

철근콘크리트 거더의 관리기준치 설정을 위한 도로교설계기준 처짐 제한치의 안전계수 추정에 관한 실험적 연구

The Experimental Study for inferring the Safety-Factor of the Limit of Span-Deflection in Standard Specifications for Highway Bridges for Setting the Standard of the Measurement Criteria in RC Girder

주 봉 철* 박 기 태** 황 윤 국** 이 우 상***
Joo, Bong-Chul Park, Ki-Tae Hwang, Yoon-Koog Lee, Woo-Sang

Abstract

The span deflection among the monitoring items of bridge measurement system in real time is representative behaviour and important index of superstructure condition. the limit of span deflection in Standard Specifications for Highway Bridge in Korea has been applied to the method that is making the management-criteria for span deflection in bridge measurement system. But the limit concern mainly serviceability of divers. So it is difficult to find the safety factor of the limit from the viewpoint of bridge safety. This study estimated the safety factor of the limit of span-deflection in Standard Specifications for Highway Bridge in Korea from the viewpoint of bridge safety by the indoor structural test.

요 지

교량 계측시스템의 계측항목 중 거더 중앙부 처짐은 교량 상부구조의 대표적인 거동 특성이며, 중요한 상태평가 항목이다. 교량 계측시스템에서 교량 경간 중앙부 처짐에 대한 관리기준치를 설정하는 여러 가지 방법 중 도로교 설계기준의 처짐 제한치를 적용하는 경우도 있다. 그러나 도로교설계기준의 처짐 제한규정은 안전성 측면보다는 사용성 측면에서 검토되어 실제 교량에서 발생할 수 있는 위험상황에 대하여 어느 정도 안전을 보장하는지 판단하기 어렵다. 본 연구는 현재 교량 설계시 경간 중앙부 처짐의 사용성 검토 기준이고, 일부 교량 상시계측시스템의 경간 중앙부 관리기준치로 적용되고 있는 도로교설계기준의 처짐 제한치가 포함하고 있는 파괴(항복)에 대한 실질적인 안전율을 추정해 보고자 실내구조실험을 통하여 일반 철근콘크리트 거더의 안전율을 추정하였다.

Keywords : Bridge, Deflection, Management-Criteria, Specifications

핵심 용어 : 교량, 처짐, 관리기준치, 설계기준

* 정회원, 한국건설기술연구원 복합구조연구실 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 복합구조연구실 책임연구원

*** 정회원, 스마트 제어계측 이사

E-mail : bcjoo@kict.re.kr 031-910-1038

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2009년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

2007년 8월 1일(현지시각) 미국 미네소타주 미니애폴리스의 고속도로 교량이 붕괴 되면서 실종 또는 사망 등의 인명피해가 발생하는 사고가 발생하였다. 우리나라에서도 1992년 창선대교, 1994년 성수대교가 사용 중 붕괴되어 공용 중에 있는 교량의 붕괴로 인한 사망사고를 경험한 바 있다. 이와 같은 교량의 사용 중 붕괴사고를 예방하기 위하여 대한민국 정부는 1995년에 “시설물의 안전관리에 관한 특별법”을 제정하고 “한국시설안전기술공단”을 설립하여 교량을 포함한 각종 사회기반시설물의 안전관리와 유지관리를 주관하고 있다. 또한 사강교, 현수교 등과 같은 특수교량은 상시 계측시스템을 구축하여 실시간으로 교량의 거동 특성을 감시하고 있다.⁽¹⁾

교량의 이상 거동 판단은 일반적으로 교량 계측시스템의 계측항목별로 설정되는 관리기준치 설정을 통하여 이루어진다. 교량 상시계측시스템의 관리기준치란 관리주체가 대상 교량에 대하여 관리목적에 적합한 관리한계를 규정한 것으로 관리자가 교량의 상태변화나 이상 여부를 정량적으로 판정하고 단계별 대응계획을 수립할 수 있도록 설정된 값이다. 계측항목별 관리기준치는 계측시스템의 계측항목별 고유한 특성 및 관리자의 관리목적에 따라 다양하게 적용될 수 있다.

