

내진성능 향상을 위한 고성능 철근콘크리트 말뚝 설계에 관한 연구

Design of High Performance Reinforced Concrete Pile for Improvement of Seismic Performance

박찬식¹⁾ · 조정래^{2)*} · 김영진³⁾ · 진원종⁴⁾ · 윤혜진⁴⁾ · 최명규⁵⁾

Park, Chan Sik¹⁾ · Cho, Jeong-Rae^{2)*} · Kim, Young Jin³⁾ · Chin, Won Jong⁴⁾ · Yoon, Hyejin⁴⁾ · Choi, Myung Kyu⁵⁾

¹⁾한국도로협회 기술연구소 책임연구원, ²⁾한국건설기술연구원 지진안전연구소 연구위원, ³⁾한국건설기술연구원 지진안전연구소 선임연구원, ⁴⁾한국건설기술연구원 지진안전연구소 수석연구원, ⁵⁾대림씨엔에스(주) 파일사업부 상무

¹⁾Senior Researcher, Department of Technology, Korea Road Association, ²⁾Research Fellow, Seismic Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, ³⁾Senior Research Fellow, Seismic Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, ⁴⁾Senior Researcher, Seismic Safety Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, ⁵⁾Vice President, Concrete Pile Business Division, Daelim C&S Co., Ltd.

/ A B S T R A C T /

Recent changes in the construction method of piles to minimize noise, along with the development of high-strength reinforcement, have provided an economical high performance RC pile development to compensate for the disadvantages of existing PHC piles. In this study, a methodology for the development of cross - section details of high performance RC piles of various performances is presented by freely applying high strength steel and concrete. This study suggested a technique for calculating bending moments for a given axial force corresponding to the allowable crack widths and this can be used for serviceability check. In calculating the design shear force, the existing design equation applicable to the rectangular or the I section was modified to be applicable to the hollow circular section. In particular, in the limit state design method, the shear force is calculated in proportion to the axial force, and the procedure for calculating PV diagram is established. Last, the section details are determined through PM diagrams that they have the similar flexural and axial-flexural performances of the PHC pile A, B and C types with a diameter of 500 mm. To facilitate the application of the selected standard sections to the practical tasks, the design PM diagram and design shear forces are proposed in accordance with the strength design method and limit state design method.

Key words: RC pile, PHC pile, PM diagram, Crack moment, PV diagram

1. 서론

국내 건설시장에서 가장 많이 사용되는 말뚝은 강관 말뚝과 PHC 말뚝 이다[1]. 강관 말뚝은 역학적 성질이 우수하지만 경제성이 낮은 단점을 가지고 있다. 원심성형 공법으로 제작된 PHC 말뚝은 공장제작에 따라 균일한 제품 성능 확보가 가능하며 강관 말뚝 대비 경제적인 뿐만 아니라 프리텐션을 적용함으로써 항타 공법으로 시공시 균열 문제로부터 자유로운 장점을 지니고 있다. 하지만 축방향하중 저항능력에 비해 휨 저항능력이 낮다. 특히 말뚝 두부 정리 시 말뚝을 완전히 절단하는 국내 건설 시공 관행에 따

라 휨모멘트가 최대인 말뚝 상단에서 일정구간 프리텐션 손실이 발생하여 휨성능이 더욱더 떨어지는 단점이 있다. PHC 말뚝은 전단철근이 없기 때문에 전단강도가 매우 작는데, 프리텐션 손실까지 부가되어 전단성능이 더욱 낮아질 수 있다. 이러한 이유로 수평하중이 상대적으로 큰 교량구조에서는 강관말뚝이, 축방향 하중이 지배적인 건축구조에서는 PHC 말뚝이 주로 사용되고 있다.

최근 이러한 말뚝의 단점을 극복하기 위해 초고강도 PHC 말뚝, 복합말뚝, 충전 PHC 말뚝, 합성 말뚝, 고강도 RC 말뚝 등이 제안되고 있다. 초고강도 PHC 말뚝은 기존 PHC의 콘크리트 강도인 약 80 MPa보다 높은 110 MPa의 초고강도 콘크리트를 적용한 PHC 말뚝이며, 복합말뚝은 축방향 하중이 지배적인 중 하부에는 PHC 말뚝, 전단력과 휨모멘트가 지배적인 말뚝 상부에는 강관말뚝을 배치하여 연결한 말뚝이다. 충전 PHC 말뚝은 PHC 말

*Corresponding author: Cho, Jeong-Rae

E-mail: chojr@kict.re.kr

(Received February 26, 2019; Revised April 4, 2019; Accepted April 5, 2019)

뚝의 내부를 철근콘크리트로 채워 휨성능과 전단성능을 높인 말뚝이다 [2-4]. 이외에도 강관말뚝 내부를 콘크리트 속채움한 강-콘크리트 합성 말뚝과 복합소재(GFRP)-콘크리트 합성 말뚝이 개발되고 있다[5]. 최근 일본에서는 기존PHC 부재에 나선철근과 철근을 추가 배치하고 중앙에 강봉으로 긴장력을 도입한PRC말뚝도 개발하여 휨성능의 향상을 도모하고 있다[6].

한편, 최근 말뚝 시공 환경이 소음 최소화를 위하여 항타 공법에서 매입 공법으로 전환되는 추세이고 고강도 철근이 등장함에 따라 한국도로공사에서는PHC 말뚝을 대체할 수 있는 고성능 철근콘크리트 말뚝(이하 RC 말뚝) 개발을 추진하고 있다. 한국도로공사에서 개발 중인 고성능 RC 말뚝(이하 ExPile)은PHC 말뚝 공정에서PC 강봉을 고강도 철근으로 대체하고, 전단 나선 철근을 적용하였다. PHC 말뚝과 유사한 경제성을 지니고 있으나, PHC 말뚝과 달리 말뚝 두부 정리시 말뚝을 절단하더라도 휨성능의 저하가 없고 전단철근의 사용으로 큰 전단력을 지지할 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한 철근 콘크리트 부재의 특성상 내진 성능 역시 우수할 것으로 기대하고 있다. ExPile은 직경 500 mm 및 600 mm를 대상으로 하며 PHC 말뚝의 A종과 B종의 중간정도의 휨 성능을 발휘하도록 그 상세를 제안하고 있다[7].

