

콘크리트 충전형 합성교각의 성능 및 응용



강 대 홍*



박 연 수**

1. 서 론

교량 미래학자 D.P Billington의 말을 인용하면, “19세기의 교량은 강교가 주류를 이루었고, 20세기는 콘크리트 교량이 주류를 이루었다. 21세기에는 새로운 신소재의 교량이 출현할 것이며, 이에 앞서 복합적인 교량이 완충역할을 할 것이다.” 라고 하였다.

여기에서 소개하고자 하는 콘크리트 충전형 합성교각은 이러한 흐름의 한 형태라고 볼 수가 있다.

콘크리트 충전형 합성교각은 도시교통의 입체화에 따른 고가구조물, 기둥의 면적을 줄이고자하는 초고층 빌딩, 그리고 장대교량에 적용할 수 있는 매우 적합한 구조시스템이라고 할 수 있다. 이는 콘크리트 충전형 합성교각의 높은 내하력, 국부좌굴의 억제에 따른 변형성능의 우수성, 그리고 열악한 환경에서의 시공능력 등의 장점을 최대한 활용할 수 있기 때문이다.

콘크리트 충전형 합성교각이란, 주로 축방향 압축력을 받는 폐단면의 강재 기둥에 부재 축방향을

따라 콘크리트를 충전함으로 강재와 콘크리트가 일체가 되어 외력에 저항하는 기둥을 말한다. 힘이나 전단에 대한 합성작용이 부족한 경우에는 전단연결재를 이용하여 설계를 행한다. 콘크리트 충전형 합성 교각의 단면은 그림 1과 같이 원형과 사각형 단면이 있다.

1901년 Swell에 의해 건축물의 기둥 부재에 대한 강성을 증가시키기 위하여 콘크리트 충전 각형 강관 기둥이 고안된 이후, 1950년경부터 미국에서 사용되기 시작하였다. 토목구조물에는 영국에서 1963년 Almondsbury 입체 교차로 도로교공사의 하부구조에 콘크리트를 충전한 대구경 강기둥을 적용하기 위한 실험적 연구가 수행되기 시작하면서 점차 콘크리트 충전형 합성교각에 대한 관심이 높아지기 시작하였으며, 점차 이에 따라 활용의 폭이 높아질 것으로 보인다.

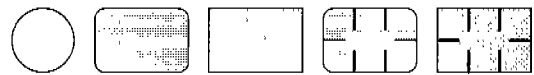


그림 1 콘크리트 충전형 합성교각 단면

* 전남대학교 토목공학과, 박사과정
** 정회원 · 전남대학교 토목공학과, 부교수

2. 콘크리트 충전형 합성교각의 특징

콘크리트 충전형 합성교각은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- (1) 기둥 단면을 크게 하지 않고 강재와 콘크리트의 합성효과로 인하여 중공 강관 기둥보다 큰 내하력을 발휘할 수 있다.
- (2) 강성이 크므로 처짐이 작다.
- (3) 강재와 콘크리트의 합성 효과로 인하여 변형성능 및 인성(Toughness)이 우수하다.
- (4) 충전된 콘크리트가 강재의 국부 좌굴을 방지할 수 있다.
- (5) 큰 압축력이 작용하더라도 외측 강재에 의해 충전 콘크리트의 압축과괴가 방지된다.
- (6) 충전 콘크리트의 열용량 효과에 의해 중공 강관보다 내화성이 유리하다.
- (7) 강재가 콘크리트 타설에 대하여 거푸집 역할을 하게 되므로 시공환경이 열악한 건설공사에 적합하며, 내진 성능이 우수하다.
- (8) 단면 외측에 강재를 배치하므로 강재에 고장력강을 이용한 경우라도 강재를 항복영역에 도달할 때까지 유리하게 이용할 수 있다.

