

고속도로 교량의 상태 분석에 근거한 점검 활동 개선에 관한 연구

전준창* · 이일근** · 박창호*** · 이희현****

Jeon, Jun Chang*, Lee, Il Keun**, Park, Chang Ho***, Lee Hee Hyun****

A Study on Improvement of Inspection Activity Based upon Condition Analysis of Expressway Bridges

ABSTRACT

In this paper, detailed safety inspection reports on the 915 expressway bridges which had been published from 1996 to 2010 are collected and condition of these bridges are analyzed. Damages are categorized into 'damage by defect', 'damage by physical force', and 'damage by deterioration' and the concept of damage possession rate is introduced to investigate the occurrence time and the characteristics of damages. Based on the top 10 damage patterns of expressway bridges and the deterioration characteristics of heavy snow and freezing cold area, reasonable improvement direction of inspection activity is suggested. From this study, it is known that improvement of inspection regularization during construction or at completion stage of bridges is needed. Since the deterioration progress of the heavy snow and freezing cold area is faster than that of general area, environmental characteristics should be considered in inspection activity. The results of present study can be widely used for improvement of inspection activity of expressway bridges.

Key words : Damage analysis, Damage characteristics, Safety inspection, Improvement of inspection activity, Expressway bridge

초 록

이 논문에서는, 1996년부터 2010년까지 915개 고속도로 교량에 대해 실시된 정밀안전진단 보고서를 수집하여 이들 교량의 상태를 분석하였다. 분석시 손상을, 결함, 물리적 및 열화에 의한 손상으로 구분하여 손상이 많이 발생하는 시기를 조사하고, 유손상율의 개념을 도입하여 손상의 특징을 조사하였으며, 고속도로 교량의 10대 손상, 다설한랭지역 교량과 일반지역 교량의 열화특성을 비교하여 합리적인 점검활동 개선 방향을 제시하였다. 연구결과, 시공시 실시하는 점검 또는 초기점검 제도 개선이 필요하고, 다설한랭지역의 경우 열화진행 속도가 빠르므로 주변 환경의 특성을 고려한 점검 활동 개선이 필요한 것으로 판단되었다. 이 연구 결과는 향후 고속도로 교량의 점검 활동 개선을 위해 널리 활용될 수 있을 것이다.

검색어 : 손상분석, 손상특성, 안전점검, 점검활동 개선, 고속도로 교량

1. 서론

1995년 시설물의 안전관리에 관한 특별법(이하 「시특법」이라 한다)이 제정·공표되고, 이에 따라 1, 2종 시설물들의 안전점검 및 정밀안전진단이 범국가적인 차원에서 주기적으로 이루어지고 있다. 그러나 시특법 시행 이래 약 20년이 경과하면서 보다 합리적이고 과학적인 점검·진단 체계를 구축하기 위해 국토교통부와 한국시설안전공단에서는 수차례 법 개정을 하고, 정밀점검 및 정밀안전진단

* 교신저자·씨티씨(주) 전무이사 (Corresponding Author·CTC Co., Ltd.·cj@ctceng.co.kr)

** 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 (Korea Expressway Corporation·lik@ex.co.kr)

*** 중신회원·한국도로공사 도로교통연구원 연구위원 (Korea Expressway Corporation·ch_park@ex.co.kr)

**** 중신회원·씨티씨(주) 대표이사 (CTC Co., Ltd.·lh@ctceng.co.kr)

Received August 4, 2016/ revised September 29, 2016/ accepted November 25, 2016

세부지침도 보완하는 등 많은 노력을 기울이고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015; Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012a). 이로 인해 후진국형의 시설물 안전사고를 방지하고, 시설물 유지관리 선진화에 큰 기여를 했다는 것은 자타가 공인하는 사실일 것이다. 그러나 최근, 교량설계 기준이 한계상태설계법 또는 하중저항계수설계법으로 변경되는 과도기적인 시점에 있어(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012b), 이를 고려하여 교량의 상태평가도 성능중심형으로 이루어지도록 한국건설기술연구원과 한국시설안전공단을 중심으로 개선작업이 이루어지고 있다.

교량의 상태평가 및 점검체계 등에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행된 바 있다. Oh et al. (2012)은 교량 바닥판의 효율적인 유지관리를 위한 기초자료를 제공하고자 일반국도 교량을 대상으로 상부구조형식, 연장, 공용년수 등을 고려한 바닥판 상태평가등급을 분석하였다. 연구를 통해 바닥판의 상태등급이 C등급 이하로 저하되는 시기는 공용년수 10~20년 사이로서 이 시기에 집중적인 유지관리가 필요하다고 하였다. Park et al. (1997)은 일반국도 교량에 대해 수행된 점검결과를 바탕으로 전반적인 교량상태와 주요 손상부위를 분석하였다. 슬래브교, PSC Beam교 및 라멘교에 대한 효과적인 보수 및 보강공법 개발이 필요하고, 주부재에 비해 교량받침이나 신축이음장치 등에서 손상발생 빈도가 높다고 하였다. Hwang and An (2008)은 바닥판의 상태평가와 관련하여 안전 점검 및 정밀안전진단 세부지침과 기 수행된 점검 및 진단보고서의 문제점을 분석하여 기술자로 하여금 보다 효율적이고 일관된 평가를 유도할 수 있는 개선방안을 제시하였다. 건축물에 대한 손상분석은 Kong et al. (2013)에 의해 수행된 바 있는데, 70% 이상의 손상이 건조수축 및 재료특성에 기인한 비구조적인 요소에 의한 것이라고 하였다. 이상의 연구들은 주로 점검대상 부재의 상태등급에 초점이 맞추어져 있으며, 세부적인 손상유형 분석 등에 대한 내용은 누락되어 있다.

