

콘크리트 박스거더교의 설계 유효온도 산정을 위한 실험적 연구

이성행
부산대학교 토목공학과

Experimental Study on the Effective Temperature Calculation of Concrete Box Girder Bridge

Seong-Haeng Lee
Department of Civil Engineering, Pusan National University

요약 콘크리트 박스거더교의 합리적인 설계 온도하중을 산정하기 위하여, 1개의 교량시험체를 제작하였다. 교량시험체에 설치된 23개의 온도 게이지에서 1년간의 여름과 겨울기간에 30분 간격으로 하루에 48세트의 온도를 측정하였다. 상부 콘크리트와 측벽, 하부슬래브에 두께에 따른 온도변화를 검토하기 위하여 두께에 따라 여러 온도게이지를 부착하였다. 각 측정에서 측정된 온도를 통계 처리하여 추세선과 표준오차를 산정하고, 대표측점의 온도분포와 추세선을 제시하였다. 이를 바탕으로 Euro code에서 제시한 대기온도에서 여름철의 최고 유효온도와 겨울철의 최저 유효온도를 각각 산정하였다. 최고 유효온도는 35℃ 이상에서 Euro code와 비교하여 1.5~2℃ 높게 산정되었고, 최저 유효온도는 -13℃~-19℃에서 0.5~1.1℃로 더 낮게 분석되었다. 양산지방의 50년빈도 최고 및 최저 기온에 따른 본 연구의 유효온도와 비교해 보면, 최고 유효온도는 4.7℃ 높게, 최저 유효온도는 4.5℃ 더 낮게 산정되었다. 점점 높아지는 기후변동을 고려하고, 본 분석의 결과를 반영하면, 현 온도설계기준은 그 범위를 더 크게 하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

Abstract To calculate the reasonable design temperature load of a concrete box girder bridge, one bridge test specimen was made. The temperature gauges installed on the bridge test specimen measured 48 sets of temperature per day at 30-minute intervals during the summer and winter periods of one year. The temperature measured at each station was treated statistically to calculate the trend line and standard error, and the temperature distribution and trend line at the representative station were presented. The maximum effective temperature and the lowest effective temperature were calculated from the air temperature suggested by Euro code. The maximum effective temperature was calculated to be 1.5 to 2°C higher than the Euro code at 35°C and above. In comparison, the lowest effective temperature was 0.5 to 1.1°C lower at -13°C to -19°C. Compared to the effective temperature of this study according to the highest and lowest 50-year frequency of the Yangsan region, the highest effective temperature was 4.7°C higher, and the lowest effective temperature was 4.5°C lower. Considering the increasing climate change and reflecting the results of this analysis, it is deemed necessary to make the current temperature design standards larger.

Keywords : Concrete Box Girder Bridge, Maximum Effective Temperature, Minimum Effective Temperature, Temperature Load, Temperature Measurement, Bridge Test Specimen,

본 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Seong-Haeng Lee(Pusan Nat'l Univ.)

email: lsh77@pusan.ac.kr

Received September 21, 2020

Revised October 23, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

교량의 온도에 대한 설계기준으로 AASHTO LRFD [1]이나 Euro code [2]와 같은 선진 설계법은 좀 더 체계적이고 세분화된 규정이 제정되어 있다. 국내에서는 신뢰도에 기반을 둔 한계상태 설계법(LSD)이 적용되고 있으나, 좀 더 체계화되고, 세분화된 설계규정의 제정이 요망된다.