강재와 콘크리트가 합성된 부재의 인성은 일반적으로 각각 재료의 인성과 부착특성에 의해 지배된다. 위에서 콘크리트 충전형 합성교각의 특징을

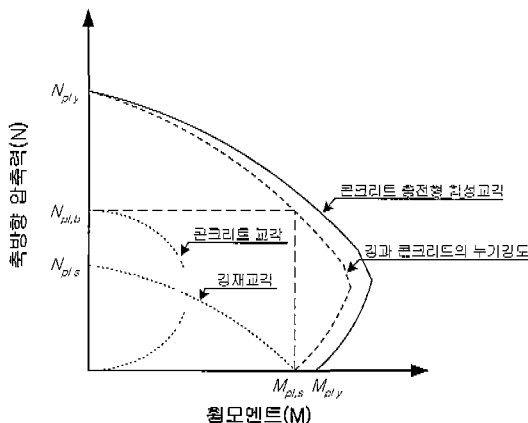


그림 2 축방향 압축력과 휨 모멘트를 동시에 받는 콘크리트 충전형 합성교각의 내하력

살펴본 바와 같이 콘크리트가 강재의 의해 구속을 받고 있으므로 우수한 인성이 얻어진다. 또한 그림 2와 같이 강재와 콘크리트의 강도를 단순하게 누가 시킨 것보다도 큰 내하력과 우수한 인성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그러나 콘크리트 충전형 합성교각의 인성은 파괴형상에 따라 크게 좌우되므로 이를 설계에 직접적으로 반영하기는 정량적으로 곤란한 점을 내포하고 있으므로, 우리나라에서는 일본 건축학회의 『건축 내진 설계에서의 보유 내하력과 변형 성능(1981)』을 참고하고 있는 실정이다.

3. 콘크리트 충전형 합성교각의 응용

3.1 콘크리트 충전형 합성교각의 구비사항

콘크리트 충전형 합성구조가 기본적으로 구비하여야 할 사항으로는 첫째, 강재와 콘크리트의 일체성이 유지되어야 하고, 둘째, 강재와 콘크리트 모두에 축력이 재하되어야 한다. 콘크리트 충전형 합성교각은 강재의 하중분배율 δ 가 작아짐에 따라 철근콘크리트 부재와 같이 거동하며, 반대로 커지면 강부재로써의 거동이 지배하게 된다. 따라서 작용 축력을 강재 및 충전 콘크리트 각각의 부재에 균등하게 분포시키기 위하여 강재 부분에 분배된 축력은 다음 범위 내로 하도록 하고 있다.

$$0.2 \leq \delta \leq 0.9$$

여기서, $\delta = \frac{N_{sp}}{N_p}$

N_p : 콘크리트 충전 합성강 기둥의 전소성 축력
 N_{sp} : 강재부분의 축력

3.2 콘크리트 충전형 합성교각에 대한 허용응력 설계

콘크리트 충전형 합성교각에 대한 허용응력 설계는 기존의 교각설계에 준하며, 여기에서는 이에 포함되어 있지 않은 사항에 대하여 설명하고자 한다.

(1) 콘크리트 타설에 대한 축압(C_p)

콘크리트 충전형 합성교각의 실제 축압은 충전 높이 $H=5.1m$ 인 경우에 대하여 그림 3과 같이 분포하고 있다. 이러한 실험적인 연구와 해석적 평가를 토대로 하여 실제 콘크리트 충전형 합성 교각의 설계에 이용되는 축압의 계산에는 그림 4와 같이 축압이 분포한다고 가정하여 식 (1)과 식 (2)에 의하여 계산하고 있다.

$$C_p = 0.8 + \frac{80 \cdot R}{T + 20} \leq 15 \quad (tf/m^2) \quad (1)$$

$$C_p = 2.4 \cdot H \quad (tf/m^2) \quad (2)$$

여기서, R : 타설의 속도 (m/h)
 T : 강재내의 콘크리트의 온도($^{\circ}C$)
 H : 콘크리트의 충전높이 (m)

