



새로운 형식의 강-콘크리트 합성구조용 전단연결 시스템: Y형 Perfobond rib 전단연결재

A New Type of Shear Connection System for Steel-concrete Composite Structures: Y-Type Perfobond Rib Shear Connector

김상호 Sang-Hyo Kim
연세대학교 사회환경시스템
공학부 교수

박세준 Sejun Park
연세대학교 스마트공간연구원
Post-Doc

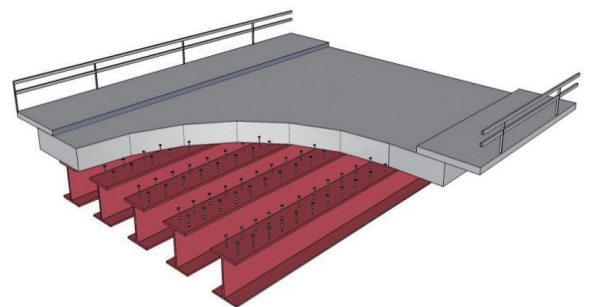
정치영 Chi-Young Jung
부산대학교 지진방재연구센터
선임연구원

1. 머리말

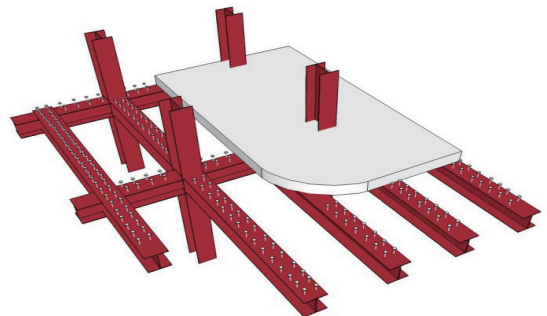
최근 구조 재료의 고강도화·고인성화 및 신재료의 개발 등으로 인하여 각 구조재료의 단점을 보완하고, 장점을 극대화하여 이종재료들을 재료적·역학적으로 결합하는 강-콘크리트 합성구조의 사용이 증가하고 있다. 합성구조는 전단연결부에 의해서 서로 다른 두 재료가 합성되어 강성과 강도를 증가시킨 형태의 구조물을 의미하는 것으로, 경제성·시공성 및 구조적 안전성 측면에서 매우 우수한 구조 형식이다. 강-콘크리트 합성구조는 인장에 강한 강재와 압축에 강한 콘크리트의 서로 다른 두 재료적 장점을 극대화한 것으로 경제적이고 합리적인 단면의 구성이 가능하다. 이러한 강-콘크리트 합성구조는 교량뿐만 아니라 고층 건축물의 기둥, 보-기둥 접합부, 바닥판 그리고 플랜트 등으로 이용 범위가 확대되고 있다.

두 재료의 경계면에 외력에 의한 상대변위가 발생하게 되면 부재의 강도와 강성이 감소하게 된다. 이에 현재 강-콘크리트 합성구조에는 두 부재간의 효과적인 응력전달과 완전 합성거동을 위하여 기계적 연결방식 중 하나인 전단연결재를 사용한다. 강-콘크리트 합성구조를 형성하는데 있어 중요한 역할을 하는 전단연결재는 서로 다른 성질을 가진 재료인 강재 및 콘크리트의 수직 및 수평분리를 막고, 일체거동을 보장하여 두 재료간의 효과적인 응력전달이 이루어질 수 있도록 하는 강-콘크리트 합성구조 성립의 기본 요구조건으로 볼 수 있다. <그림 1>과 같이 강합성 거터와 강재 보-RC 슬래브 구조는 대형 교량과 건축물 등에 널리 쓰이는 대표적인 합성구조이며, 스티드 전단연결재가 주로 사용되고 있다. 현재 국내의 도로교설계기준에서는 스티드(headed stud) 전단연결재의 적용 기준만이 제시되어 있으나 최근 토목·건축 구조물의 형식이 다양화됨에 따라 합성구조에서 요구되는 전단연결재의 형식 역시 다양하게 연구·개발되고 있다.

