

폐단면리브 강성에 따른 일축압축을 받는 보강판의 국부좌굴강도 평가

최병호^{1*}

¹국립한밭대학교 건설환경공학과

Evaluation of Local Buckling Strength of Stiffened Plates under Uni-axial Compression due to Closed-section Rib Stiffness

Byung-Ho Choi^{1*}

¹Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University

요 약 일반적으로 압축을 받는 판 구조는 종방향 보강재를 이용하여 보강된다. 이 때 보강재로서 U형 단면 리브를 사용하는 것이 보다 효과적이거나, 현재 국내에서 이에 대한 명확한 설계지침이나 연구자료가 제시되지 못하고 있다. 이에, 본 연구에서는 U리브의 단면 크기 및 강성 등에 따른 보강판의 탄성좌굴강도를 살펴보고자 한다. 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 세 가지 타입의 U형 단면 리브를 적용한 해석모델을 수립하여 고유치 해석을 실시하였고, 양연지된 판의 국부좌굴강도 이론식과 본 해석적 결과를 비교하였다. 이러한 분석 결과를 토대로 U형 단면 리브에 의해 좌굴강도가 증진하는 보강 효과를 확인하였으며, 설계 파라미터에 따른 변수해석적 연구를 통해 그 영향을 분석하였다. 본 연구결과는 U리브 보강판의 적정 설계 방안을 제시하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Generally, structural plates under axial compression should be stiffened by longitudinal stiffeners in order to enhance the buckling strength. Though U-shaped ribs would be more efficient for the stiffened plate system, there is in the absence of a proper design guides or relevant research results. Thus this study is aimed to examine the local buckling behavior of stiffened plates with U-section ribs. 3-dimensional analysis models which include 3 types of U-shaped longitudinal stiffeners were simulated by using the finite element code ABAQUS. The bifurcation analysis were conducted and then the buckling analysis results are compared with the theoretical equation values. It is found that the rotational constraint effect provided by the U-ribs should increase the local buckling strength. Some features drawn from a series of parametric study results are summarized.

Key Words : Buckling, Closed-Section Rib, Compressive Strength, Longitudinal Stiffeners, Stiffened Plates

1. 서론

U형 단면 리브(이하 U리브)는 압축을 받는 판에 접합되어 보강된 판과 폐합 단면을 이루기 때문에 구조적 안정성이나 비틀림 거동의 측면에 있어 상대적으로 유리하다. 국내에서는 U리브 적용에 관한 명확한 설계지침이나

충분한 연구자료가 제시되어 있지 않아서, 주로 강바닥판 등에만 국한되어 적용되고 있는데 과학적 근거없이 매우 조밀한 배치 형태로 활용되고 있다. U리브의 구조적 이점을 극대화하는, 보다 합리적인 활용 방안이 도출되려면 U리브 크기나 강성에 따른 좌굴강도의 특성을 면밀히 검토될 필요성이 있다.

본 연구는 한국연구재단의 일반연구지원사업(2011-0013918)에 의한 연구비 지원으로 수행되었음.

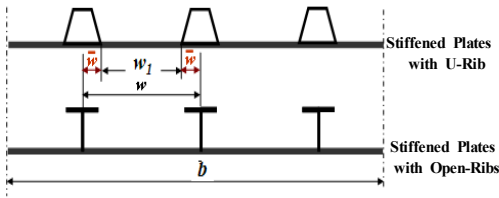
*Corresponding Author : Byung-Ho Choi (Hanbat National University)

Tel: +82-42-821-1105 email: bhchoi@hanbat.ac.kr

Received January 14, 2013

Revised February 5, 2013

Accepted February 6, 2013



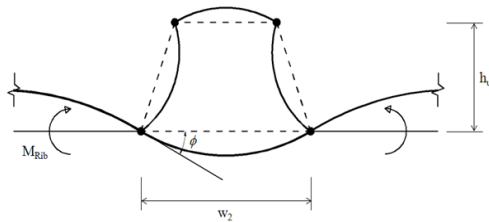
[Fig. 1] Comparison of cross-sectional shapes

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 U리브를 적용하면 개단면 리브 적용 단면과 비교할 때, w 에서 w_1 으로 유효폭이 줄어드는 효과가 예상된다. 따라서, U리브 적용 단면은 다음 식에 의해 국부좌굴강도가 증가되는 효과가 기대된다.

