

소성거동을 고려한 RC 구조물의 간략화 해석모델에 관한 연구

Development of the Simplified Analysis Model for RC Structures Considering Plastic Behavior

정연주* 유영찬**
Jeong, Youn-Ju You, Young-Chan

요 지

RC 구조물은 서로 다른 재료적 특성을 지닌 콘크리트와 철근의 복합구조이고, 특히 콘크리트는 복잡한 소성거동을 나타내는 재료이다. 따라서 RC 구조물의 소성해석을 위해서는 콘크리트와 철근 각각의 재료특성과 소성거동을 묘사할 수 있는 세밀한 모델링 기법이 필요하지만, 이때 발생하는 모델링의 어려움, 모델링 규모, 계산용량 및 수렴성 등의 문제점으로 인하여 소성해석 수행에 많은 시간과 노력이 소요되거나 해석자체가 불가능하게 된다. 따라서 본 논문에서는 간편한 RC 구조물의 소성해석을 위해 RC 부재와 동일한 소성거동을 나타내는 균질·등방 재료로의 물성치환 방법을 제시하였다. 물성치환 원리는 RC 부재의 소성거동 특성, 즉 항복모멘트, 항복곡률 및 극한모멘트, 극한곡률로 표현되는 bi-linear 형태의 모멘트-곡률 관계를 이용하여, 이와 동일한 모멘트-곡률 관계(bi-linear 형태의 응력-변형률 관계)를 갖는 균질·등방 재료를 생성하였다. 또한 실제 RC 부재 해석모델과 치환된 균질·등방 재료를 이용한 해석모델에 대한 소성해석 결과를 비교·분석하여 본 연구의 타당성을 검증하였다.

핵심어 : 소성해석, 모멘트-곡률, 물성치환, 응력-변형률 관계

Abstract

RC structure is the composite material system combined concrete and steel showing different plastic behavior. Especially, concrete shows very complex plastic behavior. Therefore, for plastic analysis of RC structures, we have to model carefully each plastic behavior of concrete and steel member. But, because of divergency as well as difficulties and dimensions of modelling, it takes a lot of time and labor or sometimes it is impossible to perform plastic analysis of RC structures. In this study, for simplified plastic analysis of RC structures, we propose material transformation method by homogeneous and isotropic material which have the same plastic property as RC. We generate homogeneous and isotropic material showing the same moment-curvature curves (bi-linear stress-strain relation) as RC members, using bi-linear moment-curvature relation by yielding moment, yielding curvature and ultimate moment, ultimate curvature of RC member. Finally, we prove compatibility in the study by comparing plastic analysis results for various analysis models using transformed material models and RC model.

Keywords : plastic analysis, moment-curvature, material transformation, stress-strain relation

* 정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 구조시스템그룹, 연구원
** 한국건설기술연구원 건축연구부 건축구조재료그룹, 선임연구원

· 이 논문에 대한 토론을 2000년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

RC 구조물은 철근과 콘크리트의 장점을 결합한 복합구조물로 많은 장점을 갖고 있지만, 콘크리트와 철근의 물성이 서로 다르고 특히, 콘크리트의 복잡한 소성특성으로 인하여 해석상의 어려움이 뒤따른다. 따라서 RC 구조물의 소성해석시에는 콘크리트와 철근의 각기 다른 소성거동을 고려해야 하며, 이에 대한 세밀한 모델링 기법이 필요하다. 대규모 RC 구조물의 소성해석을 위해서는 전체 구조물내의 콘크리트와 철근 부위를 각각 유한개의 2D-plate(또는 3D-solid) 요소와 truss(또는 beam) 요소로 모델링 해야 하므로, 자유도가 급격히 증가되어 해석 수행에 많은 시간이 소요되거나 심지어 해석이 불가능한 경우가 발생하기도 한다. 또한 RC 구조물의 소성해석은 수렴성에 많은 문제점을 나타내기도 한다. 이러한 해석상의 문제점은 유한요소법에 근간한 해석방법을 이용하는 모든 해석프로그램에서 동일하게 발생하는 문제점으로, 실제 RC 구조물의 소성해석에 이러한 해석방법의 적용은 모델링의 어려움, 모델링 규모, 계산용량, 해석수행 시간 및 수렴성 등의 문제점으로 인하여 실질적으로 사용이 불가능하거나 비효율적이다.

