

비내진상세 철근콘크리트 골조 구조물의 내진성능 및 중약진지역에서의 한정연성도 내진설계

Seismic Capacity of a Reinforced Concrete Frame Structure without Seismic Detailing and Limited Ductility Seismic Design in Moderate Seismicity

김재관

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

김익현

지진공학연구센터
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1

요 약

지진하중을 고려하지 않고 4층 철근콘크리트 골조 건축물을 설계하였다. 건축물의 주축 및 직각 방향에 대하여 푸쉬오버(Pushover) 해석을 수행하여 공급역량곡선을 얻고 이를 ADRS 스펙트럼으로 변환하여 수요스펙트럼과 비교하여 전체적인 내진성능을 평가하였다. 공급역량곡선 상의 몇 점에 대해 변형형상, 부재의 전단력 및 모멘트의 분포를 계산하여 거동특성을 파악하였다. 내진성능을 기본으로 하여 중약진지역의 내진설계 개념에 적합한 한정연성도 설계개념을 제안하였다.

Abstract

A four-story reinforced concrete frame building model is designed for the gravity loads only. Static nonlinear pushover analyses are performed in two orthogonal horizontal directions. The overall capacity curves are converted into ADRS spectra and compared with demand spectra. At several points the deformed shape, moment and shear distribution are calculated. Based on these results limited ductility seismic design concept is proposed as an alternative seismic design approach in moderate seismicity design.

1. 서 론

우리나라의 건축구조물의 내진설계는 1986년 고층빌딩에 대하여 도입되면서부터 실시되고 있다. 내진규정의 기본 개념은 UBC와 동일하며 강한 지진운동에 대하여 큰 소성변형을 허용하고 있다. 그러나, 구조물의 지진 시의 동적응답특성은 지반운동 세기의 함수로 구조물이 위치한 곳의 지반운동의 세기를 고려하여야 한다. 우리나라의 지반운동의 세기는 강진지역에 비하여 비교적 낮기 때문에 중약진 지역으로 분류할 수 있다. 또한, 내진상세가 고려되지 않은 구조물의 경우도 상당한 량의 수평저항력을 보유하고 있어서⁽¹⁾⁽²⁾ 중약진지역의 설계지진운동에 대하여 완전하게 붕괴되지 않을 가능성이 있으며 최대지진(MCE)에 대하여 요구되는 연성도의 크기도 강진지역에서 만큼 높지 않을 것이다. 따라서, 중약진지역에서는 한정된 연성도 (Limited Ductility) 를 확보할 수 있는 내진상세가 고려된다면 MCE에 대해서도 붕괴되지 않을 수 있을 것이다. 이러한 목적을 위해서는 우선, 내진상세가 고려되지 않은 구조물은 어느 정도의 수평저항력을 보유하고 있는지 또

한, 중약진지역의 지반운동에 대하여 어떻게 거동하는지를 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 지진하중을 고려하지 않은 설계하중에 대하여 4층 RC 건축물을 설계하고 비선형 수치해석을 통하여 비선형 거동특성을 확인하였다. 해석에서 얻어진 바닥전단력-지붕변위의 관계식을 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)으로 변환하고 소요내진역량과 비교하여 내진성능을 검토하였다.

2. 모델 건축물의 설계

4층 건축물의 지상부분을 건축물의 설계기준에 따라 설계하였다. 평면은 2×2 Bay로 하고 층고는 3.5m이다. 외벽은 시멘트 벽돌로 쌓고 내부 간막이 벽은 경량재료를 사용하는 것으로 가정하였다. 콘크리트의 설계 압축강도 210kgf/cm^2 , 철근의 인장 항복강도는 4000kgf/cm^2 이다. 모델의 평면도 및 입면도는 그림 1, 그림 2와 같다. 각 층 부재의 단면도 및 철근배근 상세는 그림 3과 같다. 본 모델에서는 지진하중과 풍하중과 같은 수평하중을 특별히 고려하지 않았지만 풍하중에 대해서는 충분한 저항력을 지니고 있는 것으로 확인되었다. 계산의 편의를 위해 외벽 및 간막이 벽은 골조와 분리되어 건물전체의 강성에 기여하지 않는 것으로 가정하였다.

