

강합성 부재의 합성거동을 위한 전단 연결재의 거동 특성

원덕희¹, 한택희¹, 김승준², 이정화³, 강영종^{3*}

¹한국해양과학기술원 연안개발에너지연구부,

²Texas A&M University Department of Civil Engineering,

³고려대학교 건축사회환경공학과

Behavior Characteristics of Shear Connector for Composite Behavior of Steel Composite Columns

Deok Hee Won¹, Taek Hee Han¹, Seungjun Kim², Jung Hwa Lee³
and Young Jong Kang^{3*}

¹Coastal Engineering and Ocean Energy Research Division, Korea Institute of Ocean Science and
Technology

²Department of Civil Engineering, Texas A&M University, College Station

³Department of Architecture, Civil & Environmental Engineering, Korea University

요 약 강합성 구조는 교량의 상하부 구조, 풍력 타워, 건축물의 기둥 등의 많은 분야에서 연구되어지고 있다. 강합성 구조의 가장 큰 특징은 강재와 콘크리트를 합성시킴으로서 두 요소의 단점을 극복하여 더욱 우수한 성능을 발휘하게 한다. 강합성 구조에서 강재와 콘크리트가 합성거동을 하지 않을 경우에 성능의 향상을 기대하기 어렵기 때문에 반드시 합성구조화 시켜야 한다. 교량의 상부구조에서는 강합성 보를 합성 거동시키기 위하여 다양한 방법의 합성방법을 제시하였으나 내부 구속 중공 RC 기둥이나 내부 구속 중공 CFT 기둥과 같은 새롭게 제안된 강합성 부재의 경우에는 거의 연구가 되지 않은 실정이다. 이러한 강합성 부재는 내·외부와 콘크리트가 합성되지 않을 경우, 두 재료 간 슬립이 발생하여 설계 성능보다 성능이 감소할 가능성이 매우 크기 때문에 반드시 콘크리트와 강재가 일체 거동을 할 수 있도록 합성 방법을 제시하여 주어야 한다. 본 연구에서는 전단 연결재를 위의 기둥들에 적용하는 방안을 마련하기 위하여 전단 연결재의 실험적 거동 특성을 분석을 통해 추후에 전단 연결재 설계법 제시를 위한 기초 자료를 구축하였다.

Abstract Steel composite structures have been studied in various areas such as bridges, high rise buildings, and wind towers. They show excellent structural performance through overcoming of the weaknesses of steel and concrete. Although various methods were already developed to achieve full composite behavior between steel and concrete in flexural members, the number of studies regarding composite columns is quite limited. If slip occurs between concrete and steel under external loads, the performance of the composite column would be reduced significantly. Connection methods ensuring full composite action between steel and concrete must be suggested. This paper investigated about structural behavior of shear studs through a series of experimental tests. Extensive parameters were also performed to understand the effects of the diameter of stud, space of stud and height of concrete. The present study provides fundamental bases for further development of design method of shear studs in composite columns.

Key Words : Composite, Column, Shear, Stud, Connector

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(과제 12 기술혁신 E09)과 서울산업통상진흥원에서 시행한 2011년도 특허기술상품화 기술개발 지원 사업(PA110020)의 부분적인 연구비지원에 의하여 수행된 연구입니다.

*Corresponding Author : Young Jong Kang(Korea Univ.)

Tel: +82-02-927-7715 email: yjkang@korea.ac.kr

Received January 30, 2013

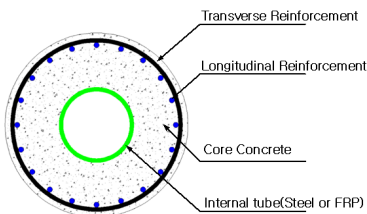
Revised (1st March 8, 2013, 2nd March 18, 2013)

Accepted April 11, 2013

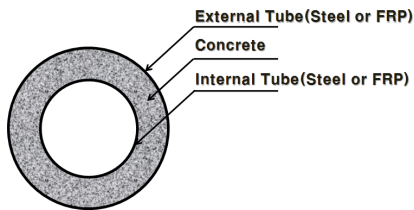
1. 서 론

최근 많이 건설되고 있는 합성 구조는 기술자들에게 많은 기술적 선택의 자유와 창조성을 부여하고 있다. 인장에 강한 강재와 압축에 강한 콘크리트의 적절한 조화로 구조물을 효율적이고 경제적으로 시공할 수 있는 많은 합성형 구조가 개발되었고 실제 적용되고 있다.

