

프리캐스트 대형판 구조물의 접합부에 관한 탄소성해석 Elasto-Plastic Analysis on Connections of Precast Large Panel Structures

권택진* 박강근** 권익노*** 조강표***
Kwon, Taek Jin Park, Kang Geun Kwun, Ik Noo Cho, Kang Pyo

ABSTRACT

Precast large panel structures behave differently from frame and monolithic wall structures under external loads, because of the distinct planes of weakness in the horizontal and vertical joints between panels. These joints may slide and open during shaking, producing large localized changes in the bending and shear stiffness of individual walls. The structural behavior of large precast panel buildings depends on the relative strength and stiffness of the panels and joints. Special modeling are thus required for the analysis of precast panel connections. This study suggests a new analytical modeling and method to obtain the rational estimation of discontinuity and slip movements from the connections of precast large panel structures.

1. 서론

철근콘크리트 프리캐스트 대형판 구조물은 기초부, 대형판, 수평접합부, 수직접합부로 이루어져 있다. 외력이 작용할때 프리캐스트 구조물은 일체식 구조물과는 달리 접합부에서 하중 전달의 불연속성과 미끄러짐이 생기게 되어 프리캐스트 구조물의 강도와 안정성은 주로 접합부의 내력 전달 특성에 달려 있다. 이러한 프리캐스트 대형판 구조물은 접합부의 불연속성 및 미끄러짐으로 인하여 붕괴시 까지의 거동이 일체식 구조물과는 다르게 나타난다. 수평접합부는 전도모멘트와 전단 미끄러짐에 의한 변형으로 벌어짐 및 인장응력 집중현상이 생기고 반대편에는 압축응력 집중현상이 발생한다. 또 수직접합부는 수직전단력에 의한 미끄럼 변형이 일어나게 되고 전단력 전달 성능에 따라 전단벽의 거동이 달라지게 된다(1,2).

본 논문에서는 상기와 같은 철근콘크리트 프리캐스트 대형판 구조물의 접합부 거동에 관한 불연속성과 미끄러짐을 보다 합리적으로 평가할수 있는 새로운 강체요소 모델링과 해석적인 방법론을 제시하고자 한다.

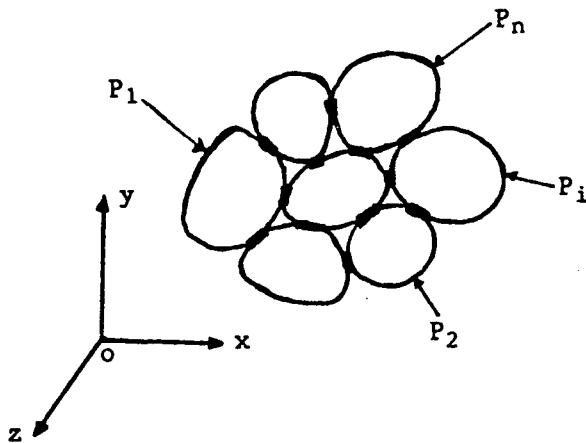
2. 철근콘크리트 프리캐스트 대형판 구조물의 모델화 및 정식화

2-1. 강체요소법에 의한 프리캐스트 대형판 구조물의 모델화

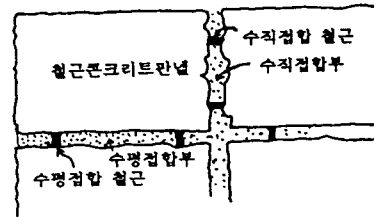
강체요소법(Rigid Element Method)은 1982년에 쓰보이(坪井)가 가와이(川井)에 의해서 제안된 강체스프링 모델의 개념에서 착안하여 철근콘크리트 벽식 프리캐스트 구조물의 탄소성해석에 적용함으로써 시작된 수치해석법이다.