본 연구에서는 직경별로 단일단면으로 제시된 ExPile과는 달리 고강도 철근과 콘크리트를 자유롭게 적용하여 다양한 성능의 고성능 RC 말뚝의 단면 상세의 개발 방법론을 제시하였다. 고성능 RC 말뚝의 제작공법은 PHC 말뚝과 동일하게 원심성형 공법을 가정하였고, 콘크리트 재료 역시 80 MPa 콘크리트를 가정하였다. RC 말뚝은 PHC 말뚝과 달리 균열을 허용한다. 본 연구에서는 허용균열폭에 대응하는 주어진 압축력에 대한 휨 모멘트를 계산하고 이를 축력-모멘트 상관도(이하 PM 상관도)에 표시하여 사용성을 검토하는 기법을 제안하였다. 이 기법으로 계산된 설계 PM 상관도를 통해 극한상태는 물론 사용한계상태에 대해서도 간편하게 설계 검토를 수행할 수 있다. 한편, 설계 전단력 계산시 사각 또는 I형 단면에 적용 가능한 기존 설계식을 중공원형 단면에 적용가능하도록 수정하여 적용하였으며, 특히 한계상태설계법에서 전단력은 축력에 비례하도록 계산하므로 이를 근거로 축력-전단력 상관도(이하PV 상관도)를 계산하는 절차를 정립하였다. 최종적으로 직경 500 mm를 대상으로 제안된 기법으로 PHC 말뚝 A종, B종, C종에 각각 대응하는 고성능 RC 말뚝의 단면 상세를 제시하고, 설계 PM 상관도와 설계 PV 상관도를 제시하였다.

2. 철근콘크리트 중공원형 단면의 설계다이아그램

2.1 균열을 고려한 PM 상관도

PM 상관도는 휨 또는 휨-압축 부재에서 부재가 파괴되는 상태(극한한계상태 또는 극단상황한계상태)에 대해 설계 검토를 수행할 때 일반적으로 사용되는 설계다이아그램이다. 부재가 파괴되는 상태에 대해 PM 상관도를 통해 설계조건을 만족하는 경우, 추가적으로 사용성을 검토하게 된다. 프리스트레스 부재의 경우 균열을 허용하지 하지 않기 때문에 사용하중상태에 대해 균열모멘트를 검토하게 되며, 철근콘크리트 부재의 경우 설계기준에서 요구하는 허용균열폭을 만족하도록 설계한다. 본 연구에서는 RC 말뚝 설계시 허용균열폭에 대응하는 주어진 압축력에 대한 휨 모멘트를 계산하고 이를 PM 상관도에 표시하여 사용성을 간편하게 검토하는 기법을 제안하였다[8].

PHC 말뚝은 프리스트레스 부재로 균열을 허용하지 않으므로 축력을 고려한 균열 휨모멘트를 PM 상관도에 추가하는 방식을 통해 PM 상관도를 구축할 수 있다. 균열 휨모멘트는 탄성상태를 가정 한 후 최외각 콘크리트 연단이 인장강도에 도달하는 시점을 계산하는 다음과 같은 해석식을 적용할 수 있다.

$$M_{cr} = \left[\sigma_{cr} + \frac{N+P}{A_g} \right] \frac{I_g}{r_1} \tag{1}$$

여기에서, N 은 축력, N 은 프리텐션량이다. σ_{cr} 는 콘크리트 균열강도이며, A_g 와 I_g 는 각각 콘크리트 기준 환산단면적과 단면 2차 모멘트, r_1 은 외부 직경이다.

균열을 허용하는 RC 말뚝에서는 허용균열폭에 대응하는 균열 발생시 휨모멘트의 계산이 필요하다. 본 연구에서는 축력에 따라 비선형 단면해석을 통해 모멘트-곡률 곡선을 유도한 후 균열이 발생한 시점부터 도로교설계 기준[9] 및 EC2[10]에서 공통적으로 제시하는 최대균열폭 식으로 균열폭을 계산하여 그 값이 허용균열폭에 도달할 때의 허용균열모멘트를 계산하였다. 사용된 최대균열폭식은 다음과 같다.

$$w_{max} = s_{max} (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \tag{2}$$

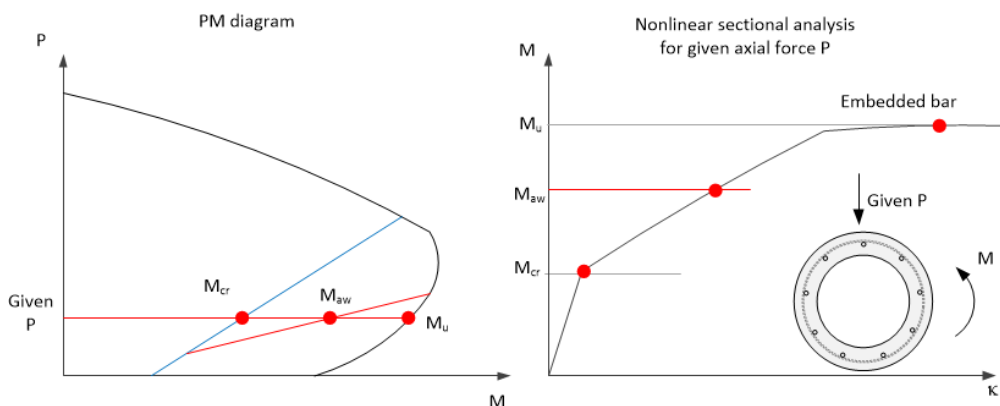


Fig. 1. Crack moment, allowable crack moment, and ultimate moment

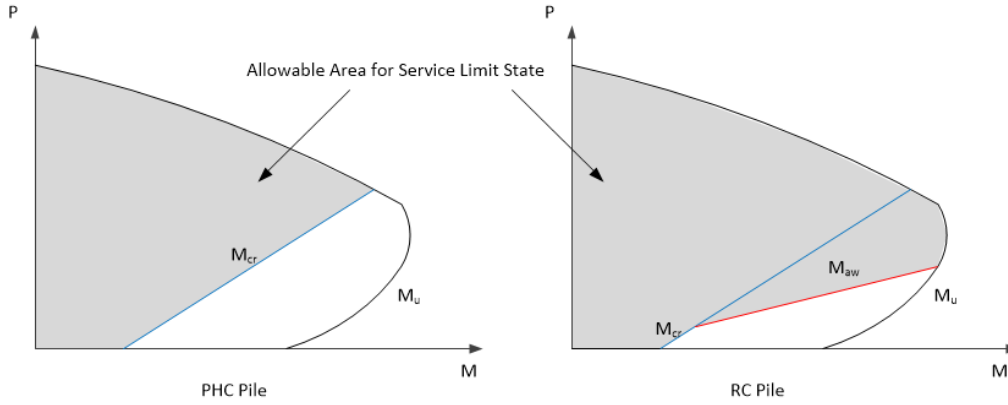


Fig. 2. Allowable areas for service limit state of PHC and RC piles

여기에서, w_{max} 는 최대균열폭, s_{max} 는 최대균열간격, $\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ 은 평균변형률이다.

