

상태평가 결과 기반 고속도로 PSC Box 거더교 상부플랜지 열화·손상 실태 고찰

구영호^{1*}, 한상묵²

A Review of the Deterioration and Damage of the Top Flange of the Highway PSC Box Girder Bridge based on the Condition Assessment Results

Young-Ho Ku^{1*}, Sang-Mook Han²

Abstract: Although PSCB girder bridges account for 4% of the bridges in use on highways, they do not account for much, but 98% of PSCB girder bridges are 1st type and 2nd type of bridge. Also, the total length of the PSCB girder bridge is 16% (192km) of the total length of the highway bridge. Thus, the PSCB girder bridge can be one of the bridge types where maintenance is important. In order to analyze the damage types of PSCB girder bridges, a detailed analysis was conducted by selecting 62 places (477 spans) precision safety diagnosis reports considering ratio of the construction method and snow removal environment exposure class. Analysis of report and a field investigation was conducted, and as a result, most of the causes of deterioration damage were caused by rainwater (salt water) flowing into the bridge pavement soaking in between the top flange and the interface. After concrete slab deteriorate occurred then bridge pavement cracking and breaking increased and exfoliation of concrete occurred by corrosion and expansion of the reinforcing bars shrinkage. In addition, the cause of cracks in the longitudinal direction on the bottom of the top flange is considered to be cracks caused by restrained drying shrinkage. In conclusion, for reasonable maintenance considering the characteristics of PSCB girder bridges, it should be suggested in the design aspect that restrained drying shrinkage crack on top flange. Also, it is believed that differentiated maintenance method should be proposed according to snow removal environment exposure class.

Keywords: PSCB girder bridge, Top flange, Bridge pavement, Crack, Deterioration, Damage

1. 서론

PSC BOX 거더교(이하, PSCB 거더교)는 기하학적으로 휨 및 비틀림 강성이 크므로 주행차량에 의한 진동과 처짐이 작아 주행성능이 우수하고, 하부플랜지 및 복부에 철근과 PS강재를 많이 배치할 수 있어 장기간 적용이 가능하며 전용 가설장비를 이용하여 단계별 설치가 쉽고 공사 및 유지관리 비용이 경제적인 구조형식으로 알려져 왔다.

PSCB 거더교는 고속도로에서 공용중인 교량의 4%로 많은 비중을 차지하고 있지는 않지만, PSCB 거더교의 약 98%가 1.2종 교량이며 전체 교량 연장의 약 16%(192km)를 차지하는 만큼 유지관리가 매우 중요한 교량 형식 중 하나이다.

지금까지의 PSCB 거더교의 유지관리 관련 연구는 안전성

관점에서 외부 텐던과 그라우트 상태 등을 다루었을 뿐이며, PSCB 거더교의 실제 유지관리 현장의 문제점과 포괄적인 유지관리 방안은 제시되지 못하였다(Seoul Special City, 2017).

한편, PSCB 거더교는 ‘시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(이하, 세부지침, 국토교통부, 2019)’을 적용하여 점검 및 진단을 수행하고 있으나, PSCB 거더교의 손상 유형에 따라 조사하고 평가하도록 정의하고 있을 뿐 실제 PSCB 거더교의 구조적인 특성과 열화·손상 특성을 세밀하게 고려하여 평가하는 방법은 제시하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 PSCB 거더교의 구조적 특성과 열화·손상 특성을 고려한 유지관리 방안을 수립하고자, 정밀안전진단 보고서를 기반으로 PSCB 거더교에 발생된 열화·손상을 분류하고 주요 열화·손상 특성을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 상부플랜지의 열화·손상 가운데 교축방향 균열, 누수, 백태, 손상 등에 대하여 제설환경 노출등급, 교면포장 형식, 교면포장 개량 현황을 고려하여 정밀 분석을 수행하고 영향인자를 도출하였으며, 현장조사 결과를 종합하여 열화·손상의 원인을 분석하였다.

¹정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정, 교신저자

²정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

*Corresponding author: kyhkhc@ex.co.kr

Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61, Daehak-ro, Gumi-si, Gyeongsangbuk-do, 39177, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 본 론

2.1 주요 열화·손상 유형

PSCB 거더교 정밀안전진단 보고서의 손상유형을 효율적으로 분석하기 위해 일본과 미국의 문헌자료를 수집 및 분석하였다.

일본에서는 PSC교량의 초기손상 실태와 원인 추정을 위해 국토교통성에서 정기적으로 수행하는 교량정기점검결과에 기초하여 교량정기점검요령(안)에서 PSC교량의 균열유형을 총 31가지로 구분하여 정리한 바 있다(MLIT, 2014).

한편, 미국의 PCI(프리스트레스트 콘크리트협회)에서는 PSCB 거더교에서 발생하는 균열에 대하여 발생 원인과 발생 위치를 고려하여, 완성계에서의 휨과 전단에 의한 균열, 분할 시공으로 인한 균열, 텐던 배치 오류로 인한 균열, 텐던 정착 블록 및 주변 보강 부족에 따른 균열 등으로 구분하여 균열 사례를 제시하고 있다(Podolny, 1985).

일본의 경우 PSCB 거더교를 포함한 일반적인 PSC 거더교에서 발생하는 균열에 대하여 발생 위치를 중심으로 분류하고, 미국 PCI에서는 시공과정과 구조적인 부분을 고려하여 균

열의 발생 원인을 중심으로 분류하고 있으며, PSCB 거더교 열화·손상 가운데 백태, 누수흔적 등 열화와 관련된 분류는 미흡한 것으로 분석되었다.

PSCB 거더교 정밀안전진단 보고서 분석을 위하여 일본과 미국에서 제시하고 있는 균열분류를 기반으로 상부플랜지에서 관찰되는 열화(백태, 누수흔적 등)를 포함하여 PSCB 거더교의 열화·손상 유형을 35가지로 분류하고, 열화·손상 분류의 적정성을 검토하기 위하여 33개소 교량의 정밀안전진단 보고서 분석을 실시하였다.

