우각부 모멘트 분석을 통한 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 최적 개방률 산정

Estimation of Optimal Opening Rate of Rahmen Bridge with Open Wall through Moment Analysis of Corner

박선준* · 김영석** · 김익중*** · 조선희**** · 홍남경***** · 강대흥*****

Park, Sun-Joon*, Kim, Yeongseok**, Kim, Ikjoong***, Cho, Sunhee****, Hong, Namkyung*****, and Kang, Dae-Hung*****

Abstract

The earth pressure acting on the wall of a Rahmen bridge generates significant bending moments at the corners. These moments create problems in the wall in terms of stability and economy. In this study, a Rahmen bridge with an open wall was adopted to solve the problems highlighted above, and its optimal opening rate was estimated. Structural analysis was performed for 36 analytical cases by applying the limit state design method according to lengths of 20 and 15 m for the closed height ratio (h/H) and closed width ratio (b/B) of the wall. Within the scope of this study, in the Rahmen bridge with a 20 m span, it is desirable to design an open wall to satisfy the $0.4 \leq h/H \leq 0.614$ and $0.75 \leq b/B < 1$ conditions when adequate reinforcement is provided at the wall end in contact with the haunch. Additionally, an open wall should be designed for the 15 m span Rahmen bridge to satisfy the conditions of $0.229 \leq h/H \leq 0.586$ and $0.833 \leq b/B < 1$ when suitable reinforcement is provided at the slab end in contact with the haunch. Therefore, the Rahmen bridge with an open wall can be used instead of the conventional Rahmen bridge, considering the economy and on-site applicability factors.

Key words : Rahmen Bridge, Open Wall, Earth Pressure, Optimal Opening Rate, Limit State Design Method

요 지

기존 라멘교의 벽체에 작용하는 토압이 우각부에 큰 휨모멘트를 발생시켜, 벽체의 안정성과 경제성에 문제점을 유발하고 있다. 본 연구에서는 이를 개선한 개방형 벽체를 갖는 라멘교를 제안하고, 제안한 라멘교의 최적 개방률 범위를 산정하였다. 제안한 라멘교의 최적 개방률 범위 산정을 위해 경간장 20 m와 15 m에 대하여 벽체의 높이 폐쇄비(h/H)와 폭 폐쇄비(b/B)에 따라 각각 36개의 해석 CASE를 대상으로 한계상태설계법을 적용한 구조해석을 실시하였고, 우각부에서 높이 폐쇄비(h/H) 및 폭 폐쇄비(b/B)에 따른 부모멘트의 크기와 완전 폐쇄형 벽체에 대한 부모멘트의 크기의 비를 계산하여 최적 개방률을 산정하였다. 본 연구의 제한된 범위 내에서, 경간장 20 m인 라멘교에서는 현지부와 만나는 벽체의 단부에 적절한 보강이 이루어진다면, $0.4 \leq h/H \leq 0.614$ 및 $0.75 \leq b/B < 1$ 을 만족하도록 개방형 벽체를 형성하는 것이 바람직하며, 경간장 15 m인 라멘교에서는 슬래브 단부의 현지부에 접하는 곳에 대한 적절한 보강이 이루어진다면, $0.229 \leq h/H \leq 0.586$ 및 $0.833 \leq b/B < 1$ 을 만족하도록 개방형 벽체를 형성하는 것이 바람직하다. 따라서 개방형 벽체를 갖는 라멘교는 경제성과 현장 적용성을 고려한다면 기존 라멘교를 대체할 수 있을 것으로 판단한다.

핵심용어 : 라멘교, 개방형 벽체, 토압, 최적 개방률, 한계상태설계법

*정회원, 동신대학교 토목환경공학과 교수(E-mail: parksj@dsu.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Dongshin University

**동신대학교 토목환경공학과 석사과정

Master Course, Department of Civil & Environmental Engineering, Dongshin University

***동신대학교 토목환경공학과 공학박사

Ph.D., Department of Civil & Environmental Engineering, Dongshin University

****동신대학교 토목환경공학과 박사과정

Ph.D. Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Dongshin University

*****동신대학교 토목환경공학과 박사과정

Ph.D. Candidate, Department of Civil & Environmental Engineering, Dongshin University

*****교신저자, 정회원, 동신대학교 토목환경공학과 조교수(Tel: +82-61-330-3134, Fax: +82-61-330-3138, E-mail: tycoon@dsu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering at Dongshin University

1. 서 론

교량은 인적 및 물적 자원을 원활하게 교류하도록 도와주는 중요한 구조물이다. 최근 자동차등록 대수와 국내총생산(Gross Domestic Product, GDP)의 꾸준한 증가로 인하여 교통량이 매우 증가하였으며, 신속한 통행을 위하여 교량의 규모는 점점 대형화되고 복잡한 형상을 가지게 되었다. 이로 인하여 교량에 대한 사용성 및 내구성에 대한 요구 조건이 점점 높아지고 있다.

국토교통부의 자료에 따르면 2019년 기준으로 국내 교량 34,297개 중 라멘교가 8,092개(23.6%)로 큰 비중을 차지하고 있다(MOLIT, 2019). 거더교의 경우 신축이음장치와 교량 받침을 갖추어야 하고, 이는 초기 비용을 상승시킨다는 문제점이 있다(Wolde-Tinsae et al., 1988; Dicleli et al., 2003). 또한 하중환경에 의해서 비교적 빨리 노후화되기 때문에 보수·보강 및 유지관리상의 문제점으로 인해 실질적인 손실은 막대하다(Ra and Lee, 2012). 그러나 라멘교는 신축이음장치 및 교량 받침이 필요 없어 경제성이 높고, 사용성과 유지관리에 매우 효과적이다. 그러나 라멘교는 경간이 커짐에 따라 슬래브 단부 및 중앙부의 휨모멘트는 증가하고, 경간장 20 m 이상일 때에는 소요 철근량이 증가하여 시공성이 떨어진대(Choi, 2015). 이러한 문제점을 해결하기 위하여 라멘교의 장경간화를 위한 연구를 진행하였다.