3. 해석모델 및 해석결과

모델 건축물의 각 부재(기둥 및 보)는 파이버(Fiber) 요소로 구성되는 프레임 요소를 이용하여 3차원 공간에서 모델화하였다⁽³⁾. 콘크리트의 균열 발생 이후의 구조물 전체의 비선형 거동을 정확하게 모사하기 위하여 분산균열 모델(Smeared Crack Model)을 적용하였다. 콘크리트의 구성모델에는 압축에 대하여 탄소성파괴(Elasto-Plastic Fracture) 모델⁽⁴⁾, 인장에 대하여 인장경화(Tension Stiffening) 모델⁽⁵⁾를 적용하였다. 따라서, 휨 거동에 대해서는 매우 정확하게 모사할 수 있다. 전단파괴의 판단 여부는 실험식을 이용하여 검토하기로 한다.

모델의 역량곡선(Capacity Curve)은 비선형 푸쉬오버(Push over) 해석을 수행하여 주축 및 직각 방향에 대하여 각각 얻었다. 하중은 먼저 정적하중을 재하하여 예비해석을 수행하고 각 하중 단계의 변형형상으로부터 개략적인 모드 벡트의 비를 구하여 이를 단조증가시켜 재하하였다.

바닥전단력-지붕변위의 관계식으로 주어진 모델의 역량곡선은 그림 4와 같다. 수치해석의 결과로 얻어진 모델의 연성도는 주축 및 직각방향으로 각각 2.7, 3.33 정도이다. 그림 5와 같이 역량곡선은 ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)⁽⁶⁾로 변환하여 내진성능을 검토하였다. 역량곡선 상의 3점에 대하여 지진공학회의 표준설계응답스펙트럼에 의거하여 지진계수(C_d)⁽⁷⁾를 계산하여 도시하였다. 소성변형 시의 감쇠비는 부재의 이력곡선이 다케다 모델로 표현될 때의 등가감쇠비를 채용하였다⁽⁸⁾. 감소비의 증가에 따른 응답크기의 감소는 ATC에서 주어진 저감계수⁽⁶⁾를 이용하였다.

역량곡선 상의 3점에 대하여 모델의 중앙 기둥의 변형형상을 그림 6에 나타내었다. 이들 기둥의 모멘트 및 전단력의 분포를 그림 7, 그림 8에 나타내었다. 바닥전단력이 최대가 되는 시점("B"점)에서 2층 중앙기둥에 큰 전단력이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 소성변형이 커지는 시점("C"점)에서는 1, 2층의 전단력은 손상에 의해 감소하는데 비해 3, 4층의 전단력은 증가하는 것을 알 수 있다. 이로부터, 모델의 극한변형 시, 심한 손상이 1, 2층에서 집중되는 것을 확인할 수 있다. 각 기둥의 전단강도는 충분한 여유를 가지고 있는 것이 확인되었다.

4. 한정연성도 내진 설계 개념

지반종류에 따른 각 내진성능목표, 즉 기능수행 및 붕괴방지 수준에서의 지진계수는 표 1과 같다. 지진구역계수 I, 구조물의 중요도 등급은 I, II 등급인 경우에 대하여 수록하였다. 표1과 그림 5로부터 모델 건축물의 안전에 대한 여유도를 고려한다면 내진성능은 충분히 만족할만한 수준은 아닌 것으로 판단된다. 특히, 연약한 지반 상(S_B)에 위치하는 경우 지진에 대한 위험도는 더욱 증

가한다. 몇몇 실험 연구^{13,14)}에 의하면 내진상세가 고려되지 않은 구조물도 상당한 수평저항력을 보유하고 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 차이는 구조물 설계기법의 차이, 초과강도 및 해석 모델의 이상화에 따른 차이일 가능성이 크다. 본 연구의 경우와 같이 최적의 상태로 설계된 건축물일 경우 내진성능은 만족할만한 수준이 아님을 확인할 수 있다. 그러나, 우리나라의 지진환경에서 구조물의 소성변형량은 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다.

