

## 시공 효율화를 고려한 공법계획과 구조설계

- Structural Design & Method Statements in the basis of Construction Efficiency -



이치노헤 히데오(一戸英男)\*  
Hideo Ichinohe

### 1. 서 론

필자는 일본 大成建設(주)에서 26년간 구조엔지니어로서 일을 해왔으며 1995년에 삼성물산(주) 건설부문에 입사했다. 현재까지 9년 3개월 동안 구조기술을 기초로 공업화 공법의 개발 및 적용과 Sliding 공법, Lift-Up공법 등과 같은 특수공법에 대한 엔지니어링을 행하여 왔다. 일본의 주요 건설회사들은 설계와 시공을 모두 수행하므로 자사 내에 수백명에서 수천명 규모의 건축설계, 구조설계, M&E 설계 인원을 갖고 있고, 수주한 민간공사의 설계 업무를 대부분 자사 내에서 행하는 Inhouse Design and Engineering and Construction의 방식을 취하고 있다. 구조기술자는 설계 초기단계부터 시공담당자와 생산성 효율화에 대해 지속적인 협의를 통해 최적의 공법과 구조 시스템을 도출하여 실시설계에 반영시킨다. 시공중에는 발주처의 대행자로서 구조설계자 자신이 직접 시공의 품질관리도 행한다. 필자는 1995년부터 현재까지 大成建設(주)에서 쌓아 온 경험과 노하우(know-how)를 기초로 생산성 효율화를 위해 PC화에 의한

공업화 공법을 개발하여, 반도체공장, LCD공장, 업무시설, 판매시설 등에 수많은 적용을 행하여 왔다. 아래에 PC화 공법의 개요와 구조설계·품질관리의 요점을 소개한다.

### 2. PC화 공법

#### 2.1 PC화 공법 개발의 배경

철근 콘크리트 재래(현장타설) 공법은 동바리, 형틀, 배근, 콘크리트 공사에 많은 노동력을 필요로 하며, 특히 형틀공사는 노무의 비율이 크다(표 1). 비, 눈, 바람, 온도 등의 자연 조건에도 큰 영향을 받고 철골조에 비해 장기간의 공기가 필요하게 된다. 특히 경간 및 층고가 크고 보크기도 상당히 큰 반도체 관련시설에서는

동바리와 형틀에 많은 노동력, 시간 및 비용이 필요하게 되며 공기단축의 방해요소가 되고 있다. 매우 짧은 공기 내에 고품질이 강하게 요구되는 하이테크 관련시설에는 이러한 생산성 효율화의 필요성이 크게 요구되어, PC화를 통한 공업화 공법을 개발·적용하게 되었다.

#### 2.2 부재의 PC화

부재의 PC화에 있어서는, 우선 어떤 부재를 어떤 방법으로 PC화 할지를 결정해야 한다. PC화한 경우의 구조성능, 접합방법, PC제작, 운반, 설치방법과 순서, 양중장비, 설치시의 동바리, 설치의 정밀도, 공사원가, 품질, 공기 등에 대하여 시공담당자, PC제작회사, 설치 담당자와 면밀히 협의하여 구조설계자가 결정해야 한다.

표 1. 철근 콘크리트 재래(현장타설) 공법의 공사비 구성사례

		재료비	노무비
형틀 공사	39%	35%	65%
철근 공사	36%	70%	30%
콘크리트 공사	25%	85%	15%

\* 삼성물산(주) 건설부문 기술본부 건축구조팀장, 부사장

큰보, 작은보					
Shape No.	①	②	③	④	⑤
단면형상					
Type	Half	Half	Full	Full	Half
동바리	필요	불필요	불필요	불필요	불필요
PC 내부 주근 배근	Bottom	Bottom	Cent. Top	Cent. Top	Cent. Top
			Bottom	Bottom	Bottom

그림 1. 큰보, 작은보의 PC화

기둥		
Shape No.	㉠	㉡
단면형상		
Type	Full	Half

그림 2. 기둥의 PC화

〈그림 1〉과 〈그림 2〉에 큰보, 작은보, 기둥의 PC화 사례를 나타내었다. 큰보, 작은보에는 필요에 따라 프리텐셔닝을 도입하였다. 슬래브는 하프 PC, 프리스트레스트 하프 PC 또는 트러스형 데크 등으로 하였다.