일반적으로 보에서 합성형 구조는 강재 주형과 콘크리트 슬래브의 두 요소가 상호 연결되어 각 요소의 거동에 의하지 않고 두 요소가 합성적으로 거동하도록 설계된 철근-콘크리트 단면의 구조를 말한다. 전단 연결재의 많은 종류 중 하나인 연결재를 통해 합성형 구조를 나타낼 수 있으며, 실제 현장 타설 콘크리트 바닥판의 경우 전단 연결재와 접합을 위하여 block out부를 두고 있으며 이를 무수축 모르타르 등의 채움재로 충전시켜 합성을 이루는 방법을 사용한다. 또한 현장 타설 콘크리트 바닥판의 경우 도로교 설계기준(2010)[1]에서 규정된 바와 같이 전단 연결재의 허용 전단력을 콘크리트 강도와 전단연결재 지름의 함수로 표현하고 있다. 합성형 보의 설계 주요 장점은 강재 중량의 감소, 보다 길고 얇은 강재 주형, 전체 구조물의 강성 증대, 시간 길이 등을 들 수 있다.



[Fig. 1] Constitution of ICH RC columns[4]



[Fig. 2] Constitution of ICH CFT columns[5]

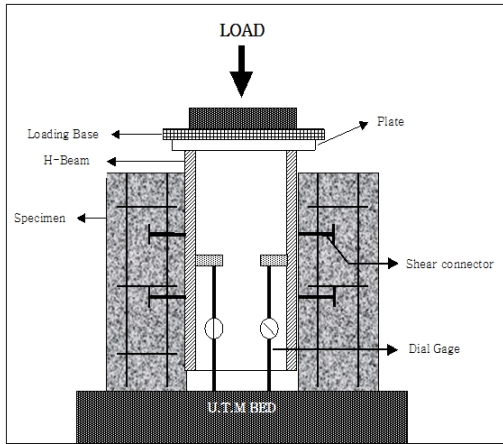
위와 같이 합성형 보의 경우에는 안남식(2012)[2], 심현섭(2007)[3] 등에 의해 많은 연구가 되었고 설계 기준도 제시되어져 있다. 그러나 콘크리트 충전 강관 기둥 (Concrete-Filled Tube ; CFT), 내부 구속 중공 RC 기둥 (Internally Confined Hollow RC ; ICH RC column), 그리고 내부 구속 중공 CFT 기둥(Internally Confined Hollow

CFT column ; ICH CFT)과 같은 강합성 기둥은 보와 같은 연결재에 대한 규정이 제시되어져 있지 않다. 특히 Han et al. (2010)[4,5]에 의하여 제안된 ICH RC 기둥은 Fig. 1과 같이 중공 철근 콘크리트 기둥의 중공부에 튜브를 삽입한 구조이며, ICH CFT 기둥은 Fig. 2와 같이 중공 CFT 기둥의 중공부에 튜브를 삽입한 구조이다. 이렇게 새롭게 제안된 강합성 부재들은 내·외부와 콘크리트가 합성되지 않을 경우, 두 재료간 슬립이 발생하여 설계 성능보다 성능이 감소할 가능성이 매우 크기 때문에 반드시 콘크리트와 강재가 합성 거동을 할 수 있는 방법을 제시하여 주어야 한다.

본 연구에서는 전단 연결재를 다양한 부재들에 적용하는 방안을 마련하기 위하여 전단 연결재의 거동 특성을 분석을 통해 추후에 전단 연결재 설계법 제시를 위한 기초 자료를 구축한다. 전단 연결재의 간격, 직경, 그리고 실험체의 크기 등의 변수로 선정하여 분석을 수행하였다.