Cheon et al. (2010)은 장경간을 적용한 RC 라멘교는 효율적으로 상부하중을 지지하는데 어려움이 존재하여, 상부 보를 벽체 상단에 설치된 연결강형에 단순 가설방식으로 맞물리도록 하고 하부구조인 벽체하단을 기초와 분리하여 제작하여 벽체 하단에 휨모멘트가 발생하지 않은 상태에서 상부 보를 하부구조와 콘크리트로 일체화시키도록 하여 기초 및 벽체의 크기를 최소화할 수 있는 구조를 제안하였다. Lee (2011)는 RC 라멘교와 PSC Beam교의 시공성을 개선하기 위하여 경제성을 가진 Inverted-T형 거더를 이용한 합성 라멘교를 개발하였다. Shin (2011)은 고강도 콘크리트를 적용한 라멘교와 보통강도 콘크리트를 적용시킨 라멘교를 비교하였다. 고강도 콘크리트를 사용한 경우 20% 정도의 단면감소 효과가 있으며, 콘크리트량은 5~12% 정도 감소하는 것으로 나타났으며, 경제적인 측면에서 경간장이 19 m 이상의 RC라멘교의 경우 고강도 콘크리트를 사용한 라멘교가 경제적임을 확인하였다. Ahn (2013)은 플레이트 거더의 단부와 RC벽체를 PS강봉에 긴장력을 도입하여 일체화함으로써 기존 플레이트 거더교의 구조적 효율을 높이고 접합부 공정이 복잡한 기존 합성형 라멘교의 시공상 한계를 개선하기 위한 새로운 교량 형식인 Prestressed Integral Composite (PIC) 거더교를 개발하였다. Joung (2012)는 합성 거더교의 장점과 받침장치 및 신축이음장치가 필요없는 장점을 가진 수직 긴장 합성 라멘교를 개발하였다. Choi et al. (2015)은 교대벽체와 기초 사이에 힌지 구조를 적용하

여 기초의 휨모멘트를 감소시킨 신형식 강합성 라멘교를 제안하였다. Lee (2016)는 효율적인 휨모멘트의 재분배를 위하여 라멘교의 구조적 특성을 반영하고 긴장장치를 이용한 프리스트레스를 도입한 장경간 강합성 라멘교를 제안하였다. 또한 하전을 횡단하는 대표적인 경간장 25 m, 30 m, 35 m를 선정하여 시공방법에 따른 지점 경계조건을 적용하였다. Choi and Jang (2017)은 기존 거더형식이 가지는 신축이음부 파손으로 인한 유지관리 비용 증가 및 휨모멘트의 재분배가 불리한 구조라는 문제점을 개선하기 위하여 상부 바닥판과 접속슬래브가 일체식이면서 상부구조와 격벽거더 및 교각을 강결한 무조인트 무교대의 고차부정정 일체식 구조계를 제안하였다. Lee and Lee (2017)는 기둥-슬래브 접합부의 두께(h)와 기둥 단면 치수(c)를 변수로 구분하고 기둥의 콘크리트 압축강도(f_{cc}')와 슬래브의 콘크리트 압축강도(f_{cs}')에 따른 기둥과 슬래브의 콘크리트 강도비(f_{cc}'/f_{cs}')를 변수로 설정하여 유한요소해석을 수행한 후, 기둥-슬래브 접합구조의 형상비가 구조물에 어떠한 영향을 미치는지 분석하였다.

그러나 이러한 연구들은 라멘교에 가장 큰 영향을 주는 토압에 큰 비중을 두지 않았다. 현재 가장 많이 사용하는 Fig. 1에 보이는 폐쇄형 벽체를 갖는 라멘교는 토압에 대한 지지를 벽체가 하여야 하며, 성토에 따른 연약지반의 측방 유동이 우려되므로, 경량의 성토재가 필요하다. 또한, 토압이 증가하면 벽체의 두께가 늘어나고 벽체의 콘크리트량 및 철근의 사용이 증가하여 공사비가 상승하는 등의 문제점이 발생하고 있다.

Fig. 1. Rahmen Bridges with a Closed Wall (Sunroad Blog, 2017)

따라서 본 연구에서는 토압에 따른 구조적 문제점을 보완하고 경제성을 향상하기 위하여 벽체에 작용하는 토압을 배제하거나 최소화시킨 개방형 벽체를 갖는 라멘교(Rahmen with an Open Wall Structure, ROWS)를 제안하고, 제안한 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 구조적 성능을 평가하기 위하여 완전 폐쇄형 벽체를 갖는 라멘교(Rahmen with a Closed Wall Structure, RCWS)와 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 우각부에서의 휨모멘트 값을 비교·분석하였다. 그리고 개

방형 벽체를 갖는 라멘교의 높이 폐쇄비와 폭 폐쇄비에 따른 벽체의 최적 개방률을 산정하였다.

2. 개방형 벽체를 갖는 라멘교

2.1 개요

개방형 벽체를 갖는 라멘교는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 완전 폐쇄형 벽체와 달리 벽체의 중앙 등에 개방부를 형성하여 벽체에 작용하는 주동토압 등의 토압작용을 배제 또는 최소화시킬 수 있도록 하였다.

Fig. 2. A Rahmen Bridge with an Open Wall

2.2 주요 특징

개방형 벽체를 갖는 라멘교는 공장제작한 거더를 벽체에 거치 후 즉시 타설이 가능하여 공기를 단축할 수 있고 벽체에 작용하는 토압 하중을 최소화할 수 있어, 콘크리트와 철근 사용량을 최소화하여 공사비를 절감할 수 있는 장점을 갖고 있다. 또한, 우각부 헌치가 상부 형고내에 설치 가능하며 극저형고 구현이 가능하고 하천 적용시 전체적인 범면유지로 인해 유속의 흐름에 효율적으로 대응할 수 있어 우각부 헌치로 인하여 형고가 부족하거나 하천 유속이 빨라 범면유지가 어려운 경우에 적합하다. 그리고 개방형 벽체이므로 별도의 하천제방 호안 블록이 불필요하여 시공성에 문제점을 가지고 있는 기존의 라멘교를 개선한 경제적이고 안정적인 구조물이다.

