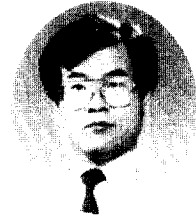


특 집

건축 프리캐스트 콘크리트 구조

프리캐스트 콘크리트 구조 접합부 설계 Design of Precast Concrete Structure Connections



정 란*

1. 머리말

프리캐스트 콘크리트 공법에 의한 구조물이 다른 현장 타설 공법에 의한 구조물과 다른점은 부재와 부재를 연결하는 구조요소인 접합부가 존재한다는 것이다. 이 접합부는 공장에서 생산되는 부재와 달리 반드시 현장에서 접합된다. 따라서 부재를 집합할 때에는 매우 세심한 주의를 기울여 시공하여야 하고 이 접합부의 시공상태가 전체 구조물의 성능을 좌우하게 된다 하여도 과언이 아니다. 왜냐하면 공장에서 생산되는 부재에 대하여는 품질 측면에서 믿을 만하다고 여기지는 반면에 접합부의 시공은 현장에서 이루어지므로 인력관리나 품질 관리가 매우 어렵기 때문이다.

이러한 접합부의 종류에는 1) 내력벽과 내력벽 2) 내력벽과 바닥판 3) 바닥판과 바닥판 4) 기타 계단과 다른 부재 등이 접합되는 접합부가 있다. 이를 크게 접합부의 방향에 따라 분류하면 1) 수평접합부와 2) 수직접합부가 있다. 또한 부재를 집합하는 방법으로 분류하는 것을 일본의 예를 들면 1) 현장타설 콘크리트 또는 모르타에 의해 응력이 전달되는 습식접합부(wet joint)와 2) 형강

또는 기타 철물의 용접, 나사조임, 압착 등을 이용해서 응력을 전달하는 건식접합부(dry joint)가 있고 미국식으로 분류하자면 1) 현장타설 콘크리트 또는 모르타에 의하여 접합되는 접합부(cast-in-place connections) 2) 강재를 용접하여 접합하는 접합부(welded connections) 3) 기계적인 도구에 의해 접합되는 접합부(mechanical connections) 등이 있다. 일본식 분류 습식 접합부는 미국식 분류의 CIP 접합부와 같고 건식 접합부는 용접접합부와 기계적 접합부와 같은 형태이다.

이러한 접합부를 설계하려면 우리나라 프리캐스트 콘크리트 조립식 건축구조 설계기준 및 해설(참고문헌 1, 1992, 건설부, 이하「PC 설계 기준」이라 한다)에 따라야 하는데 PC 부재의 접합 형태가 천차만별이고 설계 개념이 다를 수 있기 때문에 미국에서는 기본적으로 구조 기술자의 판단에 맡기고 있다. 즉 설계기준의 적용에 있어 내력을 결정하는 기준식 뿐만 아니라 강도감소계수(ϕ factor)와 하중계수까지도 실험과 이론적인 해석 결과에 따라 구조 기술자들이 스스로 판단하도록 하고 있다. 예를들면 PCI(precast concrete Institute)에서는 하중계수를 정하는데 있어서 하중계수(E)를 1.0에서 1.33까지의 값중 다음과 같은

* 정회원, 단국대학교 건축공학과 부교수

인자들이 미치는 영향에 따라 그때 그때 구조기술자의 판단에 따라 적절한 값을 선택할 수 있도록 규정하고 있다.

즉,

- 1) 파괴모드(콘크리트 파괴인가 혹은 철이 파괴되는가?)
- 2) 재하되는 하중이 어느정도 예측 가능한가?
- 3) 파괴의 결과가 얼마나 치명적인가?
- 4) 부재 제작과 시공에 대한 품질관리에 있어서의 오차와 신뢰성 정도는 어느 정도인가?
- 5) 사람에 따라 발생할 수 있는 오류 (human error)의 확률은 어느정도 인가?
- 6) 경제성이 어느정도 있는가?

등이다.