2. 실험체의 설계 및 실험 방법

Fig. 1과 2의 기둥의 내부튜브 혹은 외부튜브에 전단 연결재가 설치되었을 경우 거동 특성을 분석하려고 한다. 이러한 분석을 위하여 정적 시험을 수행하였다. Fig. 3은 정적실험 방법 및 실험체의 설치를 보여준다. 실험체는 Fig. 1과 2와 같이 원형이 아닌 Fig. 4의 실험체의 평면도와 같이 H형강의 플랜지에 전단 연결재를 설치하고 양단에 콘크리트를 타설하여 H형강과 콘크리트를 합성시켜 주는 방법을 이용하였다. 실험의 현실성을 위해서는 원형 단면을 적용하여야 하나 원형일 경우에는 전단 연결재와 H형강과의 파괴를 상세하게 관찰할 수 없기 때문에 결과 분석의 용이성을 위해서 H형강을 이용하였으며, 시험결과를 두 재료의 슬립을 주로 분석하기 때문에 원형강관을 이용하거나 혹은 제안된 방법으로 실험을 할 경우나 큰 차이가 발생하지 않을 것으로 판단되어 다음과 같이 실험체를 설계하였다. H형강은 구조용 압연 형강 (H-300×300×10×15)를 사용하였다. 각각의 실험체는 UTM에 설치하였으며, H형강의 상부를 고정시키고 압축 하중을 가하여 직접 콘크리트 블록에 전달되도록 하였다. 각 실험체에서 콘크리트와 H 형강 사이의 슬립을 측정하기 위하여 형강에 작은 플레이트를 설치하였으며, 마그네틱 베이스를 이용하여 1/100mm 다이얼 게이지를 형강의 안쪽에 설치하였다. 하중은 중앙 집중재하를 하였으며, 가력판과 형강 사이에 편심제거를 위한 플레이트를 설치하고 양측 대칭을 이루게 실험체를 배치하고 하중을 재하 하였다.



[Fig. 3] Testing method and installation of specimens

[Table 1] Dimension of specimens

Specimens	f_{ck} (MPa)	D (mm)	EA	S (mm)	L (mm)
1) $\phi 19$ L450 1@00	31.7	19	1	·	450
2) $\phi 19$ L750 2@300	35	19	2	300	750
3) $\phi 19$ L350 2@100	28	19	2	100	350
4) $\phi 19$ L450 2@100	26.4	19	2	100	450
5) $\phi 19$ L550 2@100	27.7	19	2	100	550
6) $\phi 19$ L650 2@100	29.3	19	2	100	600
7) $\phi 19$ L750 2@100	29.4	19	2	100	750
8) $\phi 19$ L650 3@100	32.3	19	3	100	650
9) $\phi 22$ L450 1@00	25.3	22	1	·	450
10) $\phi 22$ L550 2@100	33.2	22	2	100	550
11) $\phi 22$ L650 3@100	34.9	22	3	100	650
12) $\phi 22$ L750 2@300	29.3	22	2	300	750

where, f_{ck} : compressive strength of concrete

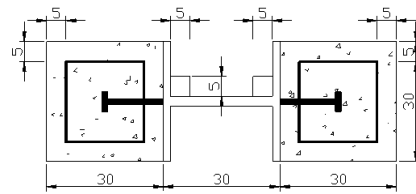
D : diameter of shear stud connector($\phi 22$)

EA : number of stud column, S : space of stud(2@30)

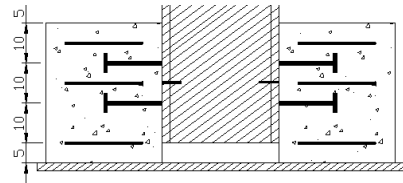
L : height of concrete block(L750)

Table 1은 실험체의 제원을 나타낸 것으로, 사용된 변수는 연결재 직경, 연결재 간격, 콘크리트 블록의 높이, 그리고 연결재 열의 수 등이다. 연결재의 직경은 19mm와 22mm를 적용하였으며, 이 때의 콘크리트의 설계 압