35가지 열화·손상 유형에 따른 분석결과, Fig. 1과 같이 개

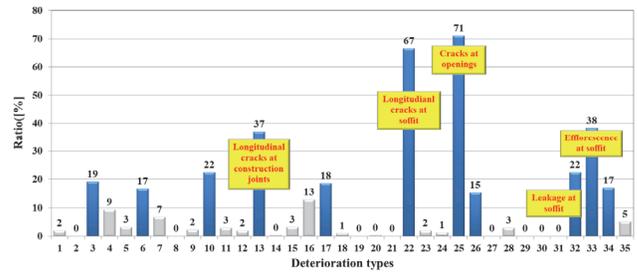


Fig. 1 Analysis result of PSCB girder bridge deterioration types

Table 1 PSCB girder deterioration types and factors

Location	Deterioration types	Deterioration factors
Top flange	[1] Longitudinal cracks at bottom top flange	○ Flexural stress excess ○ Loss in prestress ○ Overload from traffic ○ Drying shrinkage
	[2] Transverse cracks at bottom top flange	○ Drying shrinkage ○ Reinforcement
	[3] Transverse cracks of deck at regular intervals	○ Concrete settlement ○ Drying shrinkage ○ Corrosion of reinforcement
	[4] Vertical cracks at mid-span	○ Flexural stress excess ○ Loss in prestress
	[5] Leakage at bottom top flange	
	[6] Efflorescence at bottom top flange	○ Penetration of de-icing chemicals through cracks
	[7] Delamination, scaling and spalling at bottom top flange	○ Stagnant water between wearing surface and deck of top flange
	[8] Discoloration at bottom top flange	○ Loss in prestress
Web	[9] Inclined cracks of web at support	○ Overestimation of prestress ○ Loss in prestress
	[10] Cracks along prestress cable tendons at support	○ Lack of consideration of sheath cover ○ Failure in grout ○ Freeze-thaw cycle
	[11] Longitudinal cracks at chamfer between top flange and web	○ Concrete settlement ○ Construction joint
	[12] Longitudinal cracks	○ Concrete settlement ○ Drying shrinkage ○ Thermal stress ○ Freeze-thaw cycle

Table 1 (Continued)

Location	Deterioration types	Deterioration factors
Bottom flange	[13] Transverse cracks of soffit at mid-span	<ul style="list-style-type: none"> ○ Flexural stress excess ○ Loss in prestress ○ Scaffolding settlement
	[14] Longitudinal cracks of soffit along prestress cable tendons	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tensile force
	[15] Cracks of soffit at widening section	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tensile stress excess ○ Stress concentration
Segment joint	[16] Longitudinal cracks at segment joint	<ul style="list-style-type: none"> ○ Structural condition (restraint, etc.)
	[17] Horizontal cracks at joint between top flange and web	<ul style="list-style-type: none"> ○ Structural condition (restraint, etc.)
	[18] Cracks at segment joint	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tensile stress excess ○ Construction failure at joint
	[19] Diagonal cracks at shear key	<ul style="list-style-type: none"> ○ Overestimation of initial prestress ○ Insufficient shear capacity of shear key
Support	[20] Longitudinal cracks at header	<ul style="list-style-type: none"> ○ Structural condition (restraint, etc.) ○ Heat of hydration
	[21] Vertical or diagonal cracks of web at bearing	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bearing restraint ○ Soil stress restraint ○ Restraint of girder deformation
	[22] Longitudinal cracks of bottom flange soffit at bearing	<ul style="list-style-type: none"> ○ Horizontal restraint at bearing ○ Heat of hydration
	[23] Transverse cracks of bottom flange soffit at bearing	<ul style="list-style-type: none"> ○ Horizontal curvature of girder, constraint by shrinkage
	[24] Cracks at anchorage blister	<ul style="list-style-type: none"> ○ Longitudinal tensile stress behind anchorage blister
Secondary elements	[25] Cracks at opening	<ul style="list-style-type: none"> ○ Structural condition (post poured concrete section) ○ Heat of hydration
	[26] Vertical, diagonal or horizontal cracks at deviator sections	<ul style="list-style-type: none"> ○ Local stress ○ Structural condition (post poured concrete section) ○ Heat of hydration
	[27] Vertical, diagonal or horizontal cracks at anchorage blister	<ul style="list-style-type: none"> ○ Bearing stress ○ Structural condition (post poured concrete section)
Others	[28] Crumbling of concrete surface	<ul style="list-style-type: none"> ○ Freeze-thaw cycle ○ Freezing effect ○ Insufficient early-age curing ○ Insufficient pouring

Table 2 Assessment criteria of concrete deck condition (MOLIT, 2019)

Grade	Crack	Deterioration
A	<ul style="list-style-type: none"> ○ Crack width under 0.1mm 	<ul style="list-style-type: none"> ○ No deterioration
B (Good)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Crack width between 0.1mm and 0.3mm ○ Crack ratio under 2% 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Surface damage area under 2%
C (Mediocre)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Crack width between 0.3mm and 0.5mm ○ Crack ratio between 2% and 10% 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Surface damage area between 2% and 10% ○ Corrosion area under 2% ○ Scaling or leakage at deck plate
D (Poor)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Crack width between 0.5mm and 1.0mm ○ Crack ratio between 10% and 20% 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Surface damage area over 10% ○ Reinforcement corrosion area over 2% ○ Severe scaling or corrosion due to leakage at deck plate
E	<ul style="list-style-type: none"> ○ Crack width over 1.0mm ○ Crack ratio over 20% 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Decrease in safety of deck due to loss of reinforcement area by corrosion

구부 균열, 상부플랜지 하면의 교축방향균열, 상부플랜지 하면의 백태 등의 순서로 분포하는 것으로 나타났으며, 게르버의 균열 등과 같이 국내 PSCB 거더교의 현황에 부합하지 않거나 비중이 지나치게 낮은 일부 손상도 확인되었다.

분석시간의 절약과 집중 등 효율적인 분석을 위해 전술한 일부 손상은 제외하는 방향으로 열화·손상 유형을 Table 1과 같이 28가지로 조정하였다.

또한, 분석결과와 신뢰성 향상을 위해 분석 시 손상의 정도를 고려하기 위하여 세부지침(2019.12)의 콘크리트 바닥판 상태평가 기준을 참조하여 균열은 균열폭과 균열을, 열화·손상은 발생면적에 따라 손상의 정도를 Table 2와 같이 양호(b), 보통(c), 불량(d)으로 구분하여 분석하였다.