콘크리트 충전형 합성교각의 축압은 시공중 콘크리트의 타설속도와 타설시 콘크리트의 온도에 의하여 영향을 받는다. 이에 대하여 그림 5에서

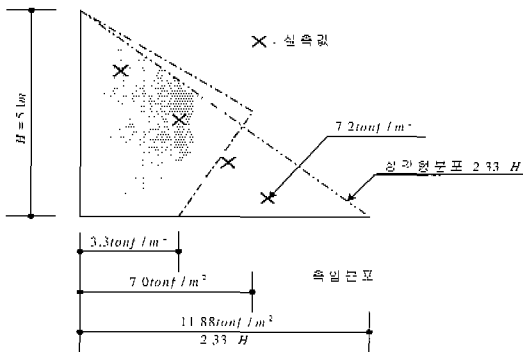


그림 3 콘크리트 충전형 합성교각의 실축압 분포

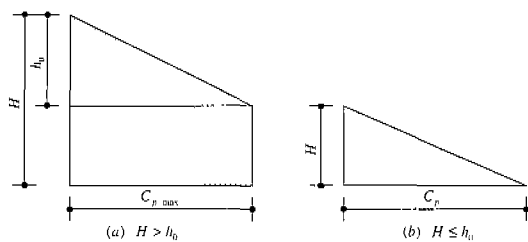


그림 4 콘크리트의 축압분포

살펴보면 온도의 변화에 따라 축압이 변화되는 현상을 확인할 수 있을 것이다.

(2) 허용응력설계법에 의한 콘크리트 충전형 합성교각의 설계

콘크리트의 변형률곡선은 원형단면일 경우와 사각형단면일 경우에 대하여 그림 6처럼 사용하여도 좋다고 하고 있다.

보강리브가 있는 경우의 국부좌굴강도는 그림 7에 보이듯이 횡보강재 또는 나이나 프램으로 고정지 지된 강재와, 종보강재로 구성되는 T형 단면 기둥과 같이 그림 8에서 표현되는 것처럼 강부재의 외 축에만 좌굴변형하는 것으로 계산하고 있다.

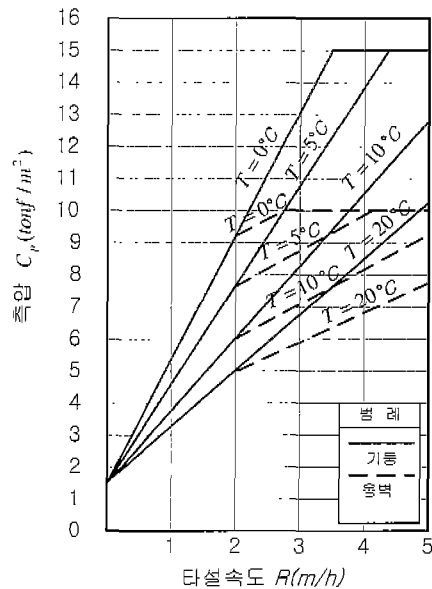


그림 5 콘크리트의 타설속도 및 타설시 콘크리트의 온도와 축압관계

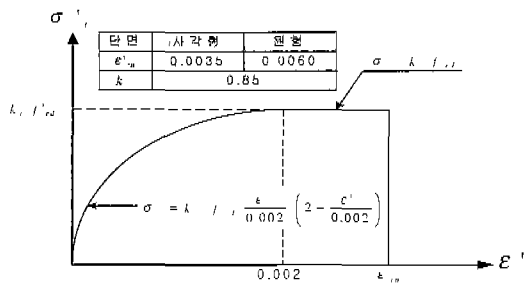


그림 6 콘크리트의 모델화된 응력-변형률 곡선

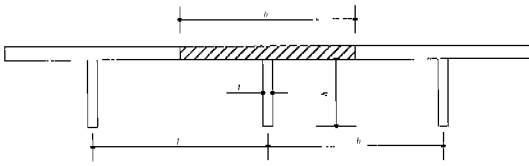


그림 7 T형단면 기둥

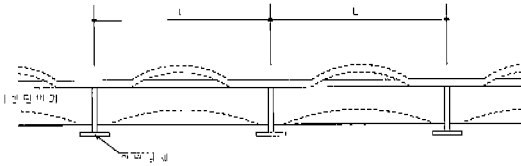


그림 8 T형단면 기둥의 지지조건과 좌굴모드

콘크리트 충전형 합성교각의 허용휨응력과 허용 전단응력은 콘크리트의 저항을 무시하고 식 (3) 과 식 (4)와 같이 계산한다.