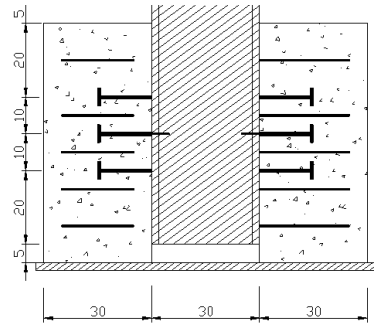
축강도는 30MPa를 사용하였다. 연결재 간 간격은 2열 배치를 기준으로 도로고 설계 기준에 의하여 연결재 최소 간격 100mm와 300mm를 적용하였다. 시험체의 크기는 350mm ~ 750mm로 100mm 간격으로 설정하였다. 또한 연결재의 종방향 열의 수는 1열, 2열, 3열로 배치하였다. 이러한 제원을 이용하여 시험체를 제작하였으며, 연결재의 파괴 이전에 콘크리트가 파괴되는 것을 방지하기 위해서 횡철근을 배근하였다. 실험체의 평면도는 Fig. 4와 비슷하다. Fig. 5는 실험체 3, Fig. 6은 실험체 8과 11의 정면도를 나타낸 것이다.



[Fig. 4] Floor Plan of specimens(unit : cm)



[Fig. 5] Front view of specimen No. 3(unit : cm)



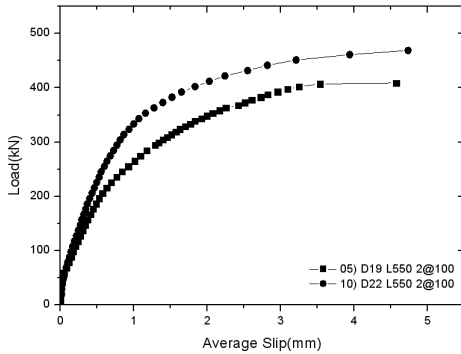
[Fig. 6] Front view of specimen No. 8 & 11(unit : cm)

3. 실험 결과 및 분석

Table 1과 같은 제원을 갖는 실험체를 제작하여 Fig. 3의 실험 방법을 적용하여 거동을 분석하였다. 전단 연결재의 직경, 간격, 콘크리트 블록의 크기에 대하여 분석을 수행하였다.

3.1 전단 연결재 직경에 따른 거동 분석

전단 연결재의 직경에 대한 거동 특성을 분석하기 위하여 직경 19mm와 22mm 실험체에 대한 Fig. 7, 8과 같이 하중-슬립 곡선을 비교하였다. 실험체 블록의 크기는 각각 L550과 L650, 전단 연결재 종방향 배열 개수는 2개와 3개 간격은 100mm로 고정하였다.

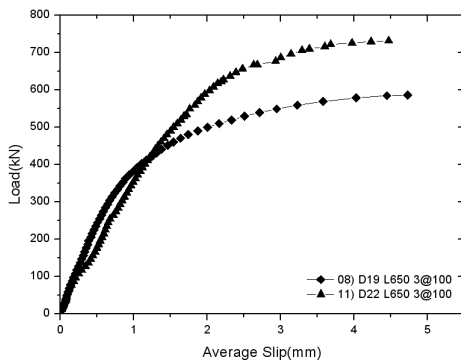


[Fig. 7] Comparison of load-slip curve by diameter of stud I

[Table 2] Results of experimental study by diameter of stud I

Specimens	P_{max} (kN)	$P_{max}/stud$ (kN/stud)	Δ_{max} (mm)	P_{yield} (kN)	Δ_{yield} (mm)	K (kN/mm)
No.5	409.08	102.27	4.58	306.81	1.42	216.06
No.10	468.92	117.23	4.74	351.69	1.14	308.50

직경이 19mm에서 22mm로 증가할 때 면적은 15.8% 증가하며, 이때의 전단 연결재 개당 하중이 Table 2와 같이 각각 102.27kN/stud, 117.23kN/stud으로 약 14.6% 증가하였다. 전단 연결재의 직경이 증가함에 따라서 내력이 증가되는 것을 확인할 수 있다. 초기강성은 유사하나 슬립량이 5mm 이상의 강성은 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.