2.2 정밀안전진단 보고서 분석

2.2.1 분석대상

고속도로 PSCB 거더교의 손상유형을 분석하기 위하여 고속도로 PSCB 거더교에 대해 기 수행된 정밀안전진단 보고서를 수집하여 분석하였다. 고속도로 PSCB 거더교 총 351개소 가운데 공용기간이 10년 미만이어서 정밀안전진단이 아직 수행되지 않은 교량이 44개소(약 13%), 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 상 3종으로 분류되어 정밀안전진단에서 제외되는 교량이 36개소(약 10%), 총 80개소(약 23%)를 제외한 271개소(약 77%)의 정밀안전진단 보고서를 수집하였으며, Fig. 2와 같이 정밀안전진단이 2회차까지 수행된 교량 156개소, 3회차 이상 수행된 교량 52개소를 수집하였다.

271개 정밀안전진단 보고서를 분석한 결과, 상태등급은 B등급이 87%로 가장 높게 나타났으며, A등급과 C등급은 각각 7%, 6%로 나타났다. 또한, 최대경간장은 50~59m가 약 70%를 차지하고 80m 이상은 약 15%로 나타났으며, ILM 가설공법이 적용된 교량이 약 65%로 가장 높게 나타났다. 동결융해일수와 제설제 사용량을 고려한 제설환경 노출등급은 Class I ~ Class IV로 구분하여 지역을 구분하고 있으며, 이에 따른 271개소 PSCB 거더교의 분포는 Class I ~ Class IV까지 각각 10%, 11%, 62%, 17%로 나타났다.

분석의 효율성을 고려하여 271개소의 가설공법, 제설환경 노

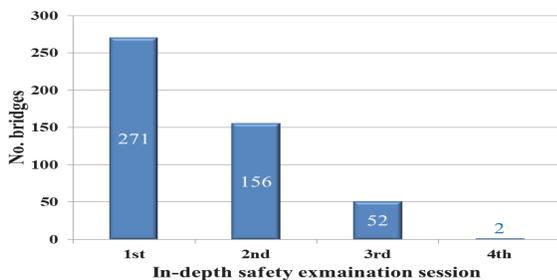


Fig. 2 In-depth safety examination report collection

출등급의 비율을 고려하여 최종적으로 62개소(477경간) 정밀안전진단 보고서를 선정하였으며, 정밀안전진단 보고서의 분석자료, 사진자료 및 외관조사방도를 상호 비교하는 방법으로 Table 1의 열화·손상 유형에 따라 발생 경간비율을 분석하였다.

2.2.2 분석결과

Fig. 3은 PSCB 거더교 62개소(477경간)의 열화·손상 유형분석 결과를 보여준다. 분석대상 교량(62개소)은 고속도로 PSCB 거더교의 가설공법 비율을 반영하여 ILM 60%, FCM 11%, FSM 23%, MSS 6%의 비율로 선정하였고, 열화·손상 유형 분석은 PSCB 거더교 경간별로 분석을 실시하였으며, 열화·손상이 발생된 경간의 비율로 표현하였다.

손상유형은 상부플랜지 하면 교축방향균열(Table 1[1]), 격벽 개구부 균열(Table 1[25]), 복부판 교축방향균열(Table 1[12])의 순서로 많은 비중을 차지하고 있으며, 약 70%의 경간에서 발생하는 것으로 분석되었다. 이들 손상은 대부분 시공 초기 건조수축이나 시공 미흡 등에 기인하는 손상으로서 공용중 진전 가능성은 크지 않을 것으로 판단되며, 일본과 미국 열화·손상 분류에서도 상기 균열에 대하여 동일한 원인을 제시하고 있다.

상부플랜지 하면 누수, 백태, 파손·박리·박락 및 변색(Table 1[5],[6],[7],[8])은 약 5~35%의 경간에서 발생하는 것으로 나타났다. 상부플랜지를 제외한 부재의 열화·손상은 대부분 시공초기, 시공미흡 또는 시공이음부에서 조사되는 유형으로 공용중 발생되고 진전될 수 있는 열화·손상은 대부분 상부플랜지에 집중되어 있는 것으로 분석되었다.

상부플랜지는 차량하중이 직접 전달되는 주요 부재이며 교면포장의 균열 및 손상 또는 교면 방수층의 손상 등으로 인해 제설염화물이 함유된 표면수의 유입·체수가 발생할 수 있는

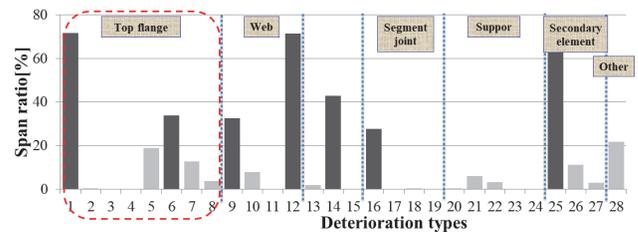


Fig. 3 PSCB girder deterioration types by elements

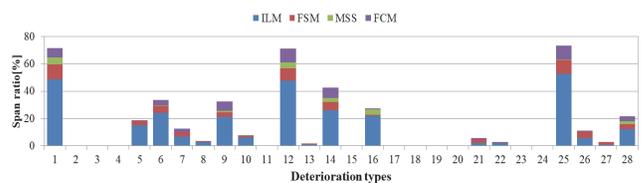


Fig. 4 PSCB girder deterioration types by construction method

환경적 조건을 고려하면 유지관리에 주의할 필요가 있을 것으로 판단된다.

가설공법 및 환경조건에 따른 열화·손상 유형 분포는 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. 가설공법은 ILM 공법, 환경조건은 Class III 이 대체로 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났는데, 이는 모 집단에서 비중이 큰 것에 기인하는 바가 큰 것으로 판단된다.

세부지침의 콘크리트 바닥판 상태평가 기준을 참조하여 b, c, d 등급으로 손상 정도를 구분한 Fig. 6을 살펴보면, c 등급의 열화·손상은 상부플랜지 하면의 누수 및 백태와 격벽 개구부 균열에서 나타남을 알 수 있다. 격벽 개구부 균열에서 c 등급이 나타난 이유는 상태평가 기준에 따른 정량적 분석 결과로써, 손상의 진전 보다는 유지보수의 시급성이 낮아 보수가 수행되지 않아 발생된 것으로 판단된다. 그러나 상부플랜지 하면의 누수 및 백태는 상부플랜지의 관통균열 발생을 의미하며 초기 교축방향 균열부로 제설염이 함유된 표면수가 유입되어 발생된 것으로 방치 시 지속적으로 열화·손상의 진

전 가능성이 높으므로 중점관리가 요구되는 손상인 것으로 판단된다.