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t_p}{w_1} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, k 는 판좌굴계수, E 는 재료의 탄성계수, t_p 는 보강된 판의 두께, μ 는 포아송비를 각각 의미한다.

U리브 보강판에서 나타날 수 있는 국부좌굴강도 증가 효과는 개단면 리브를 적용한 것과 달리 U리브가 보강판과의 폐합단면을 이루는 특징에서 유발된다. 개단면리브에 비해 폐단면리브의 비틀림강성이 매우 크기 때문에 Fig. 2와 같이 유효폭 w_1 의 양단 고정점에서 회전 변위 Φ 에 대한 회전강성(유효스프링강성)이 발휘될 수 있다.



[Fig. 2] Rotational behavior of closed-section rib

Fig. 2와 같은 거동에 의한 U리브 유효회전강성(k_R)에 따른 국부좌굴강도 증가 효과는 다음과 같은 함수식으로 표현될 수 있다.

$$F_{cr}^{RR} = \Phi(k_R) \cdot F_{cr}^{SS} \quad (2)$$

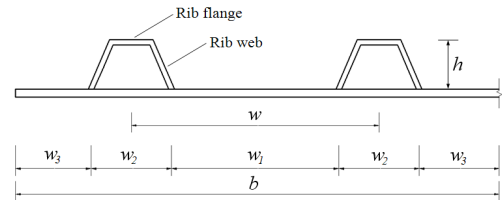
여기서, F_{cr}^{RR} 는 U리브 유효회전강성에 의한 국부좌굴강도 증가 효과를 고려한 U리브 보강판의 좌굴강도를 의미하고, F_{cr}^{SS} 는 4변 단순지지인 판의 국부좌굴강도를 뜻하므로, U리브 보강판에 대해서는 위의 식(1)과 같다. $\Phi(k_R)$ 는 U리브의 회전강성에 의해 2차적으로 유발되는 국부좌굴강도 증가계수이다. 도로교설계기준(2010) 등에

제시된 해당 기준강도는 식 (1)과 같이 단순지지 조건을 가정해서 정해진다. 따라서, 본 연구에서는 U리브 보강판에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 엄밀히 선정된 탄성좌굴강도를 위의 식(1)과 비교분석을 통해, Fig. 2와 같이 유효스프링강성(k_R)에 따른 국부좌굴강도 증가 효과 $\Phi(k_R)$ 를 평가해보고 각 핵심 설계 파라미터의 영향을 분석하고자 한다. 이러한 분석 결과는 향후 U리브 보강판의 설계강도를 보다 합리적으로 고려하여 보다 최적화된 단면 설계가 이뤄지도록 하는데 기여할 것으로 사료된다.

2. 유한요소해석

2.1 해석모델설계

본 해석적 연구를 위해 선정된 U리브 보강판의 단면 제원은 Fig.3, Table. 1 및 Table. 2에 제시된 바와 같다. 여기서 U리브간 순간격 w_1 은 250mm이고, U리브는 단면 크기에 따라 S, M, L등 세 가지 타입으로 고려하여 크기에 따른 영향을 검토하고자 한다. 일반적으로 활용되는 U리브는 L-타입과 유사하다. 본 연구에서는 합리적인 U리브 설계 방안에 관한 비교 연구를 위해 폭과 높이를 줄인 M-타입과 S-타입을 설계해서 적용하였다(도로교설계기준, 2010; 도로교표준시방서, 2005; AASHTO, 2007; Chou 외, 2006). 총 길이 L 을 유효폭 w_1 으로 나눈 형상비 α 는 최소 3에서 최대 10까지 모사하였다. U리브 두께 t_u 는 보강판 두께의 최소 1/3배 ~ 2배 이상으로 되는 범위까지 포함하여 파라메트릭 민감도 분석을 위해 광범위한 모델링을 수행하였다.