RC 구조물의 소성해석시 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 간편한 beam 요소를 사용하는 것이 대안이 될 수 있지만, beam 요소는 RC 부재를 구성하는 콘크리트와 철근의 소성거동을 동시에 고려할 수 없기 때문에 적용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법에 근간한 범용 해석프로그램에서 RC 부재의 물성을 RC 부재의 소성거동과 동일한

소성거동 특성을 나타내는 균질·등방 재료로 치환하는 방법을 제시하므로써 간편한 RC 구조물의 소성해석 방법을 개발하고자 한다. 물성 치환 원리는 특정 단면의 소성거동 특성(항복모멘트, 항복곡률 및 극한모멘트, 극한곡률)을 나타내는 모멘트-곡률 관계(M- ϕ 곡선)를 이용하였다. 즉, RC 부재와 균질·등방 재료로 구성된 부재의 모멘트-곡률 관계가 서로 일치하도록, 균질·등방 재료의 탄성계수, 항복응력, 극한응력 및 극한 변형을 등을 결정하여, 최종적으로 균질·등방 재료의 물성을 bi-linear 형태의 응력-변형률 관계로 나타내었다.

본 연구에서 제시한 물성 치환방법의 타당성은 콘크리트·철근 각각의 소성거동을 고려한 ① 2D-plane stress 모델(plate, beam 요소)과 치환된 균질·등방 물성을 이용한 ② 2D-plane stress 모델(plate 요소), ③ iso-beam 모델(beam 요소)에 의한 소성해석 결과를 비교·분석하여 검증하였다.

2. RC 부재의 소성거동

2.1 콘크리트

콘크리트는 비등방성 재료로 인장응력과 압축응력 하에서의 거동이 다르다. 즉, 콘크리트는 압축응력에는 강하고 인장응력에는 약한 재료적 특성을 나타낸다. 따라서 압축응력이 콘크리트의 압축강도 f_{ck} 에 도달하게 되면 콘크리트 파쇄현상(crushing)이, 인장응력이 콘크리트의 인장강도 f_t 에 도달하게 되면 콘크리트 균열현상(cracking)이 발생하고, 이로부터 콘