교량의 설계에 있어서 온도하중의 영향은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째로 온도 승강은 4계절의 영향으로 인하여 여름에 팽창하고 겨울에 수축하는 현상이며, 또 다른 하나는 직사광선을 받는 상판부와 간접 광을 받는 하판부의 온도승강이 달라 변형불일치로 온도구배에 따라 발생하는 휨응력이다. 온도 승강은 여름의 최고 온도와 겨울의 최저 온도에 따라서 결정되는데, 이를 반영하기 위하여 Euro code에서는 교량전체의 평균온도를 나타내는 개념으로 유효온도라는 용어가 언급된다. 강교의 유효온도[3-5]와 온도차[6]에 대하여는 여러 연구가 이루어 졌지만, 콘크리트교에 대하여는 연구가 부족한 상황이다. 콘크리트교에서는 온도 승강과 온도구배에 의해 유발되는 횡방향 응력 및 이에 의한 종방향 균열발생으로 구조물의 내구성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 현재의 콘크리트교의 도로교 설계기준(한계상태 설계법, Ministry of Land Infrastructure and Transport [7])은 온도구분을 한랭지역과 보통지역 정도로만 나누어 최고 온도와 최저온도 범위를 제시하고 있다(Table 1). 본 연구에서는 콘크리트 박스거더 시험체를 제작하여 여름철과 겨울철에 온도를 지속적으로 측정하였다. 이 시험체의 온도 측정결과를 바탕으로 대기온도에 의한 교량 단면 내 최고 유효온도와 겨울철 최저 유효온도를 산정하였다. 국외 규정인 Euro code와 산정된 유효온도를 비교 검토하고, 현행 설계기준에서 제시되고 있는 온도기준과 비교 평가 하였다.

2. 콘크리트교의 유효온도 설계기준

도로교 설계기준(한계상태 설계법)은 콘크리트교의 온도 범위를 Table 1과 같이 최고 온도와 최저온도 범위를 제시하고 있다. Euro code[2]에서는 유효온도를 Table 2와 같이 최고 유효온도 24℃~38℃, 최저 유효온도 -5℃~-19℃의 대기온도에서 설정하고 있다.

Table 1. Temperature ranges (℃)

	Concrete bridge	Steel bridge
Moderate	-5~35 °	-10~50 °
Cold	-15~35 °	-30~50 °

Table 2. Effective temperatures (℃)

Air temperature	Maximum effective temperatures	Air temperature	Minimum effective temperatures
38	37	-5	-2
37	36	-6	-3
36	36	-7	-3
35	35	-8	-4
34	34	-9	-5
33	33	-10	-6
32	33	-11	-6
31	32	-12	-7
30	32	-13	-8
29	31	-14	-9
28	30	-15	-9
27	29	-16	-10
26	29	-17	-10
25	28	-18	-11
24	27	-19	-11

3. 교량 시험체 설치 및 온도 센서

교량 시험체로 Fig. 1과 같이 콘크리트 교량시험체를 제작 설치하였다. 박스단면의 크기는 폭 2.0m, 높이 2.0m이며, 길이 3.0m, 외부 슬래브는 좌우 1m씩 돌출되며, 두께는 0.2m이다. 바닥면에는 공기 유통과 지열 등의 영향을 고려하여 높이 1.0m의 사각형 기둥 4개로 지지하였다. 교량시험체에는 23개의 온도 센서가 Fig. 2와 같이 부착된다. 상부 슬래브와 좌측측벽, 하부슬래브는 세부 a, b, c로 구분하여, 상부 슬래브 중앙부에 6개(세부 a), 좌측 벽체에 5개(세부 b), 하단부에는 4개(세부 c)를 두께에 따른 온도 변화를 보기위하여 설치하였다. 그리고 상부 슬래브 돌출부에 1개, 좌우측 벽체의 높이에 따라 각각 3개, 바닥판 아래에 대기 측정을 위한 온도 게이지 1개를 부착하였다. 교량 시험체는 경상남도 양산시 물금읍의 부산대학교 양산캠퍼스에 설치하고 측정하였다.



Fig. 1. Front photo of the bridge specimen

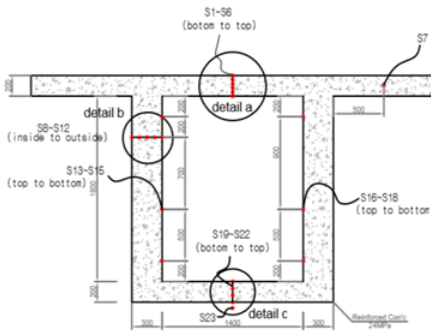


Fig. 2. Section plan and thermo-gauge location in the bridge specimen

시험체에서는 장기간의 온도를 안정적으로 측정하기 위하여 시험체로부터 20m거리에 있는 실험실 안에 데이터로거를 설치하였다. 각 교량시험체에 설치된 측정 지점에서 데이터로거의 자동 Time interval 기능을 사용하여 30분 간격으로 온도를 연속으로 측정하여 1일 48데이터 셋의 자료를 측정하였다. 최고 유효온도는 2017년 7월 1일서 8월 31일까지, 최저 유효온도는 2017년 12월 1일에서 2018년 02월 20일까지 측정된 데이터를 사용하였다.