Fig. 1은 PM 상관도에서 압축력이 주어질 경우 균열모멘트, 허용 균열폭 모멘트, 극한모멘트를 단면해석으로부터 구하는 개념도를 도시한 것이다. 허용 균열폭 모멘트 개념을 도입할 경우 사용하중상태를 만족하는 영역은 Fig. 2에 도시한 것과 같이 PHC 말뚝과는 다르게 적용해야 한다.

2.2 중공원형 철근콘크리트 기둥의 PV 다이어그램

전단철근이 배근된 보의 전단 설계는 트러스 모델과 수정압축장 이론 등이 사용된다. 이중 45도 트러스 모델이 강도설계법을 규정한 콘크리트 구조 설계기준[11]에서 사용하고 있으며, 변각트러스 모델이 한계상태설계법을 규정한 도로교 설계기준[9]에서 사용한다. 두 기준을 적용할 때 나선철근으로 보강된 철근콘크리트 중공원형말뚝을 대상으로 전단설계를 적용하기 위해서는 기존 설계식을 수정할 필요가 있다. 먼저 나선철근은 피치간격의 원형스터립으로 가정하여 적용하였다. 두번째로 전단 유효 깊이 z (콘크리트 구조설계기준[11]에서는 $z = d$, 도로교 설계기준[9]에서는 $z = 0.9d$) 및 이에 대응하는 콘크리트부의 전단면적 A_{cw} (사각 또는 I형의 경우 $A_{cw} = b_w z$)을 수정하여 적용할 필요가 있다. 다음은 각 기준에 적용할 수 있는 관련 규정을 재정의한 것이다.

2.2.1 콘크리트 구조설계기준(KDS 14 20 22: 2016)[11]

전단설계강도 V_d 는 다음과 같다.

$$V_d = \phi V_n = \phi(V_c + V_s) \quad (3)$$

여기에서 강도감소계수 $\phi = 0.75$ 이다. 본 연구에서 콘크리트에 의한 공칭전단강도 V_c , 철근에 의한 공칭전단강도 V_s 는 다음 식을 적용하였다.

$$V_c = \frac{1}{6} \lambda \sqrt{f_{ck}} A_{cw}(d) \quad (4)$$

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \leq \frac{2}{3} \sqrt{f_{ck}} A_{cw}(d) \quad (5)$$

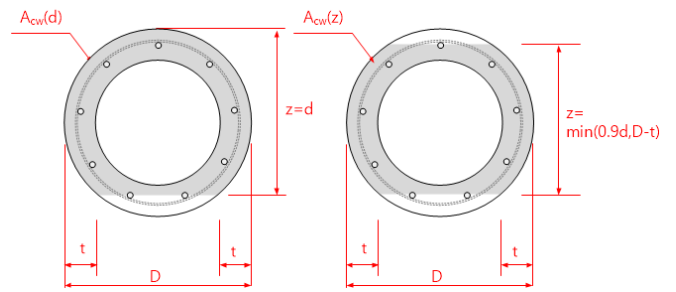


Fig. 3. Effective shear depth and area (left : strength design method, right : limit state design method)

여기에서 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, λ 는 경량콘크리트 계수, f_y 는 철근 항복강도, A_v 와 s 는 전단철근의 면적과 간격이다. 전단면적 $A_{cw}(d)$ 는 Fig. 3의 좌측 그림에서 음영처리된 영역을 의미한다.

2.2.2 도로교 설계기준(KDS 24 14 21 : 2016)[9]

기존 전단깊이 z 는 압축현의 두께를 고려하여 유효깊이 d 의 0.9배 ($z = 0.9d$)를 적용하고 있다. 이를 변형하여 다음과 같이 적용한다(Fig. 3의 우측 그림 참조).

$$z = \min(0.9d, D-t) \quad (6)$$

여기에서, D 와 t 는 중공원형 단면의 직경과 두께이다. 철근이 분담하는 설계전단강도 V_{sd} 는 기존 식과 동일하고, 콘크리트 압축파괴를 기준으로 하는 최대 전단강도 $V_{d,max}$ 에는 변화가 있다.

$$V_{sd} = \frac{\phi_s f_y A_v z}{s} \cot \theta \quad (7)$$

$$V_{d,max} = \frac{\phi_c \nu f_{ck} A_{cw}(z)}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (8)$$

여기에서 ϕ_s 와 ϕ_c 는 철근과 콘크리트의 재료계수, ν 는 콘크리트의 유효강도계수이다. $A_{cw}(z)$ 는 중심으로 부터 $z/2$ 만큼의 면적으로 Fig. 3의 우측

