

강체요소법에 의한 철근 콘크리트 프리캐스트 대형판 접합부의 탄소성해석

Elasto-plastic Analysis of Reinforced Concrete Precast Large Panel Connections by Rigid Element Method

박 강 근 * 김 용 태* 권 택 진 **
Park, Kang-Geun Kim, Yong-Tae Kwun, Taek-Jin

Abstract

This paper is a study on the elasto-plastic analysis of reinforced concrete precast large panel connections by rigid element spring model. In the analysis of rigid element spring model, each collapsed part or piece of structures at limiting state of loading is assumed to behave like rigid bodies. The present author propose new elements for the improvement and expansion of the rigid element spring model.

In this study, it is proposed how the rigid element method can be applied to the elasto-plastic analysis of precast large panel connections. Some numerical results of analytical modeling and load displacement curves are shown.

keywords : elasto-plastic analysis, rigid element method, load displacement curve, precast large panel

1. 서 론

고체역학 분야에서의 비선형 문제는 소성역학, 안정문제와 더불어 파괴현상이 복잡한 극한강도 문제로써 각종 구조물의 안정성 및 신뢰성에 매우 중요한 부분이다. 오늘날 이러한 고체역학의 한 분야는 컴퓨터의 비약적인 발전으로 유한요소법 및 경계요소법 등과 같은 수치해석법을 중심으로한 구조계산 역학이 발전되어 왔다^{1, 2)}.

연속체 개념에 기초를 둔 고체역학 분야에서 가장 다루기 힘든 비선형 문제는 구조물이 종국강도에 도달했을때 균열에 의해서 파괴됨으로써 발생하는 불연속 현상 및 슬립운동에 대한 것이다. 이러한 불연속 현상 및 슬립운동은 프리캐스트 구조물의 접합

부 및 콘크리트, 토질, 암반 등과 같이 입자로 구성된 구조물에 주로 발생한다.

최근에 연속체 역학에서 다루기 힘든 불연속성 및 슬립 현상을 보다 합리적으로 평가 하기 위해서 강체스프링 모델이 제안되어 불연속체 역학의 체계를 창조하였고, 이러한 강체스프링 모델에서 착안하여 프리캐스트 구조물 접합부의 거동을 보다 합리적으로 평가하기 위해서 강체요소법이 제안되었다³⁾.

강체요소법은 기존의 극한해석법의 개념에 유한요소법의 해석순서를 적용한 새로운 수치해석 기법으로 구조물의 분할된 요소를 강체라고 가정하고, 각 요소들은 스프링 시스템으로 연결되어 있다고 가정하여 구조물을 해석하는 방법이다.

본 논문에서는 이러한 강체요소법을 보다 일반화된 해석법으로 개발, 확장하기 위해서 철근콘크리트 프리캐스트 대형판 구조물의 접합부해석에 적용할 수 있는 새로운 요소의 개발, 해석적인 방법의 정식화 및 프로그램을 개발 하고자 한다.

* 정회원 · 밀양대학교 건축공학과 교수

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수

2. 강체요소법

2.1. 강체요소법의 개념

강체요소법(剛體要素法, Rigid Element Method ; REM)은 1982년 쓰보이(坪井 善勝)가 가와이(川井 忠彦)에 의해서 제안된 강체 스프링모델(Rigid-Bodies Spring Model ; RBSM)의 개념에서 착안하여 철근콘크리트 벽식 프리캐스트 대형판 구조물의 탄소성 해석에 적용함으로써 시작된 수치해석법이다.

1976년 가와이는 연속체 역학에 기초를 둔 기존 해석법으로 다루기 힘든 구조물의 비선형 문제, 즉 균열의 발생과 진전에 따르는 변위장의 불연속 문제를 해결하기 위해서 강체 스프링 모델을 제안하여 골조 구조물의 이산화 극한해석, 셸구조물의 이산화 극한해석, 콘크리트 구조물의 이산화 극한해석, 지반역학의 이산화 극한해석 등에 실용성을 입증하였다^{1, 2)}.