교량의 점검체계에 관한 연구는 주로 점검주기에 대해 수행되어 왔다. Lee and Kim (2015)은 점검주기의 효율적 조정을 위해 기존의 상태등급에 기반한 점검주기 체계에서 교량의 노출환경을 고려한 위험도 기반 점검체계에 대해 검토하였으며, 상태등급에 따라 기존의 점검주기를 조정하는 안을 제시하였다. Lee (2001)는 한국과 독일의 교량 유지관리체계 및 구조부재의 손상자료를 분석하여 초기에 손상을 발견할 수 있는 교량 점검주기를 제안한 바 있다. Jeon et al. (2013a) and Jeon et al. (2013b)은 고속도로 교량의 손상분석을 통해 시공 중의 하자가 손상의 대부분을 차지한다고 밝힌 바 있으나, 이 연구에서는 분석대상을 교량 주부재로 한정하였다. 한편, 국외의 연구로서 런던 교통국은 교량의 손상 등에 대한 취약성, 기후 등의 노출환경 그리고 교량의 손상이 미치는

사회적 영향을 고려하여 점검주기를 차별화하는 방안을 제시하였다(Transport for London, 2011). Agrawal and Kawaguchi (2009)는 점검주기를 차등화하기 위한 기초연구로서 교량 점검자료에 기초하여 열화모델을 구성하고, 위험도 수준을 평가하기 위한 영향 인자를 분류하였다. 미국 교통연구위원회에서는 효율적인 점검활동을 위해 미국의 각 주 뿐만 아니라 유럽 주요국가의 교통 정책, 점검인원, 점검방법, 점검주기 및 점검품질에 대해 비교 분석하였다(Transportation Research Board, 2007). 이와 같은 국내외의 교량 점검체계에 관한 연구는 대부분 한정된 수량의 교량 손상 데이터 또는 문헌 상의 자료에 기초하고 있으나, 교량의 합리적인 점검체계를 제시하기 위해서는 광범위한 실제 손상 데이터 분석이 선행되어야 한다.

이 논문에서는, 1996년부터 2010년까지 915개 고속도로 교량에 대해 실시된 정밀안전진단 보고서를 수집하여 이들 교량의 상태를 분석하였다. 상태분석을 위해 교량요소를 콘크리트 구조부재(바닥판, 거더, 교대 및 교각), 강재 구조부재 및 부대시설(교량받침, 신축이음장치 등)로 구분하고, 이들 요소의 주요 손상을, 초기하자로 인한 '결합에 의한 손상', 공용중 '물리력에 의한 손상' 및 경시적 '열화에 의한 손상'으로 분류하여 각각의 발생빈도와 세부원인을 분석하였다. 구조물의 준공초기단계에서 발생하는 결합의 발생빈도가 높으면 초기점검 및 시공중 점검의 수준을 현재보다 강화할 필요가 있다는 것을 의미하며, 또한, 결합의 세부 발생원인에 대한 분석을 통해 설계 및 시공관리에 피드백하여 결합 발생빈도를 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 손상 통계분석을 통해 손상유형별, 구조부재(부대시설)별, 손상원인별, 손상발생시기별 특성이 파악되면 교량점검시 어떠한 방법으로 점검을 수행할 것인지, 어떠한 부재 또는 손상을 중점적으로 점검할 것인지, 손상을 줄이기 위해서는 설계, 시공 및 유지관리에 있어서 어떠한 항목을 개선할 것인지, 유지관리정책을 어떠한 방향으로 수립할 것인지에 대한 의사결정에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

이 논문에서는, 손상통계 분석시 유손상율과 손상차지비율의 개념을 도입하여 고속도로 교량의 손상특성을 조사하고, 가장 빈번히 발생하는 10대 손상을 제시하였으며, 다설한랭지역 교량과 일반 지역 교량의 열화특성을 비교하여 동결융해 및 제설제의 영향을 검토하였다. 따라서, 이 연구결과는, 향후 고속도로 교량의 점검활동 개선을 위해 널리 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구대상 교량