* 정회원, 성균관대 교수 ** 정회원, (주)청구 기술개발실 *** 정회원, 성균관대 대학원

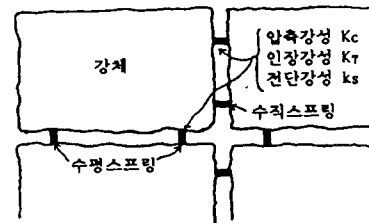
1977년에 가와이(川井)는 콘크리트, 토양, 바위, 수정체등과 같은 입자구조의 극한해석에서 발생하는 재료비선형성, 기하학적 비선형성, 균열의 발생과 진전등에 따르는 변위장의 불연속 문제와 균열 사이의 슬립에 의한 미끄럼 효과를 보다합리적으로 평가하기 위해서 강체스프링 모델이라는 보다 합리적인 모델을 제안하였다. 강체스프링 모델은 <그림 2-1>과 같이 입의 고체나 구조물이 입의 형상으로된 강체요소로 구성되어 있다고 생각한다. 이러한 고체는 외력의 작용하에서 평형상태를 유지하고 있다면, 반력은 인접한 요소의 접촉면에 있는 스프링 시스템에 분포한다고 가정한다. 그리고 외력에 의한 고체의 변형은 각요소의 주변에 취해진 스프링 시스템에 의해서 이루어진다(1).



<그림 2-1> 강체스프링 모델



(a) 벽식 프리캐스트 구조물



(b) 강체요소법에 의한 모델화

<그림 2-2> 벽식 프리캐스트 구조물의 모델화

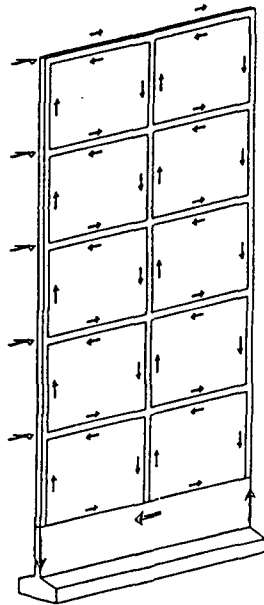
1982년 즈보이(坪井)는 상기와 같은 강체스프링 모델에서 착안하여 <그림 2-2>와 같은 철근콘크리트 벽식 프리캐스트 구조물의 탄소성해석에 적용할 수 있는 사각형 평면요소를 개발하였다. 프리캐스트 구조물의 판넬은 강체요소라고 가정하고 판넬 주변에 취해진 접합부를 스프링 시스템으로 가정하여 접합부의 응력을 평가한다. 이러한 개념을 이용한 해석법이 강체요소법이라고 명명되었다. 본 해석법은 프리캐스트 구조물의 접합부의 불연속성, 응력집중 현상 및 미끄럼 현상을 고려하는 합리적인 해석방법으로 입증되었다(2).

본 연구팀에서는 강체요소법을 보다 일반화된 해석법으로 개발 확장하기 위해서 구조물의 극한해석 및 프리캐스트 구조물의 접합부 해석을 위한 사각형 평면원요소, 원통 요소, 원통 원요소, 구요소 및 구원요소를 개발해 왔다. 특히, 사각형 평면요소 및 사각원 평면원요소는 철근콘크리트 벽식 프리캐스트 구조물의 접합부 해석에, 원통형 요소는 철근콘크리트 원통형 프리캐스트 대형판 구조물의 접합부 해석에 효과적으로 적용할 수 있다고 사료된다(2,3,4,5).

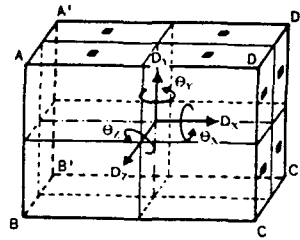
철근콘크리트 프리캐스트 내력벽은 <그림 2-3>과 같이 기초부, 대형판, 수평접합부, 수직접합부로 구성되어 있고, 수평접합부는 기초에서부터 지붕판까지 2개 이상의 연속되는 수직보강 철근으로 연결된다. 또 수직접합부는 2개이상의 접합철근과 전단기로 구성되어 있다.