강체 스프링 모델은 임의의 고체나 구조물이 임의의 형상으로된 강체요소로 구성되어 있다고 생각하고, 고체가 외력의 작용하에서 평형상태를 유지하고 있다면, 반력은 인접한 요소에 있는 스프링 시스템에 분포한다고 가정한다. 그리고 외력에 의한 고체의 변형은 각 요소의 주변에 취해진 스프링 시스템에 의해서 이루어 진다고 생각하는 해석 모델이다.

1982년 쓰보이는 강체 스프링 모델의 개념에서 착안하여 철근콘크리트 벽식 구조물의 탄소성해석에 적용하기 위해서 강체요소법이라는 새로운 해석법을 개발하였다.

1983년 권택진(權宅鎭), 항가이(半谷 裕彦), 타나미(田波 徹行), 타카야마(高山 誠) 등에 의해서 철근콘크리트 내진벽과 같은 연속체 구조물에 대한 적용을 시도 하였다. 그 결과 강체요소법은 거시적인 모델과 미시적인 모델의 중간적인 성격을 가진 모델로서 실험과의 비교가 용이하고 경제적이며, 구조물의 파괴진전 상황 등을 효과적으로 파악할 수 있다는 것이 입증 되었다.

상기와 같이 발전 되어온 강체요소법의 기본개념은 다음과 같다. 강체요소법은 구조물을 유한개의 강체요소로 분할하고, 요소들은 재료의 역학적 특성을 만족하는 스프링 시스템으로 연결되어 있다고 가

정한다. 이때 요소의 주변에 취해진 스프링은 축력, 면내 전단력 및 면외 전단력을 전달한다. 또 요소의 강체 변위는 요소내의 한 점에서 취하고 요소의 주변에 취해진 스프링을 통하여 다른 요소로 전달 된다. 스프링의 강성이 축력일 때는 인장강성과 압축강성을 구분하여, 인장 및 압축에 대한 재료의 특성을 파악하도록 한다. 요소 주변의 각 변위의 위치와 요소내의 임의의 위치에서의 강체변위와의 관계식을 이용하여 요소와 스프링의 거동을 나타내는 관계식, 즉 적합방정식을 구하는 것을 시발점으로 유한요소법의 해석적 개념을 도입하여 전체 구조물을 해석하는 방법이다.

2.2. 구성방정식

구조물을 해석하기 위해서 유한개의 요소로 분할했을 때, 요소의 주변의 임의의 스프링- α 가 요소- M 의 점 i 와 요소- N 의 점 j 를 서로 연결하고 있다면, 스프링- α 에 대한 요소- M , N 의 적합방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{U_i\} = [A_i]_M \{D\}_M \tag{2-1}$$

$$\{U_j\} = [A_j]_N \{D\}_N \tag{2-2}$$

요소주변의 스프링 변위를 요소의 각 면에 대응되는 변위는 변환매트릭스 $[T^1]$ 에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$\{d\} = [T^1]\{U\} \tag{2-3}$$

식(2-1), (2-2)과 식(2-3)로부터 다음 공식을 유도할 수 있다.

$$\{d_i\}_M = [T_i^1]_M [A_i]_M \{D\}_M \tag{2-4}$$

$$\{d_j\}_N = [T_j^1]_N [A_j]_N \{D\}_N \tag{2-5}$$

구조물의 전체좌표계와 국소좌표계사이의 변환 매트릭스 $[T^1]$ 을 고려한 후에 단위 매트릭스 $[I]$ 와

영매트릭스 [0]를 조합하면, 식(2-4), (2-5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{d_i\}_M = [T_i^1]_M [A_i]_M [T^2]_M [I]_M \{\bar{D}\} \quad (2-6)$$

$$\{d_i\}_N = [T_i^1]_N [A_i]_N [T^2]_N [I]_N \{\bar{D}\} \quad (2-7)$$

식(2-6), (2-7)로 부터 스프링- α 의 상대변위 $\{d\}_\alpha$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{d\} &= \{d_i\}_M + \{d_i\}_N \\ &= \{[T_i^1]_M [A_i]_M [T^2]_M [I]_M \\ &\quad + [T_i^1]_N [A_i]_N [T^2]_N [I]_N\} \{\bar{D}\} \end{aligned} \quad (2-8)$$