2.1 연구대상 교량의 분포

국내 고속도로는 2010년 12월 기준으로 경부선을 비롯하여 총 33개 노선이 운영되고 있으며, 고속도로상의 교량은 총 7,805개

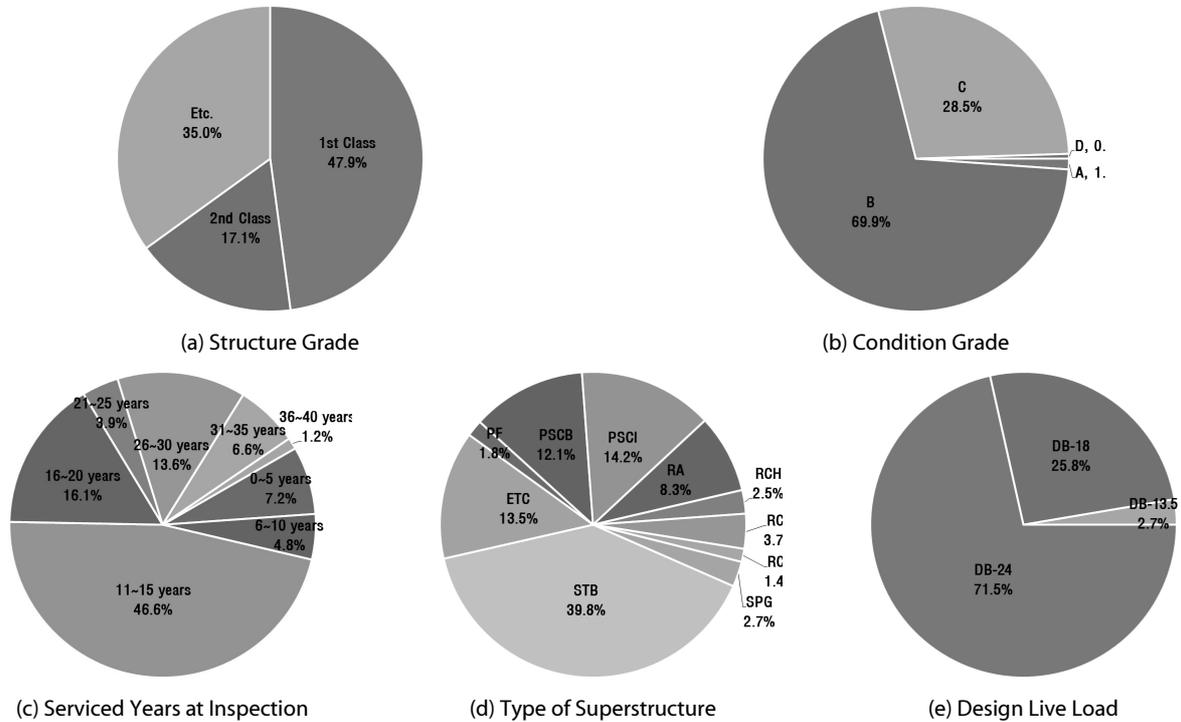


Fig. 1. Classification of Target Bridges

다. 이 논문에서는, 1996년부터 2010년까지 시트법에 따라 실시된 915개 고속도로 교량의 정밀안전진단 보고서를 수집분석하여 이들 교량의 손상 상태를 분석하였다.

연구대상 교량을 시설물등급, 상태등급, 진단 당시의 공용년수, 상부구조형식, 설계활하중에 따라 분류하여 Fig. 1에 나타내었다. 시설물등급에 따라 분류한 Fig. 1(a)에 의하면 1종시설물에 대한 정밀안전진단이 전체의 약 47.9%로서 가장 큰 비율을 차지하며, 기타시설물, 2종시설물의 순서로 나타났다. 「시트법」에 점검주기가 규정되어 있지 않은 기타시설물의 정밀안전진단 비율이 2종시설물에 비해 크게 나타난 것은 한국도로공사에서 자체적으로 실시하는 정밀안전진단이 기타시설물이 다수 포함되었기 때문이다. 한편, Fig. 1(b)에 의하면 정밀안전진단결과 평가된 연구대상 교량의 상태등급은 B등급이 가장 많으며, C등급도 약 28.5%로서 적지 않은 비율을 차지하고 있음을 알 수 있다.

연구대상 교량을 진단 당시의 공용년수에 따라 분류하여 나타낸 Fig. 1(c)에 의하면 11~15년 범위의 공용년수를 갖는 교량이 약 46.6%를 차지하며, 공용년수가 30년을 초과하는 교량도 약 7.8% 포함되어 있다. 상부구조형식에 따른 분류에서는 Fig. 1(d)에서 보는 바와 같이, 강합성 박스거더교(STB)가 가장 많았고, PSC Beam교(PSCI), PSC 박스거더교(PSCB), RC 라멘교(RA)의 순으로 나타났다. Fig. 1(e)에 의하면 설계활하중은 DB-24인 교량이 약 71.5%를 차지하고 있다.

2.2 연구대상 교량의 대표성 및 분석결과의 한계

연구대상 교량들이 고속도로 교량의 상태를 파악하는 대표적 교량형식인지 여부를 확인하기 위하여 시설물등급, 상태등급, 상부구조형식 및 설계활하중에 따라 전체 교량 수와 연구대상 교량 수를 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. Table 1에는 전체 교량과 연구대상 교량의 공용년수를 상부구조형식의 재료(콘크리트, 강재)로 구분하여 나타내었다. 콘크리트교량과 강교량이 혼합되어 있는 교량의 경우에는 콘크리트교량과 강교량 양쪽 모두에 포함시켜 수량을 계산하였다. 또한, 그림과 표에 나타난 전체 교량에 대한 대상 교량의 비율이 100%를 초과하는 것은 동일교량에 대해 2회 이상의 정밀안전진단이 수행된 경우이다.

Fig. 2(b), Fig. 2(d) 및 Table 1에 의하면 상태등급이 C등급 이하, 설계활하중이 DB-18 이하, 또는 공용년수가 26년 이상인 교량에 대한 정밀안전진단 수행 비율이 전체 교량에 비해 높은 것으로 나타나 노후되었거나 내하성능이 부족하다고 판단되는 교량을 정밀안전진단 우선순위로 하였음을 알 수 있다.

Fig. 2(a)에 의하면 전체 1종시설물 중 약 46.1%에 해당하는 교량이 분석대상이며, 2종시설물 및 기타시설물의 경우에는 각각 약 10.7% 및 약 7.4%로 나타났다. 전체 교량은 기타시설물의 비중이 높지만 연구대상 교량의 기타시설물 비중이 낮은 것은 정밀안전진단은 주로 1종 및 2종시설물을 대상으로 하기 때문이다.