Fig. 3. Longitudinal Section of ROWS (unit: mm)

3. 구조해석

벽체를 갖는 라멘교의 상부구조가 강철로 연결되는 Fig. 3의 ① 헌치부와 만나는 슬래브 단부, ② 헌치 중앙부, ③ 헌치부와 만나는 벽체의 단부 위치에서 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 높이 폐쇄비와 폭 폐쇄비에 따라 발생하는 휨모멘트와 완전 폐쇄형 벽체를 갖는 라멘교에서 발생하는 휨모멘트를 비교하여 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 구조성능을 평가하였다.

3.1 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 제원 선정

라멘교는 경간이 커짐에 따라 슬래브 단부와 중앙부의 휨모멘트의 증가율이 높아지며, 경간장 20 m 이상의 경우에는 많은 필요 철근량이 소요되어 시공성이 떨어진다. 그리고 현재 슬래브 바닥판 구조의 라멘교는 경간장 15 m 이하에 가장 많이 적용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 라멘교에서 수용할 수 있는 최대 경간장인 20 m 및 가장 보편화된 경간장인 15 m를 연구 대상으로 하였다. 라멘교의 벽체 높이는 시공환경에 따라 많은 차이를 보이고 있으나, 벽체에 미치는 토압의 영향을 효율적으로 파악하기 위하여 라멘교의 총 높이를 7.0 m로 설정하였다. 또한, 왕복 2차로의 총 폭 10.0 m인 소규모 교량을 연구대상으로 설정하였으나, 유효폭 산정 값에 따라 최대 3차로까지 고려해야 하는 도로교 설계기준(MLTM, 2010; MOLIT, 2016)을 충족시키기 위하여 표준트럭 하중 3대가 동시에 재하할 수 있도록 하였다.

마지막으로 주철근이 차량 진행 방향에 평행한 교량 슬래브의 최소 두께(h_s)는 단순 경간일 경우 Eq. (1)을 만족하여야 하므로, 경간장이 20 m인 경우는 0.92 m 이상이어야 하며, 경간장이 15 m인 경우는 0.72 m 이상으로 하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 경간장이 20 m일 때 슬래브의 두께를 1 m로 하였으며, 경간장이 15 m일 때 슬래브의 두께를 0.8 m로 선정하였다.

$$h_s = \frac{1.2(S+3)}{30} \quad (1)$$

여기서, S : 슬래브 경간장

따라서 구조해석을 위한 벽체를 갖는 라멘교의 종단면도는 Fig. 3에서 보이는 바와 같으며, 개방형 벽체는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4. An Open Wall Structure in ROWS (unit: mm)

3.2 구조해석 프로그램

본 연구를 위해 사용한 구조해석 프로그램은 Midas Civil 2019, LSD+를 사용하였고, 구조해석을 위한 주요 사항은 Plate 요소를 적용한 3차원 해석을 하고, 해석 변수를 단순화 하기 위해 경계조건은 고정지점으로 도입하였으며 라멘 구조물의 기둥과 보의 절점부에 있는 현치를 고려하여 도로 교 설계기준에 따라 강역을 설정하였다. 또한, 활하중해석을 위하여 Traffic Surface Lanes를 적용하였다. 그리고 구조해석에 적용한 하중은 고정하중, 활하중, 토압, 온도하중, 건조 수축 및 지점침하이다. 여기서 고정하중은 구체자중, 아스팔트 포장 및 방호벽 중량을 적용하였고, 활하중은 한계상태설계법에서 사용하는 KL-510을 적용하였다.

3.3 모델링

구조해석을 위한 총 CASE의 수는 72개이며, 완전 폐쇄형 벽체를 갖는 라멘교를 기준으로 절점 수는 328개이고, Plate 수는 280개이다. Table 1은 경간장(L) 20 m인 라멘교에 대한 폐쇄 유효폭(b)과 폐쇄 유효높이(h)를 나타낸 것이며, Table 2는 경간장(L) 15 m인 라멘교에 대한 폐쇄 유효폭(b)과 폐쇄 유효높이(h)를 나타낸 것이다. 그리고 Table 1과 Table 2에 나타낸 각각의 CASE를 Midas Civil 프로그램 내에서 모델링 하여 구조해석을 수행하였다. 각각의 CASE에 대한 명칭은 Fig. 5와 같이 표기하였다. 여기서 C-20-10.2-7과 C-15-10.2-7은 완전 폐쇄형 벽체를 갖는 라멘교에 대한 것이다. 또한 Fig. 6(a)는 완전 폐쇄형 벽체를 모델링한 것을 나타내고, Fig. 6(b)는 개방형 벽체를 모델링한 것을 나타낸다.

Table 1. Structural Analysis Cases with 20 m Span

CASE	L (mm)	b (mm)	h (mm)
C-20-10.2-7	20,000	10,200	7,000
C-20-4.8-1.3	20,000	4,800	1,300
C-20-4.8-1.8	20,000	4,800	1,800
C-20-4.8-2.3	20,000	4,800	2,300
C-20-4.8-2.8	20,000	4,800	2,800
C-20-4.8-3.3	20,000	4,800	3,300
C-20-4.8-3.8	20,000	4,800	3,800
C-20-4.8-4.3	20,000	4,800	4,300
C-20-5.4-1.3	20,000	5,400	1,300
C-20-5.4-1.8	20,000	5,400	1,800
C-20-5.4-2.3	20,000	5,400	2,300
C-20-5.4-2.8	20,000	5,400	2,800
C-20-5.4-3.3	20,000	5,400	3,300
C-20-5.4-3.8	20,000	5,400	3,800
C-20-5.4-4.3	20,000	5,400	4,300
C-20-6.0-1.3	20,000	6,000	1,300
C-20-6.0-1.8	20,000	6,000	1,800
C-20-6.0-2.3	20,000	6,000	2,300
C-20-6.0-2.8	20,000	6,000	2,800
C-20-6.0-3.3	20,000	6,000	3,300
C-20-6.0-3.8	20,000	6,000	3,800
C-20-6.0-4.3	20,000	6,000	4,300
C-20-6.6-1.3	20,000	6,600	1,300
C-20-6.6-1.8	20,000	6,600	1,800
C-20-6.6-2.3	20,000	6,600	2,300
C-20-6.6-2.8	20,000	6,600	2,800
C-20-6.6-3.3	20,000	6,600	3,300
C-20-6.6-3.8	20,000	6,600	3,800
C-20-6.6-4.3	20,000	6,600	4,300
C-20-7.2-1.3	20,000	7,200	1,300
C-20-7.2-1.8	20,000	7,200	1,800
C-20-7.2-2.3	20,000	7,200	2,300
C-20-7.2-2.8	20,000	7,200	2,800
C-20-7.2-3.3	20,000	7,200	3,300
C-20-7.2-3.8	20,000	7,200	3,800
C-20-7.2-4.3	20,000	7,200	4,300