안전 및 유지관리를 위한 교량 계측시스템의 계측항목 중 거더 중앙부 처짐은 교량 상부구조의 대표적인 거동 특성이며, 중요한 상태 평가항목이다. 일반적으로 거더 중앙부에 하중이 위치할 경우 대상 거더에 최대 처짐량이 발생하여 설계시 고려되는 하중의 위치와 정기적인 교량안전진단에서 정적 재하실험의 하중재하 위치는 대부분 경간 중앙부이다. 따라서 경간 중앙부 처짐을 감시하는 일은 교량 안전 및 유지관리를 위하여 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

이와 같은 교량 상시계측시스템의 계측항목 중 경간 중앙부 처짐에 대한 기존 관리기준치 설정방법은 크게 4가지로, 구조계산서 등과 같은 설계자료를 이용하는 방법, 도로교설계기준 등과 같은 설계기준을 이용하는 방법, 구조해석 결과를 이용하는 방법 그리고 재하실험 결과를 이용하는 방법 등이 있다.

구조계산서와 같은 설계자료가 있는 경우, 경간 중앙부 처짐에 대한 관리기준치 설정은 주로 설계 구조계산서의 최대 처짐량을 기준으로 설정하는 것이 일반적이다. 그러나 대상교량의 설계 자료가 없는 경우에는 도로교설계기준의 허용처짐값⁽²⁾을 기준으로 관리기준치를 결정하는 경우도 있다.⁽³⁾ 일부 교량에서는 정기적으로 수행되는 정밀안전진단시 측정되는 최대 처짐량을 기준으로 관리기준치를 설정하는 경우도 있으나 적용되는 하중조건이 일정하지 않으며, 1등급의 경우 설계하중을 재하하는 경우가 거의 없어 설계수준을 반영하기 어렵다. 그리고 설계자료가 있는 교량의 경우도 도로교설계기준의 허용처짐값을 복합적으로 관리기준치로 이용하는 경우도 있다.⁽⁴⁾ 이와 같이 도로교설계기준의 거더 중앙부 처짐제한치는 대상교량에 대한 설계 및 상태정보가 부족할 경우, 거더 중앙부 처짐에 대한 관리기준치 설정을 위하여 일반적으로 활용된다.

본 연구에서는 현재 철근콘크리트 교량 설계시 경간 중앙부 처짐의 사용성 검토 기준이고 일부 교량 상시계측시스템의 경간 중앙부 관리기준치로 적용되고 있는 도로교설계기준의 허용처짐량에 대하여 거더 항복에 대한 실질적인 안전계수를 실내구조실험을 통하여 추정한다.

2. 이론적 검토

2.1 도로교 설계기준의 처짐제한치

도로교설계기준에서 제한하는 경간 중앙부 처짐량에 대한 규정은 “강교편 3.2.3 처짐의 허용값”과 “콘크리트교편 4.4.9.5 처짐제어 및 계산” 두 가지이다(이하 허용처짐).

그러나 도로교 설계기준의 허용처짐은 국내의 설계기준을 참고로 하여 경험적으로 정한 값으로 차량의 안전주행 보장 및 변형에 의한 2차 응력의 영향에 대한 구조물의 안전성, 그리고 통행자에게 불편감 등을 고려하여 교량 전체가 어느 정도 이상의 강성이 필요하게 되므로 처짐량을 제한하여 필요한 강성을 확보하기 위한 것이다. 따라서 허용처짐이 구체적으로 어느

정도의 안전을 보장하는지 확인할 수 없다. 그리고 강 거더의 경우 도로교설계기준의 허용처짐값을 상당히 초과하여도 거더 자체의 안전 및 내하력에는 문제가 없으며, 단지 콘크리트 바닥판의 영향을 고려하여 강 거더의 폭률을 처짐량으로 제한하는 것이다.⁽⁵⁾

2.2 교량 경간 중앙부 처짐

공용 중인 교량에 발생하는 처짐의 원인은 크게 3 가지로 구분할 수 있다. 활하중에 의하여 순간적으로 발생하는 탄성처짐, 일별, 계절별 온도변화에 따라 일정한 반복 주기를 갖는 주기처짐 그리고 고정하중 및 온도하중 등과 같이 교량에 작용하는 다양한 지속하중에 의한 크리프와 손상 등에 의해 발생하는 소성처짐 등이 있다.

부재의 손상이나 기능저하 등으로 인한 교량의 강성이 감소하면 처짐이 증가하게 된다. 그러나 전체적인 처짐의 증가는 동일한 하중조건에서의 탄성처짐이 증가나 반복처짐의 진폭 증가 또는 소성처짐의 증가 등의 형태로 복합적으로 구성되어 있어 손상의 영향을 명확하게 파악하는 것은 간단한 작업이 아니다. 이와 같은 손상의 영향은 설치된 계측시스템을 통하여 지속적으로 계측자료를 누적하고 분석하는 한편, 대상 교량 조건에 적합한 안전성 평가방법에 대한 연구를 통해서 합리적으로 추정할 수 있다.