상태등급이 C등급 및 D등급 교량은 대부분 분석대상에 포함되

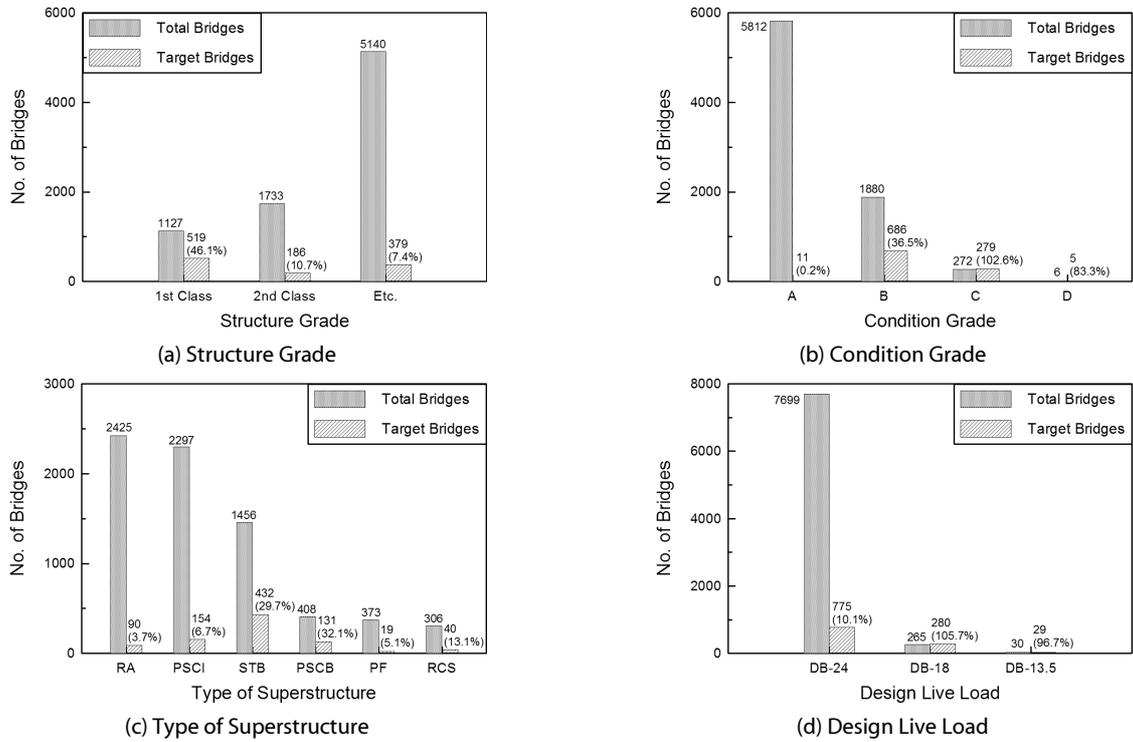


Fig. 2. Classification of Total and Target Bridges

Table 1. Comparison of Serviced Years of Total and Target Bridges

Items		Serviced years at inspection							
		0-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35	36-40
Total bridges	Total	1219	1739	2579	1385	388	390	48	48
	Target	78	52	506	173	42	147	72	13
	%	6.4	3.0	19.6	12.5	10.8	37.7	150.0	27.1
Concrete bridges	Total	984	1321	2002	1112	330	344	40	48
	Target	42	38	174	103	32	120	54	9
	%	4.3	2.9	8.7	9.3	9.7	34.9	135.0	18.8
Steel bridges	Total	256	436	594	288	63	53	8	1
	Target	37	18	359	76	11	32	20	4
	%	14.5	4.1	60.4	26.4	17.5	60.4	250.0	400.0

며, B등급은 전체 B등급 교량의 약 36.5%, A등급은 전체 A등급 교량의 0.2% 정도만이 분석대상에 포함된다는 것을 Fig. 2(b)에서 알 수 있다. 또한 Fig. 2(b)로부터, 전체 고속도로 교량의 평균적인 상태등급은 A등급에서 B등급으로 진행되는 단계이며, 연구대상 교량은 B등급에서 C등급으로 변화하는 단계로 판단할 수 있다.

상부구조형식에 따라 분류한 Fig. 2(c)를 살펴보면 PSC 박스거더교(PSCB), 강합성 박스거더교(STB), RC 슬래브교(RCS), PSC Beam교(PSCI)의 순서로 분석대상 비율이 높은 것을 알 수 있다. 연구대상 교량의 RC 라멘교(RA)의 비중이 낮은 것은 위에 언급한

바와 같이 정밀안전진단은 주로 1종 및 2종시설물을 대상으로 하기 때문이다.

설계활하중에 대해서는 DB-18 이하의 교량은 대부분 분석대상에 포함된다는 것을 알 수 있는데, 이는 공용년수 및 손상정도와 연관이 있는 것으로 판단된다(Fig. 2(d) 참조). 한편, Table 1에 정리된 데이터로부터 계산된 평균공용년수는 전체 교량이 13.2년, 연구대상 교량이 16.4년으로 약 3년의 차이가 있는 것으로 나타났다 (Korea Expressway Corporation (Expressway and Transportation Research Institute), 2013).

전체 고속도로 교량 중 점검주기가 규정되어 있는 않은 기타시설 물의 비율이 약 64%로서 가장 높다는 점(Fig. 2(a) 참조)과 전체 교량과 연구대상 교량의 평균적인 상태등급에 차이가 있다는 점(Fig. 2(b) 참조), 그리고 전체 교량과 대상 교량의 평균공용년수가 약 3년의 차이가 있다는 점을 고려하면 연구대상 교량들의 상태는 전체 교량의 손상특성과 다소 편차가 있을 수 있으며, 이 논문의 분석결과는 전체 고속도로 교량이 아닌 1996년부터 2010년까지 정밀안전진단이 실시된 모든 고속도로 교량의 손상특성에 대한 것임을 밝혀 두는 바이다. 이 논문에서는 연구대상 고속도로 교량의 손상 데이터를 이용하여 유손율을, 10대 손상 유형, 손상 발생시기, 신축이음장치 교체시기 등을 분석하였는데, 전체 교량과 연구대상 교량의 평균적인 상태등급 차이의 영향은 유손율에 한정된다. 나머지 분석항목은 충분한 표본 수를 갖는 손상이 발생한 교량만을 대상으로 하였으므로 상태등급 차이에 따른 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

3. 고속도로 교량의 상태 분석

3.1 교량 구성 부재별 손상의 종류 및 특징

이 논문에서는, 구조물 또는 구성부재의 손상을 다음과 같이 3가지로 분류하고, Eq. (1)과 같이 유손율(incidence rate)의 개념을 도입하여 손상발생 비율을 조사하였다. 즉, 유손율은, 전체 조사 대상 교량 수에 대한 해당 손상이 발생한 교량 수의 비율로서 정의되며, 의료계에서 사용되는 용어인 유병율과 유사한 의미이다(Bae et al., 2014).