Table 2. Structural Analysis Cases with 15 m Span

CASE	L (mm)	b (mm)	h (mm)
C-15-10.2-7	15,000	10,200	7,000

Table 2. (Continued)

CASE	L (mm)	b (mm)	h (mm)
C-15-4.8-1.1	15,000	4,800	1,100
C-15-4.8-1.6	15,000	4,800	1,600
C-15-4.8-2.1	15,000	4,800	2,100
C-15-4.8-2.6	15,000	4,800	2,600
C-15-4.8-3.1	15,000	4,800	3,100
C-15-4.8-3.6	15,000	4,800	3,600
C-15-4.8-4.1	15,000	4,800	4,100
C-15-5.4-1.1	15,000	5,400	1,100
C-15-5.4-1.6	15,000	5,400	1,600
C-15-5.4-2.1	15,000	5,400	2,100
C-15-5.4-2.6	15,000	5,400	2,600
C-15-5.4-3.1	15,000	5,400	3,100
C-15-5.4-3.6	15,000	5,400	3,600
C-15-5.4-4.1	15,000	5,400	4,100
C-15-6.0-1.1	15,000	6,000	1,100
C-15-6.0-1.6	15,000	6,000	1,600
C-15-6.0-2.1	15,000	6,000	2,100
C-15-6.0-2.6	15,000	6,000	2,600
C-15-6.0-3.1	15,000	6,000	3,100
C-15-6.0-3.6	15,000	6,000	3,600
C-15-6.0-4.1	15,000	6,000	4,100
C-15-6.6-1.1	15,000	6,600	1,100
C-15-6.6-1.6	15,000	6,600	1,600
C-15-6.6-2.1	15,000	6,600	2,100
C-15-6.6-2.6	15,000	6,600	2,600
C-15-6.6-3.1	15,000	6,600	3,100
C-15-6.6-3.6	15,000	6,600	3,600
C-15-6.6-4.1	15,000	6,600	4,100
C-15-7.2-1.1	15,000	7,200	1,100
C-15-7.2-1.6	15,000	7,200	1,600
C-15-7.2-2.1	15,000	7,200	2,100
C-15-7.2-2.6	15,000	7,200	2,600
C-15-7.2-3.1	15,000	7,200	3,100
C-15-7.2-3.6	15,000	7,200	3,600
C-15-7.2-4.1	15,000	7,200	4,100

C	-	20	-	4.8	-	2.3
↓		↓		↓		↓
CASE	-	Span	-	Closed	-	Closed
		Length		Width		Height
		(L, m)		(b, m)		(h, m)

Fig. 5. Notation Example of Cases

(a) Rahmen Bridges with a Closed Wall

(b) Rahmen Bridge with an Open Wall

Fig. 6. Modeling of a Rahmen Bridge with a Closed Wall and with an Open Wall

3.4 재료 특성

구조해석에 사용한 콘크리트 재료 특성은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Material Properties of Concrete

Elastic Modulus (E_c)	2.7×10^4 MPa
Poisson's Ratio (ν)	0.18
Unit Weight (γ_c)	24.5 kN/m ³

3.5 하중 조건

고정하중은 구체 자중에 대해서 Midas Civil 프로그램 내에서 자동으로 고려하도록 하였으며, 기타 고정하중인 아스팔트 포장 및 방호벽 중량은 2.58 kN/m^2 를 재하하였다. 활하중은 Midas Civil 프로그램 내에서 지원하는 Traffic Surface Lanes 옵션을 사용하여 한계상태설계법의 차량활하중(KL-510)을 최대 3차로 동시 주행하는 것으로 재하하였다. 토압은 단위중량은 $\gamma = 20.0 \text{ kN/m}^3$, 내부마찰각은 $\phi = 30^\circ$, 토압계수 $K = 1 - \sin\phi = 0.5$ 인 재료 특성을 갖는 모래이며, 상재 하중은 10 kN/m^2 가 작용하고 있다고 가정하여 Table 4에 보이는 것과 같이 계산하여 재하하였다.

Table 4. Calculation of Soil Pressure

Force	Calculation process	Result value
q1	$(10.00 + 0.08 \times 23.00 + 0.75 \times 20.00) \times 0.5$	13.420 kN/m^2
q2	$13.42 + 20.00 \times 6.5 \times 0.5$	78.420 kN/m^2

도로교 설계기준(MOLIT, 2016)에 근거하여 온도변화는 $\Delta t = \pm 10.0^\circ\text{C}$ 로, 바닥판 상·하연 온도차는 $t_0 = \pm 5.0^\circ\text{C}$ 로 설정하여 온도하중을 재하하였다. 지점침하하는 도로교 설계기준(MOLIT, 2016) 2.1.15에 따라 콘크리트교에서는 탄성 설계력의 50%를 적용한다. 따라서 지점침하를 10 mm로 설정하여 벽체 하단의 고정지점에 재하하였다. 선팽창계수(α)는 0.00001, 콘크리트 건조수축 변형률(ε)은 -0.00015이므로 건조수축은 Eq. 2에 보이는 것과 같이 계산되므로, 건조수축에 대한 영향을 -15°C 의 온도 하중으로 변환하여 재하하였다.

$$\Delta T = \frac{-0.00015}{0.00001} = -15^\circ\text{C} \quad (2)$$

4. 구조해석 결과 및 고찰

경간장 20 m 및 15 m인 라멘교에서의 구조해석을 통하여 Midas Civil LSD+에서 제공하는 조합 하중에 대한 옵션을 사용하여 ① 현치부와 만나는 슬래브 단부, ② 현치 중앙부, ③ 현치부와 만나는 벽체의 단부에서의 최대 부모멘트 값을 각각 정리하였다. 위치에 따른 부모멘트의 명칭은 Table 5에 보이는 바와 같다.