그리고 교량의 처짐은 지간의 길이에 따라 항상 비례하여 증가하는 것이 아니라 교량 형식 및 단면의 특성에 따라 크게 달라진다. 따라서 교량 형식과 단면의 특성이 반영될 수 있는 관리기준 설정방법을 개발하는 것도 교량의 안전관리를 위해 필요한 일이다.

3. 거더 중앙 허용처짐 안전을 평가

앞서 검토한 바와 같이 도로교설계기준에서 제한하는 거더 중앙부 허용처짐은 교량 설계시 사용성 검토 기준 뿐만 아니라 교량 계측시스템의 관리기준치로도 검토 및 적용되고 있다. 그러나 도로교설계기준의 허용처짐은 경험적으로 설정된 값이며, 단순히 경간길이에 따른 제한값으로 구성되어 있어 다양한 형식과 단

면을 갖고 있는 교량 등에 대하여 어느 정도의 안전율을 포함하는지 파악할 수 없다.

본 연구는 도로교설계기준의 허용처짐이 포함하고 있는 안전율을 확인하는 것이 현재 국내 적용된 교량 계측시스템의 경간 중앙부 처짐 관리기준치의 안전수준을 추정할 수 있는 의미 있는 일로 판단하고 그 시작적인 연구로 일반 철근콘크리트 거더에 대하여 간단한 실험을 통해 도로교설계기준 허용처짐의 구조적인 안전계수를 추정하였다.

3.1 실험체 설계

본 연구에 사용된 실험체는 Fig. 1과 같은 철근콘크리트 T형교의 거더를 1/3 축소하여 제작하였으며, 지간의 길이에 따른 영향을 알아보기 위하여 지간길이를 2m, 4m, 6m로 구분하여 설계 제작하였다. Fig. 1은 대상교량의 종단면과 횡단면을 나타낸 그림이다.

설계에 적용된 교량⁽⁶⁾은 일반적인 철근콘크리트 T형 거더교로 전체 길이는 13.6m, 경간 길이는 13m, 전체 폭은 8.3m이며 설계하중은 DB-18인 2등교이다. 실험체는 대상 교량의 거더 중 중앙부 거더 1개만을 선택하여 약 1/3로 단면을 축소하여 설계하였으며, Fig. 2와 같이 T형 단면의 날개부분은 실험체 제작 및 실험진행의 편의를 위하여 생략하고 직사각형 단면으로 설계하였다.

설계하중 조건에서 충격계수를 포함하는 대상교량의

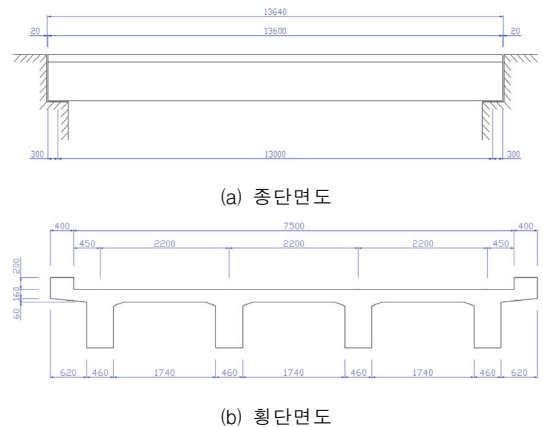


Fig. 1 대상교량 제원 및 단면형상(단위: mm)

극한모멘트를 같은 비율($(1/3)^3$)로 3차원 축소하고, 이를 실험체의 극한모멘트로 적용하여 단면을 설계하였다.

그리고 실험체에 적용된 극한모멘트 중 고정하중에 의한 모멘트를 제외한 활하중 모멘트를 지간 중앙의 집중하중으로 환산하여 이를 설계 하중조건으로 설정하였다. 2m와 6m의 지간을 갖는 확장실험체는 환산된 하중조건을 적용하여 추가 설계하였다. 본 연구에 적용된 실험체는 단면이 단순하여, 설계 및 시공상 오차발생이 가능성이 매우 낮아 강도감소계수는 적용하지 않았다.