한편 우리나라 PC 설계 기준의 제6장 접합부의 설계에서 분류한 방법으로는 1) 벽식구조의 수평 접합부와 2) 수직 접합부 및 3) 골조식 구조의 접합부 등으로 되어 있어 이번호 특집에서는 벽식구조의 수평접합부와 수직접합부에 관한 내용만을 언급하기로 한다.

2. 수평접합부

2.1 수평접합부에 발생하는 응력

수평접합부에 작용하는 힘은 주로 자중 및 직재

하중에 의한 수직하중과 바람, 지진 등에 의해 발생하는 횡력과 바닥판의 다이아프램 작용에 의해 발생하는 수평하중이 있다. 이러한 힘들에 의해서 수평접합부내에는 그림 1에서 보는 것과 같이

- 1) 수평접합부에 연직방향으로 발생하는 압축응력과 인장응력
- 2) 수평 접합부와 나란한 방향으로 발생하는 수평전단응력
- 3) 접합부면에 수직방향으로 발생하는 수직전단응력
- 4) 접합부와 직각방향으로 발생하는 압축응력과 인장응력 등이 발생하게 된다.

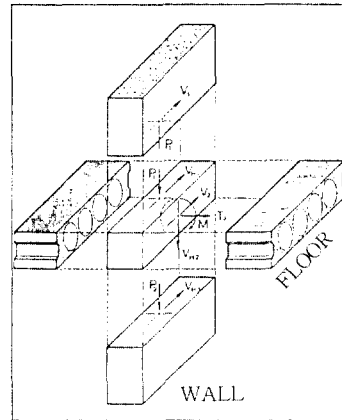


그림 1 수평접합부에 발생하는 여러가지의 힘

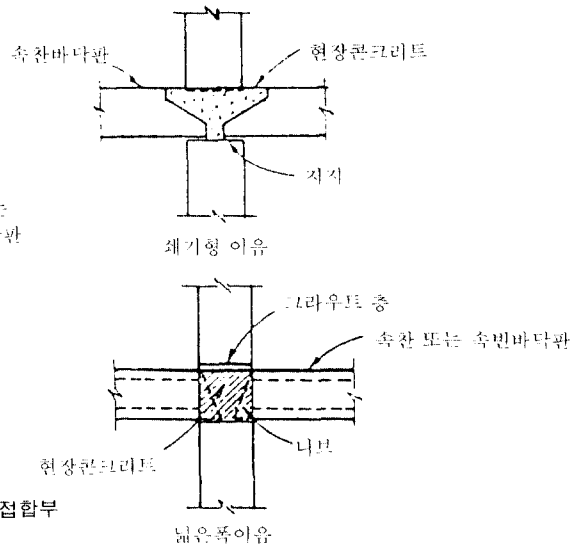
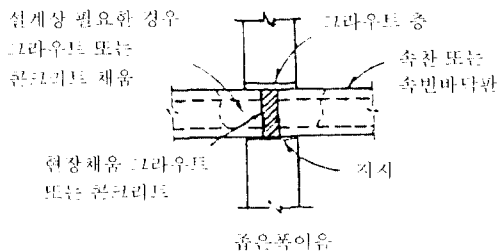


그림 2 우리나라 PC 기준에서 분류하고 있는 수평접합부의 종류

2.2 수평접합부에 발생하는 변형

우리나라 PC 기준에서는 수평접합부를 그 형태에 따라 1) 좁은 폭 접합(closed joint) 2) 쐐기형 접합(wedge joint) 3) 넓은 폭 접합(open joint)로 분류하고 있다.(그림 2)

이러한 접합부를 설계할 때에는 기본적으로 구조설계기준에 따라야 하나 유럽에서는 많은 부분을 실험을 통해 내력을 산정하도록 권장하고 있다.[참고문헌 2]