4. 측정 결과 및 분석

4.1 온도측정

측정 기간 중 가장 높은 온도를 기록한 8월 4일부터 8월 8일까지 시간별 온도 분포를 Fig. 3에 도표화하였다. 상부 슬래브 최상부 (S6), 좌측 벽체부(S12), 대기온도(S23), 하부바닥 (S19) 순으로 낮 시간의 온도가 높게 측정되며, 상판부의 온도가 상대적으로 매우 높은 온도를 보인다. 밤 시간에는 거의 온도가 수렴하며, 대기온도 이

하로 내려간다.

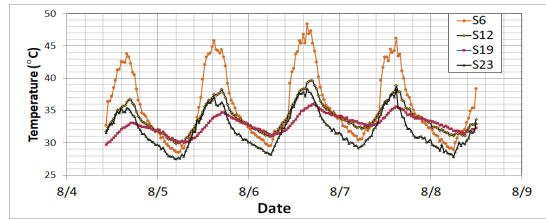


Fig. 3. Temperature variation at peak temperature

교량 모형에서 측정된 대기 최고기온은 8월 6일 오후 3시 20분에 38.4°C로 양산기상청의 당일 최고기온 38.3°C와 매우 유사하게 측정되었다. 이 최고 기온일 때 각 부위별 계이지의 온도를 정리하면 Table 3과 같다. 콘크리트 두께에 따른 온도 변화가 상판에서 크게 나타나며, 전체적으로 내측보다 외측의 온도가 높음을 알 수 있다.

Table 3. Measured temperature at highest temperature (°C)

	Temperature					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Top slab	40.1	40.8	42.8	45.2	47.6	48.1
Side wall	S8	S9	S10	S11	S12	
	35.1	35.3	35.7	37.0	39.3	
Bottom slab	S19	S20	S21	S22		
	35.4	34.7	34.3	34.2		

본 연구에서는 각 측정점에서 전체측정 데이터를 통계 분석을 통하여 추세선을 구하고 이를 바탕으로 유효온도를 구하는 방법은 사용하였다. 이 방법은 각 측정점에서의 온도 분포를 알 수 있다. 각 지점에서 측정된 온도데이터와 그 지점의 면적가중을 사용하는 Eq. (1)과 같은 티센가중법을 사용하여 유효온도를 산정하였다. 여기서 T_m 은 유효온도, A_i 는 지점의 면적, T_i 는 지점의 측정온도를 나타낸다.

$$T_m = \frac{A_1 T_1 + A_2 T_2 + A_3 T_3 + \dots + A_n T_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i T_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (1)$$

4.2 최고 유효온도 산정

최고 유효온도를 산정하기 위하여 2017년 7월 1일서 8월 31일까지 측정된 자료를 사용하였다. 교량시험체 22지점과 대기온도 1지점의 총 23지점에서 2개월간 총 2970 온도데이터 set를 분석하였다. 각 측정점에서 2970

온도데이터를 통계 처리하여 추세선과 표준 오차를 산정한다. Euro code에서 제시한 대기온도 24℃~38℃에서 각 지점의 온도를 추세선에 따라 산정하고, 산정된 값에 그 지점의 표준오차를 더하여 각 지점의 온도를 결정한다. 또한 양산지방의 50년빈도 최고기온이 39.1℃를 반영하여 39℃에 대하여도 추가 계산하였다.

Fig. 4는 분석된 22개 지점 중 4곳에 대한 온도분포 및 추세선을 보인다. S2, S6는 상부 슬래브 아래와 상단 부에 위치하며, S12는 좌측 벽체 외벽, S22는 하부 바닥 판 상부에 위치한다. S6와 S12는 콘크리트 표면에 위치하므로 비교적 일정하게 온도가 분포되어 상관관계가 높게 분석되나 S2와 S22는 박스 안쪽지점에 위치하므로 온도 추세선의 기울기가 완만하고, 상관관계도 상대적으로 낮은 편이다.