구조물의 에너지 흡수능력을 표현하는 간단하고도 합리적인 인자(Indicator)로서 변위연성도(Displacement Ductility)가 널리 이용되고 있다. 이는 콘크리트 부재의 비선형 특성이 본격적으로 진행되는 철근 항복시의 변위(δ_y)에 대한 파괴시의 변위(δ_u) 비로 정의된다. 콘크리트 기둥 부재에 충분한 횡방향 구속철근을 배치하면 압축축 콘크리트의 박리 후에도 심부 콘크리트를 구속하여 내하력의 저하 없이 충분한 소성변형을 발휘할 수 있다. 그러나, 강진지역의 구조물과 다른 거동특성을 보이는 중진지역의 구조물의 경우는 비교적 적은 횡방향 구속철근으로도 소요내진성능을 확보할 수 있게 된다. 이와 관련한 한정연성도의 개념을 그림9에 나타내었다. RC 부재의 전단강도(V_d)는 콘크리트가 분담하는 저항력(V_c)과 트러스 메커니즘에 의해 분담하는 저항력(V_s) 그리고 축력에 의한 분담력(V_p)의 합으로 나타낼 수 있다¹⁵⁾. 콘크리트의 전단 저항력은 응답변위에 반비례하여 작아지게 되는데 Priestley는 콘크리트의 공칭 전단응력을 연성도(μ)에 따라 줄임으로써 전단 강도의 저하를 고려하고 있다. 즉, 연성도가 2보다 작을 때는 공칭전단응력을 $0.29\sqrt{f_c}(MPa)$ 로 하고 연성도가 4 이상일 때는 $0.10\sqrt{f_c}(MPa)$ 으로 하였다. 그림 9에서와 같이 강진지역과는 다른 횡방향 구속철근으로 목표연성도를 확보할 수 있게 된다. 따라서, 적당한 량의 횡방향 구속철근을 공급하여 연성도를 조정함으로써 중약진지역에서 요구되는 목표내진성능을 확보할 수 있음을 보여주고 있다.

5. 결 론

구조물의 합리적인 내진설계를 위해서는 구조물의 비선형 거동특성을 이해하고 구조물이 위치한 지역의 지진환경을 고려한 동적응답 특성을 파악하여야 한다. 본 연구에서는 비내진 상세 RC 건축물에 대하여 내진성능을 파악하고 중약진 지역에 적합한 내진설계 개념을 제시하였다. 우선, 지진하중을 고려하지 않고 설계한 모델 건축물에 대해 Push Over 해석을 수행하여 비선형 거동특성을 확인하였다. 내진성능은 해석결과를 ADRS 상에 변환하여 소요성능과 비교하여 검토하였다. 모델 건축물의 내진성능은 만족할만한 수준은 아니지만 우리나라의 지진환경을 고려할 때 요구되는 구조물의 연성도는 강진지역만큼 크지 않다는 것을 확인하였다. 따라서, 한정된 연성도의 확보로 소요내진성능을 만족할 것으로 기대되며 이러한 의미에서 한정연성도 내진설계 개념은 중약진 지역에 적합한 내진설계 개념으로 사료된다.