필요한 부재만 PC화하고, 현장타설 부재와 혼용하여 시공성과 제조원가의 균형을 맞추어 PC화와 현장타설공법 양쪽 모두의 장점을 살리도록 하여야 한다. 특히 기둥은 공기를 검토하여 문제가 없다면 선조립 철근과 시스템 형틀에 의한 현장타설 공법이 바람직하다. 높이가 높은 기둥( $h = 12\text{m}$  이상)은 하부현장타설, 상부 PC조를 혼용하면 유효하다. PC부재의 크기를 결정할 때, 중량 25톤 이하, 길이 15m 이하, 높이 3.6m 이하, 폭 2.4m 이하의 운송제한을 고려하여 설계하여야 한다. 설치시의 중량제한은 사용할 양중장비의 검토에 의해 결정한다. 층고 5~6m 이상의 것은 가능한 한 무지주 공법을 채택함이 바람직하다.

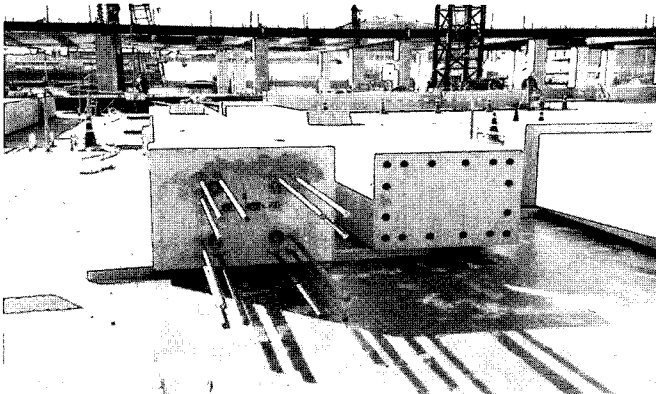


사진 1. 기둥(Full PC)

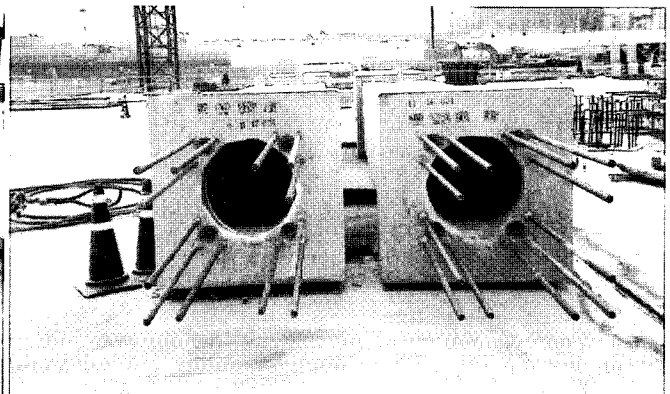


사진 2. 기둥(Half PC)

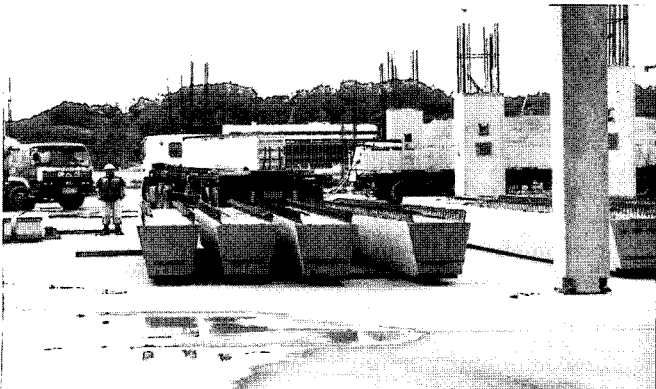


사진 3. 작은보(Full PC)

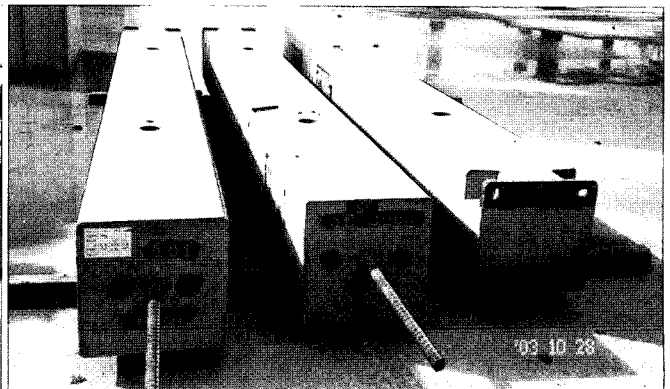


사진 4. Post

〈사진 1~4〉에 각부재의 PC화 사례를 나타내었다.

