부, 한국시설안전공단, 2019). 때문에 상태평가 결과, 재료 열화가 심각하지 않다면 설계기준에서 제시하는 계수를 적용하여 공용 중 부재의 강도를 계산하게 된다.

반면 상태평가를 수행하여 심각한 재료 열화가 의심되는 경우에는 재료시험을 수행하도록 하고 있다. 콘크리트는 코어를 채취하여 압축강도 시험을 수행하고, 철근 및 긴장재의 경우 역시 시편을 채취하여 인장시험을 수행하여 부재 강도 산정 시에 재료시험 강도를 적용한다. 미국 AASHTO MBE의 경우, 재료시험 강도 대신 설계기준 강도를 적용하는 경우, 상태평가 등급에 따른 Condition factor를 적용해서 부재 강도를 감소시키고 있다.

3.3.3 구조성능평가 비교 분석 소결

분석한 모든 국가에서 공용 중 교량의 구조성능을 평가하는 기본 개념은 동일하였다. 하지만 국외 지침의 경우, 필요 시에 구조성능을 평가하고 있으며 기본적으로 구조계산을 통해 평가

를 수행하고 있었다. 추가로 일부 국가는 목적에 따른 하중계수 및 활하중 종류를 제시하고, 재료의 상태가 불량한 경우 계수를 적용하여 부재의 강도를 감소시키는 등 설계 시와는 다른 공용 중 교량의 특성을 구조성능평가 시에 반영하고 있었다. 특히 재하시험의 경우 구조해석만으로 충분한 평가가 되지 않는 특수한 경우에만 수행하도록 하여, 양호한 상태로 평가되는 교량의 경우에도 재하시험이 통상적으로 수행되는 국내에 비하여 합리적인 것으로 판단된다.

4. 기수행 국내 안전진단 케이스 분석

4.1 분석 케이스 개요

국내·외 콘크리트교 안전진단 지침 비교 분석에 이어 기수행된 국내 콘크리트교 안전진단 케이스를 수집 및 분석하였다. 김민영(2019)의 연구에서 서울특별시에 위치한 콘크리트 교량(한강 상의 교량 제외) 230개 중에서 29개 교량의 안전진단 보고서를 입수하였고, 이 중에서 설계도면 확보가 가능한 14개 교량에 대한 상세 분석을 수행하였다. 여기에 폐교량 실증실험 연구 대상 교량들의 안전진단 보고서를 추가하여 분석하였다. 각 교량들의 개요는 표 7에 정리하였다.

Table 7. Cases of Existing Concrete Bridges

No.	Type	Year	Grade		Design live load
			Condition inspection	Structure capacity	
1	PSC I	1966	B	A	DB/DL-18
2	PSC I	1966	B	A	DB/DL-18
3	RC T	1966	B	A	DB/DL-18
4	PSC I	1968	C	B	DB/DL-24
5	RC S	1968	C	A	DB/DL-18
6	PSC I	1968	C	A	DB/DL-18
7	PSC I	1970	B	A	DB/DL-24
8	PSC I	1976	B	A	DB/DL-18
9	PSC I	1977	C	A	DB/DL-18
10	PSC I	1977	C	A	DB/DL-18
11	PSC I	1979	B	A	DB/DL-18
12	PSC I	1983	B	A	DB/DL-24
13	PSC I	1984	C	A	DB/DL-24
14	PSC I	1986	C	B	DB/DL-24
15	PSC I	1977	C	A	DB/DL-18
16	PSC I	1975	C	D	DB/DL-18
17	라멘	1975	C	E	DB/DL-18
18	PSC I	1975	C	C	DB/DL-18