본 연구에서는 기둥의 거동특성에 의한 구조 전체의 내진성능에 초점을 두고 있어 기둥과 보의 조인트에서의 문제, 보의 항복 메커니즘 등을 고려하지 않았지만 건축물의 내진성능을 보다 상세하게 평가하기 위해서는 상기의 항목에 대해서도 충분한 검토가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다. 또한, 본 연구의 모델건축물을 설계해 주신 지진공학연구센터의 김 남희 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

1. NCEER (1996), *Seismic Performance of a Model Reinforced Concrete Bridge Pier Before and After Retrofit*, Technical Report NCEER-96-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
2. Lee, H.-S., Woo, S.-W., Heo, Y.-S. (1998), "Inelastic behaviors of a 3-story reinforced concrete frame with nonseismic details", *Proc. of KCI Conference-Spring 1998*, 10(1), 429-432.
3. Kim, I.H., Okamura, H., and Maekawa, K. (1998), "Method for checking seismic performance of concrete structures and its effectiveness", *Journal of Structural Engineering*, JSCE, Vol. 44A, 871-876, 1998.
4. Maekawa, K. and Okamura, H. (1983), "The Deformational Behavior and Constitutive Equation using Elasto-Plastic and Fracture Model", *Journal of the faculty of engineering, The University of Tokyo(B)*, Vol 37, No.2, pp. 253-328, Tokyo, Japan
5. Okamura, H., Maekawa, K., and Sivasubramanyyam, S. (1985), "Verification of Modeling for Reinforced Concrete Finite Element, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures", *ASCE*, pp. 528-543
6. ATC (1996), *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Vol.1, ATC-40 report, Applied Technology Council, Redwood City California.
7. 한국지진공학회(1997), 내진설계기준연구(II)
8. Priestly, M.J.N, Kowalsky, M.J, Ranzo, G., and Benzoni, (1996), "Preliminary development of direct displacement-based design of multi-degree of freedom systems", *Proceedings of 65th Annual SEAOC Convention*, 47-66, October 1-6, 1996, Maui, Hawaii.
9. Priestley, M.J.N, Verma, R, and Xiao, Y. (1994), Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering*, V.120, No.8, pp.2310-2329.

표 1. 지진계수(C_s)

지반종류	내진성능 목표				최대 지진 (설계지진 2400년)
	기능수행 (설계지진 100년)		붕괴방지 (설계지진 1000년)		
	II 등급	I 등급	II 등급	I 등급	
S _B	0.044	0.063	0.11	0.154	0.22
S _C	0.052	0.074	0.13	0.182	0.26
S _D	0.064	0.091	0.16	0.224	0.32
S _E	0.088	0.125	0.22	0.308	0.44