### 2.3 PC 부재의 접합

#### 2.3.1 기둥 과 큰보

기둥과 큰보의 표준 접합상세를 〈그림 3〉에 나타내었다. 패널존은 현장타설 습식 접합함으로서 구조적으로 강접합이 된다. 그 외에 2-Span Unit〈그림 4〉, 1½-Span Unit와 2-Span Unit를 조합하여〈그림 5〉 사용하는 것도 가능하다. 큰보의 PC 부재 크기는 조립시의 양중장비의 성능을 고려하여 가능한 한 대형화하고, 부재수를 줄이는 것이 원가절감, 공기단축에 유효하다.

#### 2.3.2 큰보와 작은보, 작은보와 작은보

표준적인 접합상세를 〈그림 6〉에 나타내었다. 모멘트 접합과 핀 접합이 있으며 모멘트 접합의 경우는 단부 상부근을 인접 경간까지 연속하여 배근한다. 무수축 모르타르 그라우팅은 상당히 중요하므로 확실한 품질관리가 필요하다.

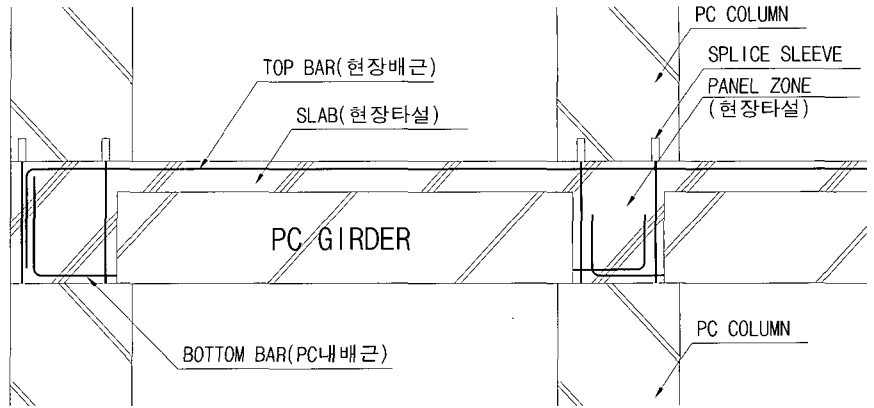


그림 3. 기둥과 큰보의 접합(1-Span Unit)