상기와 같은 철근콘크리트 벽식프리캐스트 구조물을 강체요소법에 의해서 모델화하면 다음과 같다. 강체요소법은 접합부가 판넬에 비해서 약하고, 변형은 연결조인트에서 발생한다고 가정하고 판넬의 변형은 무시한다. 따라서 각 판넬은 강체요소로 가정하고, 각 판넬을 연결하는 조인트는 축력, 면내전단력 및 면외전단력을 전달하는 스프링으로 치환한다. 판넬의 강체변위는 판넬요소의 중심에 취하고, 이점에서의 강체변위는 판넬요소 주변에 취해진 스프링을 통하

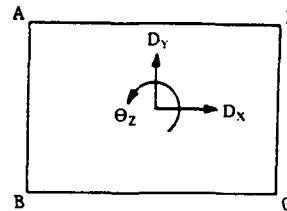
여 다른 요소로 전달된다. 또 스프링의 강성은 축력일때 인장강성과 압축강성을 구분하여 인장 압축시에 조인트의 거동을 구분해서 파악할 수 있도록 하였다. 이러한 강체요소법의 개념을 철근콘크리트 프리캐스트 대형판 구조물의 접합부 해석에 적용하면 연결 조인트의 탄소성거동, 파괴 및 균열 진전 상황, 인장 조인트의 벌어짐의 크기, 미끄럼 효과등을 효과적으로 파악할 수 있으며, 이때 접합부의 응력은 최량의 상계해가 얻어진다.



<그림2-3> 철근콘크리트 프리캐스트 내력벽



(a) 평면 힘요소



(b) 평면 요소

<그림2-4> 사각형 평면요소 및 힘요소

2-2. 사각형 평면힘요소의 개발

철근콘크리트 프리캐스트 대형판 구조물의 접합부 시스템을 보다 효과적으로 해석하기 위해서 <그림 2-4>와 같은 사각형 평면힘요소를 개발하였다. 사각형 평면힘요소의 각 면에는 면내 방향과 두께 방향에 대해서 조인트의 연결상태에 따라 면내 방향과 두께방향에 대해서 축력, 면내전단력 및 면외전단력을 전달할 수 있는 스프링을 단수 혹은 복수개로 취하고, 판넬요소의 중심에 3개의 이동강체 변위와 3개의 회전강체변위를 취한다. 그리고 요소의 중심에 취해진 6개의 강체변위가 판넬요소의 주변에 취해진 스프링의 위치에서의 변위에 미치는 영향을 고려하면, 다음과 같은 평면 힘요소의 적합 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z & -y \\ 0 & 1 & 0 & -z & 0 & x \\ 0 & 0 & 1 & y & -x & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_x \\ D_y \\ D_z \\ \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

$$\text{또는 } (U) = [A]\{D\} \quad (2-2)$$

여기에서 [A]를 일반화 적합 매트릭스라고 한다.

두께방향의 변위 \$w\$을 소거하고, 3개의 강체변위(\$D_x\$, \$\theta_x\$, \$\theta_y\$)을 소거하면 다음과 같은 사각형 평면요소의 적합방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y \\ 0 & 1 & x \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} D_x \\ D_y \\ \theta_z \end{Bmatrix} \quad (2-3)$$

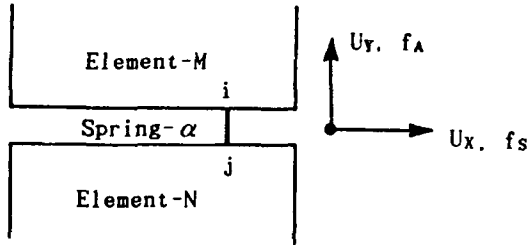
$$\text{또는 } \{U\} = [A] \{D\} \quad (2-4)$$