4.2 상태평가(비파괴 재료시험) 이력 분석

서울에 위치한 콘크리트 교량들의 재료시험 이력을 분석하였다. 여기서 분석된 비파괴 재료시험 종류는 반발경도와 탄산화깊이 측정으로 정밀안전점검에서 2년마다 수행되는 시험 항목이다. 그림 3과 4에 콘크리트교량의 거더와 바닥판에서 수행된 반발경도 시험 결과를 측정 연도별로 정리하였다. 13번 교량을 제외하고는 모두 상태평가에서 B등급 이상으로 양호한 상태였지만, 측정되는 콘크리트 반발경도는 연도마다 크게 다르게 평가되었다. 탄산화깊이 측정 결과 이력 역시 반발경도와 유사한 경향을 보였다. 콘크리트 비파괴시험의 경우, 기본적으로 콘크리트 재료의 불균일성, 시험위치의 차이, 시험자의 인위적 오차, 보수보강 효과 등 다양한 변수에 의해 그 측정값이 큰 영향을 받게 된다. 이러한 특성을 고려하여 비파괴시험 수행의 경

우, 더욱 상세한 지침 규정이 필요하다고 판단되었다. 현행 안전진단 지침에 의해서는 교량의 내구성 변화 이력을 일관성 있게 확인하기 어렵다고 판단되었다.

4.3 국내외 지침별 구조성능평가 결과 비교 분석

국가별 안전진단 지침에서 공용 중 콘크리트 교량의 구조성능평가 시에 적용하는 강도 및 하중계수가 다른 것을 앞서 확인하였다. 이 말은 동일한 교량에 대해서 어떤 안전진단 지침을 적용하는지에 따라서 그 교량의 구조성능이 다르게 평가될 수 있음을 의미한다. 따라서 국내·외 콘크리트교 안전진단 지침을 적용하여 평가되는 구조성능이 어떻게 다른지 살펴보았다.

국내 콘크리트교량은 국내 설계기준의 활하중을 기준으로 설계되었으므로, 이를 적용하여 비교를 수행하였다. 부재 강도 계산 시, PSC-I 교량의 경우 정확한 해석을 위하여 변형률 적합 조건을 적용한 단면해석을 수행하였고, RC 교량의 경우 설계기준에서 규정하는 직사각형 응력블록을 이용하여 단면 강도를 계산하였다. 부재 강도계수 또는 재료계수는 각 안전진단 지침의 값을 적용하여 그 값에 따라 평가되는 교량의 구조성능을 비교하였다. 캐나다 교량 평가지침으로 사용되는 Canadian Highway Bridge Design Code S6-14의 경우, 거더 조건에 따라 고정 및 활하중계수가 다르게 적용된다. 따라서 분석대상 교량의 종류에 해당하는 하중계수를 적용하여서 분석을 진행하였다. 적용되는 내하율에 대한 비교 결과를 그래프로 나타내면 그림 5와 같다.

그림 5에서 볼 수 있듯이, 동일한 교량이어도 적용하는 안전진단 지침 종류에 따라서 다른 내하율이 평가되었다. 특히 국내 안전진단 지침을 적용한 경우에 가장 낮은 내하율이 산정되