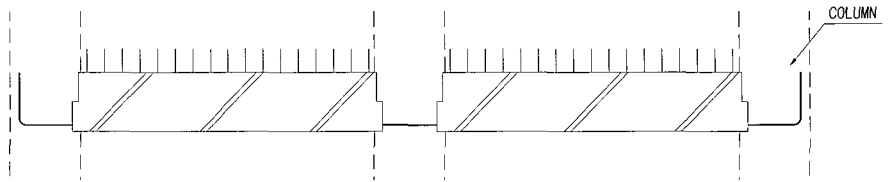


그림 4. 2-Span Unit PC 큰보

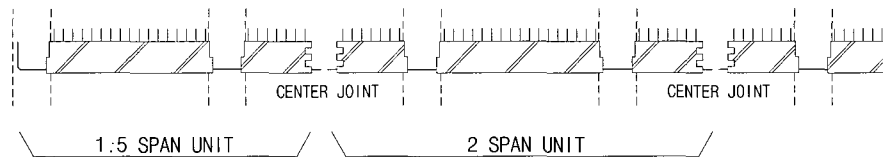


그림 5. 1½-Span Unit와 2-Span Unit의 조합

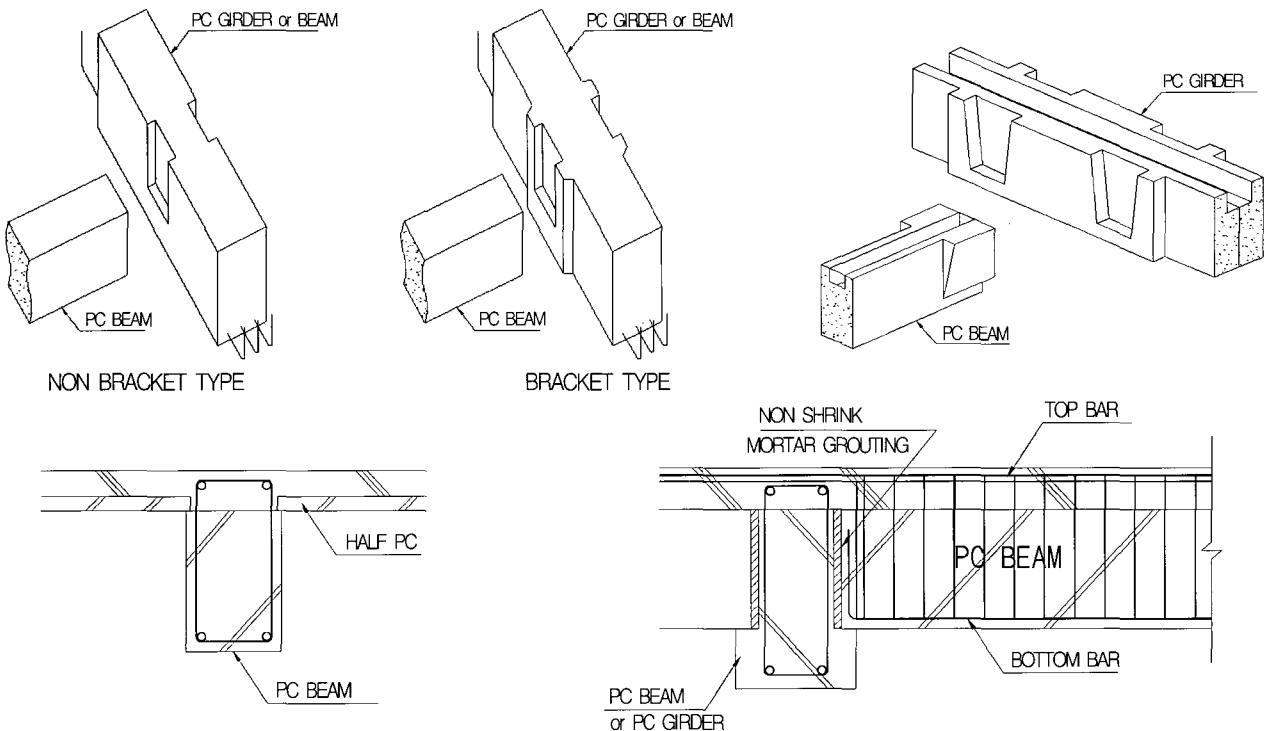


그림 6. 큰보와 작은보, 작은보와 작은보의 접합

2.4 실시사례

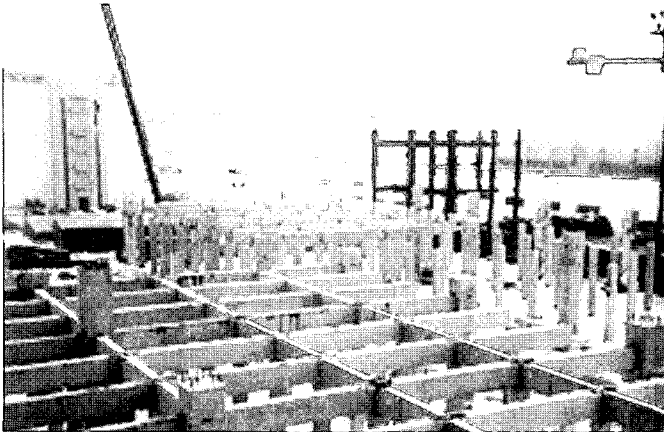


사진 5. 실시사례 1



사진 6. 실시사례 2

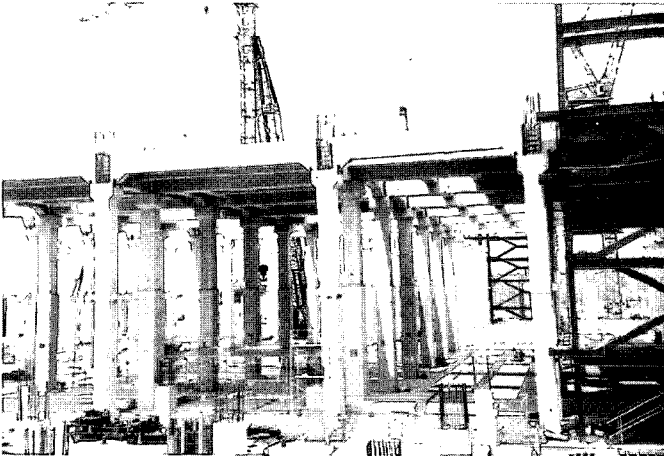


사진 7. 실시사례 3

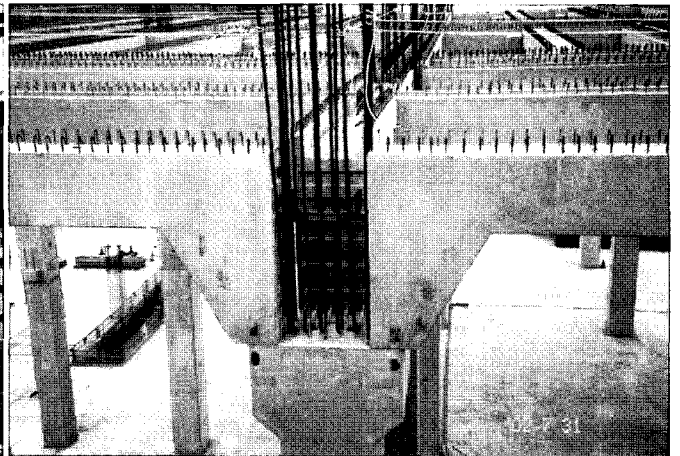


사진 8. Panel zone (1)

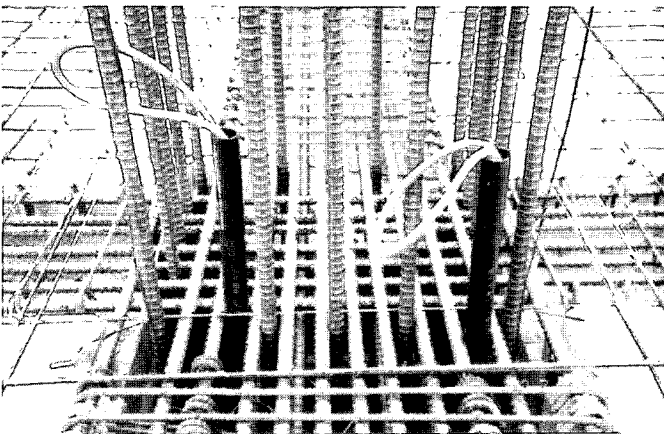


사진 9. Panel zone (2)

표 2 실시사례 - 1, 2, 3의 Shape No.(PC 단면형상)

	실시사례 1	실시사례 2	실시사례 3
기둥	㉠	㉠, ㉡	하부RC, 상부㉠
큰보	㉡, ㉢, ㉣, ㉤	㉡, ㉢, ㉣, ㉤	㉡, ㉢, ㉣, ㉤
작은보	㉡, ㉢	㉡, ㉢, ㉣	㉡, ㉢, ㉣

3. PC화 공법의 구조설계

RC조와 유사한 점이 많지만 PC조 특유의 설계를 하지 않으면 안되는 부분이 다소 있으므로 이하에 그 개요를 서술한다.

3.1 중력방향 응력(무지주공법의 경우)

중력방향 응력은 PC 보부재의 자중 및 슬라브 콘크리트의 중량에 의한 콘크리트 타설시 응력(그림 8)과 콘크리트의 강도가

발현되어 구조 골조로서의 성능이 발휘된 후 가해지는 하중(마감하중 + LL + 기타 하중)에 의한 응력(그림 9)의 두 가지 경우로 나누어 계산한다. 콘크리트 타설 시의 경간은 다음 식(1)과 같다.

