

개방형 유공강판 전단연결재로 보강된 강관말뚝머리의 휨거동에 관한 유한요소 해석

김영호¹, 강재윤², 유승운^{3*}

¹(주)지승컨설턴트 기술연구소, ²한국건설기술연구원 구조교량연구실, ³관동대학교 토목공학과

Finite Element Analysis for Bending Performance of Steel Pipe Pile Cap with the Open Perforated Shear Connector

Kim, Young-Ho¹, Kang, Jae-Yoon² and Yoo, Seung-Woon^{3*}

¹Jiseung Consultant, ²KICT,

³Dept. of Civil Engineering, Kwandong University

요 약 합성구조에서 강재와 콘크리트 사이의 경계면에 효과적인 응력전달과 합성거동을 유도하기 위하여 스티드, 채널, 유공강판 등이 사용된다. 많은 연구자들이 여러 종류의 전단연결재의 특성을 개선시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 본 연구에서는 말뚝구조물과 확대기초와의 합성을 위해 개방형 유공강판 전단연결재로 보강된 강관 말뚝머리의 휨거동을 분석하였다. 개방형 유공강판 전단연결재로 보강된 강관말뚝의 휨거동을 규명하고, 다양한 변수해석에서 요구되는 정보를 얻고자 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 비선형 유한요소 해석을 수행하였다.

Abstract Various kinds of shear connector such as headed stud, channel, perforated steel plate and others are commonly used to transfer stress and present composite performance in composite structures, and many researches have been conducted to improve the characteristics of different types of shear connectors. It is focused in this study on the bending performance of steel pipe pile cap with the open type perforated shear connector for the composite connection to the spread footing. Nonlinear analysis was conducted, using ABAQUS, a finite element analysis program, to obtain information for determining the characteristics of the structure and to allow various parametric analysis for bending performance of steel pipe pile cap with the open perforated shear connector.

Key Words : Perfobond, perforated steel shear connector, Steel pipe pile cap, Composite action, Finite element analysis

1. 서론

말뚝기초는 지반 지지력이 충분하지 않은 경우 기초하부에 말뚝을 근입하여 상부구조물로부터 전달되는 하중을 안전한 지반까지 전달하는 구조이다. 따라서 상부구조물과 말뚝 간에는 결합부가 존재하게 되고, 이러한 결합부에 대해서 국내외 여러 설계기준에서는 설계 및 시공과 관련하여 다양한 상세를 규정하고 있으며, 도로교설계기준[1]과 기초구조물설계기준[2]에는 결합부에서 발생

하는 모든 응력에 저항할 수 있도록 안전하게 설계, 시공하도록 정하고 있다. 국내외 설계기준에서 결합부 보강방법은 크게 강결합(rigid connection)과 힌지결합(hinge connection)로 나눌 수 있는데, 말뚝과 확대기초 결합부를 원칙적으로 고정으로 설계하도록 규정하고 있는 도로교설계기준 등을 고려할 때 토목구조물의 경우 강결합 보강방법을 많이 적용하고 있다. 강결합 보강방법은 그림 1에서 보는 바와 같이 두가지 방법으로 구분되며, 확대기초 구조물 시공시 하부철근 배근이 용이한 강결합 보강

본 논문은 산학협동재단 학술연구비지원사업으로 수행되었음.

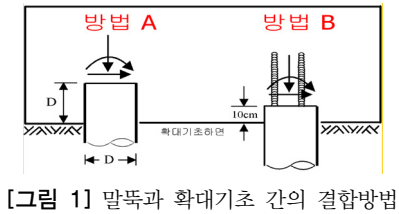
*교신저자 : 유승운(swyoo@kd.ac.kr)

접수일 10년 06월 09일

수정일 (1차 10년 07월 16일, 2차 10년 09월 01일)

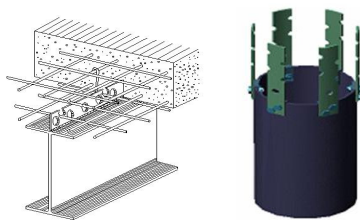
게재확정일 10년 10월 15일

방법B가 현장에서 가장 많이 사용되고 있다. 이러한 강결합 보강방법B에는 구조성능 및 시공성 개선을 고려하여 여러 가지 시공상세가 제안 되었으나, 지금까지의 보강법은 수직이형철근의 정착길이 확보 문제와 강관내부의 토사굴착 문제 등으로 인해 시공성 및 경제성이 저하되는 문제점을 갖고 있었다[3-6].