PSCB 거더교의 가설공법과 환경조건이 상부플랜지에 발생한 열화·손상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상부플랜지 하면 교축방향균열(Table 1[1]) 및 상부플랜지 하면 백태(Table 1[6])에 대하여 가설공법과 환경조건(제설환경 노출등급)에 대하여 분석하고 그 결과는 Fig. 7과 같다.

상부플랜지 하면의 교축방향 균열(Table 1[1])은 Fig. 7과 같이 가설공법과 환경조건의 영향은 크지 않으나, 초기 균열로써 환경조건 보다는 시공단계의 품질관리 영향이 클 것으로 판단된다. 가설공법별 분석결과 ILM 공법이 가장 많은 모 집단을 갖고 있음에도 FSM 공법에서 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것은 FSM 공법의 현장타설로 콘크리트 품질관리 등의 문제로 인한 것으로 판단된다.

상부플랜지 하면의 백태(Table 1[6])는 가설공법별 분석결과 MSS 공법이 상대적으로 작은 비중을 보이는 것으로 나타났다. 이는 MSS 공법을 적용한 교량에서 작은 비중을 차지하는 것은 모집단이 4개소로 매우 작기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 환경조건별 분석결과 분석대상 모집단의 구성 비율과 유사하며, 제설환경 노출등급과 상부플랜지 하면 백태의 상호 연관성이 높은 것으로 분석되었다.

PSCB 거더교 열화·손상 유형 분류에서도 설명된 것과 같이 상부플랜지 하면의 교축방향 균열은 일반적으로 건조수축 등의 원인으로 시공단계에서 발생하는 초기 균열로 볼 수 있으며, 백태는 공용중 균열을 통한 우수 및 제설염화물의 유입으로 발생된 것으로 볼 수 있을 것이다. 그러나 분석 결과에서도 알 수 있듯이, 가설공법과 환경조건에 따른 상부플랜지 하면의 교축방향 균열과 백태의 연관성이 낮은 것으로 나타났다.

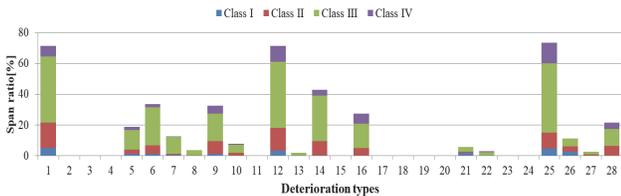


Fig. 5 PSCB girder deterioration types by exposure class

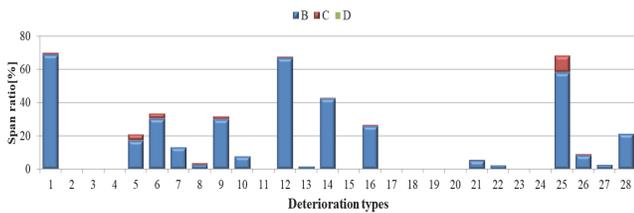


Fig. 6 PSCB girder deterioration types by bridge condition grade

2.3 주요 열화·손상 영향 인자 분석

2.3.1 제설환경 노출등급 영향

한국도로공사 제설환경 콘크리트 구조물의 염해 내구성 평가 절차(2016)에서는 강설량, 제설제 사용량 등을 고려하여 제설환경 노출등급을 Table 3과 같이 제시하고 있다. 분석 대상인 62개소의 지역별 분포를 고려하여 상부플랜지의 열화·손상 중 교축방향 균열, 누수, 백태, 파손 및 변색 등의 발생 경간 비율을 분석한 결과는 Fig. 8과 같다. 열화·손상의 정도는 세부지침의 철근 콘크리트 바닥판 상태평가 기준을 참조하여 구분하였다. 대부분의 PSCB 거더교에서 상부플랜지 하면의 교축방향 균열이 관찰되었으며 문헌조사 결과에 따르면 상부플랜지 하면의 교축방향 균열은 구축된 상태에서의 건조수축, 온도차이 등으로 인한 것으로 보고되고 있다. 분석 결과에서도 대부분 b등급 균열이고 제설환경 노출등급과 상관없이 발생된 점을 고려하면 상부플랜지 하면의 교축방향 균열에 대하여

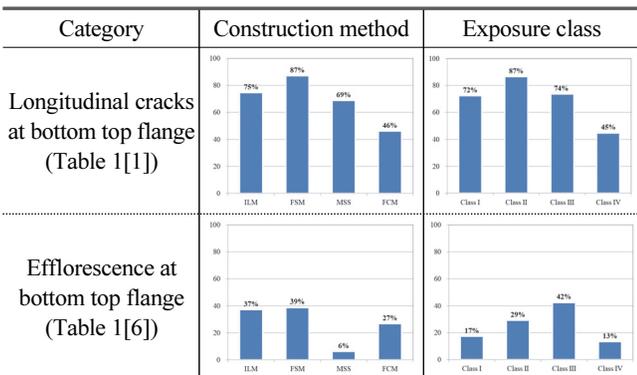
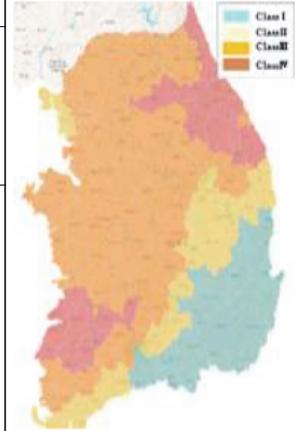


Fig. 7 Statistics of longitudinal cracks and efflorescence at top flange of PSCB girder

Table 3 Exposure class of de-icing chemical considering snowfall and usage of de-icing materials

