

수직접합부 강성을 고려한 프리캐스트 콘크리트
대형판구조물의 응력해석
Stress Analysis of Precast Concrete Large Panel Structures
Taking Account of Stiffness of Vertical Joints

장 극관* 이 한선** 신 영식*** 류 진호****
Chang, Kug-Kwan Lee, Han-Seon Shin, Young-Shik Ryoo, Jin-Ho

ABSTRACT

Precast concrete (P.C.) large panel structures have usually weaker stiffness at joints than that of monolithic in-situ reinforced concrete structures. But structural designers do not in general take into account this characteristics of P.C. large panel structures and use the same analytical models as for the monolithic structure. Therefore, the results of analysis obtained by using these models may be quite different from those actually occurring in real P.C. structure. In this study, the change in force and stress distribution and deflections of structure caused by applying lower shear stiffness at vertical joints are investigated through trying several finite element modeling schemes specific for P.C. structures. Finally, for engineers in practice, a simplified model, which takes account of the effect of lower shear stiffness at vertical joints, is proposed with the understanding on possible amount of errors.

1. 서론

근래에 우리나라에서도 선진국 대열에 진입하는 과정에서 3D기피현상으로 건설현장에서 기능인력을 구하기가 어렵고 인건비도 상승되는 반면, 품질관리는 더욱더 어려워지는 상황에 도달하였다. 따라서 이를 극복하는 방법의 하나로서 품질관리가 비교적 양호한 공장에서 부품을 생산하고 현장에서는 조립에 필요한 최소한의 인력만 사용하는 조립식 구조가 부각되고 있다. 그러나 이러한 조립식 구조물, 특히 프리캐스트 콘크리트(Precast Concrete: P.C.) 대형판 구조물은 보통 일체식 철근콘크리트 구조물에 비하여 접합부에서의 구조적 특성, 즉 강성, 강도 및 에너지흡수능력 등이 저하되는 것이 일반적인 경향이다. 따라서 특히 탄성해석법에 의한 설계소요강도의 결정시, 이러한 특성중 접합부의 낮은 강성이 고려되어야하고, 응력해석시 사용되는 모델 또한 일체식 철근콘크리트구조물의 그것과 달라야 함에도 불구하고 현재 실무자들 사이에 동일한 해석모델 및 강성을 사용함으로써 P.C. 대형판 구조물의 구조특성을 충분히 감안한 설계를 하고 있다고는 말할 수 없다. 또한 우리나라뿐만 아니라 외국에서조차도 P.C. 구조물의 해석모델에 관한 연구가 별로 많지 않은 것을 볼 때 이의 연구는 P.C. 구조물의 경제적이고 안전한 설계를 위하여 매우 필요한 분야이며, 본 연구는 이러한 필요성에 의해, 우선 수직접합부의 낮은 전단강성을 고려한 해석모델을 사용할 경우, 구조물의 탄성처짐이나 응력분포가 어떻게 달라지는지 검토하고, 실무자들이 간편하게 수직접합부의 낮은 강성을 반영할 수 있는 해석모델을 제시함을 본 논문의 목적으로 한다.

2. 수직접합부의 전단강성

수직접합부에 대한 거동실험은 국내의를 걸쳐서 많이 수행되었다. 특히 전단키와 루프(loop)철

* 삼성건설 기술연구소 선임연구원 ** 영남대학교 건축공학과 전임강사
*** 영남대학교 토목공학과 부교수 **** 영남대학교 토목공학과 석사과정

근 및 연결(tie)철근을 가진 (그림.1)과 같은 상세는 대체로 습식접합시스템의 전형적인 상세라고 할 수 있다. 이러한 접합부에 대한 전단력 및 전단변위에 관한 전형적인 곡선은 (그림.2)에 나타나 있다.⁽¹⁾ 그림에서 커브는 (i)판넬과 접합부 접합면에 따라 균열이 발생함과, (ii)접합부 내부 콘크리트의 사균열의 발생함에 따라 기울기가 확연히 달라짐을 발견할 수 있다. 또한 대체로 전단키의 미끄러짐파괴에 의해 극한치에 도달하게 된다. 이때 이 수직접합부의 강성을 원점에서 최대전단응력의 2/3에 해당하는 점에 이르는 기울기(secant slope)로 가정할 경우 CEBTP⁽²⁾와 DIAB/SBI⁽³⁾가 행한 실험결과에 의한 접합부강성은 (그림.3)과 같다. 따라서 접합부상세 차이에 따른 강성의 변화는, 접합상세가 다른 시스템마다 실험을 통하여 확인할 필요가 있겠으나, 본 연구에서는 이 실험데이터에 의거하여 강성을 가정하고 이에 적절한 해석모델을 수립하였다.