[그림 1] 말뚝과 확대기초 간의 결합방법

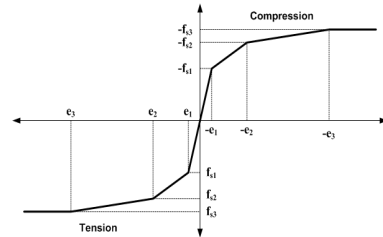
강관말뚝을 사용할 경우에 하부구조물인 확대기초와 말뚝 간의 결합방법을 효과적으로 처리하고자, 기존 수직이형철근을 사용하지 않고 강관에 구멍을 뚫은 퍼포본드(perforated rib plate, 이하 유공강판이라 칭함)를 활용하여 결합하는 방법이 최근에 연구되고 있다 [7-9]. 여기서 퍼포본드, 즉 유공강판은 합성구조에서 이종재간의 합성작용을 위한 전단연결재(shear connector)의 한 종류로서 1980년대 후반에 개발되어 최근 각종 교량 구조물에 기존 스티드(stud) 대신 유공강판 연결재를 사용하고 있다[10,11]. 그림 2는 교량 바닥판 연결부에 적용한 경우와 본 연구의 말뚝머리 보강에 적용한 개방형 퍼포본드 전단연결재의 개념도를 나타내고 있다.



[그림 2] 퍼포본드 전단연결재 및 개방형 유공강판 말뚝머리보강 개념도

본 연구는 구조물의 확대기초와 강재말뚝 간의 강결합을 위한 말뚝머리보강방법 기술로서 이종재 간의 퍼포본드 전단연결재인 개방형 유공강판 연결재와 관통 보강철근(dowel bar)을 활용하여 강관말뚝과 확대기초 간을 결합시키고, 이에 대한 구조적 성능 및 거동 특성을 규명하고자 수평하중에 대한 휨 저항성능에 대해 수치해석을 수행하고 본 연구자들이 수행한 실험결과와 비교분석을 하고자 한다. 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS[12]

를 이용하여 3차원 해석 모델을 구성, 비선형해석을 수행하였다. 비선형 해석과 관련하여 강관 및 콘크리트의 대변형에 따른 기하학적 비선형성과 강재 및 콘크리트의 재료 비선형을 동시에 고려하였으며, 재료 물성은 재료실험을 통하여 얻어진 기본 물성을 바탕으로 이론적인 응력-변형률 관계식을 적용하여 해석에 반영하였다.



[그림 3] 강관의 응력-변형률 관계

[표 1] 강관의 응력-변형률 관계

응력 (MPa)	변형률		소성변형률		
위치	값	위치	값	위치	값
f _{s1}	160	e1	0	e1	0
f _{s2}	320	e2	0.03	e2	0.0284
f _{s3}	440	e3	0.3	e3	0.2978

2. 유한요소해석 모델

2.1 강관의 재료 특성

강재는 실제적인 응력-변형률 관계를 모사하기 위하여 그림 3에 보인 바와 같이 3중 선형의 탄소성 재료로 가정하고, 인장 및 압축 거동에 대해서 동일하게 적용하였다. 강재의 탄성계수는 200GPa으로 하였고, 각 변곡점에서의 응력 및 소성변형률은 표 1의 값으로 하였다.

2.2 콘크리트의 재료 특성

보통 콘크리트의 경우, 압축강도로부터 응력-변형률 관계를 유도하는 방법들이 많이 있으나, 본 연구에서는 Carreira and Chu[13]가 제안한 관계식을 이용하여 콘크리트의 응력-변형률 관계를 설정하였다.