Table 4는 교량시험체에서 상부 슬래브, 양측 벽체, 그리고 하부 콘크리트부로 면적을 구분하여 각 면적의 합을 정리하였다.

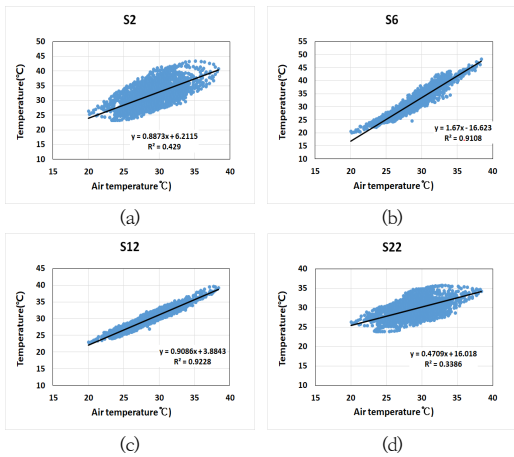


Fig. 4. Temperature distribution and trend line in summer

Table 4. Area of bridge specimen(mm²)

Top slab	Side wall	Bottom slab	Σ
800,000	1,080,000	400,000	2,280,000

각 지점에서 추세선과 표준오차로부터 24℃~38℃에서 구해진 온도와 해당지점의 면적을 Eq. (1)을 사용하여 유효온도를 산정하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였으며, Euro code값을 8행에 같이 정리하였다. 양산지방의 2018년 8월 최고기온이 39.1임을 감안하여, 39

도에서도 추가 분석을 수행하였다. Euro code값은 38℃까지 규정하고 있으며, 38℃에서는 Euro code보다 1.9℃ 높게 산정되며, 35℃까지 1.5~2.0℃ 높게 평가된다. 교량시험체 모형이 실교량과 지간, 거더 개수, 강재 및 콘크리트의 두께 등에서 차이가 있음을 고려할 때, 강성과 규모가 작은 교량시험체 모형이 대기온도 변화에 좀 더 쉽게 변동될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5. Sample of effective temperature in each gauge point (℃)

Air tem.	Top slab		Side wall	Bottom slab	Effective tem..	Euro code
	S2	S6	S12	S22		
39	42.5	49.4	39.8	35.5	39.7	-
38	41.7	47.7	38.9	35.0	38.9	37
37	40.8	46.1	37.9	34.6	38.0	36
36	39.9	44.4	37.0	34.1	37.5	36
35	39.0	42.7	36.1	33.6	36.7	35
34	38.1	41.0	35.2	33.1	35.9	34
33	37.2	39.4	34.3	32.7	35.2	33
32	36.3	37.7	33.4	32.2	34.5	33
31	35.4	36.0	32.5	31.7	33.7	32
30	34.6	34.4	31.6	31.3	33.0	32
29	33.7	32.7	30.7	30.8	32.2	31
28	32.8	31.0	29.8	30.3	31.5	30
27	31.9	29.4	28.9	29.8	30.8	29
26	31.0	27.7	28.0	29.4	30.0	29
25	30.1	26.0	27.0	28.9	29.3	28
24	29.2	24.3	26.1	28.4	28.5	27

4.3 최저 유효온도 산정

최저 유효온도 분석 데이터는 2017년 12월 1일에서 2018년 02월 10일까지 측정된 자료를 분석하였다. 최고 유효온도 산정시와 같이 Fig. 2와 같은 23개의 온도 센서가 사용되었다. 측정기간 중 최저기온을 기록한 1월 27일 오전 7시 34분의 측정값을 Table 3과 같은 지점에서 두께에 따라 Table 6에 정리하였으며, 최 외측으로 갈 수록 온도가 낮아짐을 볼 수 있다. 유효온도 산정은 최고 유효온도와 같이 분석 하였으며, Fig. 4와 같은 S2, S6, S12, S22지점의 겨울철 온도 분포는 Fig. 5에 도시하였다. 최고 유효온도와 유사하게 분포됨을 볼 수 있다.