3. 대상구조물과 해석모델

3.1 수직접합부의 탄성계수 및 치수가정

본 연구에 사용된 대상구조물은 (그림.4)와 같은 중간에 개구부가 2개열로 위치한 플랜지 벽을 가진 I형 6층 전단벽을 택하였다. 이는 참고문헌 (4)에서 예제로 사용된 것이기도 하다. 이 예제에서는 수직접합부 전단강성으로서 219 MN/m/m를 사용하였기 때문에 비교 목적상 동등한 효과를 주는 탄성계수를 산출하였다. 벽두께 20cm인 수직접합부의 폭을 20cm로 가정하였을 때 219 MN/m/m의 전단강성을 나타내기 위해서는 수직접합부 탄성계수가 53475 t/m²으로 나타났으며 이는 판넬(panel) 콘크리트의 탄성계수 2418367 t/m²의 약 1/45에 해당한다. 이 값은 또한 (그림.3)에서 전단강성이 1.1 N/mm²과 동등한 것으로 평균에 비해 매우 안전측으로(conservative) 잡은 것을 알 수 있다.

3.2 유한요소에 의한 수직접합부의 해석모델

본 해석연구에서는 수직접합부를 기본적으로 연속체(continuum)로 보고 모델을 수립하였다. 대상 구조물에 대한 해석모델은 다음과 같이 ADINA⁽⁵⁾를 사용한 (1) 4-절점 평면응력(plane stress)요소, (2) 9-절점 쉘(shell)요소 및 (3) 4-절점 쉘요소로 모델한 경우와 (4) ETABS를 이용한 모델을 사용하였다.

(1) 4-절점 평면응력(plane stress) 유한요소모델

이 모델에서는 한층의 전단벽은 하나의 4-절점 평면응력요소로 보며 개구부 인방보는 보(beam)요소로 모델하였다. 평면응력요소의 면외강성이 없는 점을 고려하여, 구조물의 안정성을 보장하기 위해 가상보를 매층 (그림.5)와같이 설치한다.⁽⁷⁾ 이 보는 수평평면내에서는 무한휨강성을 가지며 수직방향으로는 무시할 정도로 작은 휨강성을 보유하도록 한다. 다만 개구부 상부인방보의 단부를 고정단으로 모델하기 위해서는 인방보에 연결된 가상보의 수직강성도 역시 무한으로 해줄 필요가 있다. 또한 벽체의 비틀림강성을 평면요소가 반영시키지 못하기때문에 비틀림강성을 가진 가상기둥을 첨가하였다. 전산해석에 사용된 입력자료가 (그림.5)에 나타나 있다.

(2) 9-절점 쉘(shell) 유한요소모델

이 모델은 (1)에서 사용한 요소보다 좀 더 정교하고, 또 면외강성을 보완하는 가상보나 층당 하나의 요소를 사용해야하는 제약이 없이, 여러개의 요소를 사용할 수 있는 장점이 있다. 특히 9-노드 쉘의 경우 휨변형모드를 정확히 표현할수 있다는 장점이 있다. (그림.6)에서 보는바와 같이 개구부 인방보는 부구조(substructure)를 이용 총20개의 9-절점요소로 표현하였다. 수직접합부의 상세한 해석모델은 (그림.7)에 나타나 있다. 중앙에 수직연결철근을 묘사하는 기둥이 지나가고 이 기둥의 중심에 위치한 절점과 수직접합부 요소의 외곽절점이 접속면에서 강체연결(rigid link) 되어 있다. 여기서 강체연결이란 이 기둥에 인접한 수직접합부절점의 모든 변위는 기둥의 해당 중심절점의 해당자유도 변위를 그대로 따르게 하는 것이다. 단 여기서 플랜지벽체에서의 수직접합부는 판넬의 탄성계수를 그대로 사용하고 웹(web)벽체 부분의 수직접합부만 감소된 탄성계수로 입력하였다.