$$F_b = 0.75 \cdot F_y \quad (3)$$

여기서, F_y : 강재의 항복강도 (tf/cm^2)

F_b : 콘크리트 충전형 합성교각의 허용 휨응력 (tf/cm^2)

$$F_s = 0.4 \cdot F_y \quad (4)$$

여기서, F_y : 강재의 항복강도 (tf/cm^2)

F_s : 콘크리트 충전형 합성기둥의 허용 전단응력 (tf/cm^2)

콘크리트 충전형 합성교각의 허용압축응력은 압축력만을 받는 경우와 휨과 축력을 받는 경우로 구별하여 아래와 같이 구분하여 계산을 하고 있다.

(가) 압축력만 받는 부재

장기 압축응력을 받는 콘크리트 충전형 합성교각의 허용압축응력 F_c 는 다음에 따른다.

$$i) \frac{KL}{r_m} \leq C_c \text{ 일 때}$$

$$F_c = \frac{\left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL}{r_m C_c}\right)^2\right] F_{ym}}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left(\frac{KL}{r_m C_c}\right) - \frac{1}{8} \left(\frac{KL}{r_m C_c}\right)^3} \quad (5)$$

$$ii) \frac{KL}{r_m} > C_c \text{ 일 때}$$

$$F_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E_m}{F_{ym}}} \quad (6)$$

여기서,

$$C_c : \text{한계세장비} \left(= \sqrt{\frac{2\pi^2 E_m}{F_{ym}}} \right)$$

KL : 좌굴길이

(나) 휨과 축력을 받는 부재

콘크리트 충전형 합성교각은 다음 식을 만족하여야 한다.

i) 휨과 압축력을 받는 경우

$$\left(\frac{f_c}{F_c}\right)^2 + \frac{C_{mx}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{cx}}\right)} \cdot \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{C_{my}}{\left(1 - \frac{f_c}{F'_{cy}}\right)} \cdot \frac{f_{by}}{F'_{by}} \leq 1.0 \quad (7)$$

ii) 휨과 인장력을 받는 경우

$$\frac{f_t}{F_t} + \frac{f_{bx}}{F_{bx}} + \frac{f_{by}}{F_{by}} \leq 1.0 \quad (8)$$

여기서, F_t : 강재의 허용인장응력도 (tf/cm^2)

f_t : 인장응력 (N_t/A_s)

N_t : 인장력 (tf)

iii) 원형 콘크리트 충전형 합성교각에 대한 허용압축응력은 그림 9와 같이 ①, ②, ③의 경우에 대하여 각각 AIJ-ASD 기준식에 의하여 설계에 적용하고 있다.

(3) 콘크리트 충전형 합성교각의 부착설계

콘크리트의 부착응력은 원형과 사각형강재에 대

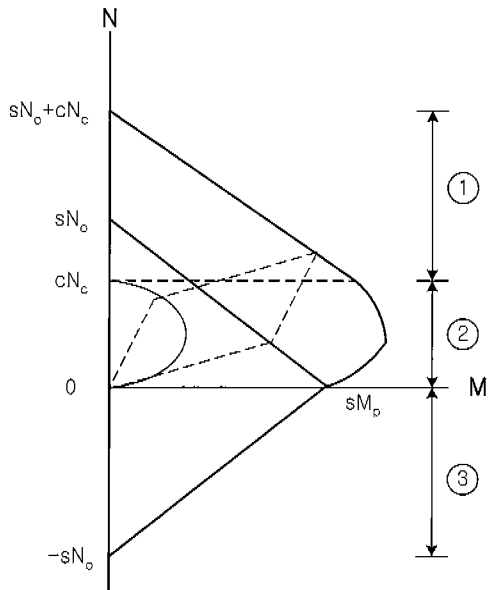


그림 9 AIJ -ASD 기준

표 1 허용부착응력(kgf/cm^2)

단면형	장기	단기
원형강재	1.5	2.25
각형강재	1.0	1.5

하여 표 1과 같이 사용기간의 여부에 따라 장기와 단기로 구분하여 정하고 있다.