Exposure class	Surface chlorine ion concentration*		Snowfall (mm)**	Area
	Accumulation factor(kg/m ³ /year)	Maximum (kg/m ³)		
Class I	0.5	20	< 150	Busan, Daegu, Ulsan, Jeollanam-do(Gwangyang, Yeosu, Namhae, Goheung, Wando), Gyeongsangbuk-do (Yeongdeok, Cheongsong, Pohang, Yeongcheon, Gyeongsan, Cheongdo, Chilgok, Goryeong, Gyeongju), Gyeongsangnam-do(Changnyeong, Miryang, Uiryeong, Yangsan, Haman, Jinju, Changwon, Gimhae, Hadong, Sacheon, Goseong, Geoje, Tongyeong, Jinhae, Masan)
Class II			150 ~ 300	Incheon, Gyeonggi-do(Gimpo, Bucheon, Siheung, Ganghwa), Gyeongsangbuk-do(Yeongju, Uljin, Yecheon, Andong, Yangyang, Uiseong, Gumi, Gunwi, Seongju), Gyeongnam (Hapcheon, Sancheong), Jeollanam-do (Suncheon, Boseong, Jangheung, Gangjin, Haenam, Jindo)
Class III			300 ~ 600	Seoul, Daejeon, Gyeonggi-do (except Gimpo, Bucheon, and Siheung), Gangwon-do (Cheorwon, Hwacheon, Yanggu, Inje, Chuncheon, Hoengseong, Wonju, Yeongwol, Donghae), Chungcheongnam-do and all of Chungcheongbuk-do, Gyeongsangbuk-do (Bonghwa, Mungyeong, Sangju, Gimcheon), Gyeongsangnam-do (Geochang, Hamyang), Jeollanam-do (Hamgyeong, Muan, Mokpo, Yangyang, Naju, Hwasun, Gokseong, Gurye, Shinan)
Class IV			> 600	Gwangju, Jeollanam-do (Yeonggwang, Jangseong, Damyang), Jeollabuk-do (Gimje, Buan, Jeongeup, Imsil, Jangsu, Gochang, Sunchang), Gangwon-do (Goseong, Sokcho, Yangyang, Gangneung, Pyeongchang, Hongcheon, Jeongseon, Samcheok, Taebaek)



* It was considered to increase linearly with time, and the maximum was presented as 20kg/m³, which is 0.85% of the weight of concrete, and assumed to be constant after reaching the maximum.
 ** The amount of snowfall is classified based on data from the Korea Meteorological Administration (average annual snowfall from 1981 to 2010).
 *** If the altitude of area is higher than 450m and the area is located between two provinces, the grade is adjusted to harsh conditions.

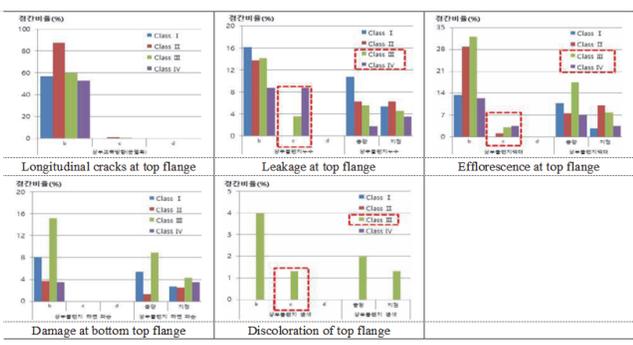


Fig. 8 Distribution of deterioration and damage type according to the snow removal environment exposure class and degree of damage

제설환경 노출등급의 영향은 미미한 것으로 판단된다.
 누수와 백태 및 콘크리트 변색에 대한 분석 결과를 살펴보면, b등급의 열화·손상과 제설환경 노출등급은 상관관계가

명확하게 나타나지 않았지만, Fig. 8과 같이 c등급의 누수, 백태 및 변색은 제설환경 노출등급 Class III ~ Class IV에서 주로 발생하는 것으로 나타났다.

상부슬래브 하면의 누수, 백태 및 변색은 표면수가 교면포장 손상부로 유입되어 균열부 또는 장기간 체수로 인한 직접 콘크리트 내부로의 침투를 의미한다. 따라서 제설환경 노출등급은 누수, 백태의 진전에 영향을 미치는 인자이고 방치 시 지속적으로 열화·손상 진전 가능성이 있으며, 제설환경 노출등급에 따라 진전속도가 상이할 것으로 판단된다.

2.3.2 교면포장 형식 영향

상부플랜지의 주요 열화·손상은 공용중에 발생하며, 교면포장의 손상부로 유입·체수된 우수(염수)의 직접 접촉이 주요 원인이다. 따라서 PSCB 거더교의 교면포장 형식이 상부플랜지 열화·손상에 미치는 영향을 분석하였다.

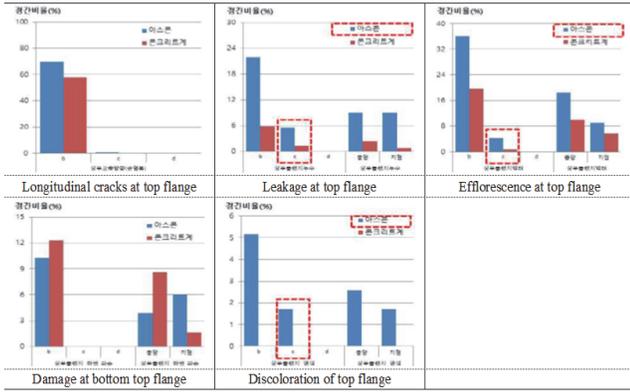


Fig. 9 Analysis result of deterioration and damage on top flange by bridge pavement type

분석대상 62개소는 아스팔트계 교면포장(이하, ACP)이 28개소(45%), 콘크리트계 교면포장(이하, CCP)이 34개소(55%)이며, 62개소 477경간에 대한 상부플랜지 교축방향 균열, 누수, 백태 등의 손상에 대한 포장형식별 분석 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9에서 알 수 있듯이, 교축방향 균열 및 파손과 교면포장의 상관관계는 분명하게 나타나지 않았다. 그러나 상부플랜지 누수의 경우, ACP에서 b등급은 약 22%, c등급은 약 6%의 경간에서 발생되었으며, CCP에서 b등급은 약 6%, c등급은 약 1%의 경간에서 발생한 것으로 분석되었다.

상부플랜지 백태의 경우에는 b등급 백태는 ACP에서 약 36%, CCP에서 약 20%의 경간에서 발생되었으며, c등급 백태는 ACP에서 약 5%, CCP에서 약 1%의 경간에서 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 누수, 백태 및 변색 등과 같은 열화는 ACP에서 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

2.3.3 교면포장 개량과 제설환경 노출등급 상관관계

현재 국내 고속도로를 관리하고 있는 한국도로공사에서는 기존 ACP에서 CCP로 교체하는 것을 교면포장개량(이하, 교면개량)이라고 정의하고 있다. 본 연구에서는 2002~2019까지 고속도로 교량의 교면개량 현황자료를 바탕으로 PSCB 거더교의 교면개량 실적과 제설환경 노출등급의 관계를 분석하였다.