스프링- α 의 내력과 스프링의 강성과의 관계식은 다음과 같다.

$$\{f\}_\alpha = [K]_\alpha \{d\}_\alpha \quad (2-9)$$

식(2-8)을 식(2-9)에 대입하면, 스프링- α 의 내력은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \{f\}_\alpha &= \{[K]_\alpha [T_i^1]_M [A_i]_M [T^2]_M [I]_M \\ &\quad + [K]_\alpha [T_i^1]_N [A_i]_N [T^2]_N [I]_N\} \{\bar{D}\} \end{aligned} \quad (2-10)$$

2.3. 전체 강성 방정식의 유도

스프링의 총수를 n 이라 하고, 가상일의 원리를 적용하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\delta\{\bar{D}\}^T \{\bar{F}\} = \sum_{\alpha=1}^n \delta\{d\}_\alpha^T \{f\}_\alpha \quad (2-11)$$

식(2-8), (2-10)을 식(2-11)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 전체 강성 방정식을 구할 수 있다.

$$\{\bar{F}\} = [\bar{K}] \{\bar{D}\} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} [\bar{K}] &= \sum_{\alpha=1}^n \{ [I]_M [T^2]_M [A_i]_M [T]_M [K]_\alpha [T_i^1]_M [A_i]_M [T^2]_M [I]_M \\ &\quad + [I]_N [T^2]_N [A_i]_N [T]_N [K]_\alpha [T_i^1]_N [A_i]_N [T^2]_N [I]_N \\ &\quad + [I]_M [T^2]_M [A_i]_M [T]_M [K]_\alpha [T_i^1]_M [A_i]_M [T^2]_M [I]_M \\ &\quad + [I]_N [T^2]_N [A_i]_N [T]_N [K]_\alpha [T_i^1]_N [A_i]_N [T^2]_N [I]_N \} \end{aligned}$$

식(2-12)의 전체 강성방정식에 하중조건 및 경계조건을 대입하면, 미지의 강체변위, 반력, 스프링의 상대변위 및 내력을 구할 수 있다.

2.4. 탄성 및 탄소성 해석 방법

강체요소법을 이용하여 구조물을 탄소성해석 하기 위해서 재료의 역학적인 거동을 만족하는 스프링의 복원력 특성(응력-변형도관계)을 Tri-linear Model로 가정하고, 소성역(제2구배 이후)에서 응력이 후진할 때는 탄성구배(제1구배)를 채택하였다. 또 철근콘크리트의 역학적인 특성을 고려하기 위해서 스프링의 압축강성 및 인장강성을 구분하여 계산할 수 있도록 하였다.

단계 1 : 구조물의 해석시에 분할된 요소의 접촉면에 취해진 스프링의 강성의 선택이 제일 우선되어야만 강성매트릭스를 계산할 수 있다. 그런데 스프링의 축력강성을 선택할 때에는 스프링의 응력성분이 인장력인지 압축력인지 미리 알 수 없기 때문에 인장강성과 압축강성을 구분할 수 없다. 따라서 우선 모든 스프링의 축력강성에 인장강성을 대입하여 계산한다. 그 결과 스프링이 상대변위의 부호가 음이면, 이때의 스프링의 응력은 압축력이 작용하기 때문에 응력의 성분과 강성이 일치하지 않으므로 압축강성으로 다시 바꾸어 계산한다. 이러한 과정을 반복하여 각 스프링에 대한 상대변위의 부호와 선택된 스프링의 강성이 일치하면 단위하중에 대한 탄성 해석을 한다.

단계 2 : 단위하중에 대한 탄성범위의 해석으로부터, 절점에 제일 먼저 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 스프링

에 대한 증분하중을 각 스프링에 곱해준다.

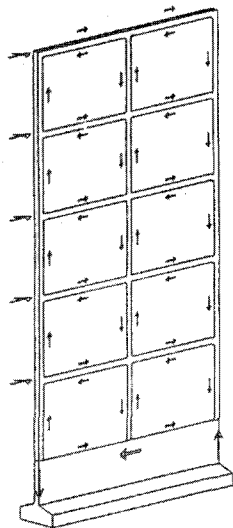
단계 4 : 이후의 탄소성해석에서는 단계1에서 단계 3까지 반복계산이 되고, 스프링의 강성이 3구배를 넘어가면 파괴된 것으로 본다.