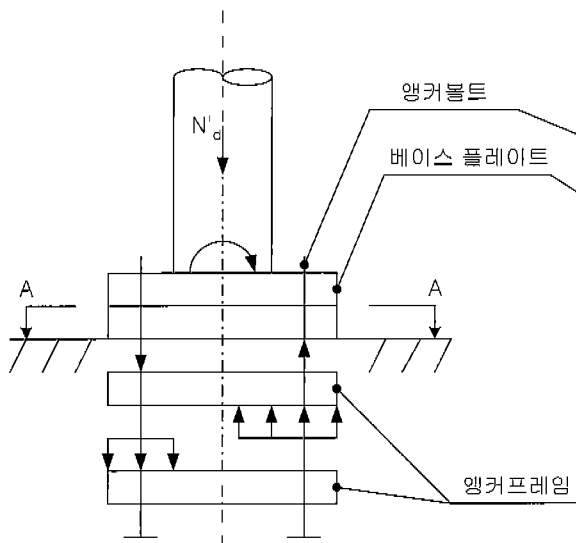


그림 11 축력과 휨모멘트(거더방식)

(4) 기둥기초부 설계에

기둥기초부 구조의 설계방식에 주로 사용되고 있는 방식은 앵커프레임방식과 매입 또는 소켓 방식이 있다. 이에 대한 예를 그림 10에 표시하여 보았다.

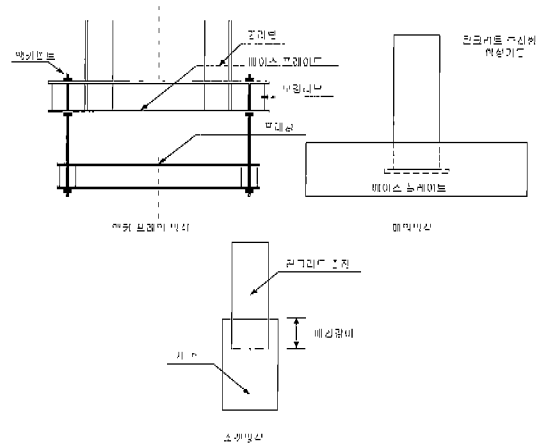


그림 10 기둥기초부의 구조예

(가) 앵커 프레임 방식의 설계

휨 모멘트와 축방향력을 받는 경우에 대한 안정성의 검토는 거더방식의 경우와 RC방식의 경우로 구별하여 설계를 행하고 있다.

i) 거더방식의 경우 축방향압축력 및 인장력

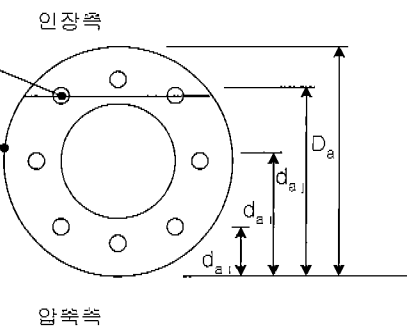


그림 12 앵커볼트의 배치(A-A)

