

이종강도 부재간 연결면 조건에 따른 전단강도 평가

강재윤*, 박종섭, 정우태, 금문성
한국건설기술연구원 구조융합연구소

Evaluation of Shear Strength of Concrete Layers with Different Strength considering Interfacial Indentation

Jae-Yoon Kang*, Jong-Sup Park, Woo-Tai Jung, Moon-Seoung Keum

Structural Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 본 연구에서는 Eurocode에서 제시하는 콘크리트 부재간 계면조건을 고려한 전단강도 설계식을 압축강도가 서로 다른 부재 연결부에 대해서도 적용할 수 있는지를 검토하기 위하여 전단실험을 수행하고 설계 평가식과 비교하였다. Eurocode에서 제시하는 전단강도 평가식의 변수를 고려하여 콘크리트 압축강도, 전단철근 보강비, 요철계면을 변수로 하는 부재를 제작하였고, 콘크리트층 간의 강도 차이와 요철계면의 유무에 따른 전단강도에 주안점을 두고 전단실험을 수행하였다. 실험을 통해 측정한 실제 전단강도를 Eurocode의 전단강도 평가식을 이용한 계산값과 비교하여 실제 전단강도 수준과 평가식과의 차이를 평가하였으며, 이종강도를 갖는 콘크리트 층에서 압축강도가 증가함에 따라 전단강도도 증가하며, 계면요철을 둔 연결부 전단강도는 설계기준의 평가식으로 계산한 값에 비해 20~50%까지 차이를 보이는 것으로 나타났다. 철근보강비가 작은 경우에는 계면요철에 의한 전단저항력이 전단강도에 주로 기여하며, 이 경우에는 계면에서의 급격한 파괴가 일어나는 현상과 전단강도 편차가 크게 나타남에 따라 평가식과 큰 차이를 보였다. 특히, 이종강도를 갖는 콘크리트 층의 전단강도는 압축강도 차이가 클수록 강도 평가식과 큰 차이를 보이는 것으로 판단된다.

Abstract This study is a part of research to develop a steel-concrete hybrid girder using ultra high-performance concrete with a compressive strength of 80 MPa. To this end, the Eurocode design formula for the shear resistance developed in a concrete-to-concrete interface was examined for the interface between concrete layers of different strengths. To examine the effect of the surface roughness on the shear resistance, a push-out test was conducted on specimens while considering the parameters of the Eurocode design equation. The actual behavior was evaluated with respect to the compressive strength of the concrete, the reinforcement ratio of the shear rebar, and the interfacial surface condition. The specimen with a rough interface shows 20-50% higher shear strength than that estimated by the design equation. In the case of failure mode, abrupt failure tends to occur at the interface of the concrete layer for the specimen with a low reinforcement ratio. It is expected that the shear strength of the concrete layer will increase according to the strength differential in the concrete layers.

Keywords : Shear Resistance, Interface of Concrete Layers, Surface Roughness, Push-out test, Ultra high performance concrete

1. 서론

서로 다른 강도를 갖는 콘크리트가 합성되는 부재에

서 발생하는 전단응력의 전달 메커니즘은 매우 복잡하며, 이 응력 전달 메커니즘에는 계면을 가로질러 배치되는 철근량, 낮은 강도를 갖는 콘크리트의 압축 저항, 계

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비 지원(13건설연구A02)으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Jae-Yoon Kang(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

Tel: +82-31-910-0135 email: jykang@kict.re.kr

Received July 4, 2016

Revised August 10, 2016

Accepted August 11, 2016

Published August 31, 2016

면의 거친 정도, 수직하중에 의해 발생하는 응력 등의 여러 변수들이 영향을 미친다. 이 메커니즘에 대한 연구는 1960년대부터 시작되어 Hanson[1], Birkeland and Birkeland[2], Mattock and Hawkins[3], Walraven and Reinhardt[4], Loov and Patnaik[5] 등이 전단마찰 거동에 대한 다양한 연구를 수행하였으며, 최근에는 Júlio and Santos[6,7]의 연구결과가 콘크리트 층의 계면에서 발생하는 전단응력의 전달 메커니즘을 설명하는 이론으로서 인정받고 있다. Júlio and Santos는 콘크리트의 계면에서 발생하는 응력 메커니즘을 층간 분리 타설에 의한 부착력(Adhesive bond), 철근의 다웰효과(Dowel Action) 그리고 계면 균열 발생 이후에 발생하는 마찰(Friction)의 조합으로 전단저항이 발휘되는 것으로 설명하였고 [6], 이 연구 결과는 Eurocode[8] 등의 설계기준에 반영되었다.