Table 5. Notation of Negative Moment According to Location

Loc.	Definition	Notation
①	Negative moment for completely closed wall	M_{ob}
	Negative moment about the open wall in accordance with the height or width of opening	M_b
②	Negative moment for completely closed wall	M_{oh}
	Negative moment about the open wall in accordance with the height or width of opening	M_h
③	Negative moment for completely closed wall	M_{ow}
	Negative moment about the open wall in accordance with the height or width of opening	M_w

4.1 경간장 20 m의 개방형 벽체를 갖는 라멘교

4.1.1 현치부와 만나는 슬래브 단부

Table 6은 경간장 20 m인 라멘교에 대하여 Fig. 3(a)의 현치부와 만나는 슬래브 단부에서의 개방형 벽체의 폐쇄 높이(h) 및 폐쇄 폭(b)에 따른 부모멘트 값을 나타낸 것이며,

Table 7은 높이 폐쇄비(h/H) 및 폭 폐쇄비(b/B)에 따른 부모멘트의 크기를 완전 폐쇄형 벽체에 대한 부모멘트의 크기로 나눈 값을 나타낸 것이다.

Table 6. Magnitude of Negative Moment (unit: kN·m)

Closed Height	Closed Width				
	7.2 m	6.6 m	6 m	5.4 m	4.8 m
7.0 m	1,184.9	1,184.9	1,184.9	1,184.9	1,184.9
4.3 m	1,176.6	1,178.3	1,180.6	1,183.8	1,188
3.8 m	1,178.2	1,180.1	1,182.6	1,185.8	1,190
3.3 m	1,180.5	1,182.6	1,185.2	1,188.5	1,171.9
2.8 m	1,184	1,186.4	1,189.2	1,192.5	1,196.3
2.3 m	1,189.8	1,192.9	1,196.3	1,200	1,203.7
1.8 m	1,201.2	1,206.2	1,212	1,217.4	1,222.5

Table 7. The Ratio of Negative Moment

Height Ratio	Width Ratio				
	1.000	0.917	0.833	0.750	0.667
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.614	0.993	0.994	0.996	0.999	1.003
0.543	0.994	0.996	0.998	1.001	1.004
0.471	0.996	0.998	1.000	1.003	1.007
0.400	0.999	1.001	1.004	1.006	1.010
0.329	1.004	1.007	1.010	1.013	1.016
0.257	1.014	1.018	1.023	1.027	1.032

Table 7과 Fig. 7(a)의 고정된 폐쇄 폭(b)에 대한 변화되는 높이 폐쇄비(h/H)를 살펴보았을 때, 개방형 벽체에 대한 높이 폐쇄비가 $0.4 \leq h/H \leq 0.614$ 일 때 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 작은 부모멘트를 가질 수 있는 것으로 나타났으며, Table 7과 Fig. 7(b)의 고정된 폐쇄 높이(h)에 대한 변화되는 폭 폐쇄비(b/B)를 살펴보았을 때, 개방형 벽체에 대한 폭 폐쇄비가 $0.75 \leq b/B \leq 1$ 일 때 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 작은 부모멘트를 가질 수 있는 것으로 나타났다.

4.1.2 현치 중앙부

Table 8은 경간장 20 m인 라멘교에 대하여 Fig. 3(a)의 현치 중앙부에서의 개방형 벽체의 폐쇄 높이(h) 및 폐쇄 폭(b)에 따른 부모멘트 값을 나타낸 것이며, Table 9는 높이 폐쇄비(h/H) 및 폭 폐쇄비(b/B)에 따른 부모멘트의 크기를 완전 폐쇄형 벽체에 대한 부모멘트의 크기로 나눈 값을 나타낸 것이다.

(a) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed width and a varying closed height in the open wall

(b) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed height and a varying closed width in the open wall

Fig. 7. The Ratio of Negative Moment at the Slab End in Contact with the Haunch

Table 8. Magnitude of Negative Moment (unit: kN·m)

Closed Height	Closed width				
	7.2 m	6.6 m	6 m	5.4 m	4.8 m
7.0 m	1,561	1,561	1,561	1,561	1,561
4.3 m	1,544.8	1,547.2	1,570.3	1,598.2	1,629.4
3.8 m	1,537.3	1,543	1,566.9	1,594	1,624.1
3.3 m	1,526.3	1,539.7	1,563	1,589.2	1,596.2
2.8 m	1,515.5	1,536.1	1,574.4	1,585	1,613.1
2.3 m	1,512.7	1,535.4	1,560.6	1,588.4	1,618.2
1.8 m	1,519.6	1,553.2	1,585.8	1,625.1	1,668.7

Table 9. The Ratio of Negative Moment

Height Ratio	Width Ratio				
	1.000	0.917	0.833	0.750	0.667
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.614	0.990	0.991	1.006	1.024	1.044
0.543	0.985	0.988	1.004	1.021	1.040
0.471	0.978	0.986	1.001	1.018	1.023
0.400	0.971	0.984	1.009	1.015	1.033
0.329	0.969	0.984	1.000	1.018	1.037
0.257	0.973	0.995	1.016	1.041	1.069

Table 9와 Fig. 8(a)의 고정된 폐쇄 폭(b)에 대한 변화되는 높이 폐쇄비(h/H)를 살펴보았을 때, 개방형 벽체에 대한 높이 폐쇄비가 $0.257 \leq h/H \leq 0.614$ 일 때 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 작은 부모멘트를 가질 수 있는 것으로 나타났으며, Table 9와 Fig. 8(b)의 고정된 폐쇄 높이(h)에 대한 변화되는 폭 폐쇄비(b/B)를 살펴보았을 때, 개방형 벽체에 대한 폭 폐쇄비가 $0.971 \leq b/B \leq 1$ 일 때 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 작은 부모멘트를 가질 수 있는 것으로 나타났다.