각 지점의 추세선과 표준오차를 사용하여 -5 ~ -19℃ 대기온도에 대한 유효온도를 산정하면 Table 7과 같으며, Euro code값을 8행에 같이 비교하였다. -5℃~8℃

사이에서는 2℃정도 더 낮게 측정되나, -13℃~-19℃에서는 0.5~1.1℃로 좀 더 근접하여 측정됨을 볼 수 있다.

Table 6. Measured temperature at lowest temperature (℃)

	Temperature					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Top slab	-7.7	-7.9	-8.3	-8.8	-9.0	-9.2
Side wall	S8	S9	S10	S11	S12	
	-4.7	-4.7	-5	-5.6	-6.6	
Bottom slab	S19	S20	S21	S22		
	-6	-5.4	-5.2	-5.4		

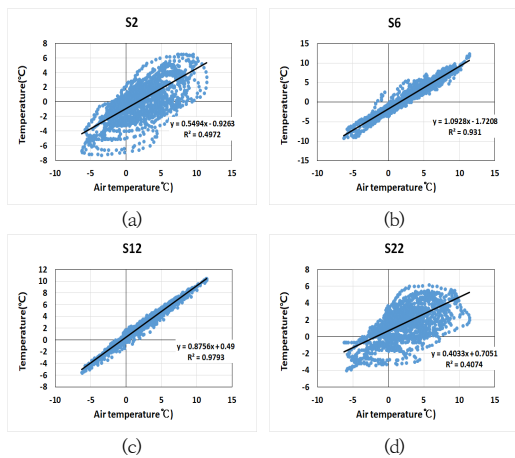


Fig. 5. Temperature distribution and trend line in winter

Table 7. Sample of effective temperature in each gauge point (℃)

Air tem.	Top slab		Side wall	Bottom slab	·	Effective tem.	
	S2	S6	S12	S22		·	Present calculation
-5	-5.7	-8.5	-4.8	-3.3	·	-4.3	-2
-6	-6.2	-7.6	-5.2	-3.8	·	-5.0	-3
-7	-6.8	-8.4	-6.1	-4.2	·	-5.6	-3
-8	-7.3	-9.2	-7.0	-4.6	·	-6.1	-4
-9	-7.9	-9.9	-7.8	-5.0	·	-6.6	-5
-10	-8.5	-10.7	-8.7	-5.4	·	-7.2	-6
-11	-9.0	-11.4	-9.6	-5.9	·	-7.7	-6
-12	-9.6	-12.2	-10.5	-6.3	·	-8.3	-7
-13	-10.1	-12.9	-11.4	-6.7	·	-8.8	-8
-14	-10.7	-13.7	-12.2	-7.1	·	-9.5	-9
-15	-11.2	-14.5	-13.1	-7.5	·	-9.9	-9
-16	-11.8	-15.2	-14.0	-8.0	·	-10.4	-10
-17	-12.3	-16.0	-14.9	-8.4	·	-11.0	-10
-18	-12.9	-16.7	-15.7	-8.8	·	-11.5	-11
-19	-13.4	-17.5	-16.6	-9.2	·	-12.1	-11

4.3 지역별 유효온도 산정

우리나라 각 지역별로 기상관측 데이터를 기반으로 각 지역의 최고, 최저 기온에 대한 교량 형식별 유효온도가 산정된다면, 국내 교량 설계 시 각 지역의 특성을 고려한 설계기준이 확립될 수 있을 것이다. 기상청 자료를 바탕으로 50년빈도의 양산지역 최고, 최저 기온은 Table 8과 같다. 이를 기준으로 본 연구에서 산정된 양산지역의 50년빈도 최고 및 최저 기온을 기준으로, 최고 및 최저 유효온도를 산정하고 국내 설계기준과 비교한다. 양산지역은 부산과 인접하므로 Table 1에서 보통지역으로 구분하여 평가한다. Table 9에서 최고기온인 39°에서는 국내설계기준 보다 4.7℃ 더 높았으며, 36℃~38℃에서 Euro code 보다 1.5~1.9℃ 높았다. Table 10에서 최저기온 -14°를 기준으로 분석하였고, 이 온도에서 설계기준 보다 4.5℃ 더 낮게 분석되며, Euro code 보다 0.5~1.3도 더 낮았다. 현재 설정된 콘크리트 교량에 대한 온도 설계기준은 점점 높아지는 기후변동을 고려하여 온도 범위를 최고기온에서 4.7℃ 높게, 최저기온에서 4.5℃ 더 낮게 설정하는 것이 요망된다.