수평접합부의 직압력에 의한 파괴형태로는 시

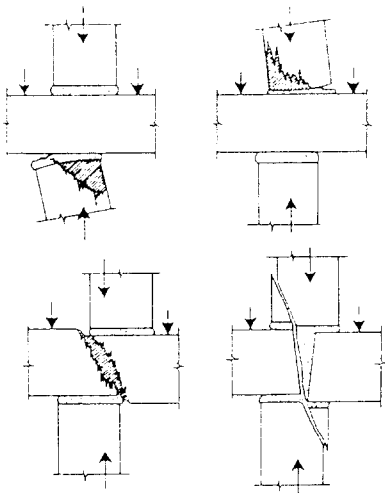


그림 3 초기 변형에 의한 수평접합부의 파괴형태

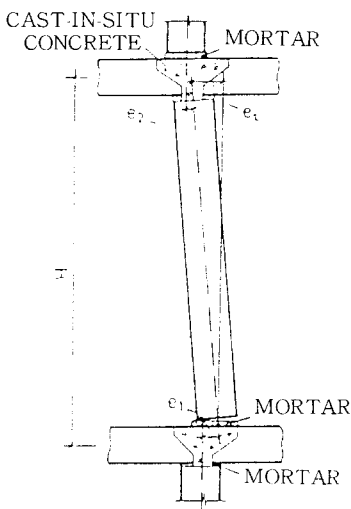


그림 4 프리캐스트 벽판의 층간 변위

공오차에 의한 초기변형(initial imperfection)에 의한 파괴(그림 3참조)와 정상파괴 등이 있는데 초기변형의 원인으로는

- 1) 수직 축에 대한 벽판 부재의 수평편심(그림 4의 e_1, e_2)
- 2) 부재의 경사(e_t)
- 3) 벽판 부재 사이의 콘크리트 압축강도 차
- 4) 수평접합부 내의 모르터 두께
- 5) 모르터 강도의 감소
- 6) 국부적인 결함

등이 있다.[참고문헌 3]

2.3 수평접합부의 설계

바닥판 다이아프램 거동이나 횡력으로부터 야기되는 수평방향 전단력은 그라우트의 전단강도, 마찰 또는 전단마찰로 저항된다. 그러나 건조수축 변형 등은 벽체와 그라우트 사이에 균열을 발생시키고 마찰력을 감소시키기 때문에 전단 저항력이나 전단마찰 저항력이 설계에 사용되어야 한다.

수평접합부의 수평전단 강도에 대하여 규준에서 요구하는 값은

$$\begin{aligned} \overline{V}_u &\leq \phi v_{cg} \cdot t \cdot L \quad (\text{전단}) \\ &\leq \mu P_u \quad (\text{마찰}) \end{aligned}$$

중 작은 값으로 하게 되어 있다.

여기에서

$$\phi = 0.85$$

$$v_{cg} = \text{그라우트 전단강도, kg/cm}^2$$

$$\leq 0.2 f_g$$

$$\leq 56 \text{ kg/cm}^2$$

$$t = \text{접합부 그라우트의 폭, cm}$$

$$L = \text{접합부의 계산하는 길이, cm}$$

$$\mu = \text{마찰계수}$$

$$= 1.0 \text{ 요철형 표면}$$

$$= 0.6 \text{ 평활한 표면}$$

$$P_u = \text{극한 수직 하중}$$

$$V_u = \text{수평전단강도}$$

이다.

. 마찰계수를 정할때, 요철형 표면과 평활한 표면을 판단하는 기준으로는 ACI 318-89[참고문헌 4] 11. 7. 9절에 규정된 조항에 따르면 좋을 것이다. 즉, ACI 318-89 11. 7. 9절에서는 마찰로 전단을 전달하려면 접촉면은 깨끗하고 레이턴스가 없어야 하며 마찰계수 1.0에 해당하는 요철형 표면이란 요철의 크기가 대략 6mm(1/4 in.) 정도 이상 되게끔 기질게 만들어야 하는 것으로 규정하고 있다.