4.1.3 현치부와 만나는 벽체의 단부

Table 10은 경간장 20 m인 라멘교에 대하여 Fig. 3(a)의 현치부와 만나는 벽체의 단부에서의 개방형 벽체의 폐쇄 높이(h) 및 폐쇄 폭(b)에 따른 부모멘트 값을 나타낸 것이며, Table 11은 높이 폐쇄비(h/H) 및 폭 폐쇄비(b/B)에 따른 부모멘트의 크기를 완전 폐쇄형 벽체에 대한 부모멘트의 크기로 나눈 값을 나타낸 것이다.

(a) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed width and a varying closed height in the open wall

(b) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed height and a varying closed width in the open wall

Fig. 8. The Ratio of Negative Moment at Central Haunch

Table 10. Magnitude of Negative Moment (unit: kN·m)

Closed Height	Closed Width				
	7.2 m	6.6 m	6 m	5.4 m	4.8 m
7.0 m	1,302.3	1,302.3	1,302.3	1,302.3	1,302.3
4.3 m	1,399	1,414.5	1,430.2	1,445.3	1,458.3
3.8 m	1,395	1,409.8	1,424.7	1,438.8	1,450.7
3.3 m	1,391.1	1,405.7	1,420.1	1,433.4	1,424.4
2.8 m	1,388.9	1,404.6	1,409.8	1,434.4	1,445.8
2.3 m	1,395.2	1,416.9	1,439.2	1,461.5	1,482.8
1.8 m	1,434.3	1,480.7	1,527.1	1,583.2	1,647.6

Table 11. Ratio of Negative Moment

Height Ratio	Width Ratio				
	1.000	0.917	0.833	0.750	0.667
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.614	1.074	1.086	1.098	1.110	1.120
0.543	1.071	1.083	1.094	1.105	1.114
0.471	1.068	1.079	1.090	1.101	1.094
0.400	1.066	1.079	1.083	1.101	1.110
0.329	1.071	1.088	1.105	1.122	1.139
0.257	1.101	1.137	1.173	1.216	1.265

Table 11과 Fig. 9(a)의 고정 폐쇄 폭(b)에 대한 변화되는 높이폐쇄비(h/H) 및 Table 11과 Fig. 9(b)의 고정된 폐쇄 높이(h)에 대한 변화되는 폭 폐쇄비(b/B)를 살펴보았을 때, 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 벽체를 개방하였을 때 최소 6.6%부터 최대 26.5%까지 부모멘트가 더 커짐을 확인할 수 있었다.

따라서 벽체 상부의 현치부와 접하는 곳은 완전 폐쇄형 벽체일 때보다 개방형 벽체일 때 추가적인 보강을 해야 할 것으로 보인다.

(a) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed width and a varying closed height in the open wall

4.2 경간장 15 m의 개방형 벽체를 갖는 라멘교

4.2.1 현치부와 만나는 슬래브 단부

Table 12는 경간장 15 m인 라멘교에 대하여 Fig. 3(b)의 현치부와 만나는 슬래브 단부에서의 개방형 벽체의 폐쇄 높이(h) 및 폐쇄 폭(b)에 따른 부모멘트 값을 나타낸 것이며, Table 13은 높이 폐쇄비(h/H) 및 폭 폐쇄비(b/B)에 부모멘트의 크기를 완전 폐쇄형 벽체에 대한 부모멘트의 크기로 나눈 값을 나타낸 것이다.

Table 12. Magnitude of Negative Moment (unit: kN·m)

Closed Height	Closed Width				
	7.2 m	6.6 m	6 m	5.4 m	4.8 m
7.0 m	596.1	596.1	596.1	596.1	596.1
4.1 m	597.2	597.4	598.3	599.6	601.7
3.6 m	597.8	598.1	599	600.4	602.4
3.1 m	598.7	599.1	600.1	601.4	603.5
2.6 m	600	600.5	601.5	603	605.1
2.1 m	602.1	603	604.3	606	608.3
1.6 m	606.6	609.2	610.8	613.6	617

Table 13. The Ratio of Negative Moment

Height Ratio	Width Ratio				
	1.000	0.917	0.833	0.750	0.667
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.586	1.002	1.002	1.004	1.006	1.009
0.514	1.003	1.003	1.005	1.007	1.011
0.443	1.004	1.005	1.007	1.009	1.012
0.371	1.007	1.007	1.009	1.012	1.015
0.300	1.010	1.012	1.014	1.017	1.020
0.229	1.018	1.022	1.025	1.029	1.035

(b) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed height and a varying closed width in the open wall

Fig. 9. The Ratio of Negative Moment at the Wall End in Contact with the Haunch

(a) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed width and a varying closed height in the open wall

(b) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed height and a varying closed width in the open wall

Fig. 10. The Ratio of Negative Moment at the Slab End in Contact with the Haunch

Table 13과 Fig. 10(a)의 고정된 폐쇄 폭(b)에 대한 변화되는 높이 폐쇄비(h/H) 및 Table 13과 Fig. 10(b)의 고정된 폐쇄 높이(h)에 대한 변화되는 폭 폐쇄비(b/B) 살펴보면, 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 벽체를 개방하였을 때 최소 0.2%에서 최대 3.5%까지 부모멘트가 더 커짐을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 경간장이 짧아지고, 벽체의 개방으로 인한 벽체의 강성 저하로 인하여 발생하는 것으로 보인다. 그러므로 벽체의 개방으로 인한 벽체에 작용하는 토압이 작아진다고 하더라도, 상부하중에 대한 벽체가 지지할 강성이 작아진다면 벽체의 개방에 대한 이점을 가질 수 없는 것으로 보인다. 따라서 현치부와 만나는 벽체부에는 완전 폐쇄형 벽체일 때보다 개방형 벽체일 때 추가적인 보강을 해야 할 것으로 보인다.