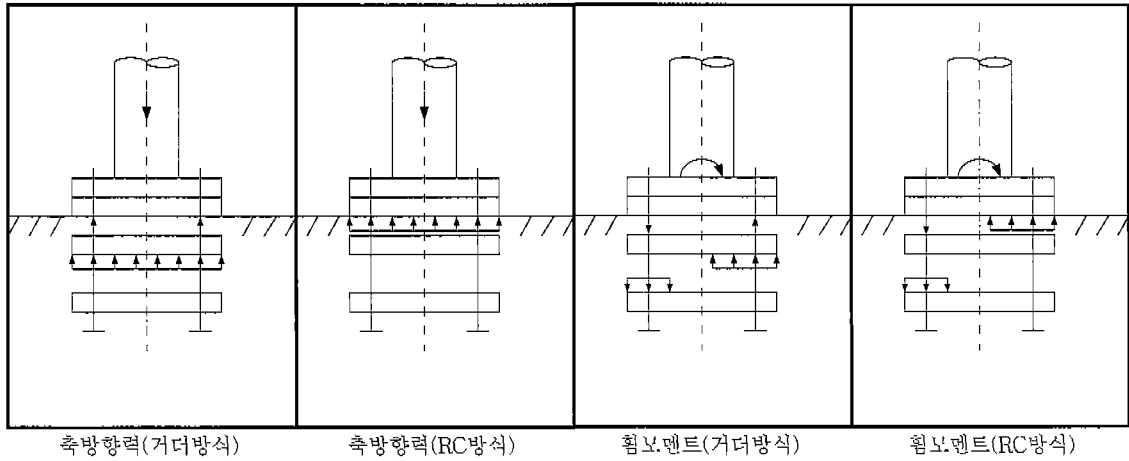


그림 13 거더방식과 RC방식의 내하기구의 비교

에 대해서는 앵커 프레임과 프레임 하부의 기초 콘크리트간의 지압력에 의해 저항한다.

- ii) RC 방식의 경우, 축방향 인장력에 대해서는 앵커 프레임 방식과 같이 저항하지만 축방향 압축력에 대해서는 베이스 플레이트로부터의 지압에 의해서 기초 콘크리트에 전달한다.

전단력에 대한 안전성의 검토는 전단에 대한 거동이 그림 14와 같이 이루어지므로 이에 대한 설계는 현재 『2000년 도로교 설계기준』의 강교편에 의하여 수행하여도 될 것이다.

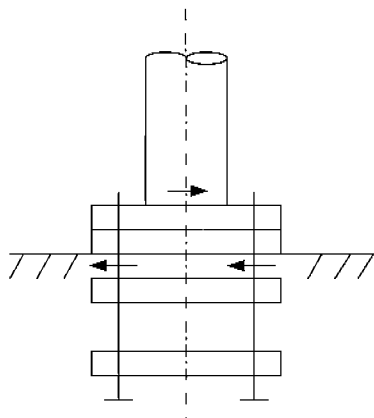


그림 14 전단 내하 기구

(나) 베이스플레이트의 설계

베이스부에 플레이트 및 리브를 설치하여 기둥 기초부에 작용하는 단면력이 균일하게 앵커볼트 및 기초구조물로 전달될 수 있도록 설계를 수행하여야 한다. 베이스부의 상·하에 설치하는 플레이트의 최소 판두께는 리브로 삼변이 고정되고 일변이 콘크리트에 단순지지 되는 단형판으로 생각하여 이방향 슬래브로 설계하도록 하고 있다.

앵커 볼트는 동일한 지름을 갖도록 하고 전후 좌우 각각 대칭으로 배치한다.

앵커프레임은 기초콘크리트에 의한 항력이 앵커볼트에 작용하는 인장력에 저항할 만한 매입깊이를 가져야 한다.

(다) 매입방식의 설계

매입기둥표면으로부터 기초단면까지의 거리가 적은 경우는 주로 기둥기초부 또는 매입부 단부로부터 전단 파괴를 일으킨다. 이에 대해서는 주로 매입 깊이를 크게 함과 동시에, 기초구조물의 매입부 주변의 주철근과 배력철근을 증가시킴으로써 이를 방지할 수 있다.

(라) 소켓방식의 설계

소켓식 접합부의 내하기구는 소켓강재 및 충전 콘크리트의 전단력 및 마찰 저항력으로부터 성립된다고 생각한다. 소켓강재에의 매입깊이는 일반적으로 기둥직경의 1.5배 이상으로 하고 있다.