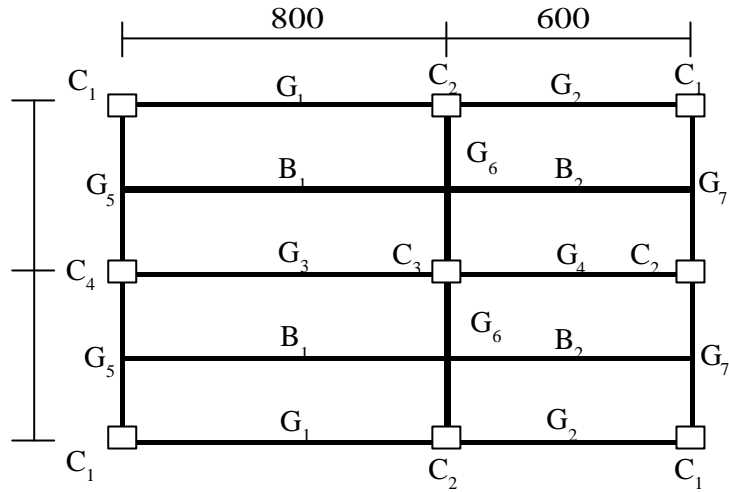


그림 1 모델 건축물의 평면도

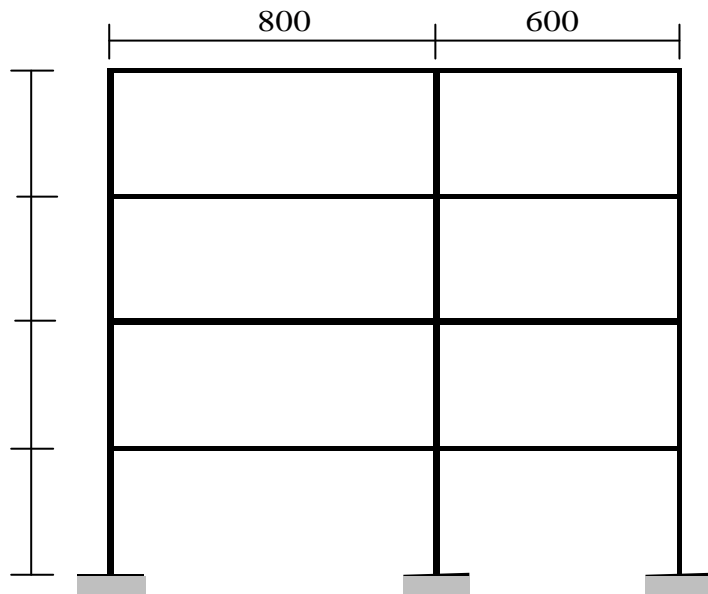


그림 2 모델 건축물의 입면도

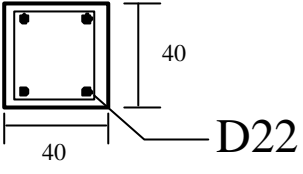
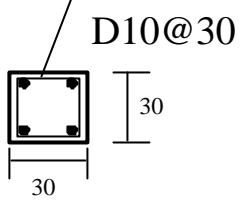
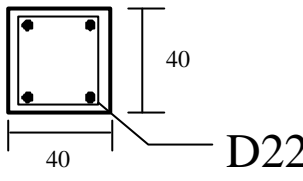
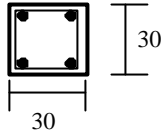
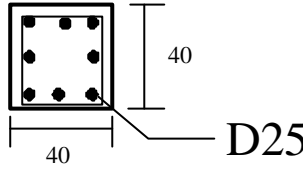
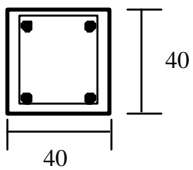
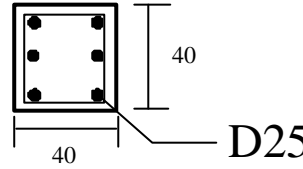
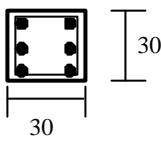
	1-2	3-4
C1	 <p>40 40 D22</p>	 <p>D10@30 30 30</p>
C2	 <p>40 40 D22</p>	 <p>30 30</p>
C3	 <p>40 40 D25</p>	 <p>40 40</p>
C4	 <p>40 40 D25</p>	 <p>30 30</p>