4.2.2 현치 중앙부

Table 14는 경간장 15 m인 라멘교에 대하여 Fig. 3(b)의 현치 중앙부에서의 개방형 벽체의 폐쇄 높이(h) 및 폐쇄 폭(b)에 따른 부모멘트 값을 나타낸 것이며, Table 15는 높이 폐쇄비(h/H) 및 폭 폐쇄비(b/B)에 따른 부모멘트의 크기를 완전 폐쇄형 벽체에 대한 부모멘트의 크기로 나눈 값을 나타낸 것이다.

Table 14. Magnitude of Negative Moment (unit: kN·m)

Closed Height	Closed Width				
	7.2 m	6.6 m	6 m	5.4 m	4.8 m
7.0 m	1,150.1	1,150.1	1,150.1	1,150.1	1,150.1
4.1 m	1,127.6	1,127.6	1,123.5	1,114.7	1,100.1
3.6 m	1,114.9	1,114.3	1,109.7	1,100.6	1,086.1
3.1 m	1,098.9	1,097.6	1,092.7	1,083.6	1,069.3
2.6 m	1,076.7	1,074.5	1,067.3	1,060.1	1,046.4
2.1 m	1,040.7	1,036.7	1,030.2	1,020.7	1,007.6
1.6 m	972.2	963.9	953.9	947.9	943.1

Table 15. The Ratio of Negative Moment

Height Ratio	Width Ratio				
	1.000	0.917	0.833	0.750	0.667
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.586	0.980	0.980	0.977	0.969	0.957
0.514	0.969	0.969	0.965	0.957	0.944
0.443	0.955	0.954	0.950	0.942	0.930
0.371	0.936	0.934	0.928	0.922	0.910
0.300	0.905	0.901	0.896	0.887	0.876
0.229	0.845	0.838	0.829	0.824	0.820

Table 15와 Fig. 11(a)의 고정된 폐쇄 폭(b)에 대한 변화되는 높이 폐쇄비(h/H)를 살펴보면, 개방형 벽체에 대한 높이 폐쇄비가 $h/H \leq 0.586$ 일 때 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 작은 부모멘트를 가질 수 있는 것으로 나타났으며, Table 15와 Fig. 11(b)의 고정된 폐쇄 높이(h)에 대한 변화되는 폭 폐쇄비(b/B)를 살펴보면, 개방형 벽체에 대한 폭 폐쇄비가 $b/B < 1$ 일 때 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 작은 부모멘트를 가질 수 있는 것으로 나타났다.

4.2.3 현치부와 만나는 벽체의 단부

Table 16은 경간장 15 m인 라멘교에 대하여 Fig. 3(b)의 현치부와 만나는 벽체의 단부에서의 개방형 벽체의 폐쇄 높이(h) 및 폐쇄 폭(b)에 따른 부모멘트 값을 나타낸 것이며, Table 17은 높이 폐쇄비(h/H) 및 폭 폐쇄비(b/B)에 부모멘트의 크기를 완전 폐쇄형 벽체에 대한 부모멘트의 크기로 나눈 값을 나타낸 것이다.

Table 17과 Fig. 12(a)의 고정 폐쇄 폭(b)에 대한 변화되는 높이 폐쇄비(h/H)를 살펴보면, 개방형 벽체에 대한 높이 폐쇄비가 $0.229 \leq h/H \leq 0.586$ 일 때 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 작은 부모멘트를 가질 수 있는 것으로 나타났으며, Table 17과 Fig. 12(b)의 고정된 폐쇄 높이(H)에

(a) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed width and a varying closed height in the open wall

(b) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed height and a varying closed width in the open wall

Fig. 11. The Ratio of Negative Moment at Central Haunch

Table 16. Magnitude of Negative Moment (unit: kN·m)

Closed Height	Closed Width				
	7.2 m	6.6 m	6 m	5.4 m	4.8 m
7.0 m	910	910	910	910	910
4.1 m	882.5	900.2	919.2	938.6	957.3
3.6 m	876.4	893.6	911.9	930.5	948.4
3.1 m	868.7	885.3	902.8	920.7	937.7
2.6 m	858.5	874.8	891.8	909.6	926.3
2.1 m	846.9	864.4	883.2	902.7	921.5
1.6 m	842.7	866.5	893.2	911.8	930.0

Table 17. The Ratio of Negative Moment

Height Ratio	Width Ratio				
	1.000	0.917	0.833	0.750	0.667
1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.586	0.970	0.989	1.010	1.031	1.052
0.514	0.963	0.982	1.002	1.023	1.042
0.443	0.955	0.973	0.992	1.012	1.030
0.371	0.943	0.961	0.980	1.000	1.018
0.300	0.931	0.950	0.971	0.992	1.013
0.229	0.926	0.952	0.982	1.002	1.022

(a) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed width and a varying closed height in the open wall

(b) The ratio of the negative moment of a fully closed wall to the negative moment of a fixed closed height and a varying closed width in the open wall

Fig. 12. The Ratio of Negative Moment at the Wall End in Contact with the Haunch

대한 변화되는 폭 폐쇄비(b/B)를 살펴보았을 때, 개방형 벽체에 대한 폭 폐쇄비가 $0.833 \leq b/B < 1$ 일 때 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 작은 부모멘트를 가질 수 있는 것으로 나타났다.