마찰력을 통하여 수평 전단강도를 얻고자 할 때에는 반드시 직압력이 존재하여야 하는데 이 직압력은 하중계수를 곱하지 않은 재하하중이나 가정된 균열면을 지나는 철근 또는 포스트-텐션력에 의해서 얻어질수 있다. 철근에 의해서 직압력을 계산할 때에 철근량은 전단 마찰식에 의해 구할 수 있다.

즉,

$$A_{vf} = \frac{V_u}{\phi f_y \mu} \quad \bar{V}$$

여기서

A_{vf} = 전단마찰 철근의 단면적, cm^2

$\phi = 0.85$

f_y = 철근의 항복강도, kg/cm^2

$\leq 4000 kg/cm^2$

μ = 마찰 계수

이다.

이 전단마찰 철근은 가정된 균열면을 따라 균등하게 벽판에 적절히 정착되어 배치되어야 한다. 또한 안정성 측면에서 그림5의 인장면은 접합부 전체길이의 1/3 이하로 하여야 하며 수평전단 내력을 계산할때 인장면의 균열폭이 0.4mm(1/64 in.) 이상으로 계산된 부분은 제외시켜야 한다. 기타 다른 철근이나 포스트-텐션 철근, 혹은 연결 장치에 의해 추가되는 전단 내력은 적절한 강도에 따라 추가로 고려될 수 있다.[참고문헌 5]

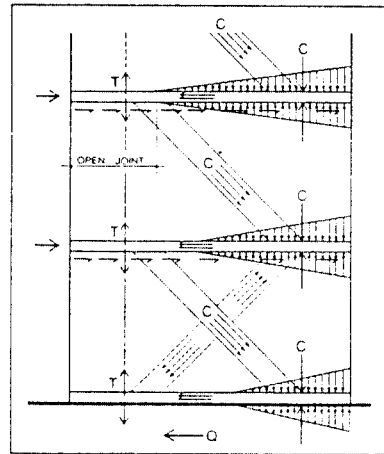


그림 5 수평접합부에 작용하는 압축력과 인장력

3. 수직접합부

3.1 수직접합부에 발생하는 응력

수직접합부는 접합부를 통하여 하중을 전달하고 인접한 벽체 사이에 발생할 수 있는 상이한 변위를 제한하는 역할을 한다. 크기가 일정한 수직하중만 작용한다면 수직접합부는 압축력만을 받게되어 구조적인 문제가 없으나 실제 PC 건물에는 그림 6과 같이 지진이나 바람 등의 불균등한 하중이 작용하기 때문에 판과 판사이의 접합부에는 전단력이 발생되어 응력의 집중과 균열을 유발시키게 된다.

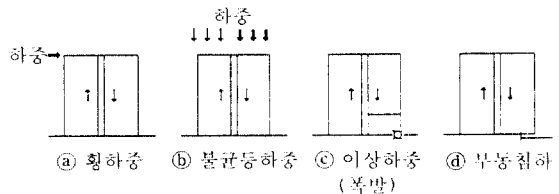


그림 6 수직접합부의 전단력 발생요인

또한 수평하중을 벽판으로 전달하기 위해서는 벽판사이에 존재하는 수직접합부가 인장이나 압축 혹은 인장 + 수직전단, 압축 + 수직전단 등의 힘을 잘 전달할 수 있어야 한다. 두께 혹은 그 이상의 벽판으로 구성되는 수직접합부의 역할은

힘을 전달하는 능력을 좌우하는 접합부 상세에 의해 결정된다. 따라서 수직접합부는 하나의 구조요소를 형성하도록 구성되거나 독립적으로 작용하도록 연결되어야 한다. 즉, 벽판이 서로 단독으로 작용하도록 설계되지 않는 한 벽판의 접합부는 보강철근으로 연결하여 연결된 벽판끼리 일체성을 갖도록 설계 되어야 하는 것이다.