[Fig. 3] Typical cross-section of U-rib stiffened plate

[Table 1] Sectional dimensions of U-rib stiffened plates

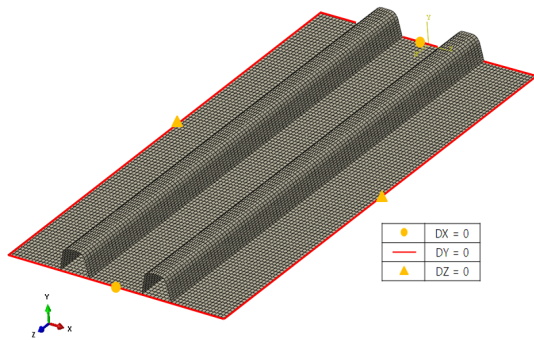
U리브	t_p (mm)	t_u (mm)	w_1 (mm)	w_1 / t	n	a
S	4~16	3~24	250.0	15.6~62.5	2	3,5,10
M	8~16	2~13	250.0	15.6~31.2	2	3,5,10
L	8~24	6~24	250.0	10.4~31.2	2	3,5,10

[Table 2] Cross-sectional specifications of U-rib

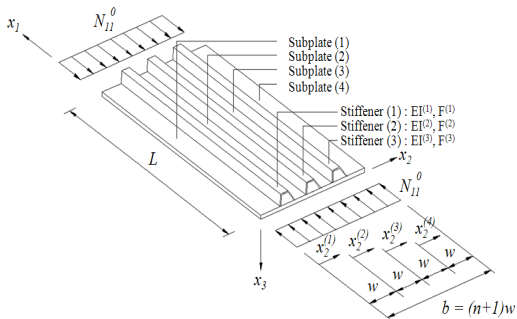
U리브	w_2 (mm)	h (mm)	t_{limit} (mm)
S	100	105	2.5
M	162.4	105	3.7
L	221.6	154	4.8

2.2 유한요소 변수 해석

각 해석모델에 대해 ABAQUS에서 제공하는 S4R5요소를 이용하여 유효폭 w_1 을 기준으로 $w_1 \times w_1$ 에 대해 12×12개 이상 분할하는 방식으로 Fig. 4와 같이 요소망을 구성하였다. 이러한 유한요소망은 충분히 수렴하는 보강된 판의 탄성좌굴강도를 구할 수 있는 것으로 알려져 있다(Yoo 외, 2001; Choi와 Yoo, 2005). 보다 엄밀한 해석결과를 얻기 위해 U리브의 웹판은 최소한 8등분 이상으로 구분하여 유한요소를 배치하였다. 경계조건은 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 네 변 단순지지 조건을 구현하였다. 하중재하 방식은 아래 Fig. 5와 같이 균일한 압축응력을 양단에서 판과 리브에 모두 재하하였다. Table 1에 제시된 U리브 크기 및 두께 강성에 따라 고유치해석을 실시하여 좌굴거동 및 압축강도의 변동 특성을 분석하였다.



[Fig. 4] Finite element mesh and boundary condition of the stiffened plate model



[Fig. 5] Overview of closed-section rib stiffened plates

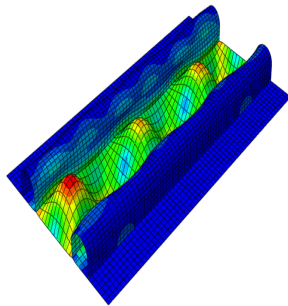
[Table 3] Eigenvalue analysis results

TYPE	t_p (mm)	t_u (mm)	α	F_{cr} (MPa)	$\Phi(k_R)$
L	8	5.5	10	942.83	1.24
	8	10	10	1124.20	1.48
	12	8.8	10	2098.50	1.23
	12	10	10	2173.70	1.27
	16	10.5	5	3495.20	1.15
	16	11	5	3549.20	1.17
	20	13.7	3	5406.50	1.14
	20	14	3	5446.70	1.15
	24	20	3	7723.60	1.13
	M	8	4.2	10	1009.40
8		4.4	10	1014.20	1.34
10		4.4	5	1512.00	1.28
10		5	5	1532.00	1.29
14		7	3	2850.50	1.23
14		7.2	3	2867.60	1.23
16		10	3	3696.60	1.22
16		10.5	3	3749.50	1.24
S	4	1	10	262.96	1.39
	4	3	10	284.06	1.50
	6	1.9	10	581.77	1.36
	6	3	10	602.01	1.41
	8	3	10	1012.90	1.33
	8	3.8	10	1038.20	1.37
	10	4.4	5	1553.20	1.31
	10	5	5	1582.40	1.33
	16	12	3	3889.30	1.28
	16	12.6	3	3943.40	1.30