(3) 4-절점 셸(shell) 유한요소모델

이 모델은 주어진 구조물에 대한 정해(exact solution)에 가장 근접한 결과를 얻도록 최대한 노력한 해석모델이다. 즉 정밀해석을 위해 많은 요소를 사용하되, 자유도수를 줄이기위하여 구조물의 대칭성 및 역대칭성을 이용하였으며⁽⁷⁾, (그림.8)과 같은 모델을 수립하였다. 총 자유도는 5600개 정도로 나타났다. 웹벽은 두께를 반으로 줄여 10cm로 하였으며, 경계조건도 x축을따른 대칭면에서의 y방향이동과 x방향회전을 구속하였으며, y축을따른 웹벽의 중앙대칭면에서는 수직방향으로 z방향의 이동을 구속하였다. 수직접합부의 모델수립은 (2)와 같은 방법을 사용하였다.

(4) ETABS⁽⁶⁾를 이용한 모델

ETABS는 기본적으로 보와 기둥의 선형부재로 모든 구조물을 모델하며, 각 층바닥을 강체다이아프램(rigid diaphragm)으로 가정함에 의해 두개의 수평이동 자유도와 하나의 회전 자유도로 관련자유도수를 대폭줄임으로 인해 능률적인 구조해석이 가능하도록 하게된 프로그램이다. 실제로 전단벽으로 이루어진 구조물 또는 전단벽과 보 및 기둥(이중괄조)의 복합체일 경우이든 벽체를 판넬요소로 입력시킨후 이 판넬요소들이 연결되어 있을 경우 (그림.9)와같이 하나의 기둥으로 치환한후 구조해석을 수행한다. 그 결과는 각 판넬별로 주어지든지 아니면 접속판넬들로 이루어진 기둥에 대한 것으로 주어진다. 또한 ETABS에서는 판넬요소에 대해 비적합(incompatible)힘모드를 적용시킴으로써 힘에 대해 보다 정확도를 높여주고 있다. 본 연구에서는 (그림.10)에서와 같이 (i)수직접합부를 별도의 판넬요소로 본 모델과, (ii) 수직접합부를 같은 단면의 깊은보로 보고 모델한 2가지에 대해 결과를 관찰하여 보았다.

4. I형 6층 구조물의 해석결과 비교

3절에서 언급한 수직접합부의 저하된 탄성계수를 적용하고, 해석모델을 사용하여 상단에 길이 방향으로 수평하중 102ton을 가력하여, 이때 발생하는 처짐과 응력분포현상을 관찰하여 보았다. 수직접합부의 강성을 판넬의 것과 동일하게 하였을 때의 결과와 또한 비교하였다.

4.1 처짐결과의 비교

본 연구에서는 전부 적합요소(compatible element)를 사용하거나 경계조건이 적합조건을 만족하도록 조치하였으므로 실제로 처짐이 커지면 커질수록 정해(exact solution)에 가깝다고 볼수있다. 우선 수직접합부 강성저하를 고려한 경우와 고려하지 않고 일체식구조물로 가정하였을때, 지붕형처짐의 크기가 모델별로 (표.1)에 나타내었다. 여기서 알수있는 것은 층당 한 요소로 모델한 4-절점 평면응력요소모델이나, ETABS의 골조모델이, 9-절점 셸요소모델에 비해 결코 손색이 없이, 정해(4-절점 셸요소모델의 해)에 가까운 값을 보여주고 있다는 사실이다. 대체로 그 오차는 15%이내인 것을 알수있다. 또한 수직접합부의 강성을 1/45정도로 저하시켰을 경우 횡지붕처짐의 크기는 모델에 따라 19% - 32%정도 증가함을 나타내고 있다.