Eurocode에서는 타설시기가 서로 다른 콘크리트 계면에서의 전단저항강도 평가를 위하여 Eq. 1과 같은 평가식을 제시하고 있다. 이 식은 크게 3개의 항으로 구성되어 있으며, 첫 번째 항의 cf_{cd} 는 계면에서의 재료간 점착저항(adhesion resistance)으로서 콘크리트의 설계인장강도(f_{cd})에 의해 결정되며, 두 번째 항의 $\mu\sigma_n$ 는 외부 하중에 의한 수직응력(σ_n)에 의해 발생하는 전단마찰 저항으로서 표면조도(surface roughness, μ)에 의해 결정된다. 세 번째 항의 $\rho f_{syd}(\mu \sin \alpha + \cos \alpha)$ 는 전단철근에 의한 전단저항으로서 철근비(ρ), 철근항복강도(f_{syd}), 철근 경사각(α) 및 표면 거칠기(μ)에 의해 결정된다. 이 식에서 c 와 μ 는 계면조도에 따른 계수로서 Table 1의 값으로 한다[8].

$$v_{Rdi} = cf_{cd} + \mu\sigma_n + \rho f_{syd}(\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0.5v_{fd} \quad \text{Eq. 1}$$

본 연구에서는 기존의 강거더 합성교의 형고를 낮추기 위해 Fig. 1과 같은 상부 플랜지에 압축강도 80 MPa

의 초고성능 콘크리트 케이싱을 합성한 하이브리드 거터를 제안하고, 이 교량 형식에서 80 MPa의 케이싱 콘크리트와 30 MPa의 바닥판 콘크리트를 합성하기 위한 전단 철근량을 결정함에 있어서 Eurocode의 전단저항 설계식을 적용하는 것으로 하였다. 단, 이 식은 콘크리트 층간의 강도차이를 반영하고 있지는 않아 설계식 적용성 검토를 위해 강도가 서로 다른 콘크리트의 계면 조건에 따른 전단강도에 대해서 Eurocode의 설계식과 실제 거동과의 차이를 파악하기 위해 콘크리트 강도, 전단철근량, 계면 요철조건을 변수로 하는 시편에 대해서 전단실험을 수행하였다.

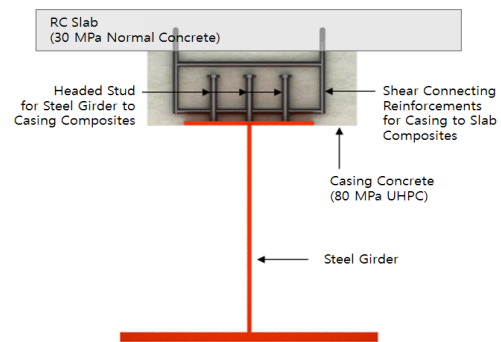


Fig. 1. Concept of Steel Girder-UHPC Casing Hybrid Girder

2. 이종강도 콘크리트 연결부 전단실험

2.1 실험체 제작 변수

이종강도 연결부의 전단강도를 평가하기 위하여 직접 전단 실험을 실시하였고, 전단실험체는 표면처리 유무, 철근직경, 전단연결재 개수에 따라 구분 하여 제작하였다. 실험체 제작 변수는 Eurocode 평가식에서 전단강도를 결정하는 변수항을 고려하여 결정하였으며, 본 연구에서는 콘크리트층 간의 강도를 달리하는 점과 경계면의 요철처리 조건에 주안점을 두었다.

실험체 형상은 Fig. 2와 같다. 상층과 하층의 콘크리

Table 1. Factors which depend on the roughness of the interface[8]

Surface condition	c	μ	Remarks
Very smooth	0.25	0.5	a surface cast against steel, plastic or specially prepared wooden moulds
Smooth	0.35	0.6	a free surface left without further treatment after vibration
Rough	0.45	0.7	a surface with at least 3 mm roughness at about 40 mm spacing, achieved by raking, exposing of aggregate
Indented	0.50	0.9	a surface with indentations

트 블록은 각각 압축강도 30 MPa와 80 MPa로 달리한 경우(NC30-SC80)와 동일하게 30 MPa를 적용한 경우(NC30-NC30)로 구분하였고, 실험체 제작 후 공시체 압축실험으로 측정한 실강도는 각각 31.8 MPa 및 74.55 MPa였다. 전단철근은 Fig. 3과 같이 1개~6개 까지 개수를 달리하여 배치하였고, 콘크리트 층간의 경계면 조건은 표면처리를 하지 않은 경우와 Fig. 4와 같이 40 mm 간격으로 깊이 6 mm의 요철면 처리를 한 경우로 구분하였다.