PSCB 거더교 교면개량 실적을 분석한 결과, 전체 1,185개소의 교면개량 실적 중 PSCB 거더교의 교면개량은 총 55개소로 전체의 약 5%이며, PSCB 거더교 351개소의 약 16%가 교면개량이 실시된 것으로 나타났다. PSCB 거더교의 교면개량 실적을 바탕으로 개량 차수별 평균 공용년수를 Fig. 10에 나타냈다. 교면개량 실적이 있는 PSCB 거더교 55개소는 평균 16.5년의 공용이후 1차 교면개량이 이루어졌으며, 1차 교면개량 이후 2차 교면개량이 시행된 교량은 7개소로 1차 개량된 교량

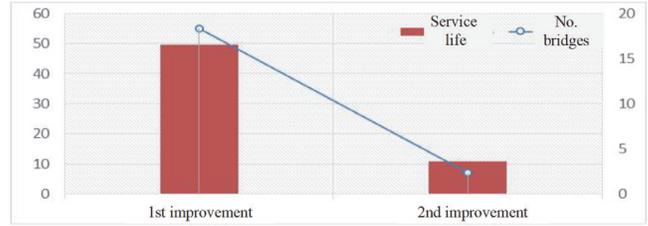


Fig. 10 Number of PSCB girder and average service life based on the number of bridge pavement improvement

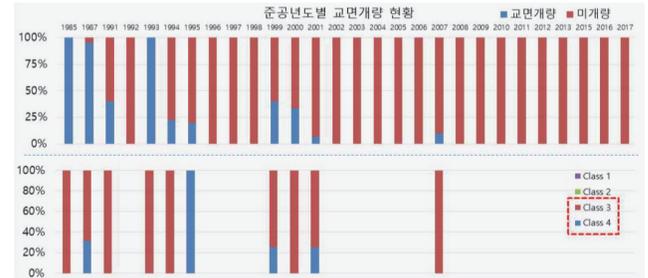


Fig. 11 Statistics of bridge pavement improvement by year of completion of bridge and statistics of snow removal environment exposure class

의 약 13%이며, 2차 교면개량까지의 공용년수는 평균 3.6년인 것으로 분석되었다.

이와 같이 교면개량 이후, 교면포장의 충분한 공용수명을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 일반 거더 교량에서도 교면개량 이후 교면포장의 공용수명이 확보되지 못하는 것으로 보고되고 있으며(KEC, 2020), PSCB 거더교의 경우에도 교면개량시 교통차단의 어려움으로 인한 품질확보 문제와 PSCB 상부플랜지 열화부 제거 미흡 등 복합적인 원인에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 11에는 준공년도별 PSCB 거더교의 교면개량 현황과 교면개량 교량의 제설환경 노출등급을 나타냈다. Fig. 11과 같이 교면개량된 PSCB 거더교는 제설환경 노출등급 Class III ~ Class IV에 위치하고 있으며, 이는 제설환경 노출등급이 높은 염해환경에서 ACP의 균열 등으로 유입된 염화물이 PSCB 거더교 상부플랜지의 열화를 유발하고 교면포장과 PSCB 거더교 상부플랜지 계면에 체수되어 열화가 진전되어 다시 교면포장의 손상으로 이어져 교면개량까지 이어진 것으로 판단된다.

2.4 주요 열화·손상 발생 원인 분석

2.4.1 상부플랜지 열화 원인

공용중 PSCB 거더교의 정밀안전진단 보고서 분석 및 현장 조사 결과를 고려하면 대부분의 손상은 시공초기 건조수축이나 시공미흡 등에 기인하는 손상으로 공용중 진전 가능성은

크지 않은 것으로 판단된다. 그러나 실제 공용중 발생하는 열화·손상은 상부플랜지에 집중되어 있는 것으로 분석되었으며, 이는 PSCB 거더교 상부플랜지가 일반적인 교량의 바닥판 역할을 하기 때문에 윤택중을 직접 지지하면서 동절기 제설염 포설 환경에 노출되는 등 상대적으로 열악한 환경에 놓여 있기 때문이라고 판단된다.

Fig. 12는 상부플랜지 열화·손상유형의 발생 현황이며, 균열과 누수, 백태 및 박리/박락 등 열화·손상의 단독 또는 병행 발생 여부의 분석결과를 보여준다.

Fig. 12와 같이 상부플랜지 하면에 발생한 균열은 대부분 누수나 백태 등을 동반하지 않고 단독으로 발생되었고 관통형 균열이 아님을 알 수 있는데, 이는 정밀안전진단 보고서에 제시된 균열깊이조사 결과에서 균열이 철근 피복깊이까지만

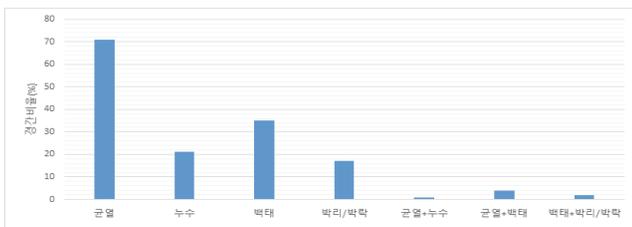


Fig. 12 PSCB girder deterioration and damage type of the bottom top flange

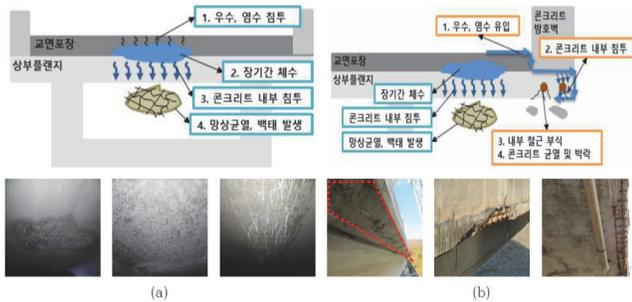


Fig. 13 Deterioration mechanism of PSCB girder top flange

Table 4 Main factors and deteriorations of PSCB girder top flange

Category	Deck	Cantilever
Deteriorations	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Mediocre condition ▷ Local damages such as efflorescence or leakage at openings during the construction(no progress in scale or severity of damage) ▷ History of asphalt repaving in several places and efflorescence on bridges with severe damage such as crumbling asphalt cracks, delamination and abrasion of asphalt (not severe and progressive) 	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Efflorescence, leakage, spalling on the side or end of the cantilever(severe and progressive at barrier or at vertical construction joint of widening sections) ▷ Severe damage of wearing surface on emergency stopping lane such as delamination, crumbling asphalt cracks and stagnant water or efflorescence and leakage at inside cantilever with water-proof layer damaged as a result of coring(progressive and observation required)
Main factors	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Damage of surface wearing and waterproof layer ▷ Interface of waterproof layer when partially repaving 	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Damage of surface wearing and waterproof layer ▷ Stagnant water on emergency stopping lane ▷ Leakage of bottom bridge barriers

진행된 것으로 나타난 결과와도 부합한다. 또한, 상부플랜지 하면의 박리/박락과 누수 및 백태가 동반 발생된 개소도 매우 드문 것으로 나타났으며 이는 교면포장의 방수층이 양호한 상태를 유지하면 제설염화물을 함유한 교면수가 상부플랜지 하면으로 침투되면서 백태를 유발하고 박리/박락으로 진전되는 매커니즘도 발생 가능성은 높지 않은 것으로 판단된다.