그림 3. 부재의 철근 배치도

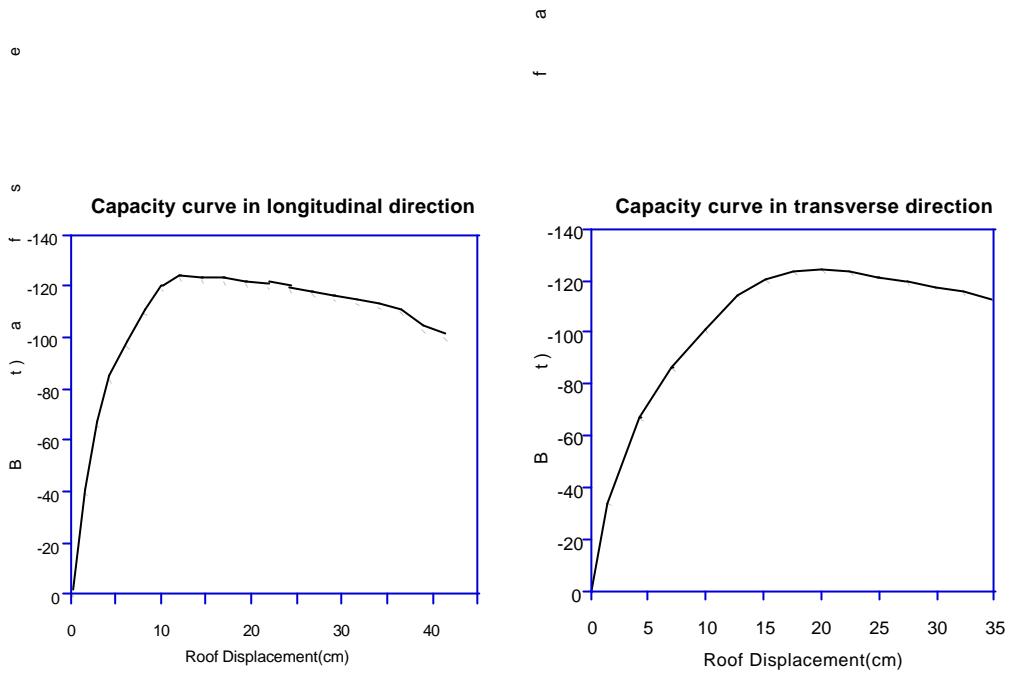


그림 4 역량곡선(Capacity Curve)

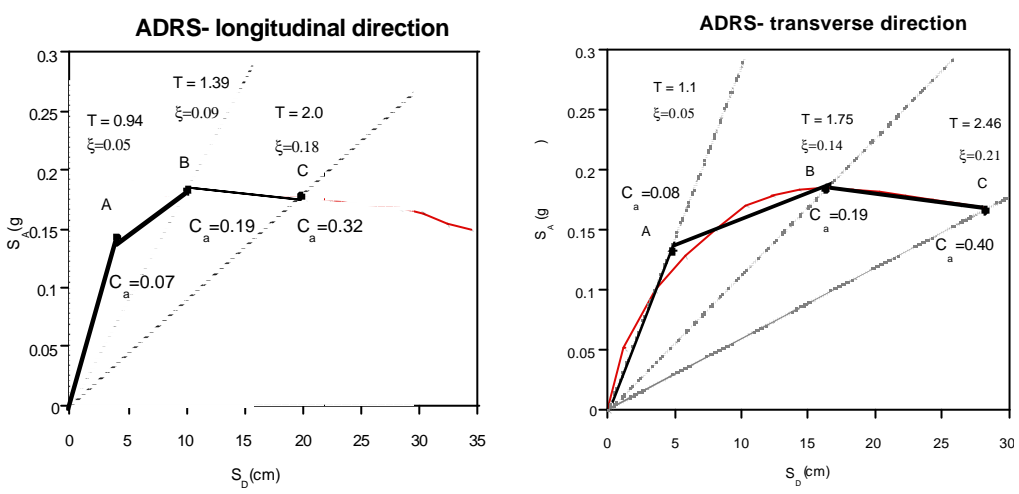


그림 5 ADRS 스펙트럼

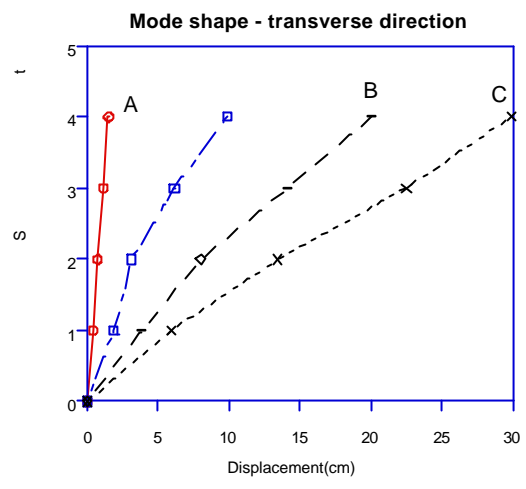
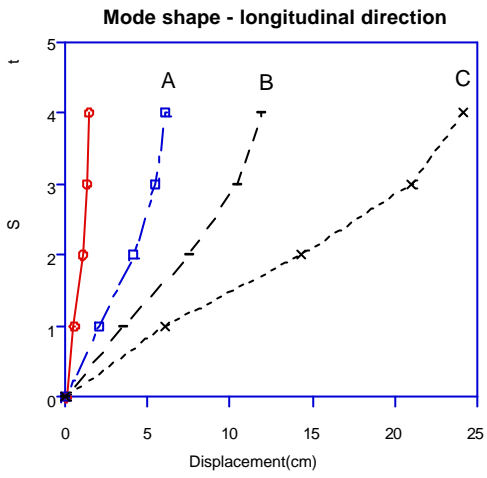