4.2 응력분포의 비교

수직접합부의 강성저하에 따른 주응력분포의 변화가 4-절점 셸요소모델의 경우에 대하여(그림.11)에서 명확하게 드러나고 있다. 또한 이미 언급한 4개 모델에 대한 1층 바닥판에서의 수직응력분포 및 축력과 모멘트를 수직접합부 강성저하유무에 따라 비교한 것이 (그림.12)에 나타나 있다. 4-절점 셸요소모델의 해석결과, 일체식일 경우 플랜지부분과 웹이 만나는 부분에서 수직응력(normal stress)이 거의 140 t/m²으로 같은 양을 보이고 있다. 그러나 수직접합부의 강성이 저하되면서 플랜지의 응력은 최고 80 t/m²정도로 감소하는 반면 웹연단의 수직응력은 400t/m²정도로 급격히 증가함을 알 수 있다. 다음 각 모델별로 플랜지와 웹의 축력분담 상황을 살펴보면, 가장 정해에 가까운 4-절점 셸 1/4부분구조모델의 경우, 수직접합부 강성저하에 따라 플랜지 인장력이 126ton에서 85ton으로 감소한 반면 웹벽체는 -40ton에서 +33ton으로 인장력이 증가하였음을 보여주고 있다. 또한 9-절점 셸요소모델의 경우 플랜지축력이 134ton에서 98ton으로 줄고

웹브릭체가 -31.9ton에서 +23.6ton으로 증가하였음을 나타내고 있다. 이와 비교해서 보다 단순화된 모델인 ETABS보모델의 경우, 웹브릭체가 압축력 -34.8 ton에서 큰 인장력 50 ton으로 증가하여, 4-절점 쉘요소모델의 정해결과와 매우 유사한 결과를 보여준 반면, 4-절점 평면응력 요소모델은 정해와 상당한 차이가 있음을 나타내고 있다. 수직접합부의 전단력 변화가 또한 모델별로 (그림.13)에 주어져 있다. 수직접합부 강성을 고려해줄 경우 대체로 하부에서 요구강도가 30ton/층에서 10ton/층이내의 정도로 급격히 줄어들고 상부층에서도 약간의 차이가 있음을 알 수 있다. 개구부 상부 인방보의 전단력 분포가 (그림.14)에 비교되어 나타나 있다. 여기서 이 인방보의 전단력은 사용모델형태나 수직접합부강성으로 부터 큰영향을 받지 않음을 발견할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 P.C. 대형판구조물에서 수직접합부의 강성을 고려하였을 경우, 그렇지않고 일체식으로 보았을때의 해석결과와 어떻게 다르게 나타나는지를 확인하였다. 수직접합부의 강성을 일체식에 비해 약 1/45로 낮추었을 경우, 대체로 지붕의 횡처짐은 20%내외로 증가함을 나타내었고 수직응력면에서 플랜지효과가 1/3정도 감소하는 한편, 웹에서의 인장응력이 상당히 증가하는 현상을 보여주었다. 또한 수직접합부의 소요강도면에서 저하된 강성을 사용할 경우 저층부분에서 훨씬 낮은 강도를 필요로 하였으며, 개구부 인방보의 전단력은 사용모델의 종류나 수직접합부 강성변화에 큰 영향을 받지 않았다. 보다 간편한 모델인, 수직접합부가 낮은 탄성계수를 가진 깊은 보로 본 ETABS 모델에서는 정해와 어느정도 차이는 있으나 매우 유사한 결과를 나타내 주고 있어 이의 오차범위를 인식하면서 실무에서 이 모델을 사용한다면 보다 실제적이며 안전한 설계를 수행할 수 있을 것으로 본다. 본 연구에서는 수직접합부의 강성영향만을 다루었으나, 추후 수평접합부의 구조적 특성을 실험결과에 근거하여 도출하고 이의 구조물에 끼치는 영향을 해석적으로 파악하는 것이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 삼성건설주식회사의 산학협동연구지원에 의해 이루어졌음을 밝히며 이 지원에 대해 감사한다.

참고문헌

1. "Stability of plate structures - method of analysis," SBI Direction 115, Danish Building Research Institute, 1981.
2. Michel Pommeret, "La resistance aux efforts tangents des joints verticaux entre grands panneaux prefabriques coplanaires," Service d'Etude des Structures. Bulltein interne d'information no.3. CEBTP, Saint-Remy-les Chevreuse 1971. 192 p.
3. "Keyed shear joints," SBI-report 97. Danish Building Research Institute, Horsholm 1976. 52 p.
4. "User's Manual for SHEWALS," 2nd Revised Edition, Danish Building Research Institute, 1980.
5. Bathe, K.J. , "ADINA 84- A Finite Element Program for Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis," Report AE 84-1 , December 1984.
6. ETABS, Three Dimentional Analysis of Building Systems , Computers and Structures Inc., Berkeley, California, 1989.
7. Stafford Smith, B. and Coull, A., "Tall Building Structures, Analysis and Design," John Wiley and Sons, 1991.
8. Bathe,K.J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis," Prentice-Hall,INC., 1982.