4.3 라멘교의 슬래브 중앙부 정모멘트

토압이 작용하였을 때, 벽체의 개방 유무에 따른 경간장

15 m 및 20 m를 갖는 라멘교의 슬래브 중앙부에서의 정모멘트는 유의미한 결과를 산출할 정도의 값 차이를 보이지 않았으며, 토압에 의한 정모멘트는 크지 않았다. 이는 벽체에 작용하는 토압이 수평 방향으로 작용하기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 벽체 배면의 토압의 영향으로 인해 벽체의 콘크리트량과 철근량 사용이 증가하여 공사비가 상승하고, 휨모멘트 증가로 장경간화를 하는데 한계가 있는 기존 라멘교의 문제점을 개선하기 위해 개방형 벽체를 갖는 라멘교를 제안하였다. 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 구조적 성능을 평가하기 위해 구조해석에 선정한 제원은 경간장의 경우 라멘교에서 수용할 수 있는 최대 경간장인 20 m 및 가장 보편화된 경간장인 15 m를 대상으로 하고, 토압의 영향을 효율적으로 파악하기 위해 총 높이는 7.0 m로 선정하였으며 유효폭은 최대 3차로까지 고려하고 교량 슬래브의 두께는 경간장 20 m의 경우는 1 m, 경간장 15 m의 경우는 0.8 m로 선정하였다. 유한요소해석을 통하여 완전 폐쇄형 벽체를 갖는 라멘교와 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 우각부에서의 부모멘트를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경간장 20 m인 경우, 헌치부와 만나는 슬래브 단부에서는 폐쇄 높이비 $0.4 \leq h/H \leq 0.614$ 및 폐쇄 폭비 $0.75 \leq b/B < 1$ 을 만족할 때, 헌치 중앙부에서는 폐쇄 높이비 $0.257 \leq h/H \leq 0.614$ 및 폐쇄 폭비 $0.917 \leq b/B < 1$ 을 만족할 때 완전 폐쇄형 벽체를 갖는 라멘교의 부모멘트 값보다 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 부모멘트 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 헌치부와 만나는 벽체의 단부에서는 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 벽체를 개방하였을 때 최소 6.6%부터 최대 26.5%까지 부모멘트가 더 커짐을 확인할 수 있었다. 따라서 벽체 상부의 헌치부와 접하는 곳에 대한 적절한 보강이 이루어진다면, 폐쇄 높이비 $0.4 \leq h/H \leq 0.614$ 및 폐쇄 폭비 $0.75 \leq b/B < 1$ 을 만족하도록 개방형 벽체를 형성하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (3) 경간장 15 m인 경우, 헌치 중앙부에서는 폐쇄 높이비 $h/H \leq 0.586$ 및 폐쇄 폭비 $b/B < 1$ 을 만족할 때, 헌치부와 만나는 벽체의 단부에서는 폐쇄 높이비 $0.229 \leq h/H \leq 0.586$ 및 폐쇄 폭비 $0.833 \leq b/B < 1$ 을 만족할 때 완전 폐쇄형 벽체를 갖는 라멘교의 부모멘트 값보다 개방형 벽체를 갖는 라멘교의 부모멘트 값이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 헌치부와 만나는 슬래브 단부에서는 완전 폐쇄형 벽체의 부모멘트보다 벽체를 개방하였을 때 최소 0.2%에서 최대 3.5%까지 부모멘트가 더 커짐을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 경간장이 짧아지고, 벽체의 개방으로 인한 벽체의 강성 저하로 인하여 발생하는 것으로 보인다. 그러므로 벽체의 개방으로 인한 벽체에 작용하는 토압이 작아진다고 하더라도, 상부하중에 대한 벽체가 지지할 강성이 작아진다면 벽체의 개방에 대한 이점을 가질 수 없는 것으로 보인다. 따라서 슬래브

단부의 헌치부에 접하는 곳에 대한 적절한 보강이 이루어진다면, 폐쇄 높이비 $0.229 \leq h/H \leq 0.586$ 및 폐쇄 폭비 $0.833 \leq b/B < 1$ 을 만족하도록 개방형 벽체를 형성하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

개방형 벽체를 갖는 라멘교는 구조적인 측면의 유효성에 국한되지 않고 경제성과 현장 적용성 측면까지 고려한다면 기존 라멘교를 보완 및 대체할 수 있는 구조형식의 라멘교라 판단한다.

References

- Ahn, Y.S. (2013). *A study on structural behavior and optimum design of composite rigid frame bridge integrated with PS bar*. Ph.D. dissertation, Dong Yang University.
- Cheon, J.U., Seo, D.Y., Moon, Y.H., and Jeon, D.P. (2010). *Rahmen bridge and construction method there of*. KR 10-0969586, Korean Intellectual Property Office.
- Choi, J.W., Jang, M.J., Cheon, J.U., and Yoon, S.J. (2015). An experimental study on the structural behavior of steel-concrete composite rahmen bridge with hinged end supports. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 27, No. 2, pp. 195-205.
- Choi, M.K. (2015). *A section force comparative analysis of RC rahmen bridge span in various type by road bridge and railroad bridge*. Master's thesis, Joongbu University.
- Choi, Y.G., and Jang, I.Y. (2017). A study of structural behavior rationality and load carrying-capacity evaluation of integral abutment bridge. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 313-321.
- Dicleli, M., Eng, P., and Albhaisi, S.M. (2003). Maximum length of integral bridges supported on steel H-piles driven in sand. *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 12, pp. 1491-1504.
- Joung, D.K. (2012). *Development and analysis of vertically prestressed composite rahmen bridge*. Ph.D. dissertation, Kyung Hee University.
- Lee, J.H., and Lee, B.S. (2017). Effect of aspect ratio of connection on structural behavior of column-slab connection. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 1, pp. 23-29.
- Lee, K.H. (2016). *Efficient moment distribution of composite rahmen bridge using vertical-horizontal tension device*. Master's thesis, University of Seoul.
- Lee, Y.H. (2011). *A structural performance test of composite*

- rahmen bridge with Inverted-T girders*. Master's thesis, Chung-Ang University.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2016). *Road bridge design standards (limit state design)*. Bridge Design Core Technology Research Group in Korean Institute of Bridge and Structural Engineers.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2019). *Yearbook of road bridge and tunnel statistics*. No. 11-1613000-000108-10.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2010). *Road bridge design standards*.
- Ra, D.G., and Lee, G.D. (2012). Life cycle cost analysis of RC structures for fuzzy reliability theory. *J. of Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 13, No. 2, pp. 161-169.
- Shin, Y.W. (2011). *A study for rigid frame bridges with high strength rebar and concrete*. Master's thesis, Hanyang University.
- Sunroad Blog. (2017). *Rahmen bridge* (February 5, 2017). Retrieved from <https://sunroad.pe.kr/keylog/라멘교>
- Wolde-Tinsae, A.M., Klinger, J.E., and Mullangi R. (1988). *Bridge deck joint rehabilitation or retrofitting*. Final Report, Department of Civil Engineering, Maryland University, College Park, MD, USA.
-
Received	■	June 23, 2020
Revised	■	June 26, 2020
Accepted	■	July 8, 2020