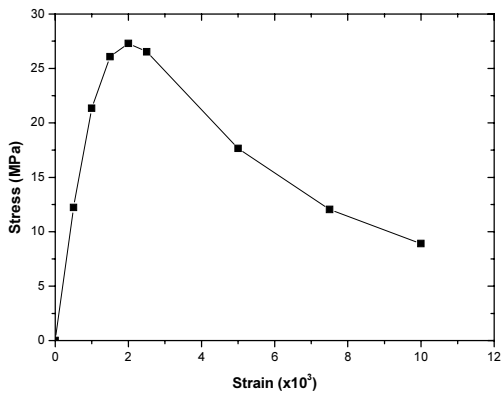
제안식은 다음과 같다.

$$\sigma_c = \frac{f'_c \gamma (\epsilon_c / \epsilon'_c)}{\gamma - 1 + (\epsilon_c / \epsilon'_c)^\gamma} \quad \gamma = \left| \frac{f'_c}{32.4} \right|^3 + 1.55$$

여기서, σ_c ; 콘크리트 압축 응력

ϵ_c ; 콘크리트 변형률
 f'_c ; 콘크리트 공시체의 압축강도
 ϵ'_c ; f'_c 에 대응하는 변형률(0.002)

상기의 관계식을 이용하여 콘크리트 재료의 응력-변형률 관계를 유도한 결과를 그림 4에 나타내었다. 여기서 $0.4f'_c$ 까지를 선형탄성한계로 가정하였고, 그 이상의 응력상태에 대해서 소성 변형률을 적용하였다. 콘크리트의 탄성계수(EC)는 $4,700\sqrt{f'_{ck}}$ 를 적용하여 25GPa으로 하였다[1]. 콘크리트의 인장응력-변형률 관계는 일축 압축 응력에 대한 일축 인장응력의 비를 0.0836으로 가정하였다.



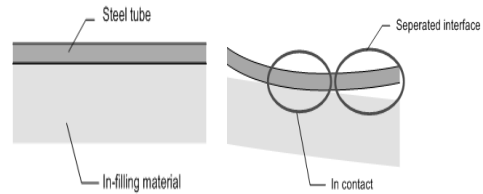
[그림 4] 콘크리트의 응력-변형률 관계

2.3 해석모델 및 경계조건

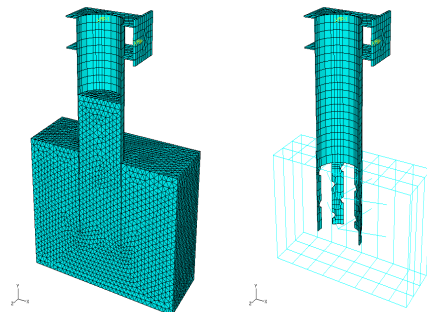
수평하중에 의한 휨거동 해석을 위해 콘크리트 블록의 모델링에는 프로그램에서 제공하는 10절점 4면체요소 (10-node modified quadratic tetrahedron, C3D10M)를 사용하였고, 강관 및 유공강관의 모델링에는 8절점 솔리드 요소(8-node linear brick, C3D8R)를 사용하였다. 철근은 2절점 트러스요소(2-node linear 3D truss, T3D2)를 사용하여 콘크리트 블록내에 매립되는 조건(embedded constraint condition)을 적용하였으며, 강관 및 유공강관과 콘크리트 블록 간의 상호작용은 기준 인발 및 압발실험 매개변수 연구[9]와 유사하게 접촉 마찰 조건을 적용하였다. 해석모델은 대칭성을 고려하여 1/2모델로 하였다.

강관 또는 유공강관 모델과 콘크리트 블록 모델간의 경계조건은 프로그램에서 제공하는 컨택조건(contact interaction property)를 적용하였으며, 이 접촉조건에서 접촉면에 수직한 방향에 대한 접촉응력-간격 조건은 하드컨택(hard contact)으로 하였다. 이 조건은 접촉면 간의

간격이 일정한 값보다 작아지면 접촉된 것으로 판정하여 완전부착과 같이 거동하게 되며, 그림 5과 같이 접촉후의 응력 상태 및 간격조건에 따라 접촉면을 구성하는 요소 간의 간격이 다시 벌어지게 되면 접촉면이 분리되는 조건을 적용하였다. 접촉면과 평행한 방향으로의 페널티 마찰조건(penalty friction formulation)을 적용하였으며, 이때 마찰계수 μ 는 0.5를 적용하였다. 그림 6는 구조해석 모델의 예로서 휨 실험체의 해석모델 구성과 요소 분할을 보인 것이다.