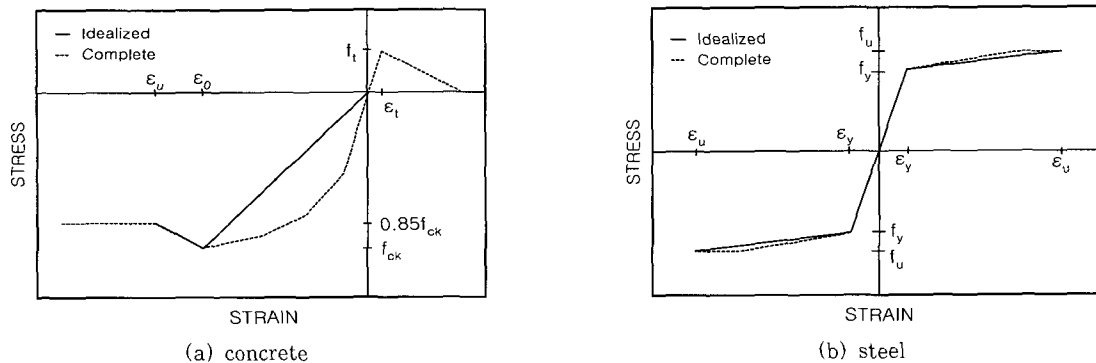


Fig. 1 Stress-strain relations for concrete and steel

크리트는 소성거동을 나타내기 시작한다. 이때, 콘크리트 압축부의 파쇄현상(crushing)에 따라서는 변형을 경화(hardening)의 소성현상이 나타나며, 인장부의 균열현상(cracking)에 따라서는 tension cut-off, tension softening 및 shear retention 등의 복잡한 소성거동이 발생하게 된다.^{1),2),6)} 그러나 이러한 인장부 소성거동의 영향은 압축부에 비해 미미하므로 일반적으로 고려하지 않는다. 본 연구의 물성 치환에 적용한 콘크리트의 응력-변형을 관계는 Fig. 1(a)와 같이 콘크리트 압축부의 변형을 경화현상은 bi-linear 형태로 이상화하고, 인장력은 받을 수 없는 것으로 가정하였다.

2.2 철근

철근은 콘크리트와는 달리 등방성 재료로 인장응력과 압축응력하에서의 거동이 동일하다. 따라서 압축, 인장부에서 항복응력에 도달하게 되면 변형을 경화의 소성현상이 발생한다.^{1),2),6)} 본 연구의 물성 치환에 적용한 철근의 응력-변형을 관계는 철근의 변형을 경화현상을 Fig. 1(b)와 같이 bi-linear 형태로 이상화시킨 모델을 적용하였다.

3. 모멘트-곡률 관계에 의한 물성 치환

3.1 RC 부재의 모멘트-곡률 관계

RC 부재의 모멘트(M)와 곡률(ϕ)의 관계는 Fig. 2에 나타난 것처럼 중립축(kd), 압축응력에 대한 콘크리트 변형률(ϵ_c) 및 인장응력에 대한 철근 변형률(ϵ_s)을 이용하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.³⁾

이때 곡률은 균열이 발생한 콘크리트에 발생하는 변형을, 콘크리트가 부담할 수 있는 인장응력 및 중립축의 위치 등에 따라 부재 길이방향으로 달라질 수 있다.

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

또한, RC 부재의 모멘트-곡률 관계는 RC 부재의 파괴형태(압축파괴, 인장파괴)에 따라 틀려진다. 이것은 모멘트가 증가할수록 콘크리트의 균열이 단면 강성을 저하시키는 정도에 기인하며, 이 영향은 압축파괴보다 인장파괴의 경우에 더 크게 나타난다. 인장파괴의 경우 모멘트-곡률 관계는 Fig. 3(a)와 같이 항복점(철근의 항복점)까지 선형 관계를 나타내지만, 압