$$L_1 = L + \frac{A+B}{2} \quad \text{식(1)}$$

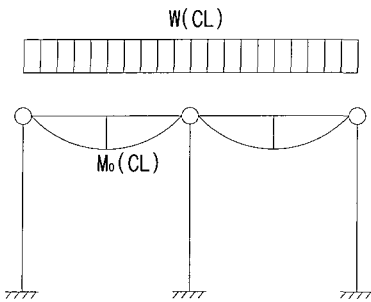


그림 8. 콘크리트 타설시 응력

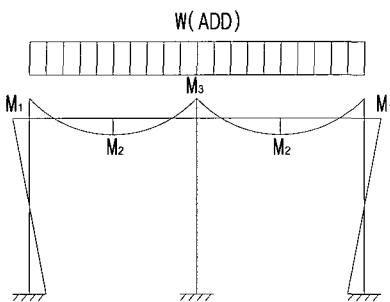


그림 9. 마감 + LL + 기타하중에 의한 응력

### 3.2 큰보, 작은보 단면설계

W(CL)에 의한  $M_0(CL)$ 과  $Q(CL)$ 에 대한 각 응력도의 산정에는 PC부재의 단면만을 사용하고(그림 11), W(ADD)와 횡하중에 대한 각 응력도의 산정에는 <그림 12>의 T형 단면을 사용한다.

### 3.3 큰보와 작은보 단면형상의 결정

부재의 중량은 <표 3>과 같은 제한사항에 의해 결정된다.

부재단면의 형상과 크기는 <표 3>의 중량제한 및 각 응력에 대하여 부재의 단면이 필요한 강도를 갖고 있는지에 대한 두 가지 조건을 만족시키도록 결정한다. 따라서 프리텐셔닝, 포스트텐셔닝을 도입하기도 하고, 동바리 적용 가능성도 검토한다.

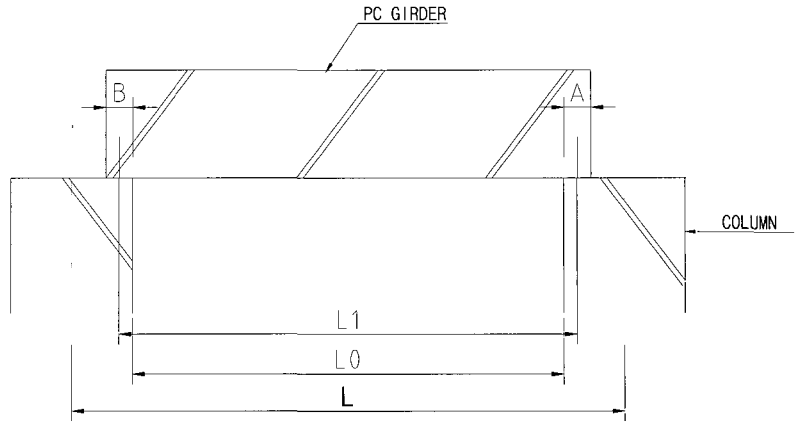


그림 10. 콘크리트 타설시 응력 계산용 SPAN L1

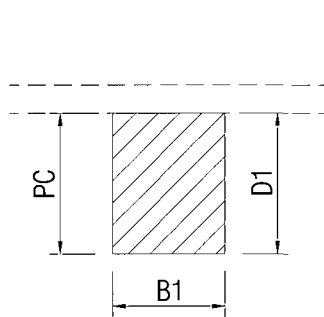


그림 11. W(CL)에 대한 설계단면

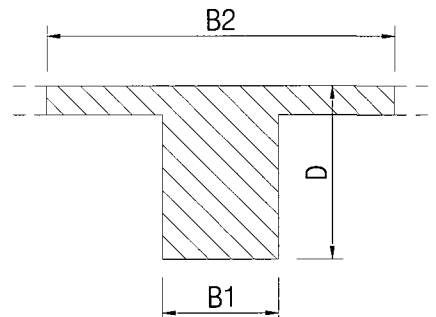


그림 12. W(ADD)와 횡하중에 대한 설계단면

표 3. PC 큰보와 작은보의 중량제한

	설치에 사용할 양중장비	
	Crawler 크레인	일반 타워 크레인
운반	25 톤 $\geq$ W	-
Erection	-	6 톤 ~ 12 톤 $\geq$ W

단면형상의 결정이 PC구조 설계에서는 대단히 중요한 부분이며, 충분한 검토가 필요하다.

### 3.4 큰보와 작은보의 콘크리트 휨 인장 응력도의 검토

RC조는 균열 발생을 전제로 하고 있다. PC화 공법에서는 균열 발생이 거의 없고 내구성이 높은 구조체를 만들기 위해 균열 폭을 조정한다.