[그림 5] 하중재하에 따른 경계조건 변화



[그림 6] 말뚝머리 해석 모델

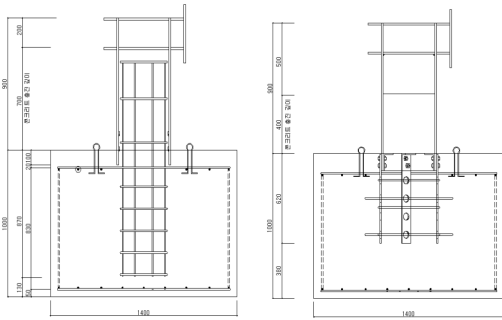
3. 휨 실험체 유한요소 해석

3.1 해석변수 설정

본 해석연구에서는 설계기준에 규정된 말뚝머리 보강 방법과 유공강관을 이용한 강관말뚝 머리보강 방법의 휨 하중에 대한 내력 및 거동 특성을 실험 결과와 비교 평가 하였다. 기존 보강방법에 대해서는 수직철근 보강 실험체 (PPM-10SB-Y)에 대해서 충전깊이 700mm를 적용하였고, 본 연구에서 제안하는 개방형 유공강관 전단연결재 보강 실험체에 대해서는 충전깊이를 200mm (=0.5D) 및 400mm (=1.0D)를 적용하여 해석을 수행하였으며, 해석에서는 L형강의 배치를 무시하였다.

[표 2] 휨거동 해석 대상 구분 및 해석변수

구분	강관말뚝머리 보강방법	L형강	콘크리트 충전깊이
PPM-10 SB-Y	수직 철근	-	700mm ($\geq 1.0D$)
PPB-05 PU-3A	유공강 판(개방형)	3	200mm ($=0.5D$)
PPB-10 PU-3A			400mm ($=1.0D$)



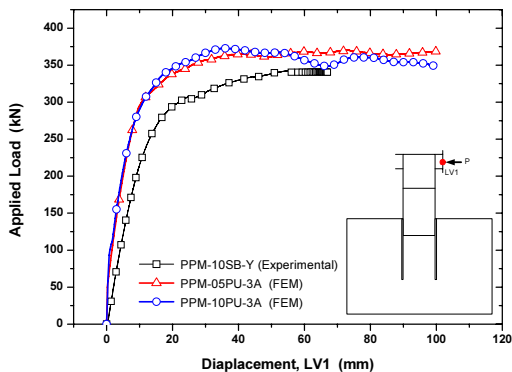
(a) 철근 보강 (b) 유공판 보강

[그림 7] 휨 실험체 상세

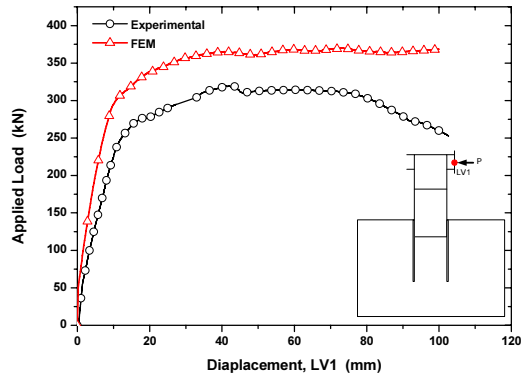
3.2 휨거동 해석결과

[표 3] 휨거동 실험체 실험결과 및 해석결과 비교

구분	Pu (kN)		해석치/실험치
	실험	해석	
PPM-10SB-Y	342.4	-	-
PPB-05PU-3A	319.2	370.2	1.16
PPB-10PU-3A	325.9	372.7	1.14



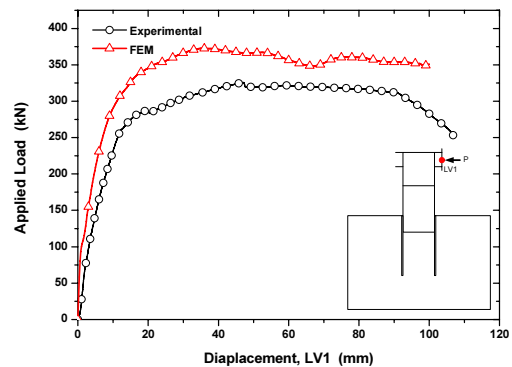
[그림 8] 기존철근보강 실험결과와 개방형 유공강판 실험체 수치해석 결과 비교