2.5. 프리캐스트 대형판 요소

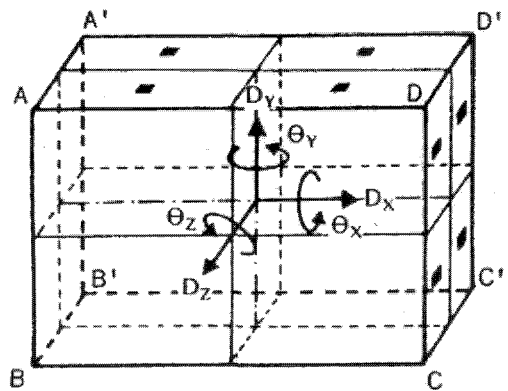
<그림 1>과 같은 프리캐스트 대형판 구조물은 프리캐스트 대형판 요소와 접합부를 나누어서 분할할 수 있다. 프리캐스트 대형판넬의 각 면에는 접합부 부분에 축력, 면내 전단력 및 면외 전단력을 전달할 수 있는 스프링으로 구성된다.

프리캐스트 대형판의 3차원 요소의 중심에는 6개의 강체변위 ($D_x, D_y, D_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)가 취해진다. 그리고 요소의 중심에 취해진 6개의 강체변위가 요소의 주변에 취해진 스프링 위치의 변위에 미치는 영향을 고려하면, 요소의 적합방정식을 구할 수 있다<그림 2>.

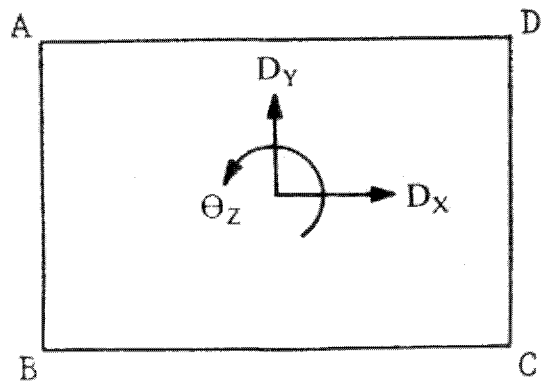
프리캐스트 대형판의 2차원 요소는 <그림 3>과 같이 요소의 중심에는 3개의 강체변위 (D_x, D_y, θ_z)가 취해진다. 같은 방법으로 3차원 원통요소는 <그림 4>와 같고, 3차원 구요소는 <그림 5>과 같다.