그림 6 중앙기둥의 변형형상

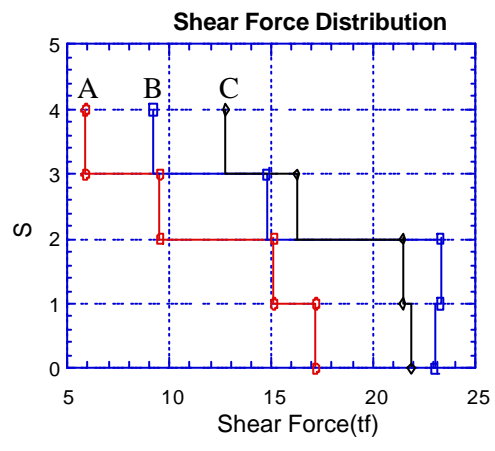


그림 7 중앙기둥의 전단력 도

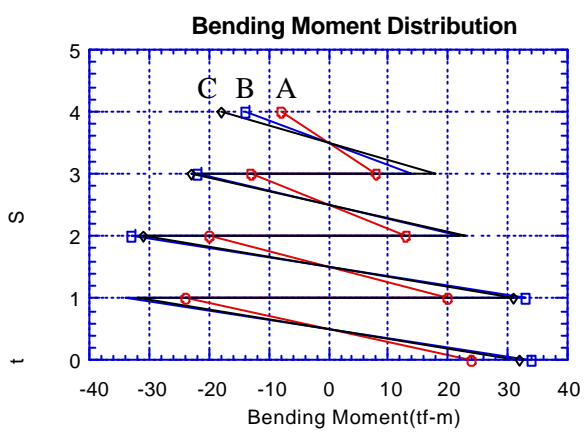


그림 8 중앙기둥의 모멘트 도

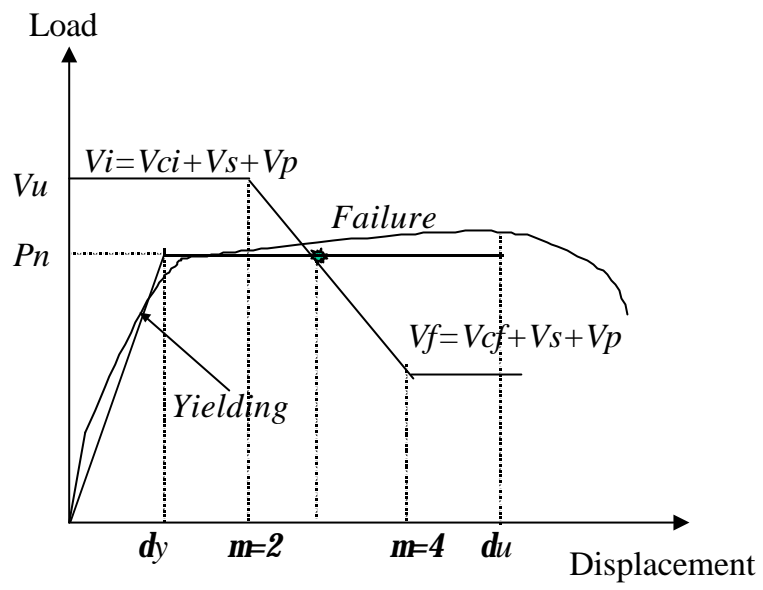


그림 9 한정연성도 설계 개념