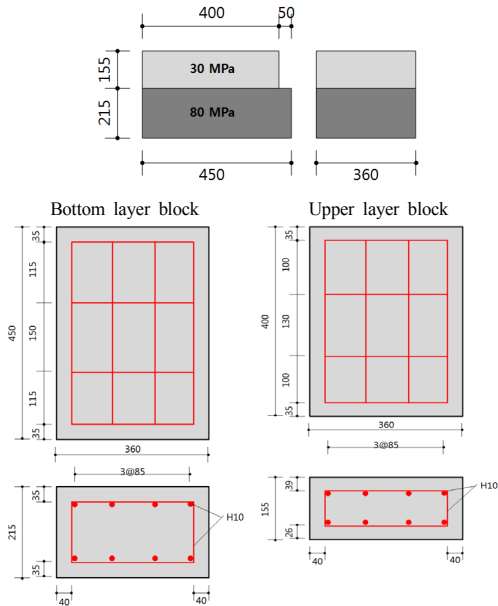


Fig. 2. Shear Test specimen (unit: mm)

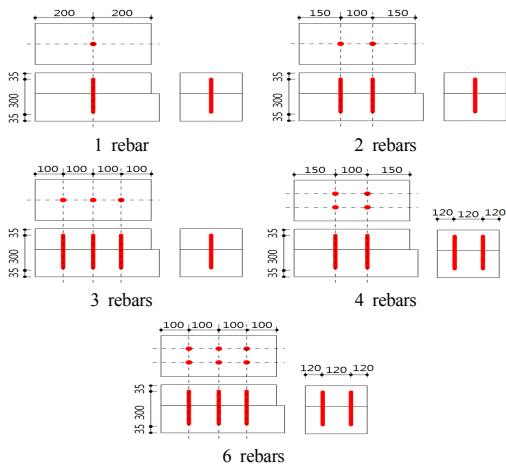


Fig. 3. Disposition of shear rebar



Fig. 4. Indented Surface

2.2 실험 방법

실험은 하중용량 2000kN UTM을 이용하여 정적하중을 적용하여 수행하였다. 하중은 변위제어로 하여 가력 속도 0.5 mm/min로 실시하였고, 변위 5 mm이상 발생 후에 1 mm/min로 가력하였다.

전단실험체는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 재하판이 상부 블록을 재하하여 연결면에서 미끄러짐이 발생하도록 하였다. 실험체 전도를 막기 위해 수직판을 두고 실험체와 수직판 사이에 롤러 장치가 있는 지지판을 두어 고정 지그와 실험체간의 마찰이 없도록 하였다.

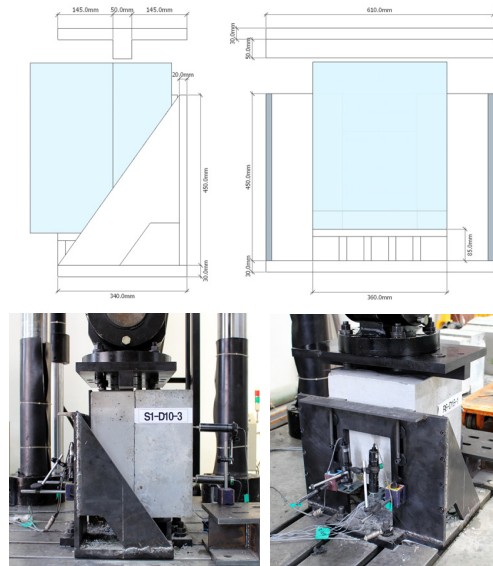


Fig. 5. Views of Shear Test

2.3 실험 결과

각 실험체의 실험결과는 Table 2에 보인 바와 같다. 각 실험변수별로 실험체를 3개씩 제작하였고, 그 평균값을 취하여 설계기준의 전단강도 평가식의 계산값과 비교

하였다. Tabel 2에서 각 실험체별로 3회의 전단실험을 수행한 결과가 큰 편차를 보이는 경우도 있었으며, 특히 전단보강비가 작은 경우에 편차가 큰 것으로 나타났다. 이는 전단보강비가 작은 경우에는 경계면 요철에 의한 저항이 전단강도에 주로 기여하고, 이 경우에는 요철면 지압에 의한 급격한 파괴가 주된 파괴모드로 나타나 전단강도 편차가 크게 나타났다. 단, 본 연구에서는 실험체별 실험수행 횟수를 3회로 하여 편차가 큰 실험결과를 제외하여 분석할 수 없는 상황으로서 실험체별 전단강도 실험값을 평균하여 비교하는 것으로 하였다.