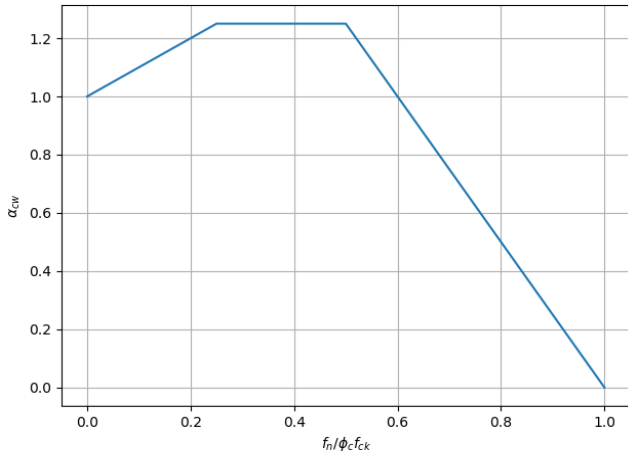


Fig. 4. Axial influence factor α_{cw}

- Find available axial stress levels satisfying $V_{sd}(\theta = 45^\circ) \leq V_{d,max,com}(\theta = 45^\circ)$

$$\alpha_{cw,lim} = \frac{V_{sd}(\theta = 45^\circ)}{V_{d,max}(\theta = 45^\circ)} = \frac{2\phi_s f_y A_v z}{\phi_c \nu f_{ck} A_{cw}(z) s}$$
 Compute $f_{n,bounds} = [f_{n,lboud} \quad f_{n,ubound}]$ by $\alpha_{cw} \geq \alpha_{cw,lim}$ in Fig. 4
- Do $f_n = f_{n,lboud}, \dots, f_{n,ubound}$
 $N = f_n bh$
 Compute α_{cw} in Fig. 12

$$\cot\theta = \sqrt{\frac{\alpha_{cw} \phi_c \nu f_{ck} A_{cw}(z) s}{\phi_s f_y A_v z}} - 1$$
 if $\cot\theta > 2.5$, $V_d = 2.5 \frac{\phi_s f_y A_v z}{s}$
 else if $1.0 \leq \cot\theta \leq 2.5$, $V_d = V_{sd} = \frac{\phi_s f_y A_v z}{s}$
 Remark. $\cot\theta \geq 1$ is assured by $\alpha_{cw,lim}$

Fig. 5. Algorithm for PV diagram

그림에서 음영처리된 영역이다. 따라서 $V_{sd} = V_{d,max}$ 조건에서 유도되는 균열각 산정식은 다음과 같이 변경된다.

$$\cot\theta = \sqrt{\frac{\phi_c \nu f_{ck} A_{cw} s}{\phi_s f_y A_v z}} - 1 \tag{9}$$

균열각 $\theta = 45^\circ$ 에서 콘크리트 파괴 보다 철근 항복을 먼저 발생하도록 설정하면,

$$V_{sd}(\theta = 45^\circ) \leq V_{d,max}(\theta = 45^\circ) \tag{10}$$

다음과 같이 최대전단철근량 규정은 유도할 수 있다.

$$\frac{A_v}{s} \leq \frac{\phi_c \nu f_{ck} A_{cw}(z)}{2\phi_s f_y z} \tag{11}$$

도로교 설계기준[9]은 콘크리트 구조설계기준[11]과 달리 축방향 압축력을 고려하여 설계 전단력을 계산한다. 따라서 축력-전단력 상관도(이하 PV 상관도)의 계산이 가능하다. 기준에서는 프리스트레스를 포함한 축방향 압축력이 작용하는 있는 부재의 경우, 콘크리트 압축파괴를 기준으로 계산되는 최대설계전단강도로 $V_{d,max}$ 대신 수정된 $V_{d,max,com}$ 를 사용하도록 하고 있다.

$$V_{d,max,com} = \alpha_{cw} V_{d,max} \tag{12}$$

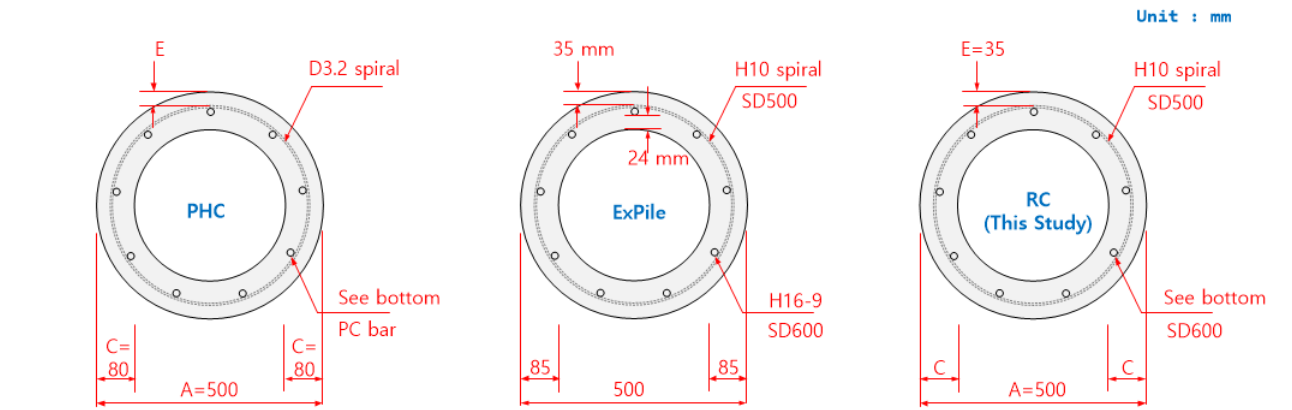
여기에서 α_{cw} 는 축방향 압축력 영향계수로서 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 축방향 응력 f_n 의 함수로 정의된다. Fig. 5는 압축력을 고려한 중공 원형 단면에 대한 PV 상관도에 대한 알고리즘은 제시한 것이다[8].

3. 고성능 철근콘크리트 말뚝 단면 제안

본 연구에서는 500 mm 직경의 말뚝을 대상으로 기존의 PHC 말뚝 A종, B종, C종과 휨 및 휨-압축 성능이 비슷하게 유지되는 3종의 고성능 RC 말뚝을 제안하고자 한다. 또한 한계상태설계법을 도입한 도로교 설계기준[9] 뿐만 아니라 강도설계법에 기초하고 있는 콘크리트 구조설계기준[11]을 적용할 경우에도 쉽게 설계 검토가 가능하도록 2장에서 제시한 설계 PM 상관도와 설계 PV 상관도를 제시하였다. 이를 통해 실제 설계시 선택의 폭을 확대하고, PHC 말뚝으로 설계된 현장에서 효율적인 구조인 고성능 RC 말뚝으로 쉽게 전환되도록 유도하고자 한다.