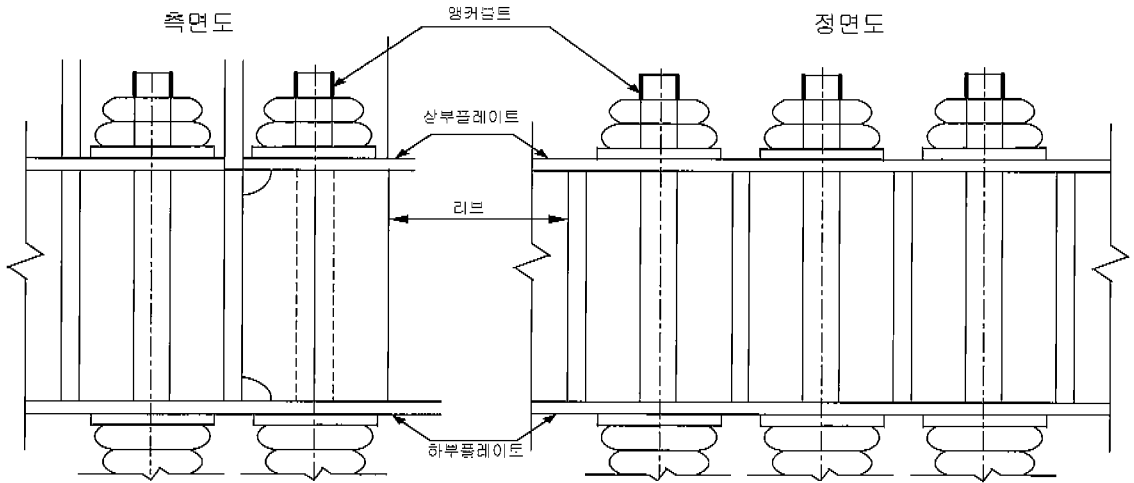


그림 15 베이스 부의 구조

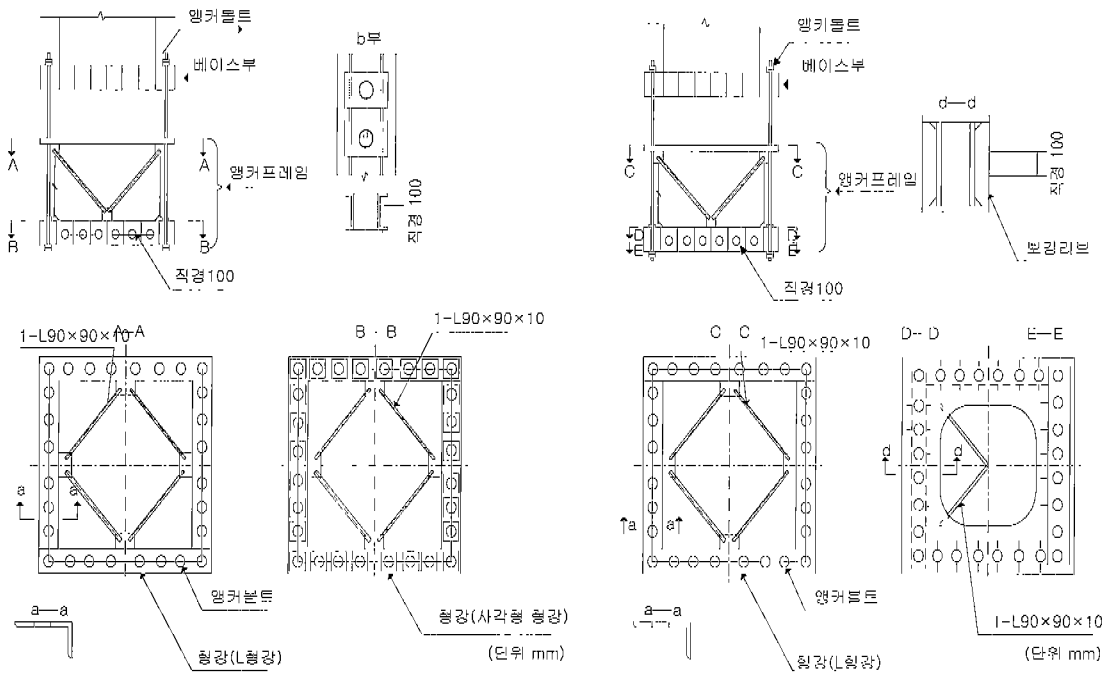


그림 16 현재 사용되는 앵커프레임의 예

4. 결 론

콘크리트 충전형 합성교각은 위에서 살펴본 바와 같이 설계에 대한 보완할 사항이 아직은 남아 있지만, 콘크리트를 충전함으로써 접합부의 전단지연 현상을 무시할 수 있다는 점과 기능기초부에 복잡한 보강재의 설치할 필요가 없다는 점, 그리고