본 기사에서는 스티드를 포함한 기존의 전단연결재의 종류와



(a) 강합성 거터



(b) 보-기둥 접합부를 포함하는 강합성 프레임 구조

그림 1. 강-콘크리트 합성구조

관련 규준에 관하여 살펴보고, 보다 유리한 전단저항성을 가지는 새로운 형식의 Y형 Perfobond rib 전단연결재의 특징 및 성능에 대하여 소개하고자 한다.

2. 강-콘크리트 합성구조를 위한 전단연결재

2.1 전단연결재의 종류

현재까지 대표적인 전단연결재인 스티드를 포함하여 Perfobond rib, Channel형 등 다양한 형태의 전단연결재들이 개발되어 있다(그림 2). 전단연결재는 연결재의 변형특성에 따라 크게 연성 전단연결재와 강성 전단연결재로 구분할 수 있다. 연성 전단연결재는 연결재의 휨강성 및 전단강성이 비교적 적은 연결재로 연결부의 극한거동 상태에서 연결재 자체가 변형을 일으키며 파단되는 특징을 갖고 있다. 연결재의 변형에 의해 연결부의 파괴거동이 결정되기 때문에 극한상태에서 연성파괴특성을 보인다. 대표적인 연성 전단연결재는 스티드, Loop형, Hook형, Spiral형 전단연결재를 들 수 있다. 스티드 전단연결재는 가장 일반적으로 사용되는 연결재로, 스티드 용접기를 이용하여 신속한 시공이 가능한 장점이 있다.

반대로 강성 전단연결재는 연결재의 휨강성 및 전단강성이 큰 연결재로 연결부의 극한거동 상태에서 연결재에 변형이 거의 발생하지 않는 특성을 갖고 있다. 따라서 연결재의 변형이 아닌 콘크리트부의 지압파괴 및 전단파괴에 의해 연결부의 파괴거동이 결정되고, 취성 파괴 특성을 보이게 된다. Angle, Channel형, Perfobond rib형 전단연결재가 대표적인 강성 전단연결재이다. Angle, Channel형 등의 전단연결재는 극한변형능력이 작고 용접에 시간이 많이 소요되므로 특수한 형태의 합성구조에만 일부 적용되고 있다. Perfobond rib형 전단연결재는 다수의 홈을 가진 판형 연결재로써, 홈 내의 콘크리트 다웰 효과(Dowel effect)와 관통철근의 역학적 특성을 이용하여 좁은 영역에서 높은 전단저항력을 필요로 하는 경우에 사용된다.

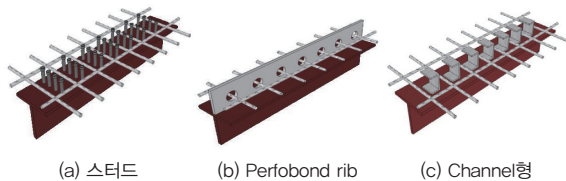


그림 2. 전단연결재의 종류

2.2 관련기준 및 전단강도 평가식

스티드 전단연결재는 시공이 편리하고 경제적이므로 국내외에서 가장 널리 사용되고 있으며, 이에 대한 정적 설계기준 또한 잘 명시되어 있다. 대부분의 설계기준에서 스티드 전단연결재의 전단강도는 콘크리트와 전단연결재의 강도에 관한 식으로 표현되며, 이에 대한 각국의 기준은 <표 1>과 같다. 이외에 현재 미국 AASHTO 설계기준에 Channel형 연결재의 두께와 길이에 따라 전단강도식이 제시되어 있으며, Perfobond rib을 포함한 나머지 연결재들은 실험적·해석적 연구를 통한 경험식들이 각국의 연구자들에 의해 제안되고 있다. 여기서 V_n , Q_n , P_{Rd} 는 개별 스티드의 전단강도(N), d 는 스티드 줄기의 지름(mm), f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도(MPa), E_c 와 E_{cm} 은 스티드(강재) 탄성계수(MPa), A_{sc} 는 스티드 줄기의 단면적(mm²), f_u 는 스티드의 극한인장강도(MPa), h_{sc} 는 스티드 줄기의 길이, 부분안전계수(partial safety factor) γ_V 는 극한한계상태에서 1.25, P_u 는 스티드의 공칭강도(N)이다.