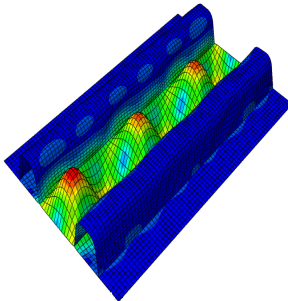
3. 해석결과 및 분석

본 유한요소 해석으로부터 결과된 각 U리브 타입에 따른 국부좌굴모드는 Fig. 6과 같다. 이 때, U리브는보강된 판에 고정점을 형성하는 것을 살펴볼 수 있으며 이에 따라 국부좌굴 거동은 w_1 에 따라 지배적인 영향을 받을 것으로 사료된다. Fig. 7은 모든 해석결과를 도식적으로 나타내고 있으며, 실제로 국부좌굴강도는 w_1/t_p 에 따라 명확한 영향을 받는 것을 볼 수 있다. U리브 보강판의 좌굴거동의 중요한 특징 중 하나는 U리브 내 구간에서도 반사인(Half-sine)곡선의 판좌굴 거동을 보이는 점이다. U리브 웹판간격이 작을수록 즉 w_1/w_2 가 클수록 유효폭 양단에서 작용하는 U리브 유효회전강성에 의한 국부좌굴 구속효과가 증가할 것으로 예상된다. 이에 따라 U리브의 폭이 작을수록 국부좌굴 강도의 증가효과가 늘어난다. 실제 결과를 살펴보면 U리브의 하부 폭이 1:1.13인 L-타입에 비해 하부 폭이 1:2.5인 S-타입에서 증대효과가 비교적 큰 것으로 고찰되었다. 고유치 해석으로 산정된 탄성좌굴강도는 Table 3에 보이는 바와 같이 앞서 식 (1)과 유사한 면이 있지만, 강도증가계수를 살펴

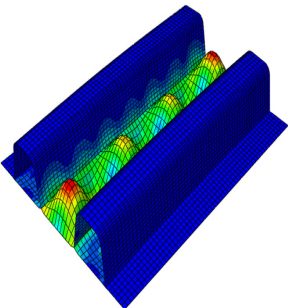
보면 최소 10%에서 최대 50% 이상 크게 증가된 경향도 나타나고 있다.



(a)S-Type (Front side)

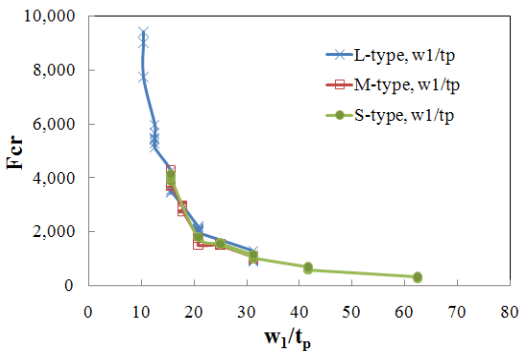


(b)M-Type (Front side)



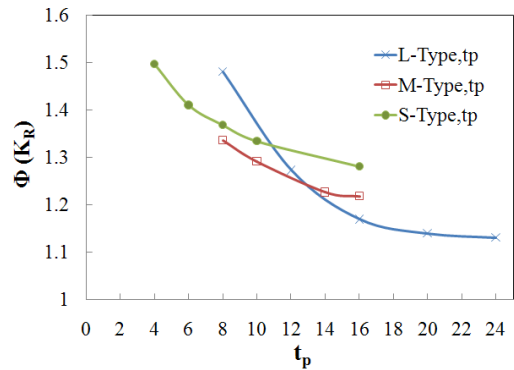
(c)L-Type (Front side)