2-3. 평면요소를 이용한 구성방정식의 유도

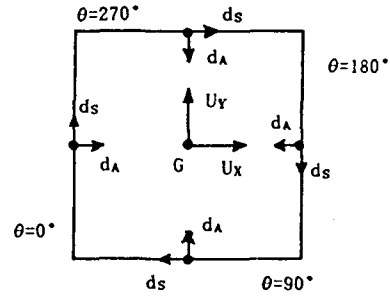
<그림 2-5>와 같이 스프링- α 가 요소 M,N의 점 i,j에 연결되어 있으면 각각의 적합 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\{U_i\}_M = [A_i]_M \{D\}_M \quad (2-5)$$

$$\{U_j\}_N = [A_j]_N \{D\}_N \quad (2-6)$$



<그림 2-5> 요소의 결합



<그림 2-6> 변위 u_x, u_y 의 변환

스프링- α 의 변위 u_x, u_y 는 요소구면의 직각방향으로 위치한 스프링의 방향과 일관성을 <그림 2-6>와 같이 d_A, d_s 를 각각 스프링의 축방향 변위, 전단방향 변위라고 하면 다음과 같은 변환매트릭스 $[T^1]$ 을 유도할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} d_A \\ d_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} \quad (2-7)$$

$$\text{또는 } \{d\} = [T^1] \{U\} \quad (2-8)$$

이때 θ 의 값은 스프링의 위치에 따라서 변한다. 식(2-5), (2-6)을 식(2-8)에 대입하면 다음식이 얻어진다.

$$\{d_i\}_M = [T_i^1]_M [A_i]_M \{D\}_M \quad (2-9)$$

$$\{d_j\}_N = [T_j^1]_N [A_j]_N \{D\}_N \quad (2-10)$$

전체 강제변위 $\{D\}$ 에 대응되는 요소 M,N의 강제변위 $\{D\}_M, \{D\}_N$ 은 단위행렬 $[I]$ 와 영행렬 $[0]$ 를 조합하면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \{D\}_M &= [[0] \cdots [I] \cdots [0]] \{D\} \\ &= [I]_M \{D\} \end{aligned} \quad (2-11)$$

$$\begin{aligned} \{D\}_N &= [[0] \cdots [I] \cdots [0]] \{D\} \\ &= [I]_N \{D\} \end{aligned} \quad (2-12)$$

식(2-11), (2-12)를 식(2-9), (2-10)에 대입하면 다음식이 주어진다.

$$\{d_i\}_M = [T_i^{-1}]_M [A_i]_M [I]_M \{D\} \quad (2-13)$$

$$\{d_j\}_N = [T_j^{-1}]_N [A_j]_N [I]_N \{D\} \quad (2-14)$$

상기의 식으로 스프링- α 의 상대변위를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{d\}_\alpha &= \{d_i\}_M + \{d_j\}_N \\ &= \{[T_i^{-1}]_M [A_i]_M [I]_M + [T_j^{-1}]_N [A_j]_N [I]_N\} \{D\} \end{aligned} \quad (2-15)$$

다음은 스프링- α 의 내력을 구하기 위해서 스프링- α 의 탄성적 성질에 대한 축력, 전단력을 각각 f_A , f_S 라 하고, 스프링의 강성, 즉 축방향 강성, 전단방향 강성을 k_A , k_S 라 하면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{Bmatrix} f_A \\ f_S \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_A & 0 \\ 0 & k_S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_A \\ d_S \end{Bmatrix} \quad (2-16)$$

$$\text{또는 } \{f\}_\alpha = [k]_\alpha \{d\}_\alpha \quad (2-17)$$

식(2-17)에 식(2-15)을 대입하면 다음과 같은 식이 주어진다.

$$\{f\}_\alpha = \{[K]_\alpha [T_i^{-1}]_M [A_i]_M [I]_M + [K]_\alpha [T_j^{-1}]_N [A_j]_N [I]_N\} \{D\} \quad (2-18)$$

스프링의 갯수를 n 이라고 하고, 가상일의 원리를 적용하면 다음과 같은 전체 방정식을 구할 수 있다.