- 결합에 의한 손상 : 계획, 설계 및 시공단계에서 목표와는 다르게 비정상적으로 건설되어 부정적으로 작용하는 불완전한 초기하자상태
- 물리력에 의한 손상 : 구조물에 외적 또는 내적으로 작용하는 물리적인 힘에 의해 불안전하게 된 상태
- 열화에 의한 손상 : 자연력 및 인위적 작용을 받는 구조물이 시간이 경과됨에 따라 물리적, 화학적으로 변질, 변형되어가는 현상

$$\text{유손율(\%)} = \frac{\text{해당 손상이 발생한 교량 수}}{\text{전체 조사 대상 교량 수}} \times 100 \quad (1)$$

Tables 2-4는 915개 고속도로 교량의 구조부재 및 부대시설의 손상의 특징, 유손율 및 손상의 종류를 정리한 것이다. 손상은 유손율이 비교적 높거나 중요한 손상을 대상으로 정리하였다. 콘크리트 구조부재의 경우 손상을 5가지로 분류하였으며, 기타에는 변색, 마감불량, 테크플레이트 손상, 이물질 퇴적 등이 포함한다. 강재 부재는 손상을 8가지로 분류하였고, 기타에는 이물질 퇴적 등이 포함된다. 부대시설의 경우에는 3~5가지 손상으로 분류하였다.

Table 2에 의하면 콘크리트 바닥판의 경우 건조수축 등에 의한 균열과 백태누수로 인한 유손율이 매우 높고, 이 손상들의 대부분은 결합에 의한 손상(Table 6 참조)으로서 시공중점검 또는 초기점검 제도를 강화할 경우 이로 인해 유지보수에 소요되는 노력과 비용을 상당히 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 콘크리트 거더의 경우에도 건조수축 등에 의한 균열과, 피복부족 및 철근부식 등에 의한 바라박라의 유손율이 높으며, 바닥판의 경우와 마찬가지로

Table 2. Damage Characteristics of Concrete Structural Members

Items	Damage characteristics and incidence rate (%)				
	Crack	Ponding/Efflorescence/Leakage	Delamination/Spalling	Segregation	Etc.
Deck	70.7	65.6	49.4	22.4	20.7
Girder	70.4	38.8	64.2	44.3	10.4
Abutment	71.7	57.4	38.4	19.7	32.7
Pier	77.5	26.9	49.4	31.9	15.4
Damage cause※	①, ③	①, ③	①, ②, ③	①	①, ②, ③

※ ① : Defect, ② : Physical force, ③ : Deterioration

Table 3. Damage Characteristics of Steel Structural Members

Items	Damage characteristics							
	Crack	Corrosion	Deformation	Weld flaw	Bolt defect	Painting damage	Ponding/Leakage	Etc.
Damage pattern	Crack	Corrosion	Deformation	Weld flaw	Bolt defect	Painting damage	Ponding/Leakage	Etc.
Damage cause※	①, ②	①, ③	①, ②	①	①, ②	①, ②, ③	①, ③	①, ③
Incidence rate (%)	3.0	84.6	48.1	48.1	33.3	71.4	28.4	25.8

※ ① : Defect, ② : Physical force, ③ : Deterioration

결함에 의한 손상으로 판단된다.

교대의 경우는 건조수축 등에 의한 균열과, 체수/백태/누수의 유손상율이 높는데, 이것의 주요 원인은 신축이음부를 통한 누수로 기술되어 있다. 한편, 교각의 경우에는, 코핑부 균열의 상당수는, 도로교설계기준에 브래킷 및 코벨의 진단 규정이 포함되기 이전 기준으로 설계되어 설계강도 부족으로 인한 균열로 언급되어 있으며, 기둥부의 경우는 대부분 건조수축에 의한 균열로 기술되어 있다. 그리고 외부충격, 시공불량, 피복부족 및 철근부식으로 인한 박라박락의 유손상율이 높은 것으로 조사되었다. Table 2로부터 콘크리트 부재의 경우 부재종류와 관계없이 유손상율이 가장 높은 것은 균열임을 알 수 있다.

강재부재의 경우에는, Table 3에서 보는 바와 같이, 부식과 도장손상의 유손상율이 상당히 높으며, 용접결함 및 피로에 의한 균열이 발견된 교량도 일부 있음을 알 수 있다.

교량 부대시설 중, 교량받침의 경우, 부식 및 이동량 부족에 의한 받침부 손상과, 건조수축과 시공불량에 의해 균열 및 박라박락으로 인한 받침대 손상의 유손상율이 높다는 것을 Table 4로부터 알 수 있다.

신축이음장치의 경우에는 본체와 후타재의 유손상율이 유사한 것으로 나타났다. 본체 손상의 경우는 상당수가 이물질 퇴적에 의한 체수로 인해 발생하였고, 후타재의 경우는 공용하중에 의한 파손과 건조수축에 의한 균열이 상당수를 차지하고 있었다. 교면포장의 경우는 공용하중 및 시공불량에 의한 균열과 파손/마모의 유손상율이 높은 것을 알 수 있다. 배수시설은 이물질 퇴적에 의한 막힘의 유손상율이 가장 높으며, 방호벽의 경우는 건조수축에 의한 균열과, 피복부족/철근부식/차량충돌로 인한 박라박락의 유손상율이 높은 것을 알 수 있다.

한편, 신축이음부 누수에 의한 손상은 국내 뿐만 아니라 일본

Table 4. Damage Characteristics of Bridge Subsidiary Facilities

Items		Damage characteristics				
	Pattern	Main body	Mortar pad	Anchor bolt	Accessories	Etc.
Bearing	Cause※	①, ②, ③	①, ③	①, ③	①, ③	①
	Incidence rate (%)	66.6	48.0	17.4	16.3	2.8
	Pattern	Main body	Joint nosing	Incompletion	-	-
Expansion joint	Cause※	①, ②, ③	①, ②	①	-	-
	Incidence rate (%)	72.2	73.8	3.8	-	-
	Pattern	Crack	Settlement (pot hole)	Level uneven/bump	Breakage/abrasion	Etc.
Pavement	Cause※	①, ③	①	①, ②	①, ②	①
	Incidence rate (%)	53.7%	21.5	21.8	40.1	9.9
	Pattern	Blockage	Defect of installation	Breakage	Corrosion	-
Drainage facility	Cause※	①, ③	①	①, ②, ③	③	-
	Incidence rate (%)	45.7	23.0	22.9	5.8	-
	Pattern	Crack	Delamination/Spalling	Efflorescence	Deformation	Etc.
Barrier	Cause※	①, ③	①, ②, ③	①	①, ②, ③	①, ②, ③
	Incidence rate (%)	74.6	56.0	17.1	15.4	18.0