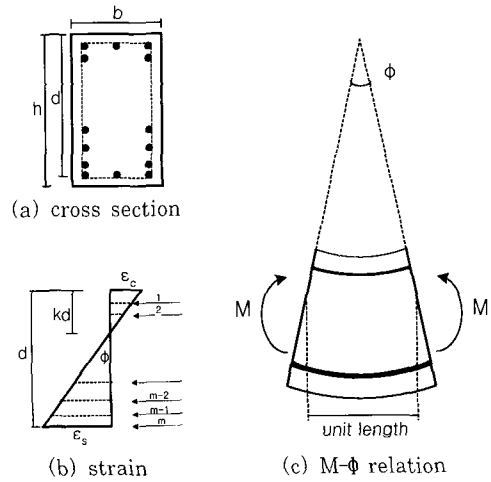


Fig. 2 Cross section and M- ϕ relation

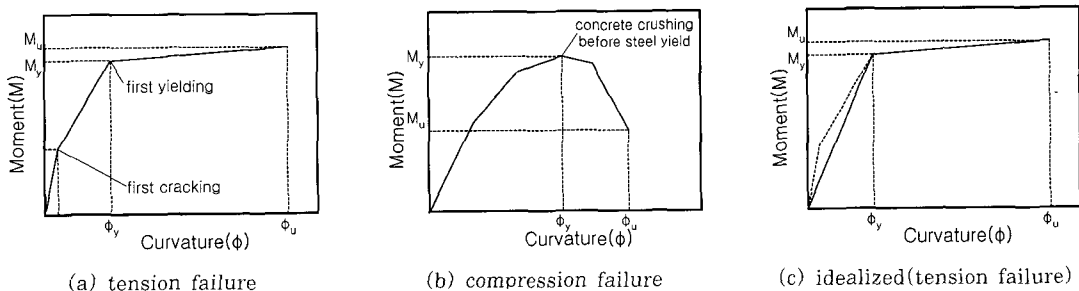


Fig. 3 Moment-curvature curve

축과피의 경우 Fig. 3(b)와 같이 항복점(콘크리트의 응력-변형률 관계가 소성영역으로 바뀌는 시점)까지 비선형 관계를 나타낸다.

그러나 대부분의 RC 부재는 인장철근이 항복하는 인장과피를 나타내므로, 모멘트-곡률 관계는 콘크리트에 균열이 발생하는 시점, 인장철근이 항복하는 시점 및 콘크리트의 극한 변형률에 따른 tri-linear 형태를 나타내고(Fig. 3(a)), 이것은 다시 Fig. 3(c)와 같이 bi-linear 형태로 이상화할 수 있다.³⁾

3.2 RC 부재의 모멘트-곡률 결정

항복모멘트, 항복곡률 및 극한모멘트, 극한곡률 등 RC 부재의 모멘트-곡률 관계는 변형 전에 평면인 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다는 전제조건하에, 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계, 변형률 적합조건 및 힘의 평형조건을 고려한 단면해석을 통해 구할 수 있다.

3.2.1 항복모멘트 및 항복곡률

RC 부재의 모멘트-곡률 관계는 항복점까지 선형관계를 유지한다. 즉, RC 부재에 작용하는 압축력과 인장력은 중립축을 중심으로 평형상태를 유지하고, 각 철근의 변형률은 중립축을 중심으로 선형관계를 유지한다. 따라서 Fig. 2(a), (b)에 나타난 RC 부재를 구성하는 각 철근의 변형률 ϵ_{si} 는 압축응력하에서 콘크리트의 극한 변형률 ϵ_{cu} 과 중립축 kd로 부터 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{si} = \epsilon_{cu} \frac{kd - d_i}{kd} \quad (2)$$

여기서 i는 중립축으로부터 동일거리에 위치한 m개의 철근을 나타내고 d_i 는 각 철근에 대한 거리를 나타낸다. 이때 각 철근에 대한 변형률 $\epsilon_{s1}, \epsilon_{s2}, \epsilon_{s3}, \dots, \epsilon_{sm}$ 으로 부터 철근의 응력-변형률 관계를 이용하여 응력 $f_{s1}, f_{s2}, f_{s3}, \dots, f_{sm}$ 를 구할 수 있고, 여기에 각 철근의 단면적(A_{si})을 곱하여 식(3)과 같이 각 철근에 작용하는 힘(T_i)을 구할 수 있다.

$$T_i = f_{si}A_{si} \quad (3)$$

콘크리트에 작용하는 압축응력 분포는 실제 포물선

형태이지만 등가응력블럭으로 치환하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있고, 여기서 f_{ck} 는 콘크리트 압축강도를, b는 단면 폭을, β 는 콘크리트 강도의 함수로 표현되는 변수로 콘크리트에 작용하는 압축응력을 등가응력블럭으로 치환하면서 나타나는 콘크리트 압축력 작용 길이(a)에 대한 계수($\beta kd=a$)를 나타낸다.

$$C = 0.85f_{ck}b(\beta kd) \quad (4)$$

여기서 힘의 평형조건으로부터 중립축을 찾을 수 있고, RC 부재의 항복모멘트 및 항복곡률은 힘 평형조건이 만족된 단면에서 개개 철근과 콘크리트의 단면력에 응력 중심거리를 곱함으로써 각각 식(5) 및 식(6)과 같이 구할 수 있다.³⁾

$$M_y = 0.85f_{ck}ba\left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}\right) + \sum_{i=1}^m T_i\left(\frac{h}{2} - d_i\right) \quad (5)$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{d(1-k)} = \frac{M}{EI} \quad (6)$$