Program	ADINA						ETABS		
	4-절점 요소		9-절점 요소		4-절점 평면응력요소 (인접보요소)		수직접합부		
탄성계수	$E_{11} = E_0$	$E_{22} = E_0$	$E_{33} = E_0$	$E_{44} = E_0$	$E_{55} = E_0$	$E_{66} = E_0$	$E_{11} = E_0$	$E_{22} = E_0$	$E_{33} = E_0$
치짐	4.05	5.32	3.86	4.61	3.71	4.63	3.43	3.78	4.54

표 1. 지붕형처짐의 크기

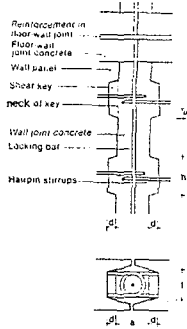


그림 1. 전형적인 습식 수직접합시스템의 상세도

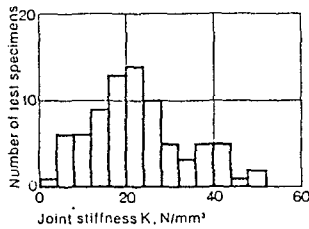
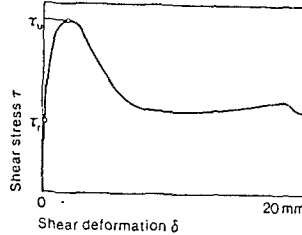
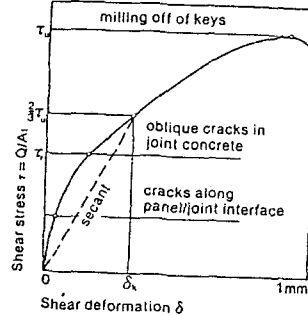