Perfobond rib 전단연결재에 대한 설계강도식은 콘크리트의 할렬강도, 다웰 효과, 횡방향 관통철근의 의한 전단저항 효과에 관한 항으로 Oguejiofor¹⁾와 Medberry²⁾에 의해 식 (1)과 (2)와 같이 제안되었다.

$$Q_u = 4.50 \cdot h_r \cdot f'_c + 0.91 \cdot A_{tr} \cdot f_y + 3.31 \cdot n \cdot d^2 \cdot \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_u = 9 \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{f'_c} + 60 \cdot b_f \cdot L_c + 20 \cdot n \cdot \pi \cdot \sqrt{f'_c} \left(\frac{d}{2}\right) + 0.9 \cdot A_{vf} \cdot f_y \dots\dots\dots (2)$$

표 1. 스티드의 전단강도 설계기준

구분	기준
도로교설계기준	$V_u = 0.4 \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot E_c \leq A_u \cdot f_u$
AASHTO	$Q_n = 0.5 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot E_c \leq A_{sc} \cdot f_u$
Eurocode-4	$P_{Rd} = \alpha \cdot 0.29 \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot E_{cm} \cdot \frac{1}{\gamma_V}$ $\alpha = 0.2 \cdot \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1\right)$ for $3 \leq \frac{h_{sc}}{d} \leq 4$ $\alpha = 1$ for $\frac{h_{sc}}{d} > 4$
BS 5400	$P_{Rd} = 0.8 \cdot \frac{P_u}{1.1} = 0.73P_u$

여기서, Q_u 은 Perfobond rib의 극한전단강도(N), h_r 은 rib의 높이(mm), t 는 rib의 두께(mm), f'_c 는 콘크리트의 압축강도(MPa), A_{sc} 은 횡방향 관통철근의 단면적(mm^2), f_y 는 철근의 항복강도(MPa), n 은 홀의 수, d 는 홀의 지름(mm), b 는 콘크리트 슬래브의 두께(mm), h 는 연결재 하부에서 콘크리트 밑면까지의 높이(mm), b_f 는 강재 플랜지 폭(mm), L_c 는 콘크리트와 강재 사이의 접촉 길이(mm), A_w 는 철근의 단면적(mm^2)이다.

3. Y형 Perfobond rib 전단연결재의 개발

Y형 Perfobond rib 전단연결재는 기존의 평판형 Perfobond rib 전단연결재의 구조적 특성 및 시공성을 보완하여 최근 새롭게 개발된 전단연결재의 형식이다. 관통철근(stirrup)의 배근을 위해 rib의 상단을 U 형태로 제거하여 철근 배근을 위한 충분한 공간을 확보하고, 잔류 rib을 Y 형태로 절곡하여 콘크리트부의 수평 다월효과를 극대화함과 동시에 수직인발저항력을 확보할 수 있는 형식의 전단연결재이다(그림 3, 사진 1). Y형 Perfobond rib 전단연결재는 강재 거더의 플랜지에 용접되어 2차 부재로서 합성작용을 할 수 있을 뿐만 아니라(그림 3-(a)), 복부판 상단을 가공하여 콘크리트에 직접 매입하는 부분 매립형 강합성 구조로도 활용될 수 있다(그림 3-(b)). 본 연결재를 이용한 부분 매립형 방식은(그림 3-(c))와 같은 강복부판 복합 PSC 거더 형식에서 높은 연결성능을 확보하는데 유리할 것으로 보이며, 파형 복부를 갖는 거더에서도 연결성능 확보와 동시에 효과적으로 rib을 배치할 수 있는 장점이 있다.

3.1 Y형 Perfobond rib 전단연결재의 전단저항 및 연성 거동

Y형 Perfobond rib 전단연결재의 설계변수는 크게 기하학적 변수와 재료적 변수로 구분된다. 기하학적 변수로는 개별 절곡된 rib의 형상에 따라 rib의 두께(t), 폭(w), 높이(h)가