3.2.2 극한모멘트 및 극한곡률

내부 힘 평형조건을 만족시키는 중립축의 위치는 항복을 지나 소성영역으로 들어가게 되면 정식화된 수식에 의한 계산이 거의 불가능해지므로 수치해석에 의한 반복계산을 실시하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig 4.에 나타난 바와 같이 반복계산의 횟수를 최소화할 수 있는 방법을 채택하였다.⁷⁾

step 1) 힘 평형조건이 만족된 이전의 변형률 분포 $\Phi_y - 1d_i$ 로부터 두개의 새로운 변형률 분포 $\Phi_d^{(i)}$ 와, $\Phi_d^{(iii)}$ 를 가정한다(Fig 4.(a)에서 점선). 곡률이 증가되면 $\Phi_d^{(i)}$ 는 인장철근에 더 많은 인장력을 가정하게 되어 내부합력은 (+)가 되며 같은 논리로 $\Phi_d^{(iii)}$ 의 경우의 내부합력은 (-)가 된다.

step 2) $\Phi_d^{(i)}$ 이나 $\Phi_d^{(iii)}$ 중 어느 것도 힘 평형조건을 만족하지 않으므로 $\Phi_d^{(i)}$ 와 $\Phi_d^{(iii)}$ 의 평균값을 취하여 새로운 변형률 분포인 $\Phi_d^{(iii)}$ 를 가정한다(Fig 4.(b)에서 직선). 새로 가정된 $\Phi_d^{(iii)}$ 는 이전에 가정된 $\Phi_d^{(i)}$ 와 $\Phi_d^{(iii)}$ 에 비해 힘 평형방정식에 근접된 값을 갖게 된다.

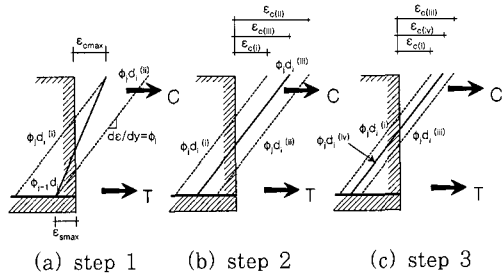


Fig. 4 Neutral axis in plastic range

step 3) $\phi_{d_i}^{(iii)}$ 가 힘 평형조건을 만족하지 않을 경우, $\phi_{d_i}^{(iii)}$ 의 내부합력의 부호에 따라 $\phi_{d_i}^{(i)}$ 또는 $\phi_{d_i}^{(ii)}$ 와의 평균값을 취하여 새로운 $\phi_{d_i}^{(iv)}$ 를 가정함으로써 힘 평형조건에 근접한 변형률 분포를 얻을 수 있다 (Fig. 4(c)에서 직선).

step 4) 힘 평형조건이 만족될 때까지 step 2) ~ step 3)을 수행한다.

위의 과정에 의해 중립축 위치가 결정되면 3.2.1절 항복모멘트와 항복곡률 계산과정과 동일한 방법으로 극한모멘트 M_u 와 극한곡률 ϕ_u 를 계산한다.

3.3 균질·등방 재료의 물성 결정

균질·등방 재료의 성질은 항복응력점(항복응력, 항복변형률)과 극한응력점(극한응력, 극한변형률)으로 구성되는 bi-linear 형태의 응력-변형률 관계를 이용하여 나타낼 수 있다. 이때 균질·등방 부재의 단면중심은 항상 부재 중앙에 있으며 휨 모멘트를 받을 경우 이를 중심으로 선형적인 변형률 및 응력분포를 나타낸다. 이때, 균질·등방 부재의 본질적인 거동은 RC 부재와 유사하지만 항복모멘트 및 극한모멘트 점은 크게 다르게 된다. 따라서 RC 부재와 동일한 단면을 갖는 균질·등방 재료가 RC 부재와 동일한 소성거동 특성을 나타내기 위해서는, RC 부재 단면과 동일한 모멘트-곡률 관계를 나타내도록(Fig. 5, Fig. 6) 재료 특성을 보정해 주어야 한다.