Fig. 6은 직경 500 mm 말뚝을 대상으로 PHC 말뚝, 한국도로공사에서 제안한 고성능 RC 말뚝인 ExPile, 본 연구에서 제안하는 고성능 RC 말뚝의 단면 상세안을 나타낸 것이다. PHC 말뚝은 “KS F 4306: 2003 (2014 확인) 프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝”[12]에 단면 직경, 두께 등의 치수 및 성능에 대한 규정규정이 제시되어 있다. 유효프리스트레스의 크기에 따라 A, B, C 종으로 구분된다. 개별 제조사는 KS 규격에서 제시하는 균열 휨모멘트 및 파괴 휨모멘트를 만족하도록 설계하고 규정된 실험을 통해 성능을 만족함을 입증해야 한다. 외경 및 두께는 KS 규격에서 제시한 값을 따르고 있으며, 사용하는 PC 강봉은 “KS D 3505 PC 강봉”[13]에서 제시하는 SBPD 1275/1420(항복강도 1275 MPa, 인장강도 1420 MPa 이상)의 규격을 따른다. A 종, B 종, C 종 등 요구되는 유효프리스트레스 양에 따라 적절한 PC 강봉의 개수를 선택하여 설계되어 있다. 전단 보강을 위해서는 나선 철선을 적용하고 있다.

ExPile을 포함한 RC 말뚝은 PHC 말뚝과 동일한 원심성형공법으로 제작되며 80 MPa의 고강도 콘크리트를 사용한다. 하지만 PC 강봉 대신 KS D 3504[14]에 표준 규격이 제정된 SD600 고강도 철근을 사용하여 전단성능 향상을 위해 SD500 철근을 나선철근으로 배치하였다. 철근콘크리트 부재의 특성에 따라 균열을 허용하는 데 0.2 mm의 허용 균열폭을 설정하였다. ExPile은 도로교 한계상태설계법에서 강화된 내구성 규정을 만족시키기 위해 말뚝 외부에는 지반에 삽입되는 환경조건인 노출등급 EC2에 해당



PHC-A: 9-SBPD 1275/1420 D9.2 (E=26.8)
 PHC-B: 18-SBPD 1275/1420 D9.2 (E=36.8)
 PHC-C: 18-SBPD 1275/1420 D11 (E=36.8)

RC500A: RC-H13-9, RC-H16-6, RC-H19-4, RC-H22-3
 RC500B: RC-H13-18, RC-H16-12, RC-H19-8, RC-H22-6
 RC500C: RC-H13-27, RC-H16-18, RC-H19-12, RC-H22-9
 (C=83) (C=86) (C=89) (C=92)

Fig. 6. Section Details of PHC, ExPile and RC piles

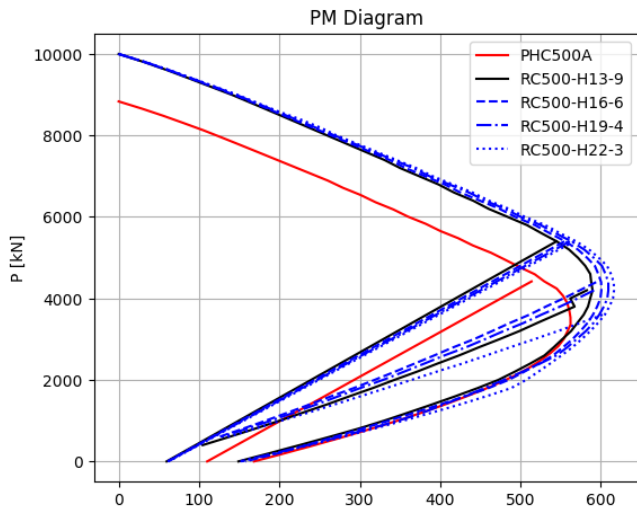


Fig. 7. Comparisons of PM diagrams of PHC500A and corresponding RC piles

하는 35 mm의 피복 두께를 적용하고 있으며, 본 연구에서 제안한 고성능 RC 말뚝은 추가적으로 밀폐된 조건의 말뚝 내부에도 EC1의 환경등급을 고려하여 25 mm의 피복 두께를 구체적으로 적용하였다. 강화된 피복두께를 적용함에 따라 ExPile과 본 연구에서 제안하는 고성능 RC 말뚝은 “KS F 4301 : 2016, 원심력 철근 콘크리트 말뚝”[15]에서 정의한 전체 원통 두께 80 mm보다 증가한 두께를 적용하고 있다.

ExPile은 PHC A종과 B종 사이의 중간 정도의 휨성능을 발휘하며, 본 연구에서 제안하는 고성능 RC 말뚝은 적용 상세에 따라 RC500A는 PHC 말뚝 A종, RC500B는 B종, RC500C는 C종과 유사한 성능을 갖는다. 13 mm, 16 mm, 19 mm, 22 mm의 고강도 주철근의 직경을 고려할 경우 그림에서 제시한 것과 같이 A종, B종, C종 각각에 대해 네가지 단면 상세를 도입할 수 있다. Fig. 7은 PHC500A와 RC500A 4종의 PM 상관도를 2장에서 제시한 방법에 따라 PM 상관도를 비교하여 나타낸 것이다. PHC500A는 극한상태에서 모멘트와 균열모멘트로 PM 상관도를 표시하였고, 균열

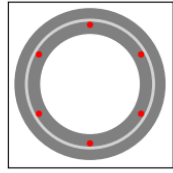
을 허용하는 RC500A에 대해서는 허용균열폭에 대응하는 모멘트를 추가로 도시하였다. PM 상관도를 비교할 경우 RC 말뚝 단면이 모두 PHC 말뚝의 휨성능과 유사한 수준임을 알 수 있다. 특이한 사항으로는 축력이 없을 때 RC 말뚝의 허용균열모멘트는 PHC 말뚝에 비해 낮지만 축력비(압축저항능력 대비 압축력)가 10% 이상인 경우 오히려 균열 허용에 따라 PHC 말뚝보다 사용하중상태에서의 휨성능이 우수한 것을 알 수 있다. 이는 어느정도 압축력을 받는 말뚝의 특성상 구조적으로 보다 우수함을 나타낸다. 다만 축력이 없는 상태인 제작 또는 운송 시 균열이 발생하지 않도록 주의해야 한다. RC500B와 RC500C의 단면 상세 역시 주철근 선택에 따른 성능의 변화는 크지 않다.