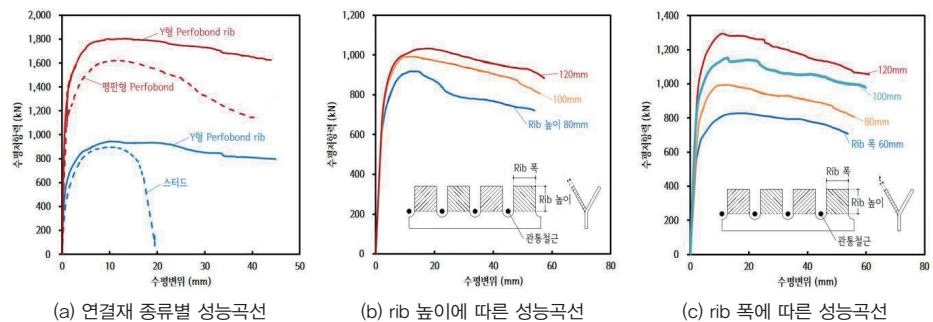


그림 4. 전단연결재 종류별 성능비교 및 Y형 Perfobond rib의 설계변수에 따른 성능비교

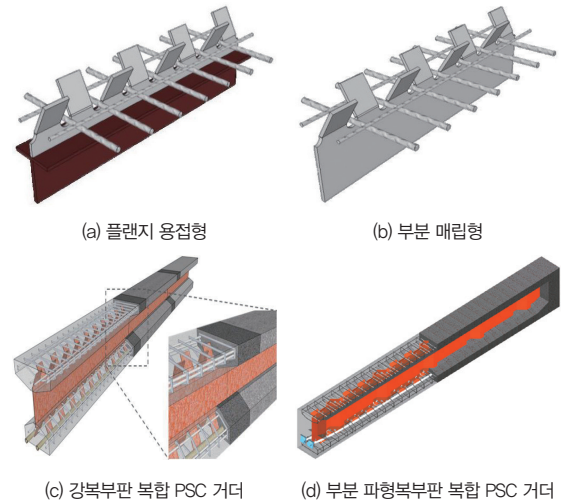


그림 3. Y형 Perfobond rib 전단연결재

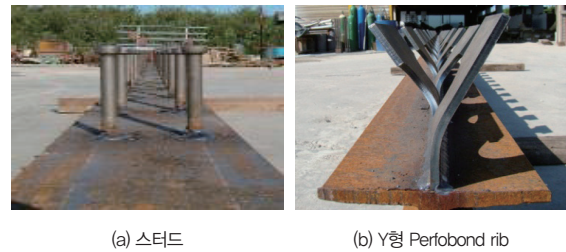


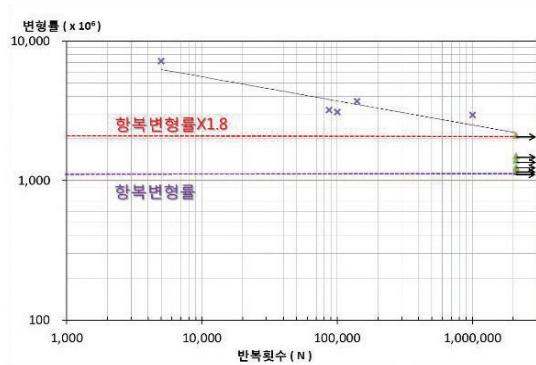
사진 1. 스티드와 Y형 Perfobond rib 전단연결재³⁾

있으며 반원의 형태를 띠는 홀의 직경(d) 그리고 홀에 배근되는 관통철근의 공칭 단면적(A_w) 등이 있다. 재료적 변수는 콘크리트의 압축강도와 관통철근의 항복응력을 들 수 있다. 이러한 설계변수에 대한 다양한 실험적·해석적 연구를 통하여 기존의 스티드 전단연결재와 평판형 Perfobond rib 전단연결재보다 전단저항성능과 연성이 우수함이 확인되었다(그림 4-(a))^{3,4)}. 성능 비교를 위하여 각 연결재들은 동일한 극한강도를 갖도록 설계되었고(평판형 Perfobond와의 비교는 동일한 치수, 즉 rib의 형태만 변화), 각 연결재들이 설치된 동일한 Push-out