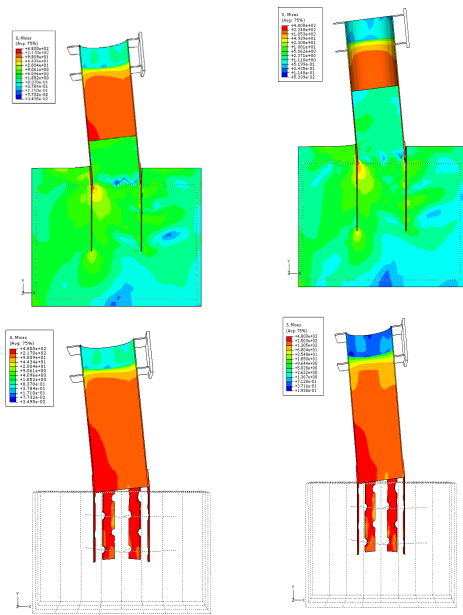
[그림 9] PPB-05PU-3A 실험체의 하중-변위 관계

지름 406mm의 강관을 적용한 머리보강 실험체에 대한 휨거동 해석결과, 강관내 콘크리트 충전깊이를 200mm($=0.5D$) 및 400mm($=1.0D$)로 달리한 개방형 유공강판 보강 실험체의 최대 휨내력은 각각 370.2kN 및 372.7kN으로 나타났으며, 충전깊이와 무관하게 거의 동일한 휨내력을 보였다.

해석결과를 표 3에 보인 바와 같이 각각의 실험체에 대한 재하실험 결과에 비해 약 15% 상회하는 값으로 나타났으며, 시방서에서 제안하는 방법을 적용한 머리보강 실험체(PPM-10SB-Y 실험체)의 실험결과에 비하면 약 8% 상회하는 것으로 나타났다. 설계기준에서는 강관말뚝과 확대기초간의 충분한 합성력을 확보하기 위하여 강관지름 이상의 충전 콘크리트 깊이를 확보하도록 규정하고 있으나 해석결과로부터 개방형 유공강판 머리보강 방법의 경우에는 충전깊이를 1/2로 감소시켜도 내력저하가 나타나지 않았으며, 이는 6개의 유공강판을 강관과 직접 연결 배치함으로써 이에 둘러 쌓인 콘크리트 블록과 충분한 합성거동을 확보할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.



[그림 10] PPB-10PU-3A 실험체의 하중-변위 관계



[그림 11] PPB-05PU-3A
응력 분포

[그림 12] PPB-10PU
-3A 응력
분포

본 연구자들이 수행한 실험결과[7]에 의하면 콘크리트 블록 상면의 강관 말뚝머리 연결부에서 하중가력방향의 직각방향으로 발생하기 시작한 균열이 하중의 증가와 함께 콘크리트 블록 측면의 수직균열로 진전되는 양상을 보였으며, 이 후 콘크리트 블록 상면의 강관말뚝머리 연결부에서는 추가적으로 하중방향과 평행한 방향의 균열과 함께, 말뚝이 전도되는 방향의 연결부 주변 콘크리트에서는 국부적인 파괴현상이 발생하였다. 해석결과에 의하면, 실험체의 파괴는 충전 콘크리트와 콘크리트 블록 경계면에서의 휨파괴가 시작된 이후에, 강관 전면부 콘크리트 블록의 지압파괴와 강관 후면부에 배치된 개방형 유공강관의 인장파괴가 동시에 진행되어 파괴에 이르는 것으로 나타났다. 이러한 파괴양상에 따른 응력 분포를 그림 11, 12에 나타내었다.

4. 결론

본 연구는 개방형 유공강관 전단연결재로 보강된 강관 말뚝머리 연결부의 수평하중에 대한 휨저항 성능 및 거동특성을 실험결과와 비교 분석하기 위해 유한요소 해석을 실시하였다. 또한 현행 설계기준에서 제시하고 있는 강관말뚝머리 보강방법(강관내 2단 걸림턱 설치, 이형철

근으로 수직보강)을 적용한 경우와 비교 분석하였으며 요약하면 다음과 같다.