그림 3. CEBTP⁽²⁾와 DIAB/SBI⁽³⁾의 실험결과에 의한 수직접합부의 강성



(a) CEBTP⁽²⁾의 전단키를 가진 접합부 실험 결과에 의한 전형적인 응력-변형률 관계



(b) 전단강성의 정의

그림 2. 수직접합부에 대한 전단력 및 전단변형률 관계

그림 3. CEBTP⁽²⁾와 DIAB/SBI⁽³⁾의 실험결과에 의한 수직접합부의 강성

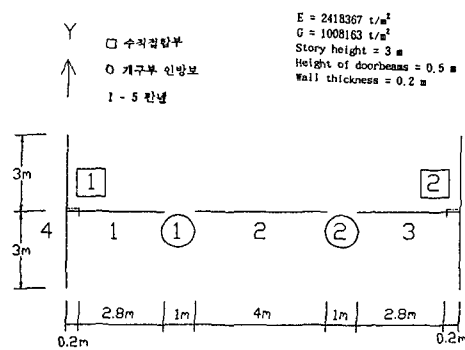


그림 4. 개구부가 2개 있는 플랜지벽을 가진 I형 6층 전단벽

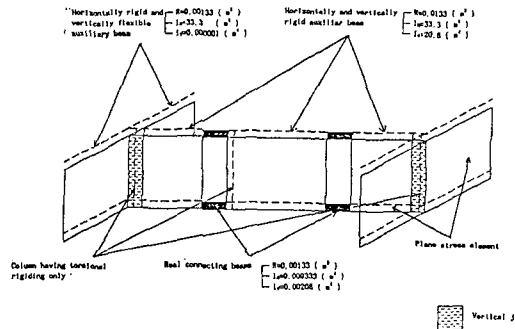


그림 5. 4-절점 평면응력 유한요소모델

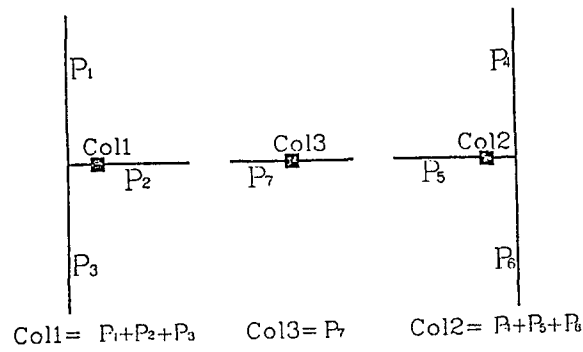


그림 9. ETABS에서의 판넬과 기둥의 관계