균열 폭 0.1mm 이하의 미소치로 유지시키기 위해 이하의 검토를 행한다. 이 검토는

중력방향 응력에 대하여만 행한다. 단, 경간이 7~8m 이하이고 적재하중이 작은 보는 대상 외로 한다.

$$\frac{M_0(CL)}{Z_{CL}} + \frac{M_2}{Z_{ADD}} \leq 2.0 \sqrt{f_{ck}} \times \frac{5}{3} = \sigma_{tb} \quad \text{식(2)}$$

$Z_{CL}$  : PC 부재중양부의  $Z_{BOTTOM}$

$Z_{ADD}$  : T형 단면 중앙부의  $Z_{BOTTOM}$

$f_{ck}$  : 콘크리트 설계기준강도

( $f_{ck} = 27 \sim 45 \text{ MPa}$ )

표 4. 인장축 콘크리트의 응력과 균열 발생과의 관계

구분	인장축 콘크리트의 응력도					균열의 발생
	$\sigma_c$	0	$f_t$	$\sigma_t$	$\sigma_{tb}$	
Full Prestressed Concrete						없음
Partial Prestressed Concrete						없음
PRC						거의 없음
장 Span PC화 공법의 큰보, 작은보						폭 0.1 mm 이하의 미소한 균열이 발생

- $\sigma_c$  콘크리트의 압축응력도
- $f_t$  콘크리트의 허용인장응력도  $\approx (f_{ck}/30 \sim f_{ck}/20)$
- $\sigma_t$  콘크리트의 인장응력도  $= 2.0\sqrt{f_{ck}}$
- $\sigma_{tb}$  콘크리트의 휨인장강도  $= \frac{5}{3}\sigma_t$

4. PC부재 제작의 품질관리 사례

(A) PC부재의 강도관리재령

PC부재는 가열양생(증기양생)을 하기 때문에 통상적인 양생을 한 콘크리트에 비해 초기강도의 상승은 크지만 재령 28일 이후의 강도증가는 작고, 또 건설기간이 단기간인 점 등에 의해 부재 콘크리트의 강도관리재령은 28일로 한다.

(B) PC부재의 설계기준강도(28일 강도)

$f_{ck} = 27 \sim 45 \text{ MPa}$

(C) 설계기준강도에 증기양생 보정치 (T)와 표준편차(약  $1.73\sigma \sim 2.0\sigma$ )를 고려하여 레미콘 공장에서 배합계획서를 작성하고 PC부재의 제작 개시 전에 품질관리책임자에게 제출한다. 품질관리책임자는 그 내용을 체크하여 승인한다. 승인 전에 PC부재를 제작해서는 안된다.

(D) PC부재의 철근은 모두  $f_y = 400 \text{ MPa}$ 로 한다.

(E) PC부재의 콘크리트 타설전의 검사

철근을 형틀 내에 배근하여 콘크리트 타설 전에 철근과 PC강선의 종류, 본수, 배치 및 Embed plate와 기타의 매설물이 제작도(shop drawing)와 같은지를 전임 검사자를 정하여 검사하고 체크 슈트에 체크항목과 OK/NG(NG의 경우는 수정작업을 지시하고 수정작업을 확인한 후 체크 슈트에 기입함)를 기입, 사진 1매 부착한 후 검사자의 서명을 한다.

완성된 PC부재와 함께 이 체크 슈트의 복사본을 현장의 품질관리 담당자에 전달한다. 이와 같은 검사는 전 부재에 대하여 행하여야 한다.

(F) 탈형시 소요강도, 출하시 소요강도

- 탈형시 소요강도
- 기둥, 큰보, 작은보 : 8 MPa 이상
- Half PC 슬래브 : 12 MPa 이상
- 출하시 소요강도
- 기둥 : 28 MPa 이상
- 큰보, 작은보 : 31 MPa 이상

(G) 증기양생

- 증기양생의 최고온도는  $80^\circ\text{C}$ 를 초과하지 않을 것(1-cycle/day)
- 전(前) 양생은 2시간 30분 이상

- 온도상승구배는  $20^\circ\text{C}/\text{H}$  이하
- 고온( $60 \sim 65^\circ\text{C}$ ) 유지시간은 6시간 정도
- 온도하강구배는  $20^\circ\text{C}/\text{H}$  이하.