이러한 수직접합부의 종류에는 힌지 접합(hinge connection), 홈접합(grooved joint connection), 기계적 접합(mechanical connection) 및 전단키 접합(keyed joint connection) 등이 있는데 우리나라에서는 거의 모든 공법이 전단키 접합을 채택하고 있다. 루프철근을 전단키내에 사용한 수직 접합부와 사용하지 않은 수직접합부의 전단강도는 그림 7과 그림 8에서 보는 바와 같이 보강철근의 효과에 의해 확실히 증대된다.

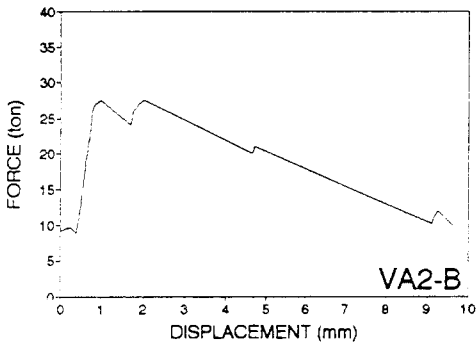


그림 7 루프보강철근이 없는 수직접합부의 전단력-변형곡선(참고문헌 6)

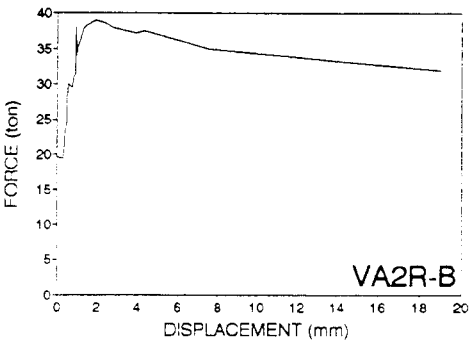


그림 8 루프보강철근이 있는 수직접합부의 전단력-변형곡선(참고문헌 6)

또한 변형능력도 보강철근이 있는 경우가 없는 경우보다 비교할 수 없을 정도로 크므로 우리 PC 구조설계기준에서는 일체화 설계를 할때에는 반드시 루프 보강철근을 사용하도록 규정하고 있다. [참고문헌 1, 6.3.3.(1)]

3.2 수직접합부의 설계

우리나라에서 현재 적용하고 있는 PC 구조 설계 기준에 제시된 강도 산정식은 Castellated된 수직접합부의 전단내력을 산정하는 데 있어서 강도에 영향을 미치는 인자로서 그라우트 강도(f_g)와 전단키의 깊이(t)와 크기(L), 전단키의 지압면적(A_c) 및 루프 철근의 항복강도(f_y)와 단면적(A_{lf}) 등을 들고 있다.

즉,

(1) 전단키가 있을 경우에 다음 ㉠ ㉢ 식의 전단강도 중 제일 작은 값을 택한다.

㉠ 접합부 그라우트의 전단강도

$$\phi V_{nj} = \phi \lambda V_c A_j \quad (\phi=0.85) \quad (1)$$

$$V_c : 0.53 \sqrt{f_g}$$

㉢ 전단키에 대한 전단강도

$$\phi V_{nk} = \phi 0.2 \lambda f_y A_k \quad (\phi=0.85) \quad \text{또는} \quad (2)$$

$$= \phi 56 \lambda A_k \quad \text{중 작은 값}$$

㉡ 전단키의 지압내력

$$\phi P_{nj} = \phi 0.85 \lambda f_y A_c \quad (\phi=0.85) \quad (3)$$

(2) 보강 철근은 접합부 형태에 관계없이 전단마찰 이론에 의한 식으로 계산된다.

$$\phi V = \phi \mu f_y A_s \quad (\phi=0.85) \quad (4)$$

μ : 접합부의 전단마찰 계수

총 전단력은 (1)항에서 계산된 값중에서 가장 작은값과 (2)항에서 계산된 수치를 합하여 얻을 수 있다.

여기에서 $\lambda : 1.0$

f_g : 그라우트의 압축강도

A_s : 수평 보강철근의 단면적

A_j : 접합부 면적

A_k : 전단키 면적

A_c : 지압되는 부위의 면적

이다.