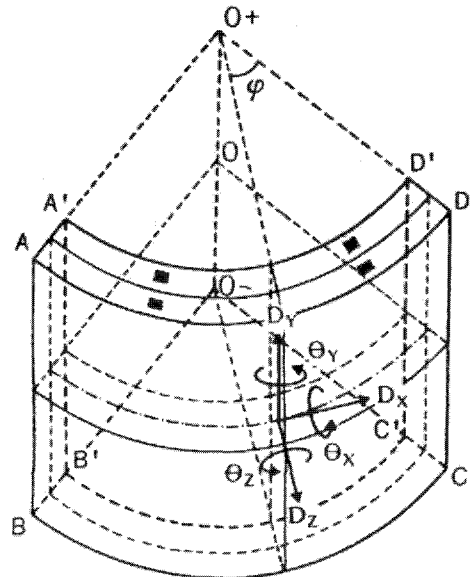
<그림 1> 프리캐스트 대형판 구조물



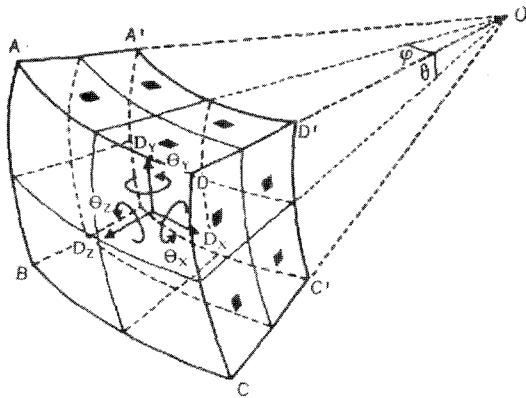
<그림 2> 3차원 판요소



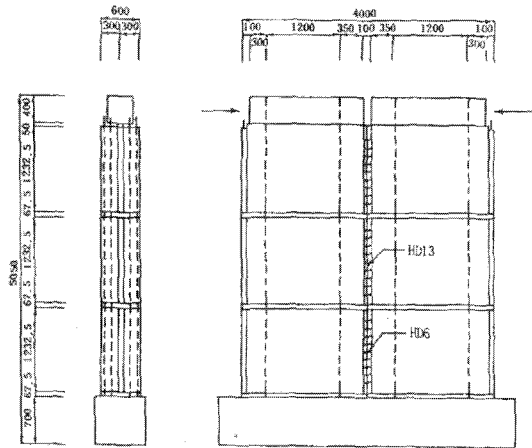
<그림 3> 2차원 판요소



<그림 4> 3차원 원통요소



<그림 5> 3차원 구요소



<그림 7> 해석모델-B

3. 대형판 접합부의 탄소성해석

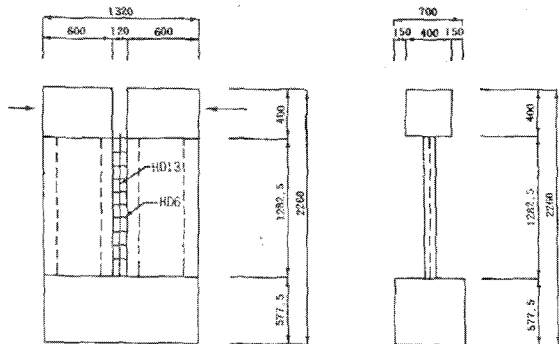
3-1. 해석모델

본 연구에서는 철근콘크리트 프리캐스트 대형판 접합부의 탄소성해석에 적용하여 구조물의 수치해석에 관한 결과와 실험결과와의 비교고찰을 통하여 강체요소법의 효용성을 파악하고자 한다.

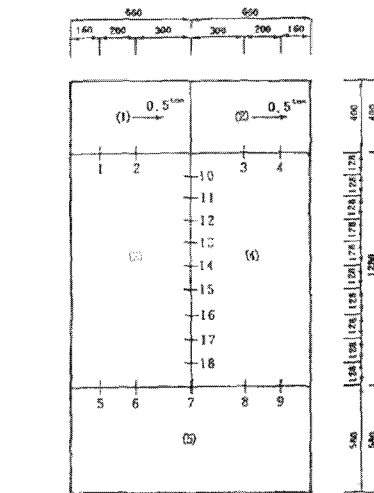
프리캐스트 대형판 구조물 해석모델의 형상과 해석 모델은 <그림 6> 및 <그림 7>와 같다.

3-2. 해석결과 및 고찰

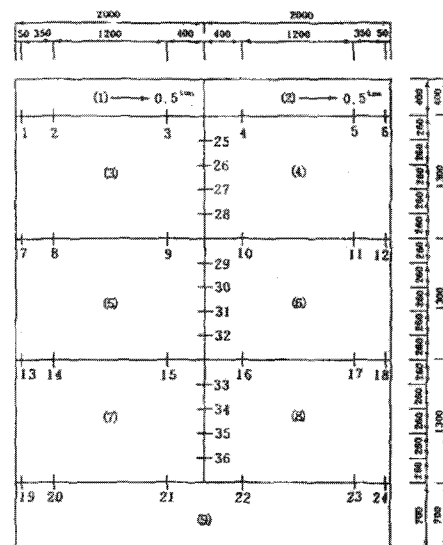
<그림 8>과 <그림 9>는 강체요소법에 의한 탄소성해석 모델을 나타낸 것이다. 탄소성해석 결과에 적용한 수평접합부 및 수직접합부 스프링의 내력은 참고문헌2)의 결과를 이용하였다. <그림 10>과 <그림 11>는 강체요소법에 의한 탄소성해석 결과와 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다.