- 1) 해석결과 본 연구의 개방형 유공강관 머리보강 방법의 경우 강관내의 콘크리트 충전깊이를 1/2로 감소시켜도 내력저하가 나타나지 않았다.
- 2) 개방형 유공강관 전단연결재로 보강한 강관말뚝머리 연결부의 휨거동의 해석결과는 하중-변위곡선의 전체적인 형태는 유사하게 추정하고 있으나, 극한 하중은 해석결과가 실험결과에 비해 15%정도 크게 나오고 있다.
- 3) 일반적으로 유한요소 해석의 경우 요소의 구성방법이나 재료모델에 따라 실험결과 보다 크게 또는 적게 나오는 경향이 있으나 본 연구의 경우 높게 나오고 있다. 추후 요소의 세분화, 재료상수 값에 대한 매개변수 연구를 통한 추가적인 연구를 수행할 예정이다.
- 4) 본 연구는 본 연구자들이 제안한 유공강관 전단연결재의 여러 가지 형상, 유공의 모양, 위치 및 크기, 강관의 크기효과 등의 매개변수 해석을 위한 기초적인 연구이며, 앞으로 제안할 유공강관 전단연결재 형태 및 유공 결정에 기초적인 도구로 활용하고자 한다.

참고문헌

- [1] 건설교통부, 도로교설계기준, 2005.
- [2] 한국지반공학회, 구조물기초설계기준, 1997.
- [3] 박영호, “강관말뚝의 볼트식 머리보강 최적화 설계법과 프로그램 개발”, 대한토목학회 논문집, 제20권 제3호, pp291-303, 2000.
- [4] 유성근, 박종면, 박대용, 김영호, 강원호, “강관 말뚝 기초 두부 연결부의 합성거동에 대한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, 제15권 제2호, pp288-296, 2003.
- [5] 윤일로, 홍기남, “강관말뚝 기초 두부 연결부의 압축거동에 관한 연구”, 한국산업응용학회 논문집, 제9권 제3호, pp183-190, 2006.
- [6] 이홍길, 오세욱, “흑타입 말뚝두부보강 기초의 안정성 평가”, 한국지반환경공학회 논문집, 제8권 제3호, pp41-49, 2007.
- [7] 구현분, 김영호, 강재윤, “유공강관 전단연결재로 보강된 강관말뚝머리의 구조 성능 평가”, 대한토목학회 논문집, 제28권 제6호, pp843-851, 2008.
- [8] 김영호, “강관말뚝 머리결합부의 미끄럼 방지턱에 관한 하중전달 매카니즘 연구”, 한국구조물진단학회 논문집, 제8권 제1호, pp221-229, 2004.

[9] 김영호, 강제윤, 유승운, “개방형 퍼포본드로 보강된 강관말뚝머리의 인발 및 압발 거동에 관한 매개변수 해석”, 대한토목학회 논문집, 제29권 제6A호, pp661-669, 2009.

[10] Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. "A Parametric Study of Perfobond Rib Shear Connectors", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.121, pp614-625, 1994.

[11] Valente, I. and Cruz, P.J.S. "Experimental Analysis of Perfobond Shear Connection Between Steel and Lightweight Concrete", Journal of Constructional Steel Research, Vol.60, pp465-479, 2004.

[12] Abaqus, Abaqus user's manual, 2005.

[13] Carreira, D.J. and Chu, K.H, "Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Tension", ACI Journal, Vol.83, No.1, pp21-28, 1985.

유 승 운(Seung-Woon Yoo)

[정회원]



- 1985년 2월 : 연세대학교 공과대학 토목공학과(공학사)
- 1987년 2월 : KAIST 토목환경공학과(공학석사)
- 1991년 2월 : KAIST 토목환경공학과(공학박사)
- 2005년 7월 ~ 2006년 8월 : 위스콘신대학교 방문교수
- 1995년 3월 ~ 현재 : 관동대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 신소재 토목구조응용

김 영 호(Young-Ho Kim)

[정회원]



- 2000년 8월 : 동국대학교 건축공학과 건축구조전공(졸업,공학박사)
- 2007년 1월 ~ 현재 : 세진특허법률사무소 부소장
- 2008년 7월 ~ 현재 : (주)지승권설턴트 기술연구소 소장(겸직)

<관심분야>

건축구조, 강구조, 교량구조, 건설특허공법개발

강 재 윤(Jae-Yoon Kang)

[정회원]



- 1995년 2월 : 동국대학교 공과대학 토목공학과(구조공학석사)
- 2004년 2월 : 동국대학교 토목공학과 구조공학(박사수료)
- 1995년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 구조교량연구실 수석연구원

<관심분야>

토목구조, 강구조, 콘크리트구조, 구조해석