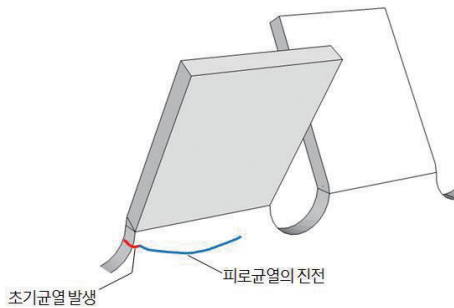
시험체를 이용하여 평가되었다. 또한 Y형 Perfibond rib 전단연결재는 기하학적·재료적 설계변수에 따라 다양한 요구성능에 맞게 설계할 수 있다. 대표적으로 주요 설계변수인 rib의 형상(높이·폭)은 연결 시스템의 전단저항성능 및 연성에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. rib의 폭이 증가할수록 전단저항성능이 크게 증가하며, 높이가 증가할수록 연성이 좋아져 이 형상변수에 대한 영향을 강-콘크리트 합성구조 연결시스템에 적절히 활용하면 구조물의 요구 연결성능 확보에 용이할 것으로 보인다<그림 4-(b, c)>⁵⁾.

3.2 피로성능

Y형 Perfibond rib 전단연결재는 피로 및 잔류강도실험을 통해서도 강-콘크리트 합성구조의 전단연결재로 사용되기 충분한 피로강도를 확보하고 있는 것으로 확인되었다. 강재 rib에 대한 피로실험 결과에 따르면 응력 집중부에서 재료의 항복변형률을 초과하는 수준의 하중으로 210만회 이상 반복 후에도 피로균열이 발생하지 않았다<그림 5-(a)>. 이렇게 높은 피로강도를 가지는 것은



(a) 하중 반복횟수-변형률 관계



(b) 피로균열의 진전 양상

그림 5. Y형 Perfibond rib 전단연결재의 피로실험 결과

피로하중에 의해 발생하는 인장변형이 Y형 Perfibond rib을 절곡하는 과정에서 발생한 소성압축변형에 의해 상당부분 상쇄되기 때문인 것으로 보인다. 피로균열은 항복변형률의 1.8배를 초과하는 수준에서와 홀의 중심부로부터 15° 위치에서 발생하였다. 균열 발생 초기에는 일정 길이까지 성장하다가 이후에는 rib을 관통하는 방향으로 진행되는 것으로 보아 강재 rib의 피로균열이 발생하여 진전되더라도 주부재의 거동에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다<그림 5-(b)>.

3.3 전단강도 평가식

앞에서 소개한 여러 가지 설계변수들에 대하여 다양한 실험적·해석적 연구결과를 바탕으로 Y형 Perfibond rib 전단연결재의 전단강도 평가식이 제안되었다. 전단연결재가 설치되는 합성거더의 길이에 따라 다량의 rib이 필수적이며, 이를 실험적으로 분석하기에는 현실적으로 많은 제약이 따르므로 수치해석적 기법을 이용한 모의 시험이 함께 수행되었다. 이러한 시험결과로부터 얻은 각 설계변수에 대한 전단강도의 변화 추이를 바탕으로 전단강도 평가식이 도출되었다. 전단강도 평가식은 rib 전면의 콘크리트에 의한 지압저항 효과, 관통철근에 의한 전단저항 효과 그리고 개별 절곡된 rib 사이의 콘크리트에 의한 다웰 효과가 기본적인 구성요소가 된다. 또한 이들을 구성하는 중요한 변수로써 rib의 개수가 있는데, 실제 교량이나 건축물에 적용되면 합성보의 길이

표 2. Y형 Perfibond rib의 전단강도 평가식의 적용가능 범위

설계 변수	기호	단위	적용가능범위
Rib 폭	w	mm	60 ~ 140
Rib 높이	h	mm	80 ~ 120
Rib 두께	t	mm	10
홀 직경	d	mm	40, 50, 60
관통철근의 공칭 단면적	A_r	mm ²	D13, D16, D19, D22*
연단거리	N/A	mm	120 이상
Rib과 철근의 개수	n	N/A	2개 이상
홀의 개수	$n - 1$	N/A	2개 이상
개별 절곡부에 의한 다웰 면적의 수	$n - 2$	N/A	2개 이상
콘크리트의 압축강도	f_{ck}	MPa	30 ~ 50
관통철근의 항복강도	N/A	MPa	400