Fig. 3은 대상교량의 거더를 약 1/3 Scale로 축소한 실험체 MS4(Miniature with Span length 4m)와 MS4와 유사한 하중조건을 갖고 지간길이가 2m인 ES2(Expansion of MS4 with Span length 2m)과 지간길이가 6m인 ES6(Expansion of MS4 with Span length 6m)의 상세를 나타낸 그림이다.

Table 1과 2에 실험체의 특징과 설계과정을 간단하게 정리하여 나타내었으며, Table 3에 실험체의 단면을 검토하여 정리하였다. 파괴실험을 위한 하중재하 방식은 변위제어 방식으로 각 지간 길이의 1/50까지 실험체의 거동을 확인하였다. Fig. 4는 파괴실험 중에 있는 실험체의 모습이다.



Fig. 2 대상교량 단면 축소 (단위: mm)

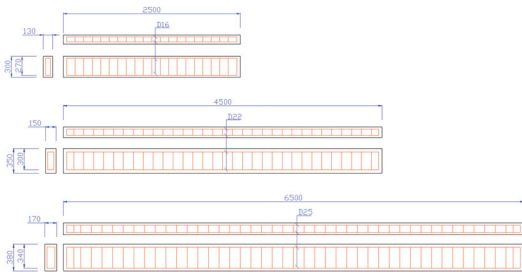


Fig. 3 실험체 상세 (단위 : mm)

Table 1 실험체 특징

실험체명	설계방법	지간길이 (m)	설계단면모멘트 (tonf·m)
ES2	MS4 확장 (Expansion)	2	3.81
MS4	대상교량 축소 (Miniature)	4	7.72
ES6	MS4 확장 (Expansion)	6	11.41

Table 2 설계하중 환산 과정(MS4의 경우)

구분	값	비고
대상교량 극한모멘트 (M_u , tonf·m)	187.59	참고문헌 5 참조
MS4의 극한모멘트 (M_u' , tonf·m)	6.95	$M_u/(3)^3$
MS4 고정하중 모멘트 (M_{ud}' , tonf·m)	0.34	Fig. 4 참조
MS4 활하중 모멘트 (M_{ul}' , tonf·m)	6.61	$M_u' - M_{ud}'$
MS4 설계하중 환산 (P_d , tonf)	6.61	중앙부 집중하중

여기서, 철근콘크리트단위중량 $W_c = 2.5 \text{ kg/cm}^3$

Table 3 실험체 단면 검토

실험체명	설계하중 (tonf)	극한모멘트 (tonf·m)	설계단면모멘트 (tonf·m)
ES2	6.61	3.37	3.81
MS4	6.61	6.95	7.72
ES6	6.61	10.85	11.41

여기서 $F_{ck} = 240 \text{ kg/cm}^2$, $F_y = 4,000 \text{ kg/cm}^2$



Fig. 4 실험체 파괴 실험 장면

3.2 실험 결과

3.2.1 중앙부 처짐⁽⁷⁾

실험체의 파괴실험을 통하여 측정된 처짐량을 Table 4와 Fig. 5에 나타내었다. 실험결과 지간길이가 4m인 MS4는 지간길이의 약 1/186 처짐이 발생하였을 때 항복하였고, 지간길이 2m인 ES2는 MS4보다 약 15% 감소한 지간길이의 약 1/220 처짐이 발생하였을 때 항복하였으며, 지간길이가 6m인 ES6은 MS4보다 약 39%증가한 지간길이의 약 1/134 처짐이 발생하였을 때 항복하는 것으로 나타났다. 처짐결과에서의 의미하는 항복은 하중증가량에 비하여 처짐증가량이 급격히 증가하기 시작하는 순간을 의미하며 하중-처짐 관계곡선에서 변곡점으로 나타난다.

3.2.2 철근 응력

콘크리트 타설전 철근에 부착한 변형률게이지를 통하여 측정된 변형률 값으로 계산된 철근의 응력에 대한 실험결과를 Table 5와 Fig. 6에 나타내었다. 인장철근의 응력결과에서도 처짐과 같은 개념으로 처짐 증가량에 대한 변형률의 증가량에 대한 비율이 급격하게 변하는 순간을 인장철근의 항복으로 설정하였으며 이를 기준으로 측정된 인장철근의 항복응력은 MS4는 497MPa, ES2는 531MPa 그리고 ES6은 481MPa이다. 이는 한국공업규격(KS D 3504)의 최소 항복강도⁽⁸⁾인 400MPa에 120~130% 수준이다.