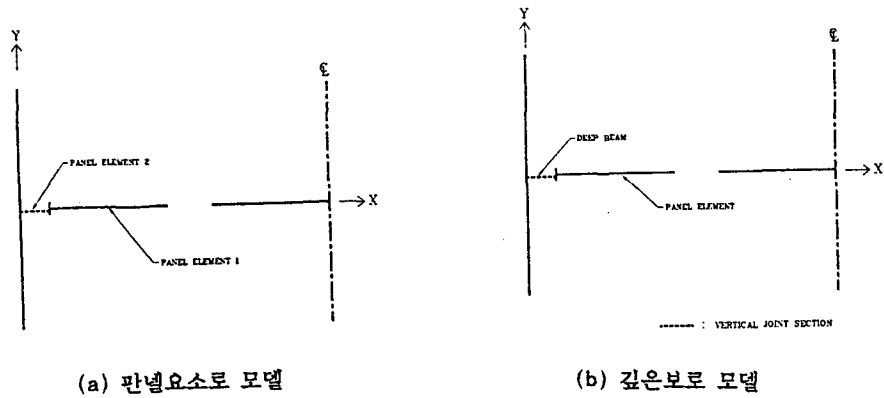


그림 10. ETABS에서 수직접합부를 판넬요소로 본 모델과 깊은보로 본 모델

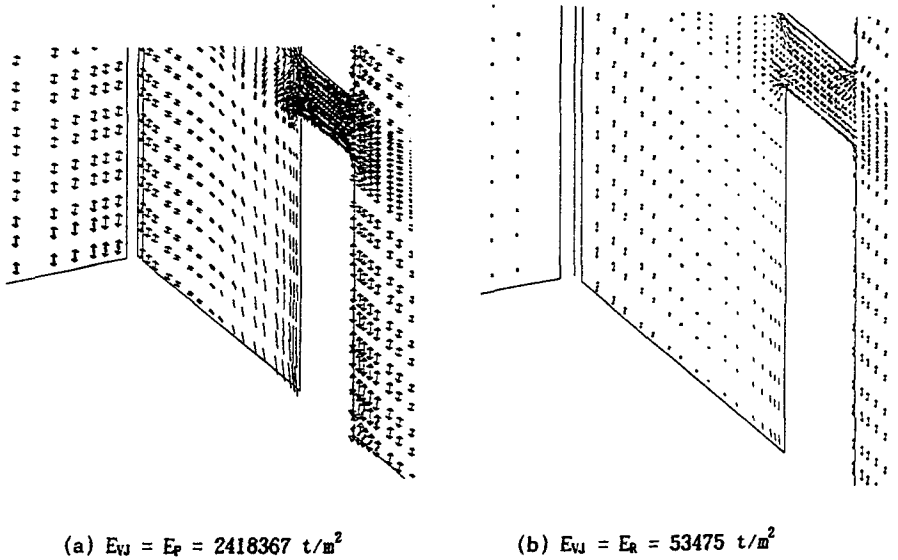


그림 11. 수직접합부의 강성저하에 따른 주응력분포의 변화

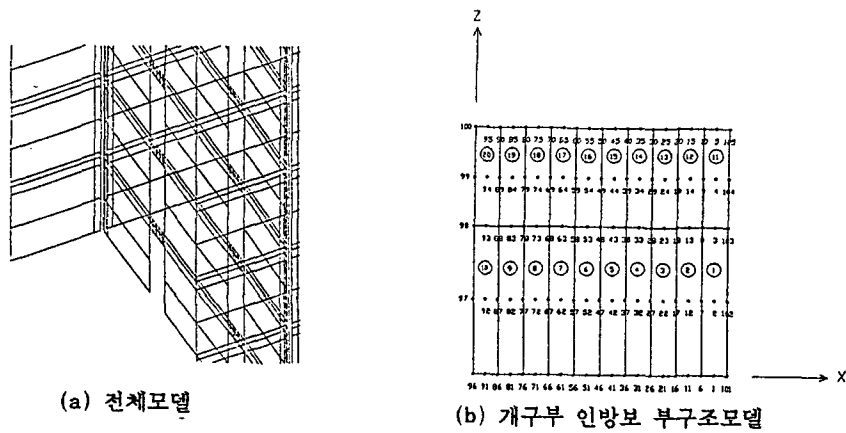


그림 6. 9-절점 셸 유한요소모델

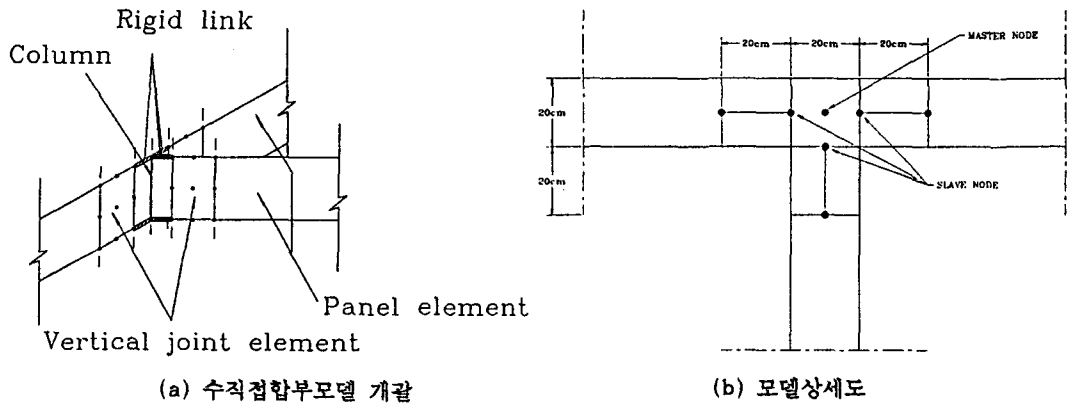


그림 7. 9-절점 및 4-절점 셸 요소모델에서 수직접합부의 해석모델상세

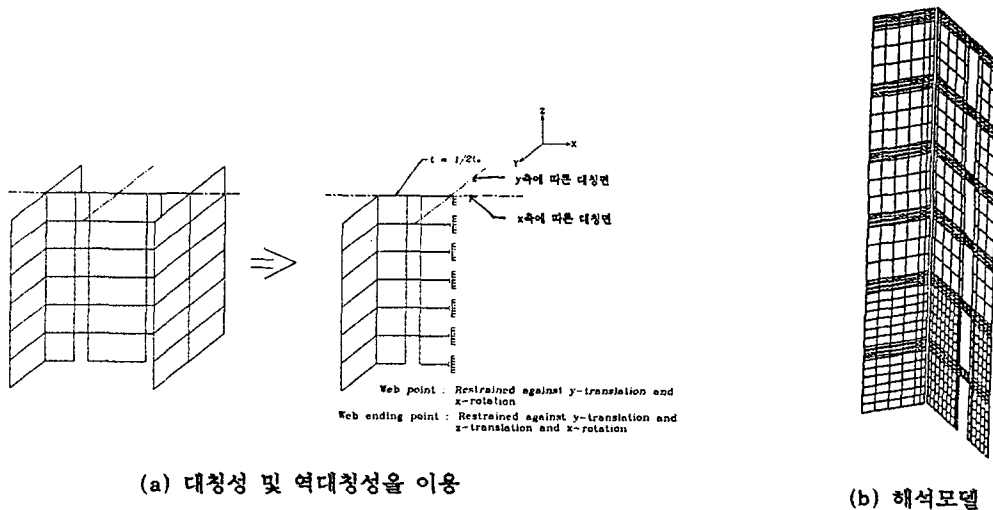
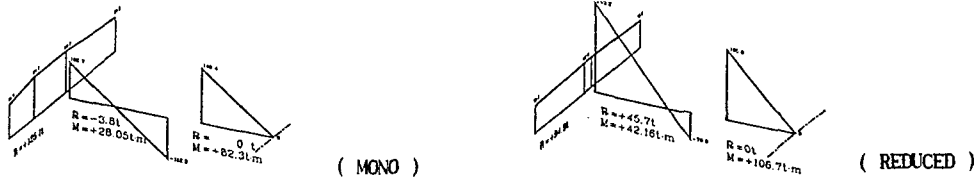
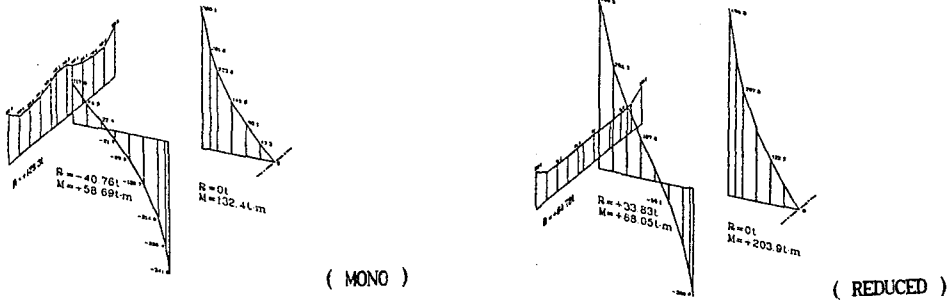