(H) 탈형후의 양생

- 3월 ~ 11월
- 탈형후 급격한 건조방지를 위해 1일 이상 살수양생을 한다.
- 12월 ~ 2월
- 탈형후 부재표면이 급격하게 냉각하여 부재내부와의 온도차에 의해 표면에 균열이 발생하는 것을 방지하기 위해, 탈형후 10시간 정도 모포 등으로 덮어둔다.
- 양생기간
- 탈형후 최소 7일간 이상 야적장에서 양생하고 출하시 소요강도 만족여부를 확인하고 출하한다.

(I) 출하전 제품검사

전체 PC부재의 치수정도 및 뒤틀림, 면의요철, 변형, 균열, 파손, 배근의 변형을 검사하고 체크 슈트에 기입한다.

치수정도기준을 초과한 것은 원칙적으로 폐기처분하지만 초과율이 허용오차의 1.25배 이하의 것에 대해서는 현장의 품질관리 책임자와 협의한 후 조치를 결정한다.

(J) 현장반입검사

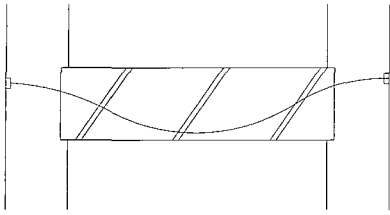
현장의 품질관리 담당자는 PC부재의 현장반입후에 (I)의 출하전 제품검사 체크 슈트와 부재를 비교, 운반에 의한 크랙이나 파손이 있는지를 체크한다.

5. 향후의 PC화 공법

향후 단공기, 고품질, 낮은 비용(cost)의 요구는 더욱더 높아지며 그것에 발맞추기 위하여 PC화 공법은 개량을 거듭하여 더욱더 진화해 나갈 필요가 있다.

가까운 장래에 실시가 예상되는 공법에는 이하와 같은 것들이 있겠다.

① 포스트텐션 PC

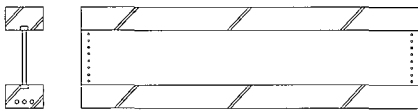


큰하중을 받는 보 부재



장스팬 보부재를 분할 제작하여 현장에서 압착접합

② Hybrid PC보(강성은 유지시키며 중량 절감 효과를 꾀함)



- 상부플랜지 : RC
- 웨브 : steel plate
- 하부플랜지 : RC + 포스트텐셔닝 또는 프리텐셔닝

③ Site PC(낮은 비용, 대형부재)

현장의 상황(부지의 여유등)에 따라 다르지만 가능한 한 Site PC로 시공하면 원가절감의 장점이 있고, 대형부재의 제작도 가능하다. □

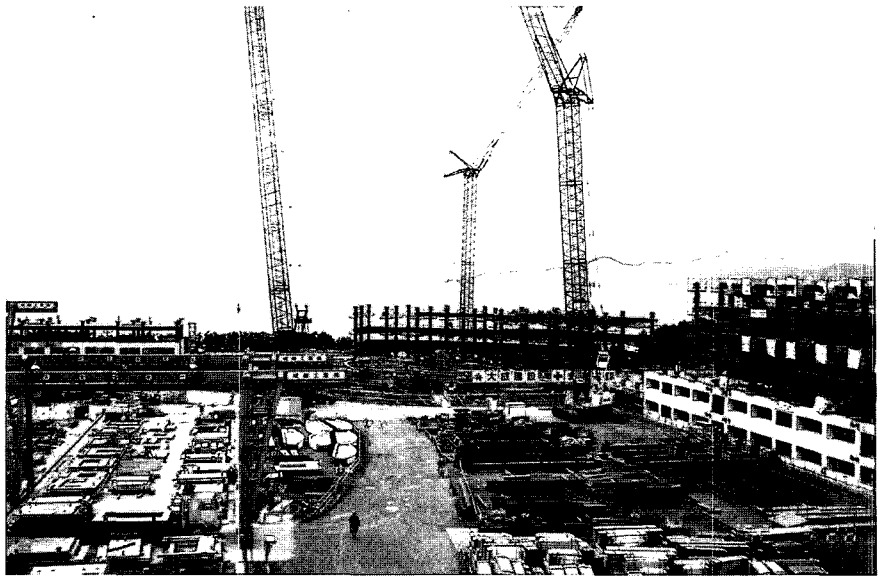


사진 15. Site PC 사례(일본 大成建設)



사진 16. Site PC 사례(일본 大成建設)