

강도설계이론에 따른 모멘트 재분배에 관한 연구

A Study on the Moment Redistribution of the Strength Design

나 준 엽* · 이 정 재 (서울대)

Na, Joon Yeop · Lee, Jeong Jae

Abstract

The strength design actually carries an inconsistency where the structural analysis is being viewed in terms of elastic while the design is being drawn up in terms of plastic. In this study, in order to extend the applicability of the strength design, MRFEA(Moment Redistribution Finite Element Analysis) is developed. After carrying out the application example, it is found the use of materials was reduced compared to the elastic analysis.

I. 서 론

일반적으로 사용되는 철근콘크리트 구조물의 설계법은 크게 허용응력설계법과 강도설계법으로 대별할 수 있다. 허용응력설계법은 탄성이론을 기초로 하여 재료의 항복점에 대한 일정한 안전율을 가지는 허용응력을 기준으로 하며, 강도설계법은 하중증가계수와 저항감소계수를 고려하여 붕괴에 대한 안전성을 확보하는 하중설계와 재료가 항복점을 지난 이후의 소성변형을 감안하는 극한설계가 복합된 방법이다.

1982년 '콘크리트 표준시방서'가 강도설계법을 중심으로 개정된 것에서도 알 수 있듯이, 최근의 철근콘크리트 구조물에 대한 대부분의 설계는 강도설계법을 이용하고 있다. 그러나, 현재의 강도설계법은 '연속휨부재의 모멘트 재분배' 규정에 의해 수정되는 경우를 제외하고는 탄성이론에 의해 결정된 최대단면력을 부재설계시 이용하도록 규정하고 있다. 즉, 극한설계의 방법을 연속휨부재의 경우에만 한정함으로써, 구조해석은 탄성적으로 설계는 소성적으로 실시하는 현재의 방법은 설계과정이 일치하지 않는 모순점을 내포하고 있는 것이다.

부재는 하중을 받으면 탄성상태의 거동을 보이다가 탄성한계를 넘으면 소성변형을 일으키게 되며, 부재에 소성힌지가 발생함으로써 소성힌지에 작용하던 모멘트는 다른 부재로 재분배되게 된다. 이러한 소성힌지의 발생에 의한 모멘트의 재분배는 현행 '콘크리트 표준시방서'에서 근사해 규정과 연속휨부재에서의 모멘트 재분배 규정을 두어 그 영향을 고려하고 있을 만큼 이론적, 실험적으로 많이 연구되었으나, 현재까지의 연구는 주로 연속된 휨부재만을 대상으로 하였으며 전체 시스템 차원에서의 모멘트 재분배 양상에 대한 연구는 미진한 형편이다.

따라서, 본 연구에서는 강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조물의 합리적인 설계를 위하여 전체 시스템에서의 모멘트 재분배를 고려한 MRFEA(Moment Redistribution Finite Element Alalysis)를 개발하고, 그 적용성을 검토하여 강도설계법의 실제적인 적용방안을 제시하고자 한다.

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집(1998년 10월 24일)

II. 모멘트 재분배 모델의 개발

1. 소성해석의 기본이론

1) 소성힌지

휨모멘트를 받는 보의 어느 단면의 응력은 탄성한계 내에서 보이론에 따라 중립축으로부터의 거리에 비례하여 바깥단부가 항복점응력에 이르기까지는 선형분포를 보인다. 이 때 단면의 바깥단부응력이 항복점응력에 이르게 하는 모멘트를 항복모멘트(yield moment)라 하며, 모멘트를 항복모멘트 이상으로 증가시킬 경우 이미 항복상태에 들어가 있는 단면은 항복점응력 이상을 지지할 수 없기 때문에 보 단면의 소성역은 점차 중립축으로 접근하여 최종적으로는 전단면이 소성상태에 이르게 된다. 이 때에는 그 단면에서 더 이상의 모멘트를 지지할 능력이 없기 때문에 조금만 더 모멘트를 증가시켜도 회전변형을 일으키고 마는 소성힌지(plastic hinge)가 생기게 된다. 이러한 소성힌지가 발생할 경우, 소성힌지가 발생한 지점은 그 때까지 작용하던 모멘트를 더 이상 받을 수 없게 되고 이 모멘트는 항복하지 않은 부재의 다른 지점으로 재분배되게 되는 것이다.

2) 소성해석

소성이론에서는 역학적 성질을 이상화하여 완전탄소성(elasto-plastic)재료로 가정한다. 이러한 재료의 성질은 보의 경우 하중-처짐곡선 또는 모멘트-곡률의 관계에서도 같은 형태로 적용된다.