※ ① : Defect, ② : Physical force, ③ : Deterioration

Table 5. Deterioration Caused by Leakage at Expansion Joint

Items	① No. of deterioration by leakage	② Total no. of damages	①/② ×100	③ Total no. of deterioration	①/③ ×100
Deck	115	2785	4.1%	676	17.0%
Concrete girder	32	1092	2.9%	233	13.7%
Steel girder	473	2314	20.4%	1009	46.9%
Abutment	543	2630	20.6%	969	56.0%
Pier	148	1908	7.8%	417	35.5%
Bearing	537	1988	27.0%	850	63.2%
Expansion joint (leakage of main body)	209	2270	9.2%	777	26.9%

(Suzuki et al., 2012)에서도 주요 관심사이므로, 이 논문에서는 신축이음부 누수가 원인이 되어 발생하는 손상자료를 분석해 보았다. Table 5는 신축이음부 누수로 인한 구조부재별 손상발생 빈도를 보여 준다. 한편, 신축이음부 누수로 인한 손상은 열화에 의한 손상에 해당하므로, 신축이음부 누수로 인한 손상이 총 열화손상에 차지하는 비율도 조사해 보았다. 표에서 총 열화빈도란 총 손상빈도에서 결함 및 물리력에 의한 손상을 제외한 숫자를 의미한다. 이 표로부터, 신축이음부 누수가, 특히 교량받침 및 교대부의 열화원인의 절반 이상을 차지하고 있음을 알 수 있다. 그리고 강재 거더를 포함하여 대부분 부재들이 신축이음부 누수의 영향으로 열화가 가속되는 것을 알 수 있다. 따라서 고속도로 교량의 유지관리비를 경감하기 위해서는 신축이음부의 적절한 누수대책(2중 차수 기능 도입, 신축이음부 횡방향 물뚫기 설치 등)이 절실히 필요한 것으로 판단된다.

3.2 고속도로 교량의 10대 손상 유형

915개 고속도로 교량에 대한 정밀안전진단보고서 자료를 분석하여, 고속도로 교량에서 가장 빈번히 발생하는 10대 손상을 조사하였다. 10대 손상이란, Eq. (2)와 같이 총 손상발생건수에 대한 해당손상발생건수의 비율, 즉, 손상차지비율(Korea Expressway Corporation, 2013)이 높은 10가지 손상을 의미한다.

$$\text{손상차지비율}(\%) = \frac{\text{해당손상 발생 건수}}{\text{총 손상 발생 건수}} \times 100 \quad (2)$$

고속도로 교량의 10대 손상유형은 Fig. 3과 같이, 건조수축 균열, 박락, 백태, 누수, 재료분리, 후타재 균열, 교면포장 균열, 교량받침 부식, 강재거더 부식, 배수구 막힘 순으로 나타났다. 따라서 향후 유지관리 비용 및 활동 최소화과 교량의 장수명화를 위해서는 이러한 손상을 줄이기 위한 기술 개발이 절실히 필요한 것으로 사료된다.

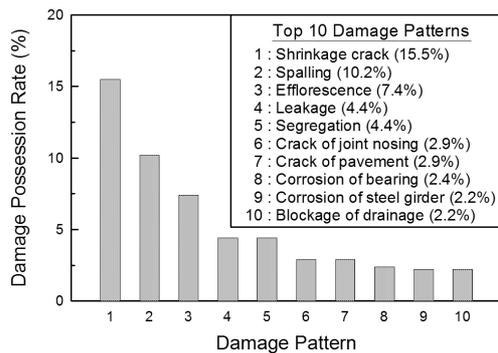


Fig. 3. Top 10 Damage Patterns of Expressway Bridges

3.3 결함, 물리력 및 열화에 의한 유손상을

3.1절에서 정의한 3가지 손상의 유손상을 조사하여 Table 6에 정리하였다. Table 6에 의하면 결함, 열화, 물리력에 의한 손상 순으로 평균 유손상율이 높은 것을 알 수 있다. 따라서, 교량 시공 중 철저한 품질관리를 실시하고, 시공중 점검 및 시공 후 하자만료전에 보다 정밀한 초기점검을 통하여 적절한 보수 및 보강이 이루어진다면 유지관리 비용을 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단되므로 이에 대한 제도적 보완이 필요한 것으로 판단된다.

한편, 교면포장의 경우 물리력에 의한 손상의 비율이 높고, 배수 시설의 경우 열화에 의한 손상의 비율이 높으므로 유지관리시 주목해야할 사실이다.

3.4 손상 발생시기

분석 대상 교량에 발생한 손상 중 열화에 의한 손상 발생시기를 분석하여 Table 7에 나타내었다. 분석시, 정확한 손상 발생시기가 보고서에 언급되어 있지 않아, 이 논문에서는 손상발생시기를 정밀 안전진단 실시년도에서 준공년도를 뺀 값으로 정의하여 분석하였다. 실제 손상은 진단업무 수행 이전에 발생되었을 것으로 사료되므로 점검/진단업무가 평균적으로 2~5년 정도의 주기로 실시된다는 사실을 감안할 때 실제 발생시기는 Table 7의 발생시기 보다 2~5년 정도 짧을 수 있을 것으로 판단된다. Table 7의 평균발생시기는 Eq. (3)과 같이 계산하였다.

$$\text{발생율}(\%) = \frac{\text{손상 발생 교량수}}{\text{대상 교량수}} \times 100 \quad (3a)$$