나선철근 간격의 규정은 각 기준에 따라 서로 상이하게 제시되어 있다. 말뚝 규정으로는 두 개의 KS 규격[12,15]에서 110 mm로, AASHTO LRFD(2007)[16]에서는 150 mm이다. 기둥 규정으로는 국내의 콘크리트 구조설계기준의 철근상세 규정[17]과 ACI 규정[18]이 각각 75 mm, 3 inch로 유사하게 규정하고 있다. 한계상태설계법을 따르는 도로교설계기준[9]과 EC2[10]는 주철근 직경에 의존하도록 정의하는데 국내의 도로교설계기준이 보다 좁은 간격을 요구한다. ExPile은 도로교설계기준[9]의 주철근 직경 6배 규정(6×16 mm = 96 mm)로부터 95 mm를 채택하였다. 이상의 조사에서 일반 기둥이 말뚝보다 좁은 나선철근 간격을 요구하는 것을 알 수 있다. 이는 지반으로 둘러싸인 말뚝과 달리 외기에 노출되는 기둥이 내진 성능을 좌우하는 심부 구속 효과를 더 크게 요구하는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 과도하게 좁은 나선철근 간격을 요구하는 기둥 규정이 아닌 말뚝 규정에 따라 나선철근 간격을 결정하였다. 따라서 국내의 최상위 기준이라 할 수 있는 KS 규격에 따라 110 mm로 선택하였으며, 이 값은 말뚝과 관련된 또 다른 기준인 AASHTO LRFD(2007)[16]를 만족한다.

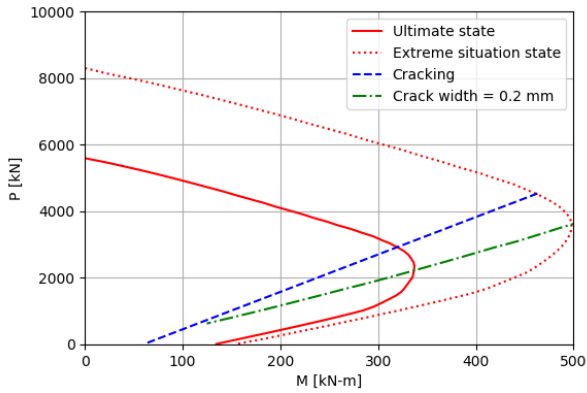
PM 상관도의 비교에서 알 수 있듯이 PHC 말뚝과 유사한 성능을 갖는 다수의 RC 말뚝 단면을 적용하는 주철근 직경에 따라 유도할 수 있다. 나선철근망의 조립이 가능한 수준의 강성을 보유하면서, 균열 분산에 유리한 작은 직경의 철근을 주철근으로 선택하는 조건을 부과하면 16 mm 철근을 주철근 사용하는 것이 적절하다. 따라서 본 연구에서는 RC500-H16-6,

RC500A(RC500-H16-6)

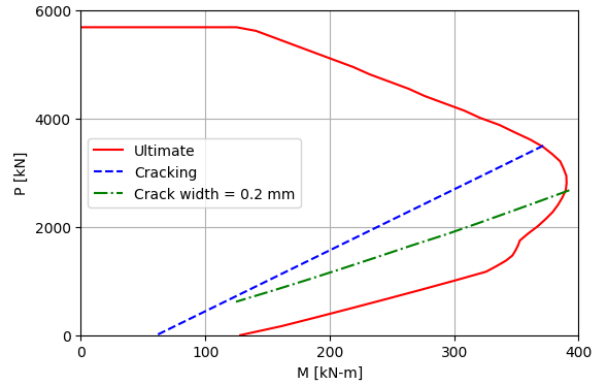
- $D=500$ mm
- $t=86$ mm
- $f_{ck}=80$ MPa
- $c=35$ mm
- Long. : 6-D16 (SD600)
- Hoop. : D10@110 (SD500)



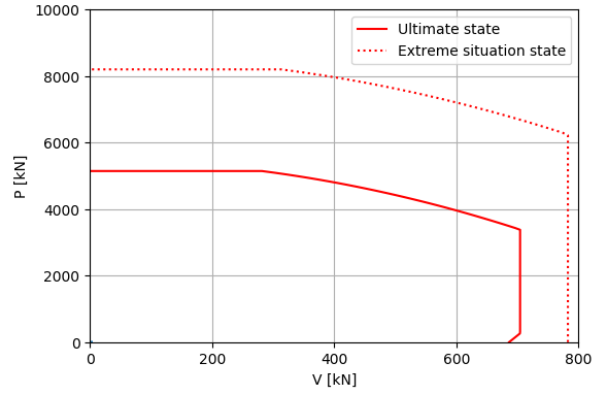
(a) Section details



(c) PM diagram for limit state design method



(b) PM diagram for strength design method

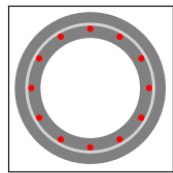


(d) PV diagram for strength design method

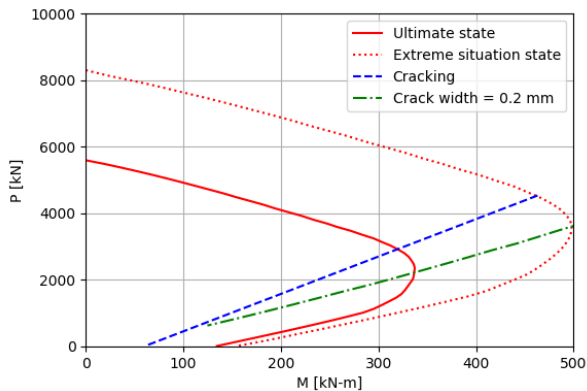
Fig. 8. Design diagrams of RC500A

RC500B(RC500-H16-12)

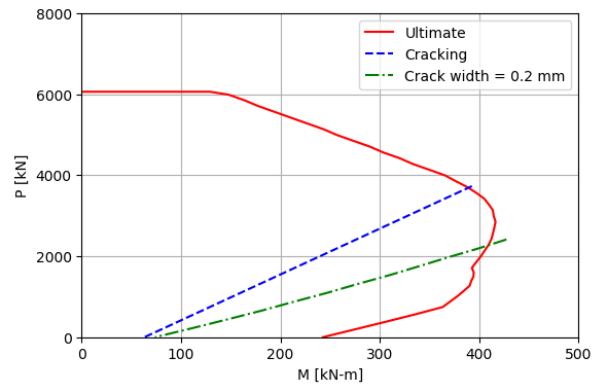
- $D=500$ mm
- $t=86$ mm
- $f_{ck}=80$ MPa
- $c=35$ mm
- Long. : 12-D16 (SD600)
- Hoop. : D10@110 (SD500)