부재의 어느 단면의 응력상태가 항복점에 이르기 시작하면 Fig. 2.1과 같은 성질의 재료는 그 이상의 하중을 받을 수 없으므로 소성상태에 머무르게 되며 이를 소성화(plastification)라 한다. 외력을 증가시킬 경우, 그 단면의 전체가 점차 소성화하여 전단면이 소성상태에 들어갔을 때는 이론상 무한한 변형이 허용되는 지점으로 바뀌게 된다.

탄성설계에서는 부재에 생기는 최대응력이 그 부재의 항복응력을 고려한 허용응력의 범위 안에 있도록 설계하는 데 비하여, 소성설계는 부재의 인성을 고려한 소성힌지 개념을 도입하여 부재의 어느 한 부분의 응력이 항복점에 도달하였을 때 그 부분은 국부적으로 항복하여 하중을 더 증가시키는 경우 항복점응력이 거의 일정한 응력상태에 있으나, 부정정구조에서 항복점응력에 도달하지 않은 다른 부분은 응력의 재분배에 의하여

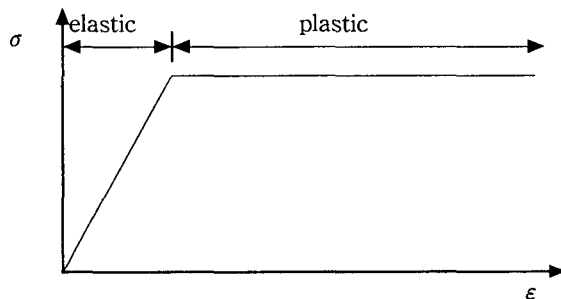


Fig. 2.1 Elasto-plastic relationship

하중을 지지할 여력을 가지고 있으므로 이러한 재료의 여력을 효율적으로 이용할 수 있다.

2. 뼈대구조 시스템의 모멘트 재분배

1) 콘크리트표준시방서의 근사해 규정

콘크리트표준시방서 2.2.2 절에 규정된 Table 2.1에 나타난 바와 같은 골조 구조해석의 근사

적인 해석방법은 오래전부터 사용해 오고 있는 방법으로서 프리스트레스트 콘크리트의 경우를 제외하고는 보편적인 시공법, 지간 및 충고를 갖는 골조구조의 근사해석에 사용할 수 있다. 근사해석에서 사용하는 하중 W_u 는 설계하중(=하중계수×사용하중)이며 활하중과 사하중의 비 L/D 가 3이내이고, 등분포하중을 받는 2경간 이상의 연속보, 라멘, 또는 1방향 슬래브의 인접 두 지간이 서로 20%이상 차이가 나지 않는 균일단면을 갖는 철근콘크리트 연속 휨부재에만 적용하도록 제한하고 있다.

Table 2.1 Moment and shear coefficients

Positive moment	
End spans	
If discontinuous end is unrestrained	$1/11 W_u l_n^2$
If discontinuous end is integral with the support	$1/14 W_u l_n^2$
Interior spans	$1/16 W_u l_n^2$
Negative moment at exterior face of first interior support	
Two spans	$1/9 W_u l_n^2$
More than two spans	$1/10 W_u l_n^2$
Negative moment at other faces of interior supports	$1/11 W_u l_n^2$
Negative moment at face of all supports for (1) slabs with spans not exceeding 10ft and (2) beams and girders where ratio of sum of column stiffness to beam stiffness exceeds 8 at each end of the span	$1/12 W_u l_n^2$
Negative moment at interior faces of exterior supports for members built integrally with their supports	
where the support is a spandrel beam or girder	$1/24 W_u l_n^2$
where the support is a column	$1/16 W_u l_n^2$
Shear in end members at first interior support	$1.15(W_u l_n/2)$
Shear at all other supports	$W_u l_n/2$

W_u = total factored load per unit length of beam or per unit area of slab

l_n = clear span for positive moment and shear and the average of the two adjacent clear spans for negative moment