*공칭 단면적으로 환산

에 따라 많게는 수십 개의 rib이 필요할 수 있기 때문이다. 해석적 연구를 통해 이러한 rib 수의 증가가 전체 연결 시스템의 전단강도에 비례하지 않는 것으로 나타났다. rib의 수가 10개 이상으로 늘어날수록 전단강도의 증가율이 점점 감소하다가 일정 수준으로 수렴하는 것으로 확인되었으며, 이는 최소한의 개념적 단위인 rib 2개의 결과를 기준으로 약 44%인 것으로 나타났다. 이와 더불어 앞서 기술한 rib의 형상에 따른 효과를 포함한 여러 구성 요소들의 기하학적 특성과 재료적 특성을 모두 고려하여 식 (3)과 같은 전단강도 평가식이 제안되었다. <표 2>는 각 설계변수들의 설명 및 단위와 함께 본 전단강도 평가식을 적용할 수 있는 설계변수들의 범위를 나타낸다.

$$Q_u = 11,500 \cdot f_{ck}^{0.3} \cdot S_{rib} + R_n \cdot f_{ck}^{0.3} \cdot [700 \cdot n \cdot A_{tr}^{0.75} + 2,600(n-2) \cdot S_{rib}] \dots \dots \dots (3)$$

여기서, $S_{rib} = t(w/80)^{0.95} \cdot (h'/120)^{0.9} \cdot (d/40)^{0.3}$
 : rib의 형상계수
 $h' = h + 0.5 \cdot d$
 $R_n = 1/(n-1)^{0.12}$: rib의 수에 따른 감소계수

4. 맺음말

본 기사에서는 시공성 및 경제성이 향상되고, 전단저항성과 연성이 우수한 새로운 형식의 Y형 Perfibond rib 전단연결재를 소개하였다. Y형 Perfibond rib은 기존의 평판형 Perfibond rib의 구조적 특성 및 시공성을 보완하여 콘크리트의 수평 다웰 효과를 증진시킴과 동시에 수직 방향의 인발 저항력을 확보하도록 개발되었다. 앞으로 다양한 교량 및 건축물의 강-콘크리트 합성구조에 확대 적용된다면 rib의 형상변수에 따른 강성과 연성의 적절한 조합을 활용하여 구조물의 요구 연결성과 연성능력 확보에 유리할 것으로 기대한다. 

담당 편집위원 : 박경수(연세대학교) k-park@yonsei.ac.kr

참고문헌

1. Oguejiofor, E. C., Hosain, M. U., "Numerical Analysis of Push-out Specimens with Perfobond Rib Connectors", *Computers and Structures*, Vol. 62, 1997, pp. 617 ~ 624.
2. Medberry, S. B., Shahrooz, B. M., "Perfibond Shear Connector for Composite Construction", *Engineering Journal, AISC*, Vol. 39, 2002, pp. 2 ~ 12.
3. Kim, S. H., Choi, J., Park, S., Ahn, J. H., Jung, C. Y., "Behavior of Composite Girder with Y-type Perfobond Rib Shear Connectors", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 103, 2014, pp. 275 ~ 289.
4. Kim, S. H., Choi, K. T., Park, S., Park, S. M., Jung, C. Y., "Experimental Shear Resistance Evaluation of Y-type Perfobond Rib Shear Connector", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 82, 2013, pp. 1 ~ 18.
5. Kim, S. H., Heo, W. H., Woo, K. S., Jung, C. Y., Park, S., "End-bearing Resistance of Y-type Perfobond Rib According to Rib width-height Ratio", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 103, 2014, pp. 101 ~ 116.



김상효 교수는 UIUC에서 박사학위를 취득한 후 1987년부터 한국건설기술연구원 구조연구실에서 근무하다 1991년부터 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 합성구조 연결부 개발, 신형식 구조시스템 개발, 성능중심 교량유지관리기법 개발 등이다.
sanghyo@yonsei.ac.kr



박세준 박사는 연세대학교 토목환경공학과에서 강-콘크리트 합성구조에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 현재 연세대학교에서 박사후연구원으로 재직 중이다. 오는 7월부터는 미국 국립표준기술연구소에서 근무할 예정이다.
sejooneee@yonsei.ac.kr



정치영 박사는 연세대학교 토목환경공학과에서 강-콘크리트 합성구조를 위한 Y형 Perfobond Rib 전단연결재 개발로 박사학위를 취득하였고, 2014년부터 부산대학교 지진방재연구센터에서 선임연구원으로 재직 중이다.
cyjung@pusan.ac.kr