$$\{F\} = [K] \{D\} \quad (2-19)$$

$$\begin{aligned} \text{여기에서 } [K] &= \sum_{\alpha=1}^n \{ [I]_M^T [A_i]_M^T [T_i^{-1}]_M^T [k]_\alpha [T_i^{-1}]_M [A_i]_M [I]_M \\ &\quad + [I]_N^T [A_j]_N^T [T_j^{-1}]_N^T [k]_\alpha [T_j^{-1}]_N [A_j]_N [I]_N \\ &\quad + [I]_M^T [A_j]_N^T [T_j^{-1}]_N^T [k]_\alpha [T_i^{-1}]_M [A_i]_M [I]_M \\ &\quad + [I]_N^T [A_j]_N^T [T_j^{-1}]_N^T [k]_\alpha [T_j^{-1}]_N [A_j]_N [I]_N \} \end{aligned}$$

식(2-19)에 경계조건을 대입하면, 전체강체 $\{D\}$ 는 미지의 강체변위 $\{D_1\}$ 와 기지의 강체변위 $\{D_2\}$ 로 나눌 수 있다. 여기서 미지의 강체변위 $\{D_1\}$ 에 대응되는 기지의 힘 $\{F_1\}$ 은 외부하중이고, 기지의 강체변위 $\{D_2\}$ 에 대응되는 미지의 힘 $\{F_2\}$ 은 반력이다. 이것을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{K}_{11} & \bar{K}_{12} \\ \bar{K}_{21} & \bar{K}_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{D}_1 \\ \bar{D}_2 \end{Bmatrix} \quad (2-20)$$

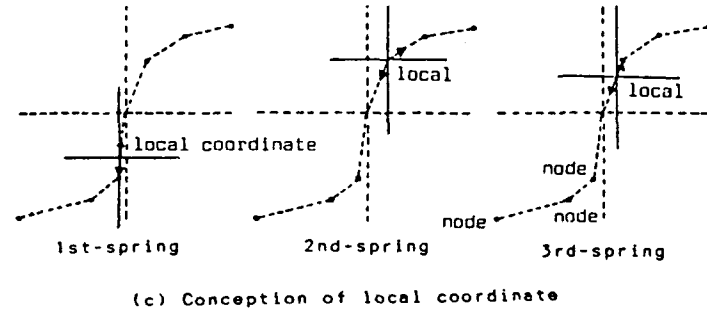
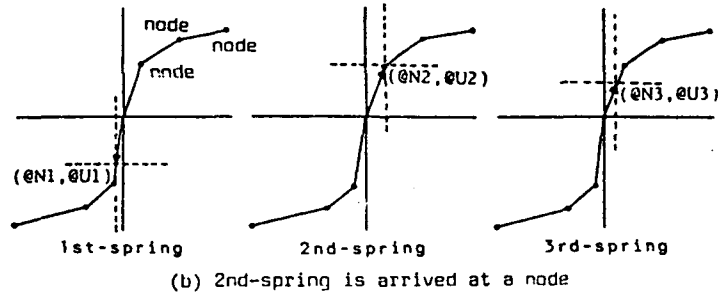
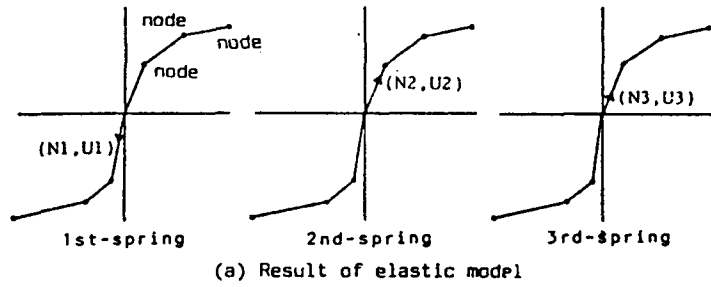
식(2-20)에서 미지의 강체변위 $\{D_1\}$ 와 반력 $\{F_2\}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\{\bar{D}_1\} = [\bar{K}_{11}]^{-1} (\{\bar{F}_1\} - [\bar{K}_{12}]\{\bar{D}_2\}) \quad (2-21)$$

$$\{\bar{F}_2\} = [\bar{K}_{21}][\bar{K}_{11}]^{-1}\{\bar{F}_1\} + (-[\bar{K}_{21}][\bar{K}_{11}]^{-1}[\bar{K}_{12}] + [\bar{K}_{22}])\{\bar{D}_2\} \quad (2-22)$$