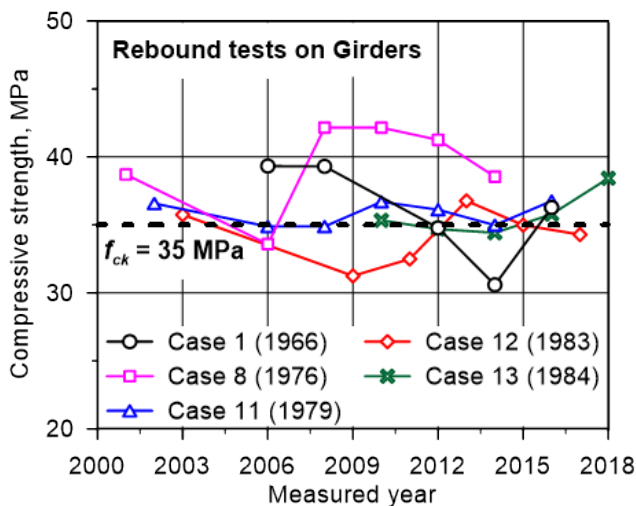


Fig. 3. History of Rebound Tests on Girders

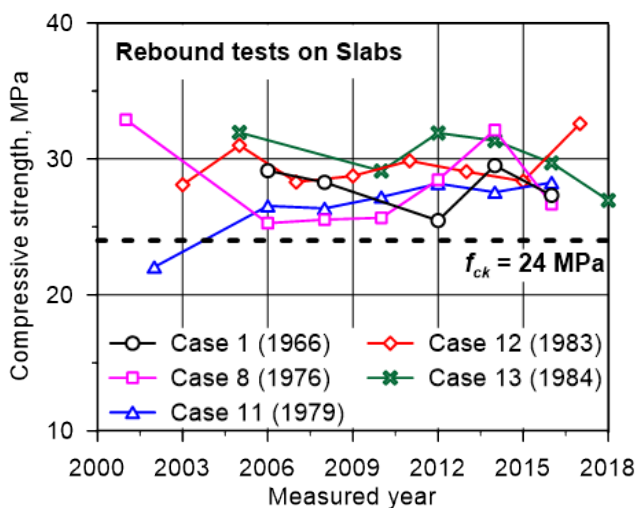


Fig. 4. History of Rebound Tests on Slabs

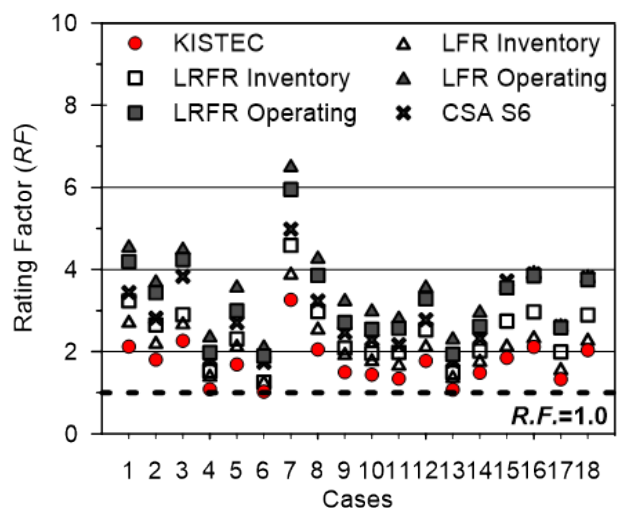


Fig. 5. Rating Factors of Bridges

었다. 이는 국내 지침의 경우, 설계기준과 동일한 하중계수를 적용하는 등 항상 설계 수준에서 교량의 구조성능을 평가하기 때문에 판단된다. 설계 시와 달리 공용 중 교량의 경우, 상세하고 정확한 상태평가가 수행을 통해 교량에 적용되는 하중과 강도의 불확실성을 감소시킬 수 있다. 따라서 국외 지침과 같이 감소된 불확실성을 구조성능 평가 시에 반영할 수 있다면, 더 합리적인 교량 안전진단 수행이 가능하다고 판단된다.

5. 결론

콘크리트 구조물은 구성 재료와 시공 과정의 특성상 공용년 수 증가에 따른 손상 및 열화가 발생하여 그 성능이 점차 감소할 수 있다. 따라서 구조물이 사용 기간 동안에 요구되는 성능을 확보하는지 여부를 정기적인 안전진단을 수행을 통해 평가하고 그에 따른 유지관리를 수행하고 있다. 한국의 경우, 1995년 시트법 제정 이후, 주기적으로 콘크리트 구조물의 상태평가와 구조성능평가를 수행해오고 있다. 공용년수 30년 이상의 노후화 구조물의 비율이 급속히 증가하고 있는 현 시점에서, 현행 국내 안전진단 지침의 실용성 및 효율성 검증이 필요하다고 판단되었다. 본 연구에서는 국내·외 콘크리트 교량 안전진단 지침의 비교 분석하고, 기수행된 국내 안전진단 결과를 분석하였다.

1) 국내 콘크리트 교량 안전진단은 외관조사와 재료시험을 수행하는 상태평가와 구조성능을 평가하는 안전성평가로 구성되어 있다. 1종시설물의 경우, 정기적으로 상태평가와 안전성평가를 모두 수행한다.

2) 콘크리트교량의 구조성능은 기본적으로 강도설계법을 적용한 안전율로 평가하며, 필요 시 재하시험을 동반한 공용내하력을 평가한다. 하지만 기수행 안전진단 보고서를 분석한 결과 안전율이 1.0 이상인 경우에도 재하시험을 수행하여 공용내하력을 평가하는 경우가 대부분이었다.