인장철근이 항복응력 일 때의 처짐은 MS4의 경우 18.06mm로 실험체 항복처짐의 약 84%, ES2의 경우 7.57mm로 실험체 항복처짐의 약 83%, M46S5의 경우 38.73mm로 실험체 항복처짐의 약 87% 수준으로 인장철근은 실험체 항복처짐의 약 83%~87% 수준에서 항복하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 인장철근의 항복과 실험체의 항복 차이는 인장철근이 일부 항복하여도 응력 재분배를 통하여 소정의 내하력이 상당기간 유지되어 나타난 현상으로, 철근의 응력을 기준으로 교량의 상태를 판단하는 것은 교량의 전체 처짐을 기준으로 교량의 상태를 파악하는 방법보다 보수적인 평가방법이다. 그러나 실제 교량에서 인장철근의 응력을 실시간으로 측정하는 일은 쉬운

일이 아니며, 대상교량 시공 중 계측장치를 설치하지 않았을 경우 인장철근의 응력파악에 많은 어려움이 따른다.

3.3 안전율 분석

실험결과를 도로교설계기준의 처짐제한치(이하 허용처짐) “경간(지간) 길이의 1/800”과 비교하여 Table 6에 함께 정리하였다. MS4의 경우 최대 430%의 항복에 대한 안전율을 포함하고 있으며, ES2의 경우 최대 364%, ES6의 경우 최대 596%의 안전율을 포함하고 있는 것으로 나타났으며, 지간길이가 길어질수록 안전율은 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

Table 6에 철근의 응력을 기준으로 인장철근의 항복응력과 한국공업규격의 최소 항복강도에 대하여 도로교설계기준 허용처짐의 안전율을 함께 정리하였다. 인장철근 항복응력에 대한 도로교설계기준 허용처짐의 안전율은 MS4의 경우 352%이고, ES2의 경우 260%,

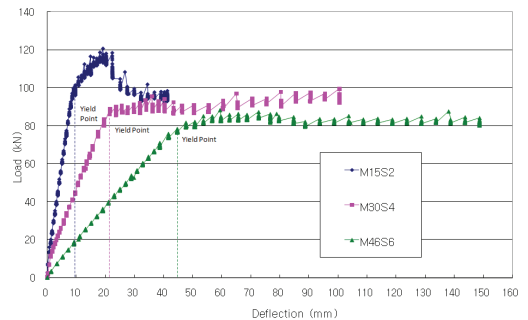


Fig. 6 하중-처짐 관계 곡선

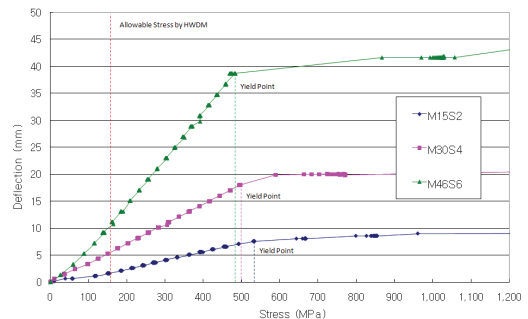


Fig. 7 처짐-응력 관계 곡선

Table 4 실험결과(처짐)

실험체명	실험체 시간[A]	실험체 항복시 처짐[B]	도로교설계기준 허용처짐[C]	지간길이에 대한 항복률[B/A]	허용처짐의 항복에 대한 안전률[B/C]
ES2	2,000 mm	9.1 mm	2.5 mm	1/220	364 %
MS4	4,000 mm	21.5 mm	5.0 mm	1/186	430 %
ES6	6,000 mm	44.7 mm	7.5 mm	1/134	596 %

Table 5 실험결과(응력)

실험체명	철근의 최소 항복강도 [D]	인장철근 항복응력[E]	허용처짐(C)일때 철근응력[F]	허용응력에 대한 안전률[D/F]	항복강도에 대한 안전률[E/F]
ES2	400 MPa	534 MPa	205 MPa	195 %	260 %
MS4		497 MPa	141 MPa	284 %	352 %
ES6		483 MPa	118 MPa	339 %	409 %

Table 6 실험결과 (응력)

실험체명	도로교설계기준 철근의 허용응력[G]	허용처짐(C)일때 철근응력[F]	철근 허용응력(G)과 허용처짐일 때의 철근응력(F)의 비[F/G]
ES2	180 MPa	205 MPa	114 %
MS4		141 MPa	78 %
ES6		118 MPa	65 %

ES6의 경우 409%로 나타났다. 또한 한국공업규격의 최소 항복강도에 대한 안전율은 MS4의 경우 284%이고, ES2의 경우 195%, ES6의 경우 339%로 확인되었다. 철근의 응력을 기준한 도로교설계기준 허용처짐의 안전율도 처짐결과와 유사한 양상으로 지간의 길이가 증가할수록 안전율이 증가하고 있다.