중공 단면보다 콘크리트의 충전효과로 인하여 강제의 두께를 얇게 할 수 있다는 점 등으로 인하여 재료비나, 현장 시공의 경비를 고려하여도 중공 강제 교각에 비하여 경제적이라고 할 수 있다. 또한 실제 처짐에 대해서도 중공 강제 교각의 처짐량의 60%가 되므로 강성이 큰 유리한 구조 형식이라고 할 수 있다.

콘크리트 충전형 합성교각은 서두에서 말한 바

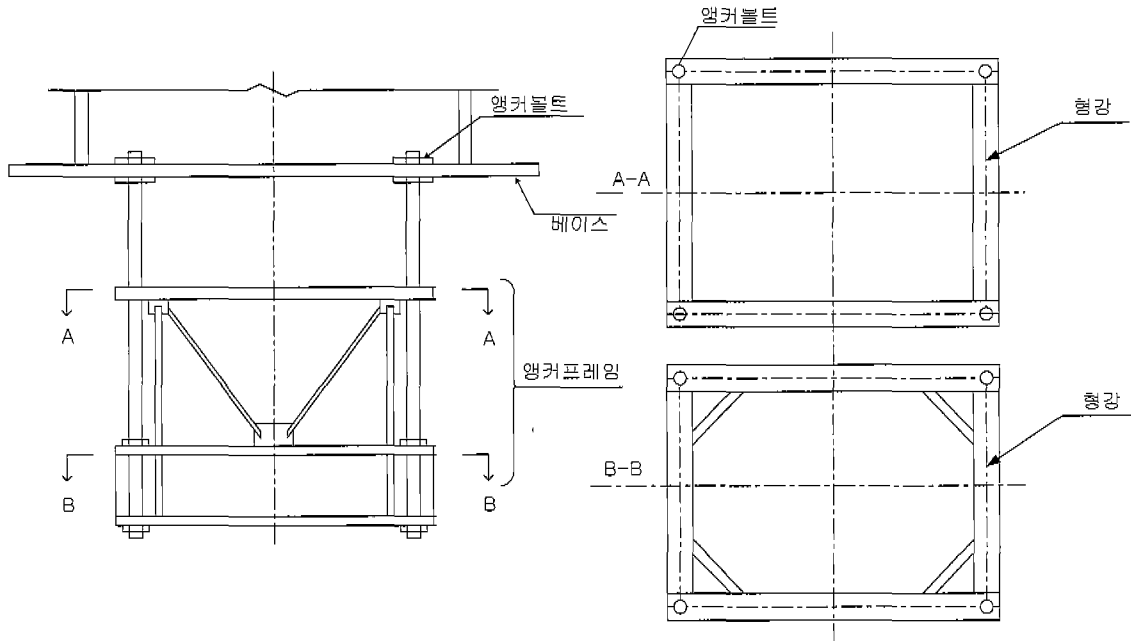


그림 17 앵커프레임의 예

와 같이 콘크리트, 강재와 같이 구조적인 또 다른 재료로써 이야기할 수 있을 것이다. 이러한 콘크리트 충전형 합성교각은 하부 내진설계 및 도심 고가 구조물에 대한 문제점을 해결할 수 있는 적극

적인 방법이 될 수 있을 것이다. 따라서 보다 실험적인 연구와 병행하여 해석적인 검증이 이루어지므로써 최적의 국내 설계 기준을 제시하는 것이 바람직하다고 하겠다. 