3) 국외 안전진단 지침을 분석한 결과, 상태평가는 모든 지침에서 정기적으로 수행하도록 규정되어 있었다. 상태평가는 기본적으로 육안조사와 타음검사를 통해 교량 외관 상태의 건전성을 평가하였다. 반면 구조성능평가의 경우, 상태평가에서 심각한 결함이 발견되어 구조성능 저하가 의심되는 경우 등의 필요한 경우에 수행하고 있었으며, 재하시험 역시 구조해석으로 충분한 평가가 되지 않는 경우에만 수행하고 있었다.

4) 미국과 캐나다의 안전진단 지침에서는 평가 목표에 따른 하중 계수를 제시하고 있었는데, 이는 설계 시보다 감소한 공용 중 상태의 재료 및 하중의 불확실성을 반영하기 위함이다. 추가로 미국 AASHTO MBE의 경우, 교량의 외관상태가 불량한 경

우, 재료시험을 하지 않더라도 적용할 수 있는 강도감소계수를 제시하고 있었다.

5) 기수행된 콘크리트 교량의 안전진단 보고서를 수집 및 분석한 결과, 현재 비파괴 재료시험 수행방법으로는 일관성 있는 재료열화 경향성 파악이 어려웠다. 그리고 국내·외 지침에 따라 동일한 교량의 구조성능을 평가한 경우, 국내 안전진단 지침에서 가장 낮은 안전율과 내하율이 산정되었다. 이는 국내의 경우, 항상 설계와 동일한 수준에서 공용 중 교량의 구조성능을 평가하기 때문에 판단된다.

국내 콘크리트 구조물 안전진단 지침을 분석하고, 국외 지침과 비교한 결과, 국내 지침의 효율성 및 정확성에 대해 추가 검증연구가 필요한 것을 알 수 있었다. 현행 국내 콘크리트 구조물 안전진단 지침의 검증 및 개선에 관한 연구는 폐교량에서 입수한 부재를 대상으로 재료 및 부재단위 실증실험을 통하여 현재 진행 중에 있다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 건설기술연구개발사업의 연구비 지원(20SCIP-B128487-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 국토교통부, 한국시설안전공단(2019), 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」.
2. 국토교통부(2020), 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」.
3. 국토해양부(2009), 「사회기반 콘크리트 구조물의 성능평가 통합시스템 구축」.
4. 국토해양부(2010), 「도로교 설계기준」.
5. 김민영(2019), 「공용 중인 콘크리트 교량의 성능평가 방법 타당성 분석」, 석사학위논문, 서울대학교.
6. 서울특별시 외 5개 기관(2017), 「서울시 관내 PSC박스거터교 긴장재 유지관리방안 수립 학술용역 종합보고서」.
7. 한국도로공사 도로연구소(1997), 「교량의 충격계수에 관한 연구」.
8. Alberta Infrastructure and Transportation (2008), "Bridge inspection & maintenance system", Government of the province of Alberta.
9. AASHTO (2017), "AASHTO infrastructure report card", American Association of State Highway and Transportation Officials.
10. AASHTO (2018), "The manual for bridge evaluation 3rd edition", American Association of State Highway and Transportation Officials.

11. CSA Group (2014), "S6-14 Canadian highway bridge design code", CSA Group.
12. FHWA (2012), "Bridge inspector's reference manual", Federal Highway Administration.
13. fib (2003), "Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures", fib.
14. Highways England (2020a), "CS 450 Inspection of highway structures", Highways England.
15. Highways England (2020b), "CS 454 Assessment of highway bridges and structures", Highways England.
16. IQOA (1996), "Bridge classification", IQOA.
17. JRA (2012), "Specifications for Highway Bridges", Japan Road Association.
18. MLIT (2019), "Road bridge periodic inspection procedure", MLIT.
19. SETRA (2010), "Technical instruction for the supervision and maintenance of structures", SETRA.
20. 뉴스시스 (2020). https://newsis.com/view/?id=NISX20200801_0001115299&cID=10201&pID=10200.
21. Chosunilbo (2019). http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2019/04/10/2019041001280.html?utm_source=naver&utm_medium=original&utm_campaign=news.