2) 소성힌지의 묘사

구조물은 재료의 성질에 따라 최대응력 발생 후 거동특성이 달라지게 된다. 완전탄소성 재료의 경우 어떤 요소에서 최대응력 상태에 도달하기 전에는 선형탄성으로 가정하고 최대저항력이 되는 점을 초과한 후에는 일정한 저항력을 유지하면서 소성변형을 하는 것으로 가정한다. 구조부재가 최대점을 넘게 되면 부재의 강성이 0이 되어 휨거동을 하는 경우에는 소성힌지가 생기게 된다. 하중이 증가하여 소성힌지의 수가 증가하게 되면 구조물은 붕괴하게 된다. 소성힌지가 생길 때마다 구조물의 강성은 점차로 감소하게 되며, $i-1$ 번째 부재가 소성힌지가 된 후 구조물의 강성은 i 번째 절점이 소성힌지가 되기 전까지는 그 크기가 일정하게 유지되는 것으로 가정한다. 구조부재가 소성힌지 요소로 대체된 구조물은 외력에 의한 하중효과와 이미 소성힌지가 된 절점의 잔류응력을 중첩하여 순차적으로 해석하게 된다.

3) Hognestad 식

본 연구에서는 소성힌지와 조합하여, 응력-변형도 곡선을 표현할 수 있는 모델로써 장기변형까지 고려하여 모델링된 Hognestad의 제안식을 사용하였다.

$$\sigma_c = 0.85 f_0 \left[2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

여기서, f_0 : 콘크리트의 압축강도

ϵ_0 : 콘크리트의 변형도

3. 모멘트 재분배 해석 모델의 개발

뼈대구조물의 재분배된 모멘트를 구하기 위한 유한요소 해석모델 MRFEA(Moment Redistribution Finite Element Analysis)를 개발하였다. 유한요소해석을 거치면서 발생한 부재의 모멘트를 재료의 항복모멘트와 비교하여 소성힌지를 삽입하여 재분배된 모멘트를 구할 수 있도록 하였다. 프로그램의 순서도는 Fig.2.2와 같다.

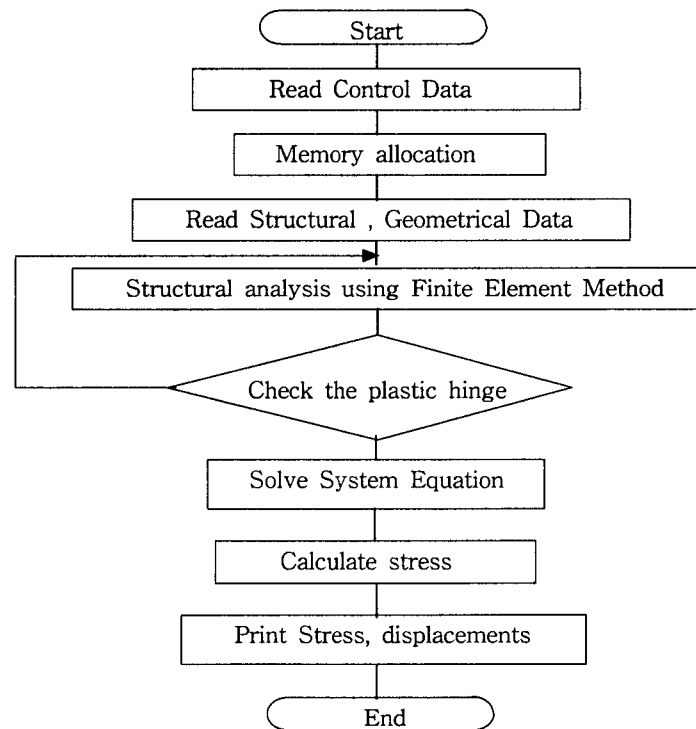


Fig. 2.2 The Flowchart of MRFEA

III. 적용 예

1. 해석 예

여기서 고려된 단순철근콘크리트 뼈대구조물은 Fig. 3.1과 같고, 이 때 설계에 사용된 상수들은 Table 3.1과 같다.

MRFEA를 사용하여 해석한 결과를 시방서 규정 및 탄성해석의 결과와 비교하여 Fig. 3.2 및 Table 3.2에 나타내었다.