상기식 중 ㉔는 사인장 균열시 일반 휨재의 전단강도 산정식으로서 PC 부재를 캔틸레버로 가정하여 유도된 식임을 알 수 있다. ㉕는 순수 전단에 대한 강도 산정식이며 ㉖는 전단키의 지압강도를 나타낸 것으로 국내 구조기준은 여러 상황을 고려하여 제안하고 있음을 알 수 있다. (2)항은 전단 마찰이론에 근거를 둔 식이다. 위 식에서는 전단키의 각도(α)와 깊이(t_k), 또는 높이(h) 등이 변수로 주어지지 않기 때문에 이들 수치에 관계없이 전단강도가 산정되게 되어있다.

수직접합부의 전단강도를 산정하는 기존의 제안식을 열거하면

Tassios & Tsokautas

$$V_{max} = 0.85 A_s f_y + 0.15 A_k f_c'$$

Chakrabati & Paul

$$V_{max} = 0.53 A_s f_y + 0.0963 A_k f_{cu}$$

$$(f_c' = 0.8 f_{cu} \rightarrow V_{max} = 0.53 A_s f_y + 0.077 A_k f_c')$$

Hansen

$$v_{max} = 1.0 A_s f_y + 0.09 A_k f_c'$$

Hashim

$$V_{max} = 0.49 A_s f_y + 0.442 A_k f_{cu}$$

$$(f_c' = 0.8 f_{cu} \rightarrow V_{max} = 0.49 A_s f_y + 0.035 A_s f_c')$$

김성수(1991)

$$V_{max} = 0.4 A_{si} f_y + 1.0 A_{kc} f_c'$$

$$(A_s = 4 A_{si}, A_k = 0.192 A_k)$$

$$\rightarrow V_{max} = 1.6 A_s f_y + 0.192 A_k f_c'$$

김상식(1993)

$$v_{max} = 1.564 A_s f_y + 0.04964 A_s f_{cu}$$

$$(f_c' = 0.8 f_{cu} \rightarrow V_{max} = 1.564 A_s f_y + 0.0397 A_k f_c')$$

노영숙 & 정란(1993)

$$V_{max} = f_1(\alpha, t_k/h) A_{sy} + f_2(\alpha, t_k/h) A_k f_c'$$

$$(f_1(\alpha, t_k/h) = (-110.5\alpha + 42.28)^{-1}$$

$$\times |100t_k - 176.5| + 1.2$$

$$f_2(\alpha, t_k/h) = (-150.3\alpha^2 + 115.1\alpha - 19.9)$$

$$I_n(0.9 + t_k/h)$$

상기 식중()안은 제안식 상호간의 비교를 위하여 부재 압축강도를 그라우트 압축 강도(f_{cu})의 80%로 치환한 것이다. 접합부의 극한강도는 일반

적으로 그라우트 압축강도와 그라우트의 프리캐스트 콘크리트와의 부착강도 및 전단키의 형상과의 함수 관계로 결정된다. 수직접합부의 파괴형상을 보여주는 그림 9와 그림 10에서 보는 바와같이 수직전단력은 전단키의 수평면과 이루는 각도 α 에 의해 인장과 압축으로 분해된다.

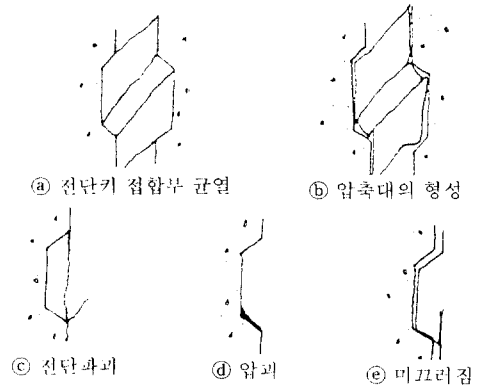


그림 9 수직접합부의 파괴 형상

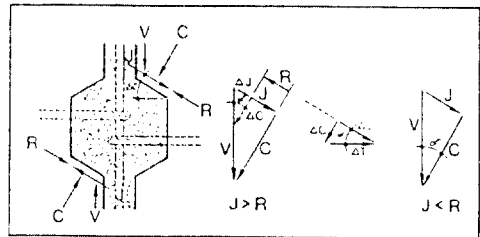


그림 10 수직접합부 전단키에 작용하는 힘

그림 10에서 보는 바와같이 분해된 힘 J와 C는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = V \sin \alpha \quad \text{식(1)}$$