[Fig. 8] Comparison of load-slip curve by diameter of stud II

[Table 3] Results of experimental study by diameter of stud II

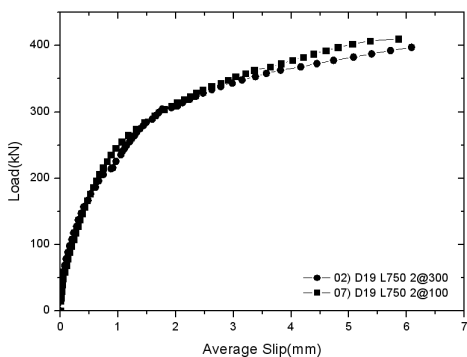
Specimens	P_{max} (kN)	$P_{max}/stud$ (kN/stud)	Δ_{max} (mm)	P_{yield} (kN)	Δ_{yield} (mm)	K (kN/mm)
No.8	586.64	97.81	4.73	439.98	1.35	325.91
No.11	731.83	121.94	4.47	548.87	1.75	313.64

Fig. 8은 콘크리트 블록의 크기가 650mm이고 전단 연결재를 3단 배근하였을 경우를 나타낸 것이다. 최대 하중은 D19모델이 586.64kN, D22모델은 731.83kN으로 나타났다. 이때의 전단 연결재당 하중은 각각 97.81kN/stud, 121.94kN/stud로 개당 하중 증가율이 24.7%로 2열 배치 시 보다 증가율이 더 큰 것을 볼 수 있다.

초기에는 변위가 서서히 증가하지만 탄성 구간 이후의 소성 구간에서는 변위가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 전단 연결재 직경이 증가함에 따라 전단 연결재의 저항력도 증가하게 되는 것을 볼 수 있다. 전단 연결재의 직경의 증가는 연결재 개당 하중의 증가를 가져오며 직경 증가율과 비슷한 크기의 하중 증가율을 나타낸다. 전단 연결재를 따라서 전달되는 응력 분포를 전단 연결재의 투영면적으로 고려한다면 응력 분포는 전단 연결재의 직경과 높이에 대한 단면의 크기에 비례할 것으로 판단된다. 그러므로 전단 연결재의 직경과 전단 연결재 개당 하중의 증가는 비례 관계에 있을 것으로 판단된다.

3.2 전단 연결재 간격에 따른 거동 분석

전단연결재 간격에 따른 거동 특성을 분석하기 위하여 직경은 19mm, 콘크리트 블록의 크기는 750mm, 2열 배열로 동일하며, 전단 연결재 설치 간격이 300mm, 100mm로 다르게 하였다. Fig. 9와 같은 하중-슬립 곡선을 도출할 수 있었다. 전단 연결재 설치 간격 300mm, 100mm의 실험체의 최대 하중과 연결재 개당 하중은 각각 99.33kN, 102.51kN로 간격이 좁은 경우에 더 큰 값을 발휘하지만 균열이 항복하중 및 강성이 거의 유사하게 발휘되는 것으로 나타났다. 실제 단면적당 설치 개수로 비교했다면 더욱 비교가 더 수월했을 것으로 판단된다. 본 실험체의 경우에는 동일한 단면적의 전단 연결재를 간격만 넓혀서 설치하였기 때문에 전단 연결재가 저항하는 저항력은 거의 유사하게 나타나는 것으로 판단된다.