따라서 도로교설계기준 허용처짐은 실험체의 처짐을 기준으로 약 360%~560% 정도 안전율을 포함하고 있으며, 인장철근의 항복응력을 기준으로 평가할 경우 약 260%~400%의 안전율을 포함하는 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 적용한 가장 보수적인 항복기준인 한국공업규격의 최소 항복강도를 기준으로 판단하여도 도로교설계기준 허용처짐은 약 200%~340%의 안전율을 포함하는 것으로 예상된다. 또한 도로교설계기준 허용처짐시 인장철근의 응력수준과 도로교설계기준의 철근 허용응력을 비교하여 Table 6에 나타내었다. 도로교설계기준 허용처짐시 인장철근의 응력수준은 ES2의 경우 도로교설계기준 허용응력의 114%이고, MS4의 경우 78%, ES6의 경우 65% 수준으로 ES2를 제외하고는 허용응력 이하의 수준으로

나타났으며, 지간의 길이가 길어질수록 응력 수준은 작아지는 경향을 나타내었다.

4. 결 론

일반적인 철근콘크리트 교량의 경간 중앙부 처짐에 대한 관리기준치 설정방법으로 이용되는 『도로교설계기준 콘크리트교 상부구조 처짐 제한치』의 철근콘크리트 거더 항복에 대한 안전계수 추정을 위한 실험적 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 일반적인 철근콘크리트 거더에 적용되는 도로교설계기준의 콘크리트교 상부구조 처짐 제한치 "경간 길이의 1/800" 규정은 항복기준에 따라 다양하게 판단될 수 있으나 최소 200% 이상의 안전율을 포함하고 있는 것으로 추정된다.
- 2) 그리고 도로교설계기준의 콘크리트교 상부구조 처짐 제한치일 때 인장철근의 전체 응력수준은 도로교설계기준의 철근 허용응력 수준이거나 작을 것으로 예상된다. 따라서 일반적인 철근 콘크리트 거더교의 경우 도로교설계기준의 콘크리트교 상부구

조 처짐 제한치 규정으로 교량을 관리 하는 것은 보수적인 수준에서 교량을 관리하는 것으로 판단 된다.

- 3) 일반 철근콘크리트 T형교의 경간 중앙부 처짐에 대한 도로교설계기준 콘크리트 상부구조 처짐 제한치는 손상 등으로 인한 소성변형을 고려하지 않을 경우 구조적 위험에 대하여 최소 2 이상의 안전계수를 포함하고 있는 것으로 추정된다.
- 4) 상시계측시스템을 통하여 계측되는 처짐량에는 크립 및 온도 변화에 따른 처짐량이 포함되어 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 거더의 처짐량은 시간길이뿐만 아니라 단면조건의 변화에도 크게 영향을 받으므로 보다 명확한 도로교설계기준 허용처짐의 안전계수를 추정하기 위해서는 단면조건에 따른 안전계수의 변화에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁·시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 06건설핵심B05)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Joo. B.C, Park. K.T, Lee. W.S, and Hwang. Y.K, "Experimental study on the method of bridge safety evaluation" Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems 2008, SPIE, Volume 6932, March 2008, pp. 693-240, 1-8.
2. 건설교통부, "도로교설계기준", 2005. 2, p.56, pp. 300-303.
3. 서울특별시, "한강교량 On-Line 안전감시망 구축용역 종합보고서", 연구보고서, 2007. 2, pp. 176-205.
4. 건설교통부, "특수교유지관리매뉴얼" 2007. 11, p. 281.
5. (사)대한토목학회, "도로교설계기준·해설", 기문당, 2003. 1, pp. 126-127.
6. 김생민, "최신 토목구조물설계", 기문당, 1998. 1, pp. 107-128.
7. 주봉철, 박기태, 이우상, "교량의 처짐 관리기준치 여유도 산정을 위한 실험적 연구", 2008년도 한국방재학회 정기총회 및 학술발표대회 논문집, 한국방재학회, 2008. 2월, pp. 473-476.
8. 지식경제부 기술표준원, KS규격번호 "KS D 3504", <www.standard.go.kr>.

(접수일자 : 2008년 7월 25일)

(심사완료일자 : 2008년 10월 21일)