3. 탄소성해석을 위한 하중증분법

강체요소법을 이용하여 구조물을 탄소성해석하기 위해서 스프링의 복원력 특성(응력-변형도 관계)을 Tri-linear model로 가정하고, 하중증분 해석시에 소성역(제 2구배 이후)에서 응력이 후진할때는 탄성구배(제 1구배)를 채택하였다. 또 쥘인트의 역학적 특성을 고려하기 위해서 스프링의 인장강성, 압축강성, 및 전단강성을 구분하였다.



<그림 3-1> 탄소성해석을 위한 하중증분법

상기와 같은 개념으로 스프링에 증분하중을 고려하여 탄소성해석하는 방법을 나타내면 <그림 3-1>와 같다.

단계 1 : 구조물의 해석시에 분할된 요소의 접촉면에 취해진 스프링의 강성의 선택이 제일 우선 되어야만 강성매트릭스를 구할 수 있다. 그런데 스프링의 축력 강성을 선택할 때에는 스프링의 응력 성분이 인장력인지 압축력인지를 미리 알 수 없기 때문에 스프링의 인장강성과 압축강성을 구분할 수 없다. 따라서 우선 모든 스프링의 축력 강성에 인장강성을 대입해서 계산한다. 그결과 스프링의 상대변위의 부호가 음이면, 이때의 스프링의 응력은 압축응력이 작용하기때문에 응력의 성분과 강성의 성분이 일치하지 않으므로 다시 바꾸어서 계산한다. 이러한 과정을 반복하여 각 스프링에 대한 상대변위의 부호와 선택된 스프링의 강성이 일치하면 단위하중에 대한 탄성해석을 한다.

단계 2 : 단위하중에 대한 탄성범위의 해석으로 부터, 절점에 제일 먼저 도달할 수 있는 스프링을 선정하고 또 이 스프링이 절점에 도달할 수 있는 크기의 증분하중을 모든 스프링에 곱해준다.

단계 3 : 각 스프링의 변위 및 응력에 증분하중을 고려한 점에서 국소계의 원점으로 생각하고, 다시 각 스프링에 대한 강성을 단계 1에서와 같은 방법으로 선정한 후에 제일 먼저 도달할 수 있는 스프링에 대한 증분하중을 각 스프링 곱해준다.

단계 4 : 이후의 탄소성 해석에서는 단계1에서 단계3까지 반복계산이 되고, 스프링의 강성이 3구배를 넘어가면 파괴된 것으로 본다.

4. 탄소성해석

4-1. 해석모델

프리캐스트 구조물의 대형 판의 접합부에 관한 탄소성해석은 <그림 4-1>과 같은 단순화된 모델을 선정하여 접합부의 응력상태, 수평변위, 수직변위등을 단계별로 파악하고자 한다. 해석모델은 판넬의 수가 10개, 수평접합부가 20개, 수직접합부가 10개로 구성되어 있다. 그리고 기초의 개념을 도입하기 위해서 1개의 지지판요소를 설치하였다.

4-2. 접합부의 강성

수평접합부와 수직접합부에 대한 각 구배의 절점력 및 강성은 표 4-1 및 표 4-2와 같다.

표 4-1 수평 접합부

N[ton], K[ton/cm] 표 4-2 수직 접합부

N[ton], K[ton/cm]

	N1	K1	N2	K2	N3	K3		N1	K1	N2	K2	N3	K3
인장스프링	11.0	80.0	13.5	3.5	(+1.0)	0.0	인장스프링	22.8	125.0	27.8	7.0	(+1.0)	0.0
압축스프링	230.0	2360.0	590.0	1600.0	590.0	1600.0	압축스프링	160.0	575.0	420.0	395.0	495.0	130.0
전단스프링	29.5	760.0	37.0	110.0	(+1.0)	0.0	전단스프링	33.0	225.0	50.0	55.0	(+1.0)	0.0