상부플랜지 내부는 대부분 양호한 상태로서 일부 국부적으로 발생한 개소는 시공당시 만들어진 개구부 마감 미흡에 기인하는 경우, 다수의 소규모 교면포장 보수 이력이 있거나 포장층의 손상이 심한 교량에서 면상으로 발생한 사례가 조사되었으며, 이 경우는 대부분 손상정도도 심하지 않고 비진행성인 경우로 나타났다. 한편, 캔틸레버는 측면이나 단부측에서 백태, 표면 열화 및 박락 등이 집중적으로 발생하는 경우와 내측에서 갓길측 교면포장의 손상이 심한 경우에 백태 및 누수혼합이 발생하는 경우로 나타나며, 대부분 손상 정도가 심하고 진행성으로 나타났다.

Table 4에는 PSCB 거더교 상부플랜지의 열화·손상 현황과 주요 인자를 정리하였다. Table 4에 정리된 바와 같이, 상부플랜지의 열화 원인은 교면포장의 균열 또는 손상부로 유입되는 우수 또는 염수의 장기간의 체수로 인한 것으로, 상부플랜지 콘크리트의 열화가 발생되고 이후 철근의 부식 등으로 이어진다.

주요 열화의 유입 경로는 Fig. 13(a)와 같이 교면포장의 손상으로 인한 우수(염수)의 유입과 장기간의 체수로 인한 열화 발생과 Fig. 13(b)와 같이 갓길부 방호벽과 상부플랜지 계면으로 유입되어 상부플랜지 캔틸레버 단부의 콘크리트 내부로 침투하여 철근의 부식·팽창으로 콘크리트에 균열과 박락이 진전되는 열화 발생 매커니즘으로 크게 구분할 수 있다.

2.4.2 상부플랜지 하면 교축방향 균열 원인

PSCB 거더교에서 가장 많이 발생된 손상은 상부플랜지 하면 교축방향 균열이며, 전체 PSCB 거더교의 약 70%에서 발

Table 5 Longitudinal crack characteristics of the bottom top flange on PSCB girder

Items	Contents	Note
Characteristics	▷ Discontinuous longitudinal direction cracks at regular intervals at mid span ▷ Discontinuous longitudinal direction cracks starting from construction joint	(cw 0.1~0.2mm) (cw 0.1~0.2mm)
Main factors	▷ Heat of hydration and restraint of drying shrinkage	Numerical analysis
Penetration occurrence	▷ No detection of longitudinal direction cracks, efflorescence, leakage ▷ Crack depth range between 36mm-54mm as a result of inspection of crack depth(Concrete cover : 44-53mm)	Inspection No penetration
Progression occurrence	▷ Minor progression in crack width, length and depth, and observation required	Progression check Uncertainty

생되었다. 상부플랜지 하면 교축방향 균열의 현황과 원인 및 특성을 Table 5에 정리하였다.

PSCB 거더교의 상부플랜지 하면에 발생한 교축방향 균열은 중앙부를 중심으로 약 300~500mm 간격으로 발생되어 있으며, 균열폭은 약 cw 0.1~0.2mm 정도이다. 기 수행된 정밀안전진단 보고서를 토대로 균열의 발생 현황이나 상태 등을 종합적으로 분석해보면, 균열은 다수의 균열이 일정 간격을 두고 불연속적으로 발생하고, 누수나 백태 등의 열화손상을 동반하지 않으며, 균열깊이는 최대 철근 피복깊이까지 발생되었고, 균열 폭 및 길이 변화는 크지 않아 진전 가능성이 크지 않은 점 등으로부터 외부하중에 의한 구조적 균열 보다 수화열, 건조수축 등으로 인한 균열로 판단된다.

문헌조사 결과에서도 상부플랜지 하면 교축방향 균열은 시공초기 건조수축이나 시공 미흡 등에 기인하는 균열로, 공용중 진전 가능성은 매우 낮은 것으로 보고되고 있다. 그러나 시공초기 건조수축 등의 원인으로 인하여 발생한 균열은 상부플랜지 상·하면에 동시에 발생할 가능성이 크고, 이는 교면포장 손상으로 인한 염해환경 노출 시 내구성 저하의 원인이 되기 때문에 시공초기 발생하는 상부플랜지 균열 제어를 위한 방안이 필요할 것으로 판단된다.

한편 국내 도로교설계기준 한계상태설계법에서는 건조수축 또는 온도 등의 간접하중에 의한 균열의 제어를 위하여 최소 철근량 조건과 적합한 하중조합과 균열 단면을 기준으로 계산한 철근 응력에 대한 최대 철근지름이 제시되어 있으나 실제 PSCB 거더 상부플랜지의 균열 발생 현황을 고려하면 구속된 상태에서의 간접하중에 의한 균열 제어가 다소 미흡하다고 판단되며, 실제 PSCB 거더교 설계시 상부플랜지의 균열에 대한 검토는 수행되고 있지 않은 것으로 조사되었다.