Table 8. Maximum and minimum temperature in Yangan area.

	Maximum temperature	Minimum temperature
Frequency of 50 years	39.1 °	-14 °

Table 9. Effective temperature at air temperature 36℃~39℃

	This analysis	Euro code	Korean highway bridge design code
39℃	39.7	-	35
38℃	38.9	37	35
37℃	38.0	36	35
36℃	37.5	36	35

Table 10. Effective temperature at air temperature -12℃~-14℃

	This analysis	Euro code	Korean highway bridge design code
-14	-9.5	-9.0	-5
-13	-8.8	-8.0	-5
-12	-8.3	-7.0	-5

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 박스거더 교량시험체에서 온도를 측정하고 유효온도를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최고유효 온도는 38℃에서 Euro code보다 1.9℃ 높게 산정되며, 35℃까지 1.5~2.0℃ 높게 평가되었고, Euro code와 유사한 것으로 평가된다.
2. 최저 유효온도는 -5℃~8℃ 사이에서 2℃정도 더 낮게 측정되고, -13℃~-19℃에서는 0.5~1.1℃로 낮게 근접하여 측정됨을 볼 수 있다.
3. 양산지방의 50년빈도 온도자료를 바탕으로 유효온도를 분석하면, 최고기온 39.1° 일 때, 국내설계기준 보다 4.7℃ 더 높았고, 최저기온 -14° 일 때 4.5℃도 더 낮게 분석되었다.
4. 4장에서 분석된 최고 및 최저 유효온도 결과와 점점 높아지는 기후변동을 고려하여, 현재 설정된 보통지역의 콘크리트 교량에 대한 온도 설계기준은 온도 범위를 최고 유효온도를 4.7℃이상 상승, 최저 유효온도를 4.5℃ 이상 하향 설정하는 것이 필요하다.
5. 본 연구에서 제시한 최고, 최저 유효온도를 포함하여, 각 지역별 Contour map에서 산정한 대기온도별 최고, 최저 유효온도를 산정하면 국내 콘크리트 교량 설계 시 각 지역의 특성을 고려한 설계기준이 확립될 수 있을 것이다.

References

- [1] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (SI Units, 4th Edition), pp.3~104, 2007.
- [2] British Standards Institution, Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2. Specification for loads, appendix E. BS5400: Part2:1978, pp.20~23, 2004.
- [3] Lee, S. H., Shin, H. K., Kim, K. N., Jung, K. S., An Experimental Study for Estimation of effective temperature for design in Steel Box Girder Bridge, Journal of the Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol.28, No.6, pp.449-458, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7781/kioss.2016.28.6.449>
- [4] Lee, S. H., Calculation of Maximum Effective Temperature of Steel Box Girder Bridge Using Artificial Neural Network, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol, 19, No. 3, pp.96-103, 2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.3.96>

- [5] Lee, S. H., Shin, H. K., Kim, K. N., Estimation of the maximum design effective temperature for steel box girder bridges considering asphalt thickness of concrete deck, Journal of the Korean Society of Steel Construction, KSSC, Vol.30, No.5, pp.299-307, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.7781/kioss.2018.30.5.299>
- [6] Lee, S. H., Park, Y. C., A Study on the Vertical Temperature Difference of Steel Box Girder Bridge by Field Measurement, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol, 19, No. 8, pp.545-551, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.8.545>
- [7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Highway Bridge Design Criteria(in Korea)(Limit state design method), 2012.

이 성 행(Seong-Haeng Lee)

[정회원]



- 1983년 2월 : 충북대학교 토목공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 충북대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

강교량, 교량 온도하중, 대형수문 진동실험