$$C = V \cos \alpha \quad \text{식(2)}$$

여기에서 미끄럼력 J는 전단 마찰저항력 R에 의해 지탱되어지는데 그 값은

$$R = C \tan \phi \quad \text{식(3)}$$

이다.

마찰계수 값 $\tan \phi$ 를 안전측으로 0.6으로 가정하면 R이 J보다 클때에는 미끄럼이 발생하지 않을 것이므로

$$R > J$$

$$C \tan \phi > V \sin \alpha$$

$$\therefore \tan \alpha < 0.6$$

$$\alpha < 31.0^\circ$$

즉 마찰계수를 0.6으로 취할때 전단키가 수평면과 이루는 각 α 는 31.0° 미만이어야 미끄러짐이 발생하지 않고 그 이상이면 미끄러지게 되어 전단 내력에 영향을 끼치게 되는 것이다. 이에 관한 실험 결과를 분석한 [참고문헌 6]에 의하면 전단키의 각도 22° 내외에서 가장 큰 내력을 나타내고 있다. (그림 11)

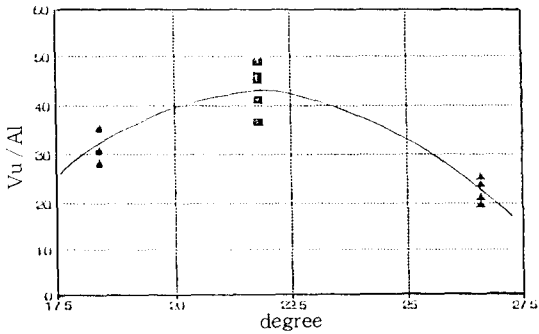


그림 11 전단키 각도(α)와 전단내력(τ_u)와의 비교

유럽의 CEB[참고문헌 7, 8] 각도 α 가 30° 이상이면 30° 이하일때에 비하여 전단내력의 값을 15% 정도 감소시키도록 규정하고 있다.

또한 전단키의 면적과 철근량, 철근의 항복인장강도에 대하여는 그림 12와 13에서 보는 바와 같

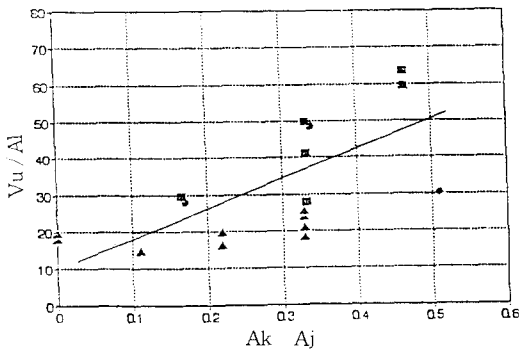


그림 12 전단키 면적(A_k / A_j)과 전단내력(τ_u)과의 비교

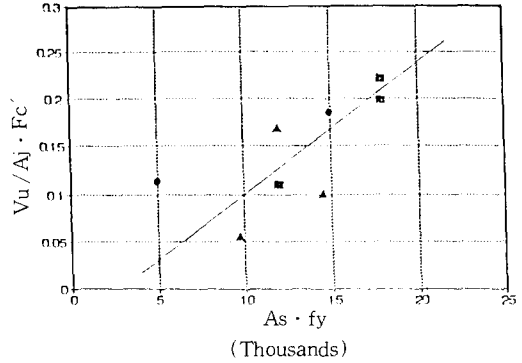


그림 13 철근량·항복인장강도($A_s \cdot f_y$)와 전단내력(τ_u)과의 비교

이 대략 선형으로 비례하는 것이 각종 실험보고서에서 보고 되고 있다.[참고문헌 6]