4-3. 탄소성해석 결과

<그림 4-2>는 최대인장력 및 압축력을 받는 조인트의 하중-변위 곡선을 나타내고 있다. 그리고, <그림 4-3>은 하중이 점차적으로 증가할때에 생기는 정점에서의 하중-변위관계를 나타내고 있다. 하중이 38.5 ton에 이르렀을때에 변위가 크게 발생한 것은 1층의 수평접합스프링 17, 18, 19가 이미 인장 2구배에 도달하여 1층 수평접합부의 좌측에서 국부적으로 상대적인장응력이 크기때문인것으로 사료된다. 종국상태에서는 수평하중으로 인한 전도모멘트때문에 그 부분에서 인장파괴가 일어난다. <그림 4-4>, <그림 4-5> 및 <그림 4-6>은 층별 수평변위, 층별 수평전단력, 수직전단력을 각각 나타내고 있다.

5. 결론

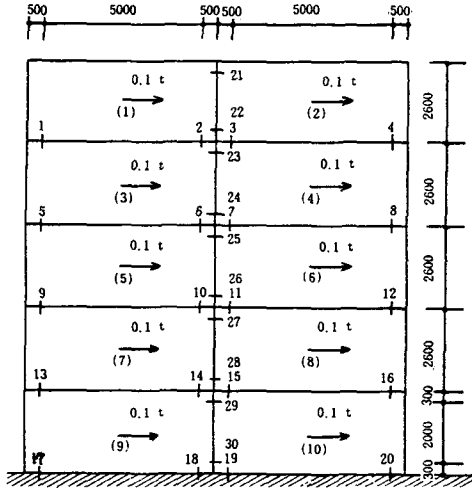
본 논문에서는 강제요소법을 이용하여 철근콘크리트 프리캐스트 대형판 구조물의 접합부해석을 보다 합리적으로 평가할 수 있는 사각형 평면형요소를 제안하고, 이를 이용하여 구조물을 탄소성해석하기 위한 해석적 방법론을 정식화하였다. 그리고 실물크기의 5층 구조물을 탄소성해석하여 조인트의 극한내력, 구조물의 변형상황등을 분석하였다.

대형판 구조물의 접합부에 대한 탄소성결과를 분석해보면, 강제요소 모델링방법은 연결 조인트의 탄소성거동, 균열진전상황, 인장조인트의 벌어짐의 크기, 접합부의 불연속성 및 미끄러짐효과를 효과적으로 파악할 수 있다고 사료된다.

참고문헌

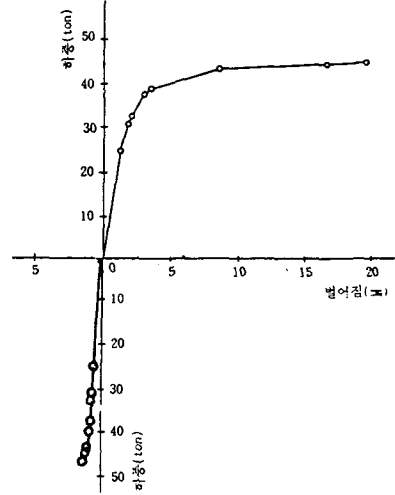
- 1) kawai, T., "New Element Model in Discrete Structural Analysis," Journal of the Naval Architects of Japan, Vol.141, pp.174-180.
- 2) Tsuboi, Y., "Elasto-Plastic Analysis of Wall-type Precast R.C. Structures by Rigid Element Method," Report of the Housing Corporation in Japan, April 1982.
- 3) Kawai, T., "Some Consideration on the Finite Element Method," International Journal for Numerical Method in Eng., Vol.16, 1980, pp.81-120.
- 4) Tsoukantas, S.G., and Tassios, T.P., "Shear Resistance of Connections between Reinforced Concrete Linear Precast Elements," ACI Structural Journal, May-June, 1989.
- 5) Kwun, T.J., Han, S.E., Suh, S., and Park, K.G., "A New Approach on the Elasto-Plastic

Analysis of Pressure Vessel(I): Theoretical Consideration of New Approach for the Structural Analysis," Proceedings of the International Symposium on Pressure Vessel Technology and Nuclear Codes and Standards, 1989.4, pp.3.32-3.39.