Table 6. Incidence Rate due to Defect, Physical Force and Deterioration

Items	Incidence rate (%)		
	Defect	Physical force	Deterioration
Concrete structural member	Deck	74.0	24.3
	Girder	77.1	21.2
	Abutment	60.0	36.8
	Pier	69.8	21.9
Steel structural member	Girder	55.0	43.6
Subsidiary facilities	Bearing	56.2	42.8
	Expansion joint	38.8	34.2
	Pavement	43.2	0.5
	Drainage facility	28.8	59.4
	Barrier	60.9	18.5
Average	56.4	13.3	30.3

Table 7. Occurance Time of Damages Caused by Deterioration

Items		Damage pattern	Ave. occurrence time (years)	No. of damages
Concrete structural member	Deck	Spalling	23	312
	Girder	Spalling	18	145
	Abutment	Spalling	19	184
	Pier	Spalling	19	152
Steel structural member	Girder	Corrosion	13	345
		Painting damage	13	133
Subsidiary facilities	Bearing	Corrosion	17	253
	Expansion joint	Corrosion	15	117
		Rubber damage	16	58
	Barrier	Spalling	18	265

$$\text{평균발생시기(년)} = \frac{\sum(\text{발생율} \times \text{공용년수})}{\sum \text{발생율}} \quad (3b)$$

Table 7에 의하면 콘크리트 부재(바닥판, 콘크리트 거더, 교대, 교각, 방호벽)의 박락 발생시기는 대략 18~23년(약 20년)으로 추정되고, 강재 구조부재의 부식 및 도장손상의 발생시기는 대략 13년으로 추정되며, 부대시설의 손상 발생시기는 대략 15~17년(약 16년) 정도로 추정된다.

3.5 신축이음장치 교체시기 및 교체형식

통행하중의 영향을 가장 크게 받는 부재 중 하나인 신축이음장치의 교체시기를 분석하여 그 결과를 Table 8에 나타내었다. 신축이음장치 교체 교량은 총 372개였으나 정밀안전진단 보고서 기록(보수 실적편)의 누락으로 인하여 교체시기가 파악 가능한 대상 수량은 159개였다.

신축이음장치 교체시기 분석결과, Rail 및 Transflex 형식의 평균 교체시기는 약 12년으로 나타났고, Monocell 및 Finger 형식의 평균 교체시기는 약 11년으로 나타났다. Rail 형식의 신축이음장치는 약 84%가 Finger 형식으로 교체되었고, Transflex 형식은 약 72%가 Monocell 형식으로 교체된 것을 알 수 있다. 또한, Monocell 및 Finger 형식은 동일한 형식의 신축이음장치로 주로 교체되는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 한국도로공사 자체적으로 내구성 및 소음 문제가 있는 Transflex 형식의 적용을 지양하고 있으며, 강재형식의 신축이음장치에 대해서는 Finger 형식을 권장하고 있는 사실과 일치한다.

3.6 다설한랭지역의 열화 속도

이 논문에서, 다설한랭지역이란 동결융해와 제설제에 의한 염해의 영향이 많은 지역을 의미한다. 이 지역은 다른 지역에 비해 열화의 진행속도가 빠를 것으로 추정되므로 대표적인 다설한랭지

Table 8. Replacement Time and Replaced Type of Expansion Joint

Items	Qty.	Replacement time (years)			Replaced joint		
		Ave.	Max.	Min.	Type	Qty.	%
Rail	76	11.8	19	1	Finger	64	84
					Monocell	8	11
					NB	2	3
					Rail	1	1
					Gai top	1	1
Transflex	25	11.9	28	5	Monocell	18	72
					Rail	2	8
					Gai top	2	8
					Finger	1	4
					Wingflex	1	4
					Compoflex modular	1	4
Monocell	17	11.1	24	9	Monocell	13	76
					Angle	2	12
					Finger	1	6
					Transflex	1	6
Finger	11	11.1	19	9	Finger	7	64
					Monocell	2	18
					Rail	1	9
					Angle	1	9

역인 대관령 주변 교량들의 바닥판, 포장 및 방호벽의 결함도와 다른 지역의 결함도를 비교해 보았다. 동일 조건의 비교를 위해 대관령 주변 교량의 평균 공용년수인 11년을 대상으로 하였다.

Table 9는 2005~2010년 동안의 대관령지역 주변의 환경특성을 일반적인 고속도로 지역의 환경특성과 비교한 것이고, Table 10은 대관령지역과 일반지역 교량의 결함도를 비교하여 나타낸 것이다. Table 10의 결함도는 구조물의 상태평가를 위해 국토해양부에서

Table 9. Environmental Characteristics of Daekwanryung and General Area

Area	No. of freezing-thawing days (days)	Amount of de-icing material (ton/2 lanes-km)	No. of snowing days (days)	Amount of snowing (mm)
General	42(76)※	12.3	13.3	570
Daekwanryung	97(126)※	52.7	27	2380

※ Number of days of which average daily minimum temperature is below -2°C

Table 10. Comparison of Defect Score of Daekwanryung and General Area

Area	No. of bridges	Defect score		
		Deck	Pavement	Barrier
General	96	0.200	0.230	0.280
Daekwanryung	24	0.239	0.379	0.296

규정한 수치이다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012(a)).