[Fig. 9] Comparison of load-slip curve by space of stud

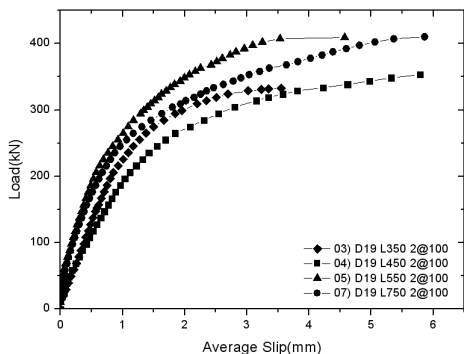
[Table 4] Results of experimental study by space of stud

Specimens	P_{max} (kN)	$P_{max}/stud$ (kN/stud)	Δ_{max} (mm)	P_{yield} (kN)	Δ_{yield} (mm)	K (kN/mm)
No.2	397.31	99.33	6.09	297.98	1.68	177.37
No.7	410.06	102.51	5.86	307.54	1.90	161.87

3.3 콘크리트 블록의 크기에 따른 거동 분석

Fig. 10은 직경 19mm 실험체 중 2열 배치의 전단 연결재에 연결재 간격이 일정한 경우의 실험체에 대한 최대 하중 및 슬립을 비교한 것이다.

전단 연결재 직경, 간격, 열의 수를 일정하게 한 후 블록의 크기를 변화 시켰을 때에 연결재 당 하중 증가 추이를 알 수 있었으며, 블록의 크기가 가장 큰 실험체 7이 최대 하중과 연결재 개당 하중이 가장 큰 것으로 보아 효율이 가장 높은 것으로 볼 수 있다.



[Fig. 10] Comparison of load-slip curve by size of specimens(D19)

[Table 5] Results of experimental study by size of specimens(D19)

Specimens	P_{max} (kN)	$P_{max}/stud$ (kN/stud)	Δ_{max} (mm)	P_{yield} (kN)	Δ_{yield} (mm)	K (kN/mm)
No.3	332.56	83.14	3.56	249.42	1.19	209.6
No.4	353.16	88.29	5.79	264.87	1.85	142.86
No.5	409.08	102.27	4.58	306.81	1.42	216.06
No.7	410.06	102.51	5.86	307.54	1.9	161.87

Table 5에서 정리한 바와 같이 실험체가 커질수록 최대 하중 및 연결재 당 하중의 증가가 나타나며, 강성 또한 증가하는 것으로 나타난다. 그러나 콘크리트 블록이 계속 커지게 될 경우에는 면적당 연결재의 설치량이 적어지기 때문에 국부적인 응력집중이 발생하여 콘크리트 블록의 균열을 초래할 가능성이 매우 크기 때문에 콘크리트 면적당 설치량이 잘 지켜져야 할 것으로 판단된다.

3.4 파괴 거동 분석

전단 연결재의 파괴는 주로 연결재의 줄기 부분에서 발생하였으며, 전단 연결재가 전단력과 힘을 동시에 받아 상부로 변형이된 형상을 볼 수 있었으며, 힘에 의하여 연결재와 콘크리트가 맞닿는 부분에 Fig. 11과 같이 지압파괴가 발생하였다.



[Fig. 11] Split of concrete block

대부분의 시험체들은 콘크리트 블록에 국부적인 균열이 발생하였으며, 극한 하중 도달 이후의 지속적인 하중재하로 인하여 콘크리트 블록에 균열이 확대된 것을 볼 수 있었다. 상부쪽의 연결재가 설치된 부분은 끝단에 수직으로 발생하는 것으로 나타났으나, 하단 연결재의 경우 강재 주형 표면을 향하여 45도를 이루며 균열이 발생하는 것으로 나타났다.

양쪽에 설치된 전단 연결재가 같음에도 불구하고 한쪽 부분이 파괴된 경우가 있었다. 이는 전단 연결재와 형강과의 접합성능이나 혹은 다른양의 슬립이 발생한 것으로 보아 서로 다른 소성변형이 발생한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전단 연결재를 강합성 기둥들에 적용하는 방안을 마련하기 위하여 전단 연결재의 거동 특성을 분석하였다. 전단 연결재의 간격, 직경, 그리고 실험체의 크기 등의 변수로 선정하여 분석을 수행하였다.