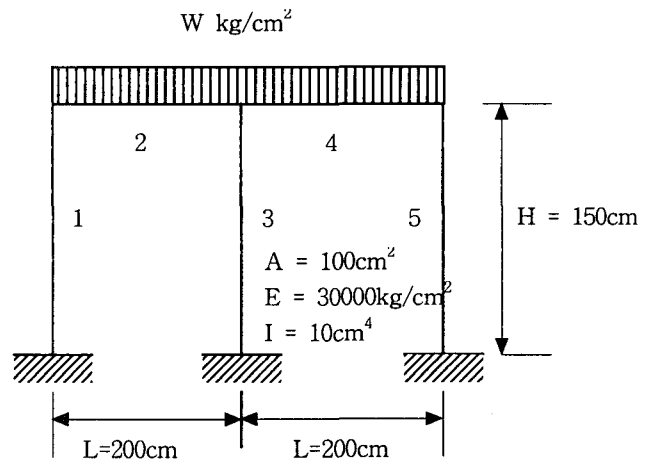


Fig. 3.1 Frame example

Table 3.1. Material properties and given values

Material properties		
σ_{ck}	σ_y	W_c
280kg/cm ²	4200kg/cm ²	2.5t/m ³

Table 3.2 Comparison of moment between each analysis methods

Analysis Element	Code	Elastic Analysis (A)	MRFEA (B)	B/A
1	-	79,910	70,260	0.879
2	119,857	169,800	127,452	0.751
3	-	28,520	31,249	1.096
4	119,857	169,800	127,452	0.751
5	-	79,910	70,260	0.879

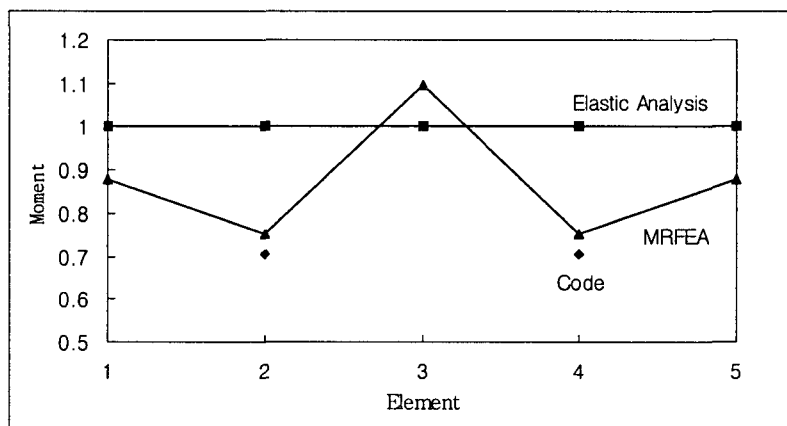


Fig. 3.2 Comparison of moment between each analysis methods

2. 결과의 고찰

MRFEA에 의한 뼈대구조물의 해석 결과는 시방서 규정보다는 약간 큰 값을 보이거나 탄성해석의 결과와 비교하여 보에서는 25%, 기둥에서는 12%정도의 모멘트 감소현상을 보였다. 이로부터 판단할 때, 기존의 탄성해석에 의한 설계보다도 부재의 절감효과를 가져올 수 있으며 또한 시방서 규정을 만족하므로 안정성에도 문제가 없다고 판단할 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 철근콘크리트 구조물의 해석 및 설계에 있어 골조의 비틀림을 고려하는 등의 복잡한 해석방법을 사용하지 않고서도 시방서의 근사해 규정을 확대하여 설계에 이용할 수 있도록 하기 위하여 MRFEA를 개발하였으며, 이를 1층 1경간 철근콘크리트 뼈대구조물에 적용해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연속된 휨부재에만 한정되어 있던 시방서의 근사해 규정을 프레임 구조로 확대하였으며, 이는 시방서 규정을 만족하는 것으로 나타났다.
2. MRFEA에 의한 해석 결과 기존의 탄성해석의 경우와 비교하여 모멘트 감소에 따른 부재의 절감효과를 얻을 수 있었으며 구조적으로도 안정하였다.

향후 모멘트 재분배 현상을 2차해석 및 처짐규정 등을 이용하여 해석, 소성해석에 의한 결과와 비교하여 보다 정확한 재분배 모멘트를 도출할 수 있는 방법을 개발하고, 이 결과를 철근콘크리트 구조물의 최적설계 시스템에 접목할 수 있는 연구 등이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Cohn, M.Z., "Rotational Compatibility in the Limit Design of Reinforced Concrete Continuous Beams", Flexural Mechanics of Reinforced Concrete(SP-12), American Concrete Institute, ASCE, 1965, pp.359-382.
2. Mattock, A.H., "Redistribution of Design Bending Moments in Reinforced Concrete Continuous Beams", Proceedings, Institute of Civil Engineers(London), Vol.13, 1959, pp.880-888.
3. Portland Cement Association, Notes on ACI 318-95 Building Code Requirements for Structural Concrete with Design Applications, 1996
4. Sergio M.R.Lopes, J.Harrop, and A.E.Gamble, "Study of Moment Redistribution in Prestressed Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, Vol.123, No.5, May, 1997, pp.561-566
5. 대한토목학회, 콘크리트표준시방서, 1996