[Fig. 6] Local buckling modes of stiffened plate model

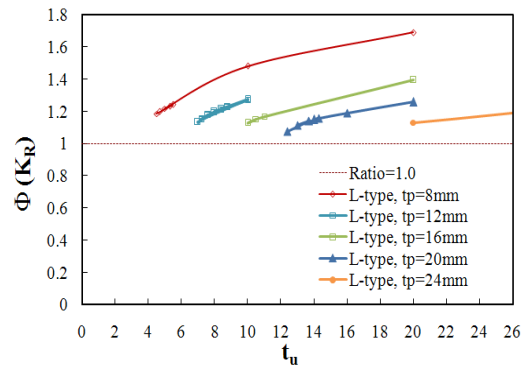


[Fig. 7] Analysis results of local buckling strength

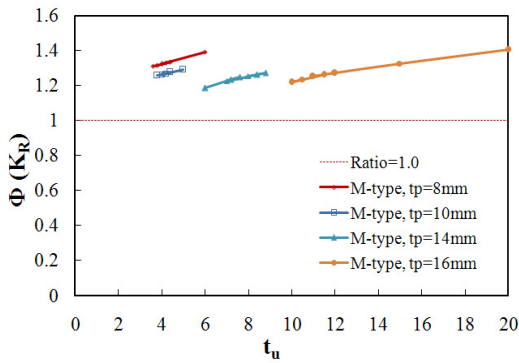
특히 L-타입 보다는 M-타입, S-타입으로 단면제원이 작을수록 강도증가계수가 다소 늘어나는 경향을 볼 수 있다. Fig. 8에서 보면 보강되는 판의 두께가 클수록 이러한 증가 현상은 다소 둔해지는 경향도 살펴볼 수 있다. 강도증가계수가 보강된 판 두께 t_p 에 따른 영향은 U리브 두께와 상관관계를 갖고 있으나 대체적으로 일정한 범위 이내로 수렴되는 양상을 보이고 있는데 이러한 경향은 Fig. 9에서 보다 명확하게 확인된다. Fig. 9는 U리브 두께 및 강성에 따른 국부좌굴강도의 변화 특성을 각 U리브 타입별로 나타내고 있다. 여기서 U리브 두께 t_u 가 보강판 두께 t_p 에 비해 증가해갈수록 좌굴강도가 증가되는 경향을 볼 수 있다. 공통적으로 U리브 두께에 따라 좌굴강도가 꾸준히 선형 증가하지만 어느 정도 이상이 되면 수렴하는 경향도 일부 나타나고 있으며 최대 양단 고정조건에서의 국부좌굴강도에 수렴될 것으로 사료된다. 따라서 U리브 두께가 이러한 변화 양상들을 적절히 고려하여 효과적인 범위로 선정된다면, 보다 효율적인 U리브 보강판의 설계가 이뤄질 수 있을 것으로 사료된다.



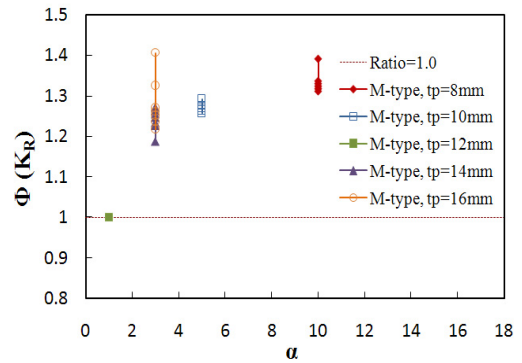
[Fig. 8] Variation of strength increment coefficient along with plate thickness