3. 결 론

PSCB 거더교는 상·하부 플랜지와 복부가 일체화된 폐합된 단면으로 일반적으로 거더와 바닥판이 분리된 교량과 구조적 특성이 상이하며, 따라서 PSCB 거더교의 특성을 반영한 유지

관리 방안이 필요하다. 본 논문에서는 PSCB 거더교의 유지관리 방안 도출을 위한 연구의 일환으로 공용중 발생하는 주요 열화·손상과 그 원인을 분석하고자 고속도로에서 공용중인 PSCB 거더교의 정밀안전진단 보고서를 분석하였으며, 분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) PSCB 거더교 62개소(477경간)의 정밀안전진단 보고서를 분석한 결과, 공용중 발생하는 열화·손상은 대부분 상부플랜지에 집중되어 있으며, 상부플랜지 하면의 교축방향 균열은 약 70%, 누수·백태 등의 열화는 약 20%의 경간에서 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 상부플랜지 하면의 교축방향 균열은 가설공법과 제설환경 노출등급의 영향이 크지 않으나 상부플랜지 하면의 백태는 제설환경 노출등급과 상호 연관성은 높은 것으로 분석되었다.
- (3) 제설환경 노출등급, 교면포장 형식은 상부플랜지 하면 교축방향 균열과의 상관관계는 나타나지 않았으나, 상부플랜지에 발생하는 누수, 백태 등 열화의 주요 인자로 분석되었다.
- (4) 최초 교면개량은 평균 16.5년, 2차 교면개량은 평균 3.6년으로 교면개량 이후, 교면포장이 충분한 공용수명을 확보하지 못하고 있는 것으로 나타났으며, 교면개량 실적은 제설환경 노출등급 Class III ~ Class IV에 위치하는 것으로 조사되었다. 이는 교면포장 개량시 교통차단의 어려움으로 인한 품질확보 문제와 PSCB 상부플랜지 열화부 제거 미흡 등 복합적인 원인에 기인한 것으로 유지관리 단계에서의 교면개량을 포함한 유지보수 활동을 위한 충분한 시간 확보가 필요할 것으로 판단된다.
- (5) 정밀안전진단 보고서 및 현장조사 결과를 종합하면, PSCB 거더교 상부플랜지에 발생하는 열화는 교면포장으로 유입된 우수(염수)가 상부플랜지와 계면 사이에 체수되어 장기간 접촉으로 인하여 발생되며, 우수(염수)의 유입경로는 중앙부의 경우 교면포장 균열부, 캔틸레버부의 경우 교면포장 균열부와 포장-방호벽-상부플랜지 경계(시공이음부)로 분석되었다.

- (6) PSCB 거더교 상부플랜지 하면 교축방향균열은 중앙부를 중심으로 300~500mm 간격, 균열폭 약 cw 0.1~0.2mm로 조사되었으며, 문헌조사 및 정밀안전진단 보고서 분석 결과를 바탕으로 PSCB 거더교의 상부플랜지 하면에 발생한 교축방향균열 원인은 수화열, 건조수축 등으로 인한 균열로 판단된다.
- (7) PSCB 거더교의 특성을 고려한 합리적인 유지관리를 위해서는 시공초기 발생하는 상부플랜지 하면 교축방향 균열 제어를 위한 설계측면의 개선 방안이 제시되어야 할 것이며, 공용중 발생하는 열화는 상부플랜지 열화 이전 교면포장의 유지관리를 통한 선제적 대응과 제설환경 노출등급에 따른 차별화된 유지관리 방안이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

4. MLIT (2004), Bridge Periodic Inspection Guidelines (Draft), Ministry of Land, Infrastructure, Transportation, and Tourism, Tokyo, Japan. (in Japanese).
5. The 4th PC Joint Research Group. (2012), Report on Quality Improvement of PC Bridge Design. (in Japanese).
6. Yoshikazu Heianyama. (2007), Verification of cracked cases of PC box girder bridge constructed in a marine environment, *Annual Proceedings of Concrete Engineering*, 29(3). (in Japanese).
7. Prestressed Concrete Engineering Society 24th Symposium Proceedings. (2015), Estimating the Cause and Countermeasures of Cracks in the PC Girder. (in Japanese).
8. Podolny, W. (1985). The cause of cracking in post-tensioned concrete box girder bridges and retrofit procedures, *PCI Journal*, 30(2), 82-139.
9. KEC. (2021), 271 Reports of In-depth Safety Inspection for Prestressed Concrete Box Girder Bridges. Korea Expressway Corporation, Gimcheon, South Korea. (in Korean).
10. KEC. (2016), A Study on the Specified Mix Proportions and Quality Management of High Durability Concrete for RC Structures on Express Way, Korea Expressway Corporation, Gimcheon, South Korea. (in Korean).
11. KEC. (2020), A Study on establishment of maintenance strategy to extend the service life of bridge deck slab, Korea Expressway Corporation, Gimcheon, South Korea. (in Korean).

References

1. Seoul Special City. (2017), PSC box girder bridge tension member maintenance plan establishment: comprehensive report. (in Korea).
2. MOLIT. (2019), Detailed Guideline of Safety and Maintenance for Structures-Bridge, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, South Korea. (in Korean).
3. MLIT. (2014), Manual for Bridge Periodic Inspection, Ministry of Land, Infrastructure, Transportation, and Tourism, Tokyo, Japan. (in Japanese).

Received : 08/02/2022

Revised : 10/25/2022

Accepted : 11/29/2022

요 지 : PSCB 거더교는 고속도로에서 공용중인 교량의 4%로 많은 비중을 차지하고 있지는 않지만, PSCB 거더교의 약 98%가 1-2종 교량이며 전체 교량 연장의 약 16%(192km)를 차지하는 만큼 유지관리가 매우 중요한 교량 형식 중 하나이다. PSCB 거더교의 손상유형을 분석하기 위해 고속도로 공용중 교량의 가설공법, 제설환경 노출등급 비율을 고려한 62개소(477경간) 정밀안전진단 보고서를 선정하여 상세 분석을 수행함과 동시에 실제 열화손상이 발생한 교량의 현장조사를 수행하였으며, 그 결과 대부분의 열화손상 원인은 교면포장으로 유입된 우수(염수)가 상부플랜지와 계면 사이에 체수되어 콘크리트가 열화되고, 이후 교면포장의 균열 및 파손, 철근의 부식·팽창으로 인한 콘크리트 박락 등으로 진전되어 나타난 것으로 조사되었다. 또한, 상부플랜지 하면에 발생한 교축방향 균열 원인은 수화열, 건조수축 등으로 인한 균열로 판단된다. 결론적으로 PSCB 거더교의 특성을 고려한 합리적인 유지관리를 위해서는 시공초기 발생하는 상부플랜지 하면 교축방향 균열 제어를 위한 설계측면의 개선 방안이 제시되어야 할 것이며, 공용중 발생하는 열화는 상부플랜지 열화 이전 교면포장의 유지관리를 통한 선제적 대응과 제설환경 노출등급에 따른 차별화된 유지관리 방안이 제시되어야 할 것으로 판단된다.

핵심용어 : PSCB 거더교, 상부플랜지, 교면포장, 균열, 열화, 손상