Table 9로부터 대관령지역의 동결융해횟수는 일반지역에 비해 2배 이상, 제설제 사용량은 4배 이상임을 알 수 있다. Table 10은 대관령지역과 일반지역 교량의 결함도를 비교한 것으로, 이 표로부터 제설제의 영향을 주로 받는 바닥판, 포장 및 방호벽의 경우 다설한랭지역 교량의 열화속도가 일반지역 교량에 비해 빠르며, 특히 포장의 열화 진행속도가 가장 빠른 것으로 추정된다. 따라서 이러한 지역에 대해서는 해양환경에 준하여 설계단계에서부터 별도의 염해 및 동결융해 대책이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

총 915개 정밀안전진단보고서를 기초로 고속도로 교량의 손상 특성을 분석하였으며, 이로부터 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 유손상률을 분석한 결과, 결함, 열화, 물리력에 의한 손상 순으로 평균 유손상율이 높은 것을 알 수 있었다. 따라서, 교량 시공 중 철저한 품질관리를 실시하고, 시공중 점검 및 시공 후 하자만료전에 보다 정밀한 초기점검을 통하여 적절한 보수 및 보강이 이루어진다면 유지관리 비용을 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단되므로 이에 대한 제도적 보완이 필요하다.
- (2) 총 손상발생건수에 대한 해당손상발생건수의 비율, 즉, 손상차지비율이 큰, 고속도로 교량에서 가장 빈번히 발생하는 10대 손상을 제시하였다. 따라서 향후 유지관리 활동 최소화와 교량의 장수명화를 위해서는 본 연구에서 제시한 10대 손상을 줄이기 위한 기술 개발이 절실히 필요하다.
- (3) 신축이음부 누수로 인한 손상이 총 열화손상에 차지하는 비율을 조사한 결과에 의하면 교량받침 및 교대부의 열화원인의 절반 이상을 차지하고, 강재거더를 포함하여 대부분 부재들이

신축이음부 누수의 영향으로 열화되는 것을 알 수 있었다. 따라서 고속도로 교량의 유지관리비를 경감하기 위해서는 신축이음부의 적절한 누수대책(2중 차수 기능 도입, 신축이음부 횡방향 물끊기 설치 등)이 절실히 필요함을 알 수 있었다. 또한, 신축이음장치의 평균 교체시기는 약 11~12년으로 나타났다. 교체시 강제 신축이음장치는 Finger 형식으로, 고무 신축이음장치는 Monocell 형식으로 교체되는 비율이 높은 것으로 나타났다.

- (4) 다설한랭지역인 대관령지역의 동결융해횟수는 일반지역에 비해 2배 이상, 제설제 사용량은 4배 이상이고, 대관령지역과 일반지역 교량의 결함도를 비교한 결과 제설제의 영향을 주로 받는 바닥판, 포장 및 방호벽의 경우 대관령지역 교량의 열화속도가 일반지역 교량에 비해 빠르며, 특히 포장의 열화 진행속도가 가장 빠른 것으로 추정되었다. 따라서 다설한랭지역에 대해서는 해양환경에 준하여 설계단계에서부터 별도의 염해 및 동결융해 대책이 필요하다.
- (5) 국내 고속도로 교량 전체의 평균적인 상태등급은 A등급에서 B등급으로 진행되는 단계로 판단된다. 또한, 교량의 상태등급이 C등급 이하, 설계활하중이 DB-18 이하, 또는 공용년수가 26년 이상인 교량에 대한 정밀안전진단 수행 비율이 전체 교량에 비해 높은 것으로 나타나 지금까지 정밀안전진단은 사후관리차원에서 진행되어 왔으리라고 추정된다. 효율적인 유지관리를 위해서는 사후관리차원의 유지관리보다는 예방적 유지관리로 유지관리 정책을 전환할 필요가 있다.

References

Agrawal, A. K. and Kawaguchi, A. (2009). *Bridge element deterioration rates*, TIRC/NYSDOT report.
 Bae, D. J., Lee, I. K., Jeon, J. C. and Lee, H. H. (2014). "The

- characteristics of damage about expressway bridges.” *Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 18, No. 2, pp. 739-741 (in Korean).
- Hwang, J. H. and An, S. S. (2008). “An improvement of the state assessment for concrete floor slab by damage type breakdown.” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 12, No. 2, pp. 139-148 (in Korean).
- Jeon, J. C., Lee, I. K., Park, C. H., Bae, D. J. and Lee, H. H. (2013a). “Analysis on damage characteristics of RC deck slab of expressway bridges.” *Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 17, No. 2, pp. 167-170 (in Korean).
- Jeon, J. C., Lee, I. K., Park, C. H., Cho, K. S. and Lee, H. H. (2013b). “Analysis on damage patterns of expressway bridges.” *Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 17, No. 1, pp. 234-237 (in Korean).
- Kong, S. C., You, D. W., Lee, J. N. and Lim, C. H. (2013). “Analysis on the damage for safety of small scale vulnerable buildings according to structural type and period.” *Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 17, No. 1, pp. 276-279 (in Korean).
- Korea Expressway Corporation (Expressway and Transportation Research Institute) (2013). *Optimization of bridge inspection based on reliability*, CTC (in Korean).
- Lee, I. K. and Kim, D. H. (2015). “Highway bridge inspection period based on risk assessment.” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 19, No. 3, pp. 64-72 (in Korean).
- Lee, Y. S. (2001). “Suggestion of the proper control-interval through comparative analysis on korea-germany bridge maintenance system.” *Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 21, No. 3-D, pp. 323-336 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015). *Special law book on the safety management of infrastructures*, KISTEC (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012a). *Guidelines on safety inspection and diagnosis*, KISTEC (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012b). *Korean highway bridge design specifications (Limit state design method)*, KRTA (in Korean).
- Oh, K. C., Lee, J. G., Shin, J. Y. and Chang, B. S. (2012). “A study on condition assessment of the general national road bridge deck.” *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol. 16, No. 6, pp. 93-101 (in Korean).
- Park, K. T., An, I. S., Park, J. S. and Kim, H. Y. (1997). “Condition survey of highway bridges.” *Proceedings of Korea Society of Civil Engineering*, KSCE, pp. 479-482 (in Korean).
- Suzuki, Y., Higashida, N. and Shimizu, T. (2012). “Countermeasure against leakage of water through the gap of existing girders.” *Bridge and Foundation*, Vol. 46, No. 11, pp. 17-21 (in Japanese).
- Transport for London (2011). *Risk based inspection of highway structures*.
- Transportation Research Board (2007). *Bridge inspection practices*, NCHRP Synthesis 375.