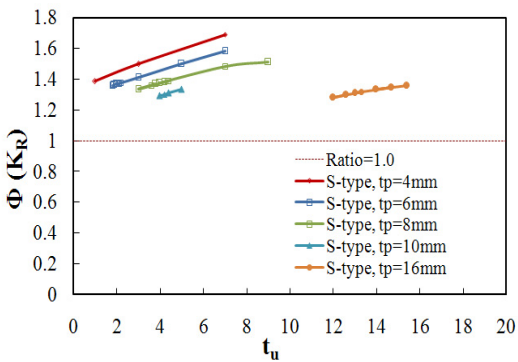
(a) L-Type



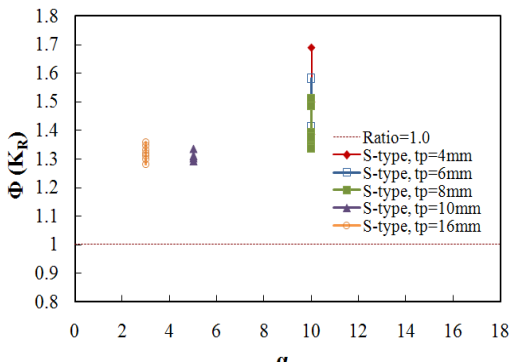
(b) M-Type



(b) M-Type



(c) S-Type

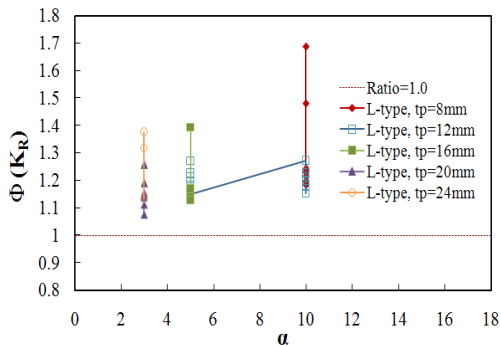


(c) S-Type

[Fig. 9] Variation of strength increment coefficient along with U-rib thickness

[Fig. 10] Variation of strength increment coefficient along with aspect ratio

U리브 보강판의 좌굴강도는 w_1/t_p 에 의해 지배적으로 영향을 받고 있지만, U리브 단면제원 및 강성에 의해서도 일정 수준 범위 내에서 조정될 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 10은 보강판 두께와 형상비에 따른 좌굴강도의 변화를 나타내고 있다. 총길이 L 을 유효폭 w_1 으로 나눈 형상비는 국부좌굴강도의 변화에 뚜렷한 영향이 없는 것으로 보여진다.



(a) L-Type

4. 결 언

본 논문에서는 U리브 보강판에 대한 3차원 유한요소해석을 변수해석적으로 수행하여 U리브 단면 강성에 따른 탄성 좌굴강도의 변화를 살펴보았다. 변수해석적 연구를 통해 U리브로 보강된 판의 국부좌굴강도는 U리브 웹판의 외측간격-판두께비인 w_1/t_p 에 의해 지배적인 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, U리브 두께 t_u 의 변화에 의해 보강된 판의 국부좌굴강도에 상당한 영향을 끼치는 것을 정량적으로 확인할 수 있었다. U리브의 단면 제원이 작을수록 국부좌굴강도의 증가효과가 다소 늘어나는 경향이 고찰되었다. 따라서, 이러한 U리브에 따른 국부좌굴강도 증가 양상을 고려하여 단면을 최적화 한다면 보다 합리적으로 적용되는 방안이 될 수 있을 것으로 보인다. 향후 이러한 국부좌굴강도 증가계수에 관한 체계적인 정립이 이뤄진다면 U리브를 적용한 보다 향상된 설계가 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] Korea Road and Transportation Association, Design Specifications for Roadway Bridges, 2010
- [2] Korea Ministry of Construction & Transportation, Standard Specifications for Roadway Bridges, 2005
- [3] AASHTO. LRFD Bridge design specifications. 4th ed. Washington (DC): American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [4] Chou. C.C., Uang C.M., Seible F. “Experimental evaluation of compressive behavior of Orthotropic Steel Plates for the New San Francisco - Oakland Bay Bridge”, ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol.12, No.2, pp. 140-150, 2006.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2006\)11:2\(140\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:2(140))
- [5] Yoo C.H., Choi B.H., Ford E.M. “Stiffness requirements for longitudinally stiffened box-girder flanges”. J Struct Eng, Vol.127, No.6, pp. 705-711, 2001.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:6\(705\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:6(705))
- [6] Choi B.H., Yoo C.H. “Strength of stiffened flanges in horizontally curved box girders”. ASCE J Eng Mech., Vol.131, No.2, pp. 167-176, 2005.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:2\(167\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:2(167))

최 병 호(Byung-Ho Choi)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 대학원 토목공학과 (토목공학석사)
- 2002년 12월 : Auburn University (구조공학박사)
- 2003년 11월 ~ 2008년 3월 : 포항산업과학연구원 선임연구원
- 2008년 4월 ~ 2009년 8월 : 포항산업과학연구원 책임연구원
- 2009년 9월 ~ 현재 : 한밭대학교 토목환경도시공학부 토목공학과 교수

<관심분야>

복합소재구조공학, 강구조공학