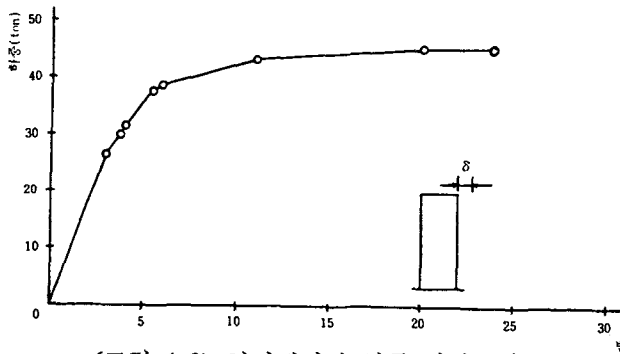


<그림 4-1> 해석모델

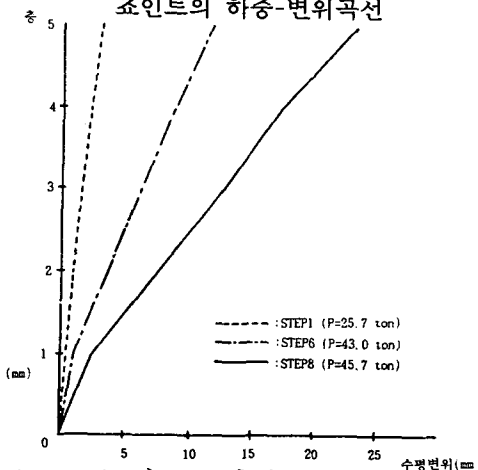
STEP	중하중 (ton)	인장력 (kg)	압축력 (kg)
1	26.72	11.00	20.56
2	30.41	11.22	24.67
3	31.17	11.26	25.53
4	37.43	11.62	32.51
5	38.55	11.75	33.81
6	43.00	13.50	37.30
7	45.33	13.50	40.03
8	45.69	13.50	40.49



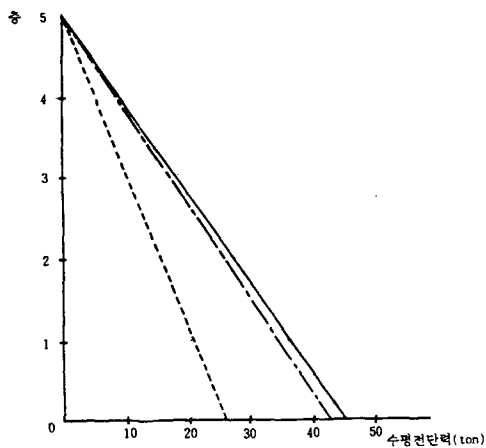
<그림 4-2> 최대인장 및 압축을 받는 조인트의 하중-변위곡선



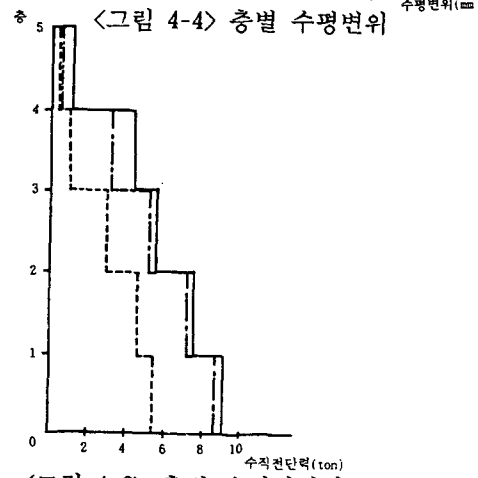
<그림 4-3> 정점에서의 하중-변위곡선



<그림 4-4> 층별 수평변위



<그림 4-5> 층별 수평전단력



<그림 4-6> 층별 수직전단력