Fig. 6은 전단철근의 보강비에 대한 전단강도를 보인 것으로서 보강비가 4.0 보다 작은 경우는 연결면에서 전단파괴가 발생하였으나, 보강비가 4 이상인 경우는 콘크리트 블록 지지면에서 압괴가 함께 발생하여 예상한 전단강도에 미치지 못하는 결과를 보였다. 보강비 4 이하인 경우만 보면 거의 모든 실험체가 설계기준의 평가식

에 의한 계산값보다 큰 전단강도를 갖는 것으로 나타났다.

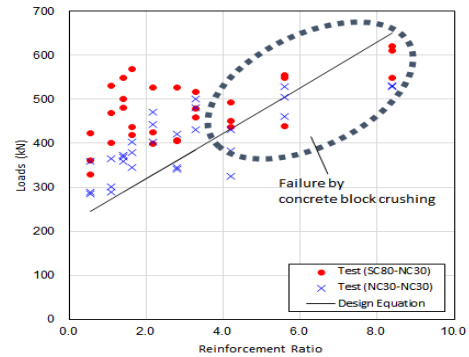


Fig. 6. Shear forces to reinforcement ratio

Fig. 7은 실험체 변수별로 설계기준의 평가식과 비교한 것으로서 보강비 4를 넘는 경우를 제외하고 설계기준

Table 2. Strength prediction models for perfbond rib

Specimen	Surface Condition	Concrete Strength		Dia. of Rebar (mm)	no. of Rebar	Reinforcement ratio (As/Ac)	Measured Shear Force (kN)				Stress (MPa)		(1)/(2)
		Upper Layer	Bottom Layer				A	B	C	Ave.	Test (1)	Eq. (2)	
S1-D10	Smooth	SC80	NC30	10	1	0.55	152.6	180.5	238.8	190.6	1.3	1.18	1.12
S2-D10				10	2	1.09	94.4	410.1	221.3	315.7	2.2	1.31	1.67
S3-D10				10	3	1.64	250.3	300.7	222.8	257.9	1.8	1.44	1.24
S4-D10				10	4	2.18	281.4	370.8	206.3	286.2	2.0	1.57	1.26
S6-D10				10	6	3.27	340.5	410.1	395.0	381.9	2.7	1.84	1.44
S1-D16				16	1	1.40	499.4	176.4	233.3	303.0	2.1	1.39	1.52
S2-D16				16	2	2.79	337.7	370.0	400.4	369.4	2.6	1.72	1.49
S3-D16				16	3	4.19	195.8	279.8	199.5	225.0	1.6	2.06	0.76
S4-D16				16	4	5.59	357.6	418.3	283.5	353.1	2.5	2.39	1.03
S6-D16				16	6	8.38	422.7	402.2	438.5	421.1	2.9	3.06	0.96
R1-D10	Indented	SC80	NC30	10	1	0.55	423.2	360.1	329.8	371.0	2.6	1.70	1.52
R2-D10				10	2	1.09	400.0	468.5	531.7	466.7	3.2	1.89	1.71
R3-D10				10	3	1.64	418.1	569.1	436.2	474.5	3.3	2.09	1.58
R4-D10				10	4	2.18	424.4	527.2	398.3	450.0	3.1	2.29	1.37
R6-D10				10	6	3.27	478.1	458.6	516.6	484.4	3.4	2.68	1.26
R1-D16				16	1	1.40	481.6	500.6	548.8	510.3	3.5	2.00	1.77
R2-D16				16	2	2.79	406.4	405.8	527.1	446.4	3.1	2.51	1.24
R3-D16				16	3	4.19	436.4	450.1	493.7	460.1	3.2	3.01	1.06
R4-D16				16	4	5.59	438.4	548.6	555.5	514.2	3.6	3.51	1.02
R6-D16				16	6	8.38	621.6	549.3	610.4	593.8	4.1	4.52	0.91
NR1-D10	Indented	NC30	NC30	10	1	0.55	288.4	359.6	284.3	310.8	2.2	1.70	1.27
NR2-D10				10	2	1.09	366.0	289.4	301.9	319.1	2.2	1.89	1.17
NR3-D10				10	3	1.64	380.0	344.5	402.1	375.5	2.6	2.09	1.25
NR4-D10				10	4	2.18	471.5	442.9	403.9	439.4	3.1	2.29	1.34
NR6-D10				10	6	3.27	501.4	481.6	431.7	471.6	3.3	2.68	1.22
NR1-D16				16	1	1.40	369.0	373.0	358.1	366.7	2.5	2.00	1.27
NR2-D16				16	2	2.79	340.5	345.9	421.8	369.4	2.6	2.51	1.02
NR3-D16				16	3	4.19	430.9	325.0	383.3	379.7	2.6	3.01	0.88
NR4-D16				16	4	5.59	505.5	460.6	529.5	498.5	3.5	3.51	0.99
NR6-D16				16	6	8.38	529.6	530.5	-	530.1	3.7	4.52	0.82