4. 맺음말

프리캐스트 콘크리트 구조의 접합부 내력은 접합부의 형태에 따라 무수히 달라 질수 있기 때문에 내력을 산정하는 식을 접합부 형태를 고려하지 않고 일률적으로 정하는데는 무리가 있다. 우리나라 PC 구조 기준은 미국의 PCI에서 제안한 값을 기본으로 하고 있기 때문에 접합부 형태가 비교적 단순한 미국식 PC 구조 접합부의 내력을 산정하는 데는 적절하나 우리나라에는 접합부의 형태가 다양한 유럽으로부터 도입된 여러가지 PC 공법들이 주류를 이루고 있기 때문에 우리나라 기준식을 그대로 적용하는 데는 다소 어려움이 따른다.

따라서 실험결과에 근거하여 내력을 산정하는 것을 권장하고 있는 유럽의 CEB 기준과 같이 우리나라에서도 실험과 이론적인 고찰을 통하여 우리 기준식을 검토하고 서로 다른 형태의 접합부의 내력을 산정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 이를 위하여 우리나라 PC 구조 기준식에서도 제1장 1절(3)항에서 특별한 조사 연구 또는 시험에 의하여 구조설계를 하는 경우에는 우리 기준식을 그대로 적용하지 않을 수 있도록 허용하고 있다. 다만 그러한 경우에는 그 근거를 명시하여 설계하여야 하며 공인된 심의 절차 등을 거쳐도록 하고 있다.

참 고 문 헌

1. 건설부, "프리캐스트 콘크리트 조립식 건축 구조 설계 기준 및 해설" 1992. 4
2. Conite Euro-International Du Beton "International Recommendations for the Design and Construction of Large Panel Structures," Bulletin D'Information No. 137
3. F. Bljucer "Design of Precast concrete Structures", John Wiley & Sons
4. ACI 한국지회 "철근콘크리트 구조계산규준(ACI 318-89)"
5. Precast Concrete Institute "PCI Manual for Structural Design of Architectural Precast Concrete"
6. 노영숙 "프리캐스트 콘크리트 대형판 구조의 수직 접합부 전단강도 특성에 관한 연구" 석사학위 논문 단국대학교 대학원, 1993.
7. Comite Euro-International Du Beton, Bulletin D'Information No.169
8. K. Hansen et. al "Keyed Shear Joints" SBI Rapport 97 · Statens Bygge for Sknjngsin Stjt-ut 1976

국내 및 해외 박람회 전시회 안내

■ 국내

- 전시회명 : 제 1 회 국제 시멘트 · 콘크리트 산업전
- 전시기간 : 1994년 11월 30일 ~ 12월 3일
- 전시장소 : 한국종합전시장(KOEX), 별관
- 주 최 : 한국전람(주)
Business & Industrial Trade
Fairs LTD. (Hong Kong)

■ 해외

- 전시회명 : The World of Concrete Exposition
- 전시기간 : 1995년 1월 29일 ~ 2월 2일
- 전시장소 : Georgia World Trade Center, Atlanta, Georgia, U.S.A.
- 전시품목 : Cranes & Accessories, Demolition Equipment, Earthmoving Equipment Engines, Excavators, Hoists, Power Tool, Pumps, Booms, Truck, Pick Rough-Terrain Cranes
- ◎ 전시특징 : 동 품목의 세계적인 박람회로 건설관련 학술회의 및 국제적인 심포지움이 병행 개최됨.
- ◎ 주 최 자 : The Aberdeen Group
- ◎ 연 락 처 : 426 South Westagate Road, Addlson, IL 60101
- ◎ 출품예정업체수 : 미국 - 6,500 외국 - 700 합계 7,200여개업체 (전회기준)
- ◎ 참관예정인원수 : 30,000여명
- ◎ 전시회참관비용 : 입장료 40달러