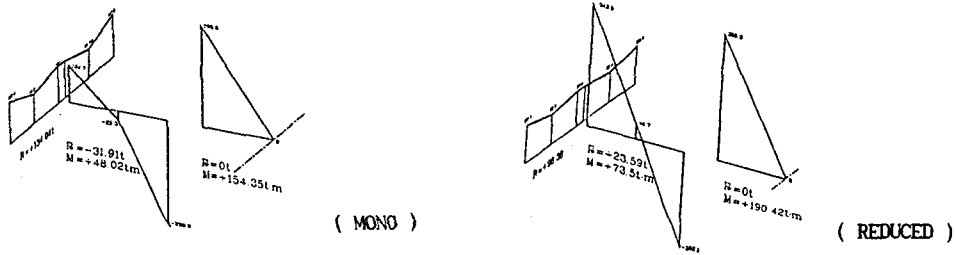
그림 8. 대칭성을 이용한 4-절점 셸 유한요소모델



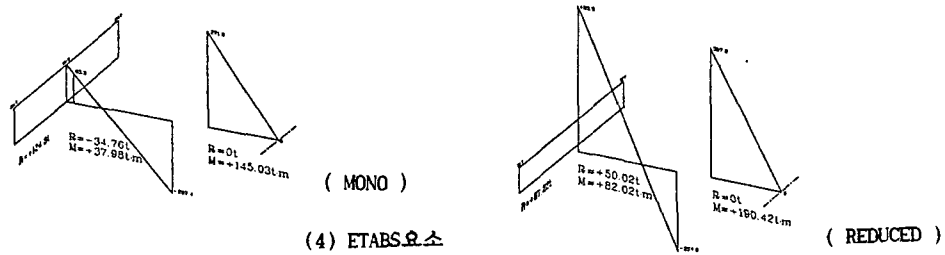
(1) 4-절점 평면응력요소



(2) 4-절점 셸요소



(3) 9-절점 셸요소



(4) ETABS요소

그림 12. 1층 바닥에서의 응력분포와 부재력(축력, 모멘트)의 변화

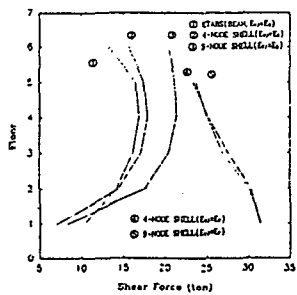


그림 13. 수직접합부의 전단력

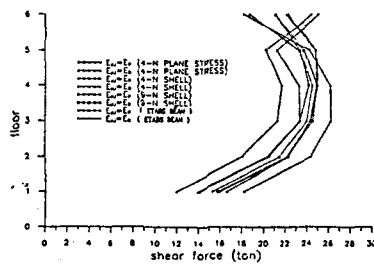


그림 14. 개구부 상부 인방보의 전단력