평가식에 비해 20%~40%의 전단강도를 갖는 것으로 나타났고, 특히 NC30-SC80으로 콘크리트 강도가 증가한 이종강도 콘크리트 연결부에 요철면 처리를 한 경우에는 40% 내외의 전단강도를 보이는 것으로 나타났다. NC30-NC30으로 동일 압축강도의 보통 콘크리트 연결부에 요철처리를 한 경우에도 설계기준 평가식에 비해 20% 내외로 큰 전단강도를 보였다.

Fig. 8은 연결면 조건과 이종강도 조건에 대해서 각각 비교한 것으로서 연결면에 요철처리를 함으로써 면처리를 하지 않은 경우보다 전단강도가 약 40% 내외 증가하며, 동일하게 요철면 처리를 하더라도 콘크리트 블록간 압축강도 차이에 의해 전단강도가 약 20% 내외 차이를 보임을 알 수 있었다.

3. 결론

본 연구에서는 압축강도 80 MPa 및 30 MPa의 이종강도 콘크리트 연결부에 대해서 연결부 계면조건에 따른 전단강도 평가를 위해 전단실험을 수행하고, Eurocode

에서 제시하는 평가식과 비교하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 압축강도 30 MPa로 동일한 강도를 갖는 블록 연결부(NC30-NC30)의 전단강도는 평가식을 이용한 계산값에 비해 평균적으로 약 20% 정도 상회하는 강도를 보였다. 반면, 80 MPa와 30 MPa로 강도를 달리하는 블록 연결부(SC80-NC30)는 평가식 계산값에 비해 실제 전단강도는 약 40% 이상 상회하는 것으로 나타났다.
- (2) SC80-NC30 시험체의 경우, 연결부를 요철면으로 처리함으로써 연결부 면처리를 하지 않은 경우에 비해 전단강도가 약 40% 내외로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 요철부의 맞물림 효과에 의해 전단마찰력이 증가하기 때문이며 요철면 처리에 의해 전단저항력이 증가함을 고려하여 전단철근량을 감소시키는 등의 대체효과를 고려할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 연결부에 요철처리를 두었을 때, 양측 콘크리트를 30 MPa의 동일한 강도로 한 경우에 비해 한 쪽