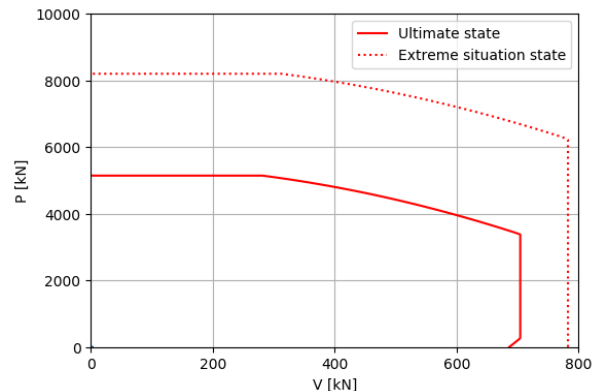
(a) Section details



(c) PM diagram for limit state design method



(b) PM diagram for strength design method



(d) PV diagram for strength design method

Fig. 9. Design diagrams of RC500B

RC500C(RC500-H16-18)

- $D=500$ mm
- $t=86$ mm
- $f_{ck}=80$ MPa
- $c=35$ mm
- Long. : 18-D16 (SD600)
- Hoop. : D10@110 (SD500)

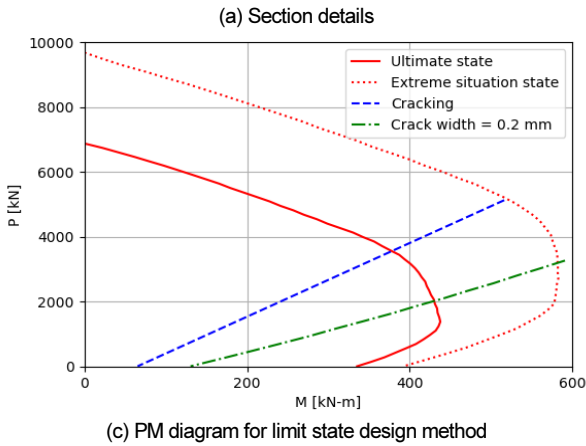
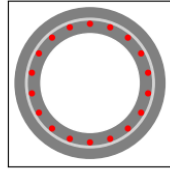


Fig. 10. Design diagrams of RC500C

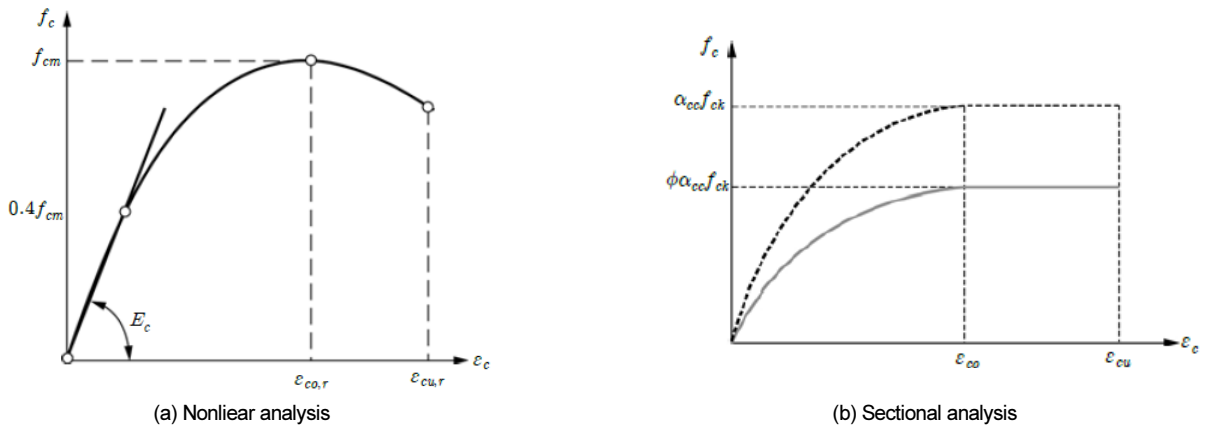


Fig. 11 Stress-strain curve of concrete [9]

RC500-H16-12, RC500-H16-18을 각각 RC500A, RC500B, RC500C의 표준 단면 상세로 제시하고, 이들 단면에 대해 강도설계법에 따른 설계 PM 상관도와 한계상태설계법에 따른 설계용 PM 상관도와 PV 상관도를 Figs. 8-10에 제시하였다. 축력의 크기와 관계없이 설계전단력이 일정한 강도설계법에 의한 극한전단력은 $V_d = 385.9$ kN이다. 이들 설계다이어그램을 통해 설계 실무시 설계 하중이 결정될 때 편리하게 설계 검토가 가능하다.

힘 및 휨압축 설계에서 사용한계상태에 대한 균열 및 허용 균열폭 모멘트는 2.1절의 결과를 강도설계법 및 한계상태설계법에서 동일하게 적용할 수 있다. 하지만 극한한계상태에 대해서는 강도설계법과 한계상태설계법에서 설계 PM 상관도를 유도하는 과정이 상이하다. 강도설계법에서는 비

선형단면해석을 통해 PM 상관도를 유도한 후 강도감소계수를 적용하여 설계에 적용되는 극한상태에 대한 설계 PM 상관도를 계산한다. 강도감소계수의 적용은 콘크리트 구조설계기준[11]에 따라 인장지배단면인 경우 0.85, 압축지배단면의 0.65의 강도감소계수 ϕ 를 적용하였다. 두 지배 단면 사이의 단면에 대해서는 최외단 인장철근의 변형률에 따라 강도감소계수를 변화시켰으며, 추가로 강도감소계수만 적용한 설계축력의 0.85배를 넘을 수 없도록 설계 PM 상관도를 계산하였다.