- 1) 전단 연결재의 직경이 증가할 경우 연결재의 단면적 증가율과 연결재 당 하중 증가율이 대체적으로 유사한 경향으로 나타난다.
- 2) 전단 연결재의 간격이 좁아 질수록 연결재 당 하중은 증가를 나타낸다. 이는 면적당 전단 연결재의 설치 개수가 증가하기 때문에 저항하는 연결재량의 증가를 의미한다.
- 3) 콘크리트 블록이 커질 경우에는 최대 하중 및 연결재 당 하중이 증가하는 것으로 나타났으나, 콘크리트 블록이 무한정으로 커지게 될 경우에는 면적당 연결재의 설치량이 적어지기 때문에 국부적인 응력 집중을 유발할 가능성이 매우 큼으로 콘크리트 면적당 설치량에 제한을 두어야 할 것이다.
- 4) 전단 연결재의 파괴는 주로 연결재의 줄기 부분에서 발생하였으며, 전단 연결재가 전단력과 힘을 동시에 받아 상부로 변형이된 형상을 볼 수 있었으며, 힘에 의하여 연결재와 콘크리트가 맞닿는 부분에 지압파괴가 발생하였다.
- 5) 상부쪽의 연결재가 설치된 부분의 콘크리트 블록 균열은 끝단에 수직으로 발생하는 것으로 나타났으나, 하단 연결재의 경우 강재 주형 표면을 향하여 45도를 이루며 균열이 발생하는 것으로 나타났다.

References

[1] Korea Road & Transportation Association(2010), Korean Highway Bridge Design Specifications

[2] Ahn N., Lee Y. H. (2012) A Study on Strength of Shear Stud in High Strength Concrete, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, vol.12 No.2, pp.1-7.

[3] Shin H. S. (2007) Finite Element Analysis of Deformation Characteristics of the Shear Studs embedded in High

Strength Concrete Slab of the Composite Beam, Journal of Korea Society of steel construction, Vol. 19, No 5 pp.473-482.

[4] Han, T. H., Yoon K. Y., Kang Y. J.(2010) Compressive strength of circular hollow reinforced concrete confined by an internal steel tube, Construction and Building Materials, Vol. 24, issue 9 pp.1690-1699.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.022>

[5] Han, T. H., J. Michael Stallings, Kang Y. J.(2010) Nonlinear concrete model for double-skinned composite tubular columns, Construction and Building Materials, Vol. 24, issue 12 pp.2542-2553.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.001>

원 덕 희(Deok Hee Won)

[정회원]



- 2008년 8월 : 고려대학교 사회환경시스템공학과(구조공학석사)
- 2011년 8월 : 고려대학교 건축사 회환경공학과 (구조공학박사)
- 2011년 9월 ~ 2012년 6월 : 고려대학교 연구교수
- 2012년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구원

<관심분야>

강구조, 합성구조, 신재생에너지, 해양구조

한 택 희(Taek Hee Han)

[정회원]



- 1995년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학박사)
- 2007년 11월 ~ 2008년 12월 : Auburn University 토목공학과 연구원

• 2009년 1월 ~ 2011년 1월 : 서울메트로 기술연구소 전문위원

• 2011년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구부 선임연구원

<관심분야>

합성구조, 해양에너지, 비선형 구조해석

김 승 준(Seungjun Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (구조공학석사)
- 2010년 2월 : 고려대학교 사회환경시스템공학과(구조공학박사)
- 2011년 3월 ~ 2012년 2월 : 고려대학교 초고층초장대기술연구소 연구교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : Texas A&M Univ. 박사후연구원

<관심분야>
구조공학, 해양공학

이 정 화(Jeong-Hwa Lee)

[학생회원]



- 2011년 8월 : 서울과학기술대학교 건설공학부 토목공학전공 (학사)
- 2011년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 구조공학 (석사과정)

<관심분야>
토목공학, 구조공학, 강구조

강 영 중(Young-Jong Kang)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 대학원 토목공학과 (구조공학석사)
- 1992년 6월 : Auburn대학교 Civil Engineering (구조공학박사)
- 1993년 3월 ~ 1994년 2월 : 공주대학교 토목공학과 전임강사
- 1994년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

<관심분야>
강구조, 합성구조, 신재생에너지, 철도, 해양구조