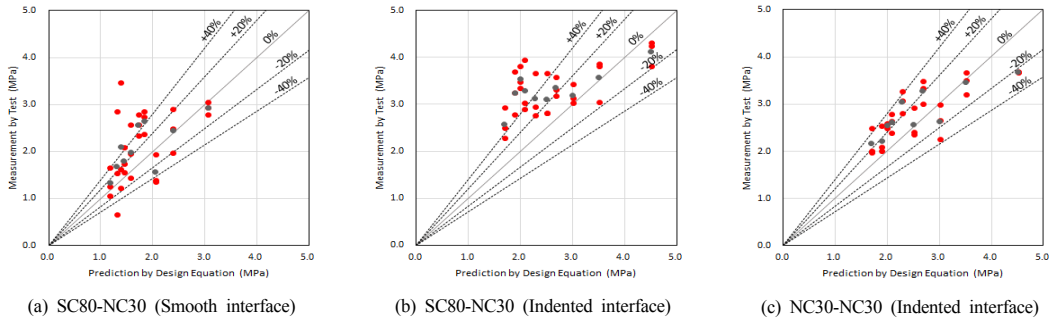


Fig. 7. Comparison of test results and prediction by design equation

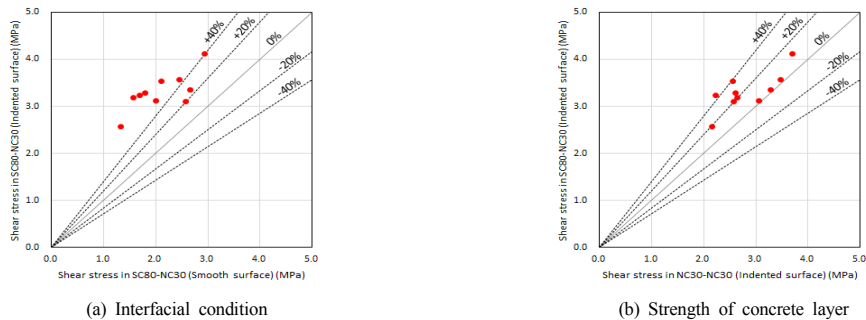


Fig. 8. Comparison of shear strength with respect to design variation

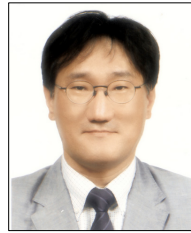
부재의 콘크리트 강도를 80 MPa로 증가시킨 경우의 전단강도가 약 20% 증가하는 것으로 나타났다. 이종강도 콘크리트 층의 전단강도는 두 층간의 강도 차이에 따라 증감이 있을 것으로 예상되며, 이종강도를 갖는 콘크리트 층의 전단강도는 압축강도가 증가함에 따라 전단강도가 증가하여 설계식과는 차이를 보인다. 따라서 설계기준의 평가식에 어떤 강도값을 적용할 것인지가 규정되어야 하며 보완 연구를 통해 이종강도 연결부의 강도평가를 위한 설계식이 수정 제안되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Hanson, N. W., Precast-Prestressed Concrete Bridges 2. Horizontal Shear Connections. Journal of the PCA Research and Development Laboratories, no. 2 (May), pp. 38-58, 1960.
- [2] Birkeland, H. W.; Birkeland, P. W., Connections in Precast Concrete Construction. Journal of the ACI, Proceedings, 63, no. 3 (March), pp. 345-368, 1966.
- [3] Mattock, A. H.; Hawkins, N. M., Shear transfer in reinforced concrete - recent research. Precast/Prestressed Concrete Institute, PCI Journal, vol. 17, no. 2 (March-April), pp. 55-75, 1972.
- [4] Walraven, J. C.; Reinhardt, H. W., Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading. Heron, 26, no. 1A, 1981.
- [5] Loov, R. E.; Patnaik, A.K., Horizontal Shear Strength of Composite Concrete Beams with Rough Interface. PCI Journal, vol. 39, no. 1 (January/February), pp. 48-69, 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15554/pci.01011994.48.69>
- [6] Júlio, Eduardo; Branco, Fernando; Silva, Vítor, Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface. Construction and Building Materials, vol. 18, no. 9 (November), pp. 675 - 681, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.023>
- [7] Júlio, Eduardo; Santos, Pedro, Comparison of Methods for Texture Assessment of Concrete Surfaces. ACI Materials Journal (September - October), pp. 433 - 440, 2010.
- [8] EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1: General Rules and Rules for buildings. European Committee for Standardization, 2002.

강 재 윤(Jae-Yoon Kang)

[정회원]



- 1995년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (토목구조 석사)
- 2012년 8월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (토목구조 박사)
- 1995년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구위원

<관심분야>

합성구조, 구조재료, 구조해석

박 종 섭(Jong-Sup Park)

[정회원]



- 1995년 2월 : 명지대학교 대학원 토목공학과 (토목구조 석사)
- 2007년 8월 : 명지대학교 대학원 토목공학과 (토목구조 박사)
- 1993년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 연구위원

<관심분야>

유지관리, FRP, 구조재료

정 우 태(Woo-Tai Jung)

[정회원]



- 2000년 2월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (토목구조 석사)
- 2009년 8월 : 명지대학교 대학원 토목환경공학과 (토목구조 박사)
- 2000년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조융합연구소 수석연구위원

<관심분야>

FRP 보강, FRC 포장, 구조재료

금 문 성(Moon-Seoung Keum)

[정회원]



- 2011년 2월 : 국민대학교 대학원
토목공학과 (토목구조 석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 한국건설기
술연구원 구조융합연구소 연구원

<관심분야>

FRP 보강, 구조재료