도로교 설계기준[9]에 따른 한계상태설계법을 적용하기 위해서는 콘크리트 및 철근에 미리 재료계수를 적용한 단면해석용 응력-변형률 곡선을 사용하여 비선형단면해석을 수행해야 하며, 극한상태 역시 극한한계상태와 극단상황한계상태로 세분하고 있다. 또한 Fig. 11에 나타낸 것과 같이 단면

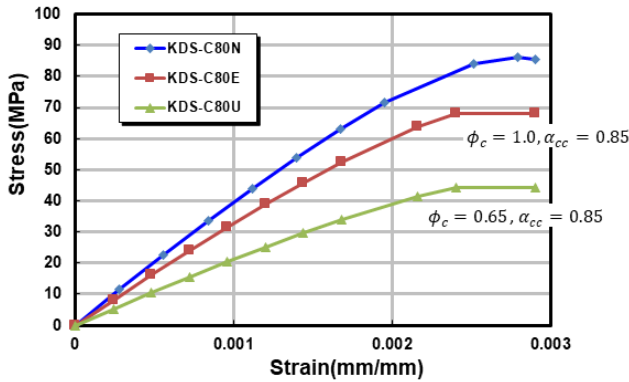


Fig. 12. Used stress-strain curves of concrete; KDS-C80N for nonlinear analysis, KDS-C80U for ultimate limit state, KDS-C80E for extreme situation limit state

설계를 위한 응력-변형률 곡선을 별도로 제시하고 있다. Fig. 12는 비선형 해석용 콘크리트 응력-변형률 곡선과 극한한계상태에 대한 재료계수 $\phi_c = 0.65$ 와 극단상황한계상태에 대한 $\phi_c = 1.0$ 및 콘크리트 재료의 불확실성을 반영한 계수 $\alpha_{cc} = 0.85$ 를 적용한 단면 설계용 콘크리트 응력-변형률 곡선을 비교하여 나타낸 것이다. 철근 역시 이중선형 곡선에서 재료계수(극한한계상태 $\phi_s = 0.90$, 극단상황한계상태 $\phi_s = 1.0$)를 적용하였다.

4. 결론

최근 고강도 철근의 철근의 개발과 더불어 소음 최소화를 위해 말뚝 시공법이 매입 공법으로 전환됨에 따라 기존 PHC 말뚝의 단점을 보완할 수 있는 경제적인 고성능 RC 말뚝 개발이 추진되고 있다. 본 연구에서는 고강도 철근과 콘크리트를 자유롭게 적용하여 다양한 성능의 고성능 RC 말뚝의 단면 상세의 개발 방법론을 제시하였다. 허용균열폭에 대응하는 주어진 압축력에 대한 휨 모멘트를 계산하고 이를 축력-모멘트 상관도(이하 PM 상관도)에 표시하여 사용성을 검토하는 기법을 제안하였다. 이 기법으로 계산된 설계 PM 상관도를 통해 극한상태는 물론 사용한계상태에 대해서도 간편하게 설계 검토를 수행할 수 있다. 한편, 설계 전단력 계산시 사각 또는 I형 단면에 적용 가능한 기존 설계식을 중공원형 단면에 적용가능하도록 수정하여 적용하였으며, 특히 한계상태설계법에서 전단력은 축력에 비례하도록 계산하므로 이를 근거로 축력-전단력 상관도(이하 PV 상관도)를 계산하는 절차를 정립하였다. 최종적으로 직경 500 mm를 대상으로 제안된 기법으로 PHC 말뚝 A종, B종, C종에 각각 대응하는 고성능 RC 말뚝의 단면 상세를 제시하고, 설계 PM 상관도와 설계 PV 상관도를 제시하였다.

/ 감사의 글 /

이 논문은 2019년 한국건설기술연구원 주요사업((19주요-대1-임무)지진 시 대피로 및 복구 차량 운행 노선 확보를 위한 교량 취약 연결부 및 내진 장치의 안전성 향상 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Cho CH, Pile Engineering Practice, E&G book, c2010. (In Korean)
2. Hyun JH, Bang JW, Lee SS, Kim YY, Shear Strength Enhancement of Hollow PHC Pile Reinforced with Infilled Concrete and Shear Reinforcement, Journal of the Korea Concrete Institute, 2012;24(1): 77-78. (In Korean)
3. Bang JW, Hyun JH, Lee BY, Lee SS, Kim YY, Flexural Strength of PHC Pile Reinforced with Infilled Concrete, Transverse and Longitudinal Reinforcements, Journal of the Korea Concrete Institute, 2013;25(1):91-98. (In Korean)
4. Kim JH, Jung HK, Park YS, Min CS, Flexural Design and Experiments on Reinforced Concrete Filled PHC Pile, Journal of the Korea Concrete Institute, 2017;29(4):353-360. (In Korean)
5. Fam A, Pando M, Filz G, Rizkalla S, Precast piles for Route 40 bridge in Virginia using concrete filled FRP tubes, PCI journal, 2003;48(3):32-45.
6. Akiyama M, Abe S, Aoki N, Suzuki M, Flexural test of precast high-strength reinforced concrete pile prestressed with unbonded bars arranged at the center of the cross-section, Engineering Structures, 2012;34:259-270.
7. Korea Expressway Corporation, Development of High Performance RC Pile, Research Report, c2017. (In Korean)
8. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, A study on design and construction of High Performance Reinforced Concrete Pile, Research Report, c2018. (In Korean)
9. Ministry of Land, Infrastructur and Transport, KDS 24 14 21 : 2016, Design Specifications of Concrete Bridge (Limit State Design), c2016. (In Korean)
10. EC F S, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for building (EN 1992-1-1:2004), c2004.
11. Ministry of Land, Infrastructur and Transport, KDS 14 20 22 : 2016, Design Specifications of Shear and Torsion for Concrete Structre, c2016. (In Korean)
12. Korean Standard Association, KS F 4306 : 2003 (2014 Reapproved), Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles, c2014. (In Korean)
13. Korean Standard Association, KS D 3505 : 2002, Steel Bars for Prestressed Concrete, c2002. (In Korean)
14. Korean Standard Association, KS D 3504 : 2016, Steel Bars for Concrete Reinforcement, c2016. (In Korean)
15. Korean Standard Association, KS F 4301 : 2016, Reinforced Spun Concrete Piles 2016, c2016. (In Korean)
16. AASHTO L, SI-2007, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, c2007.
17. Ministry of Land, Infrastructur and Transport, KDS 14 20 50 : 2016, Design Specifications of Steel Reinforcement Details for Concrete Structre, c2016. (In Korean)
18. ACI A, 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, c2014.