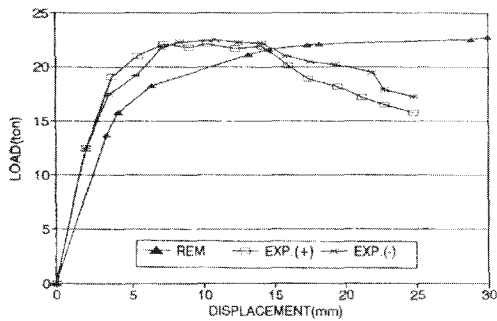
<그림 6> 해석모델-A



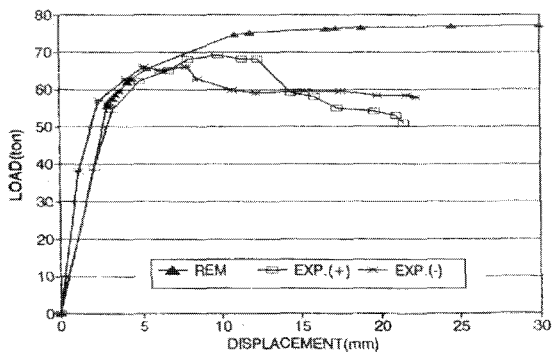
<그림 8> 해석모델-A의 강체요소모델



<그림 9> 해석모델-B의 강체요소모델



〈그림 10〉 해석모델-A의 탄소성해석 결과



〈그림 11〉 해석모델-B의 탄소성해석 결과

4. 결 론

본 논문에서는 강제요소법을 이용하여 철근콘크리트 프리캐스트 대형관 접합부의 탄소성 해석을 수행하기 위한 프리캐스트 요소를 제안하고, 이 요소들을 이용하여 구조물을 해석할 수 있는 구성방정식 및 탄소성 해석방법을 정식화하였다. 그리고 하중-변위 곡선, 균열의 진전상황 및 파괴 상황 등을 분석해 보았다.

강제요소법에 대한 본 연구는 구조물을 해석하는데 있어서 일반적인 해석적인 개념과 달리 강체스프링 모델이라는 새로운 해석적 개념을 도입한 것으로 기존의 해석적 개념에 대한 새로운 아이디어를 제공할 수 있다. 프리캐스트 구조물의 접합부의 불연속성 및 접합부의 슬립문제의 해결에 보다 효과적으로 적용할 수 있는 해석법으로 사료된다.

참 고 문 헌

1) Kawai, T., "New Element Model in Discrete

Structural Analysis," Journal of the Naval Architects of Japan, Vol.141, 1977, 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, 1982.

3) Kwun, T.J. and Kim, S.D., "Elasto-plastic Analysis of Spherical Shell by the Rigid Element Method," Proceedings IASS Symposium on Shells, Membrances and Space frames, 1986, pp.137-144.

4) Kwun, T.J., Han, S.E. and Park, K.G., "New Approach on the Elasto-Plastic Analysis of the Open Spherical Dome," Proceedings IASS Symposium on Dome from Antiquity to the Present, 1988, pp.334-342.

5) Kwun, T.J., Han, S.E., Suh, S. and Park, K.G., "A New Approach on the Elasto-Plastic Analysis of Pressure Vessel," Proceedings of the International Symposium on Pressure Vessel Technology and Nuclear Codes and Standards, 1989, pp.3.32-3.45.

6) Kwun, T.J., Park, K.G. and Cho, K.P., "A New Limit Analysis of The Hemispherical Shell Supported with Cylinder by Rigid Element Method," Proceedings of the Third Summer Colloquium on Shell and Spatial Structures, Aug,1990, pp.525-534.

7) Kwun, T.J., Park, K.G. and Cho, K.P., "An Experimental Study on Verification of Numerical Results of R.C Hemispherical Shell Subjected to Vertical Load," Proceedings of the SEIKEN-IASS Symposium on Nonlinear Analysis and Design for Shell and Spatial Structures, 1993, pp.355-362.

8) 서수연, 대형 콘크리트 관구조의 이력거동에 관한 연구, 한양대학교 박사학위 논문, 1994. 12

9) 박강근, 강제요소법에 의한 구조물의 탄소성해석에 관한 연구, 성균관대학교 박사학위 논문, 1994. 12