먼저 Fig. 7과 같은 항복조건하에서 RC 부재의 항복모멘트와 항복곡률 조건을 만족하도록 식(7), 식(8)과 같이 균질·등방 재료의 항복응력 및 항복변형률을 구한다. 다음 Fig. 8과 같은 극한조건하에서 RC 부재의 극한모멘트와 극한곡률 조건을 만족하도록 식(9), 식(10)와 같이 균질·등방 재료의 극한응력

및 극한변형률 값을 구한다.⁷⁾ 이때, 식(9)에서 K_1 은 f_y 에 대한 f_u 의 크기에 따라 틀려지며 $f_u < f_y, f_u = f_y$ 그리고 $f_u > f_y$ 의 경우에 각각 1, 2, 3의 값이 된다.

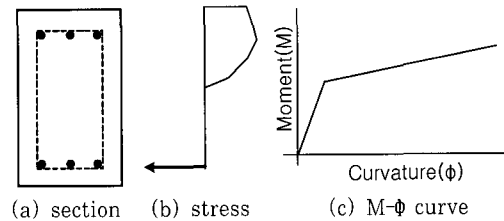


Fig. 5 M- ϕ curve of RC member

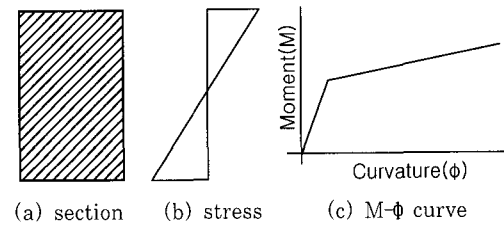


Fig. 6 M- ϕ curve of isotropic member

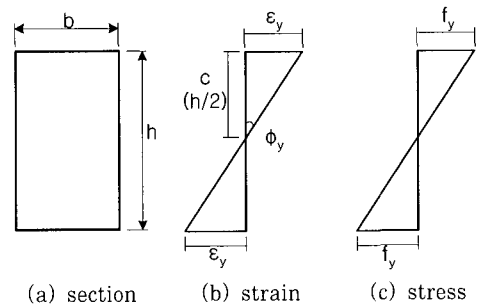


Fig. 7 Yielding condition of isotropic member

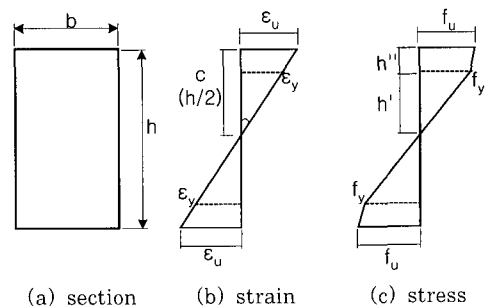


Fig. 8 Ultimate condition of isotropic member

$$f_y = \frac{3M_y}{2bc^2} \quad (7)$$

$$\epsilon_y = \phi_y \cdot \frac{h}{2} \quad (8)$$

$$f_u = \frac{\left(\frac{M_u}{2b} - \frac{1}{3}h'^2 - \frac{1}{2}h'h'' - \frac{K_1}{8}h''^2 \right)}{\left(\frac{1}{2}h'h'' + \frac{K_1}{8}h''^2 \right)} f_y \quad (9)$$

$$\epsilon_u = \phi_u \cdot \frac{h}{2} \quad (10)$$

4. 수치해석

본 연구에서 제시한 해석모델 간략화 방법의 타당성을 검증하기 위해 3가지 대상구조물(단순보 : RC1, RC3, 내민보 : RC2)에 대한 구조해석을 실시하였다. 이때, 대상구조물 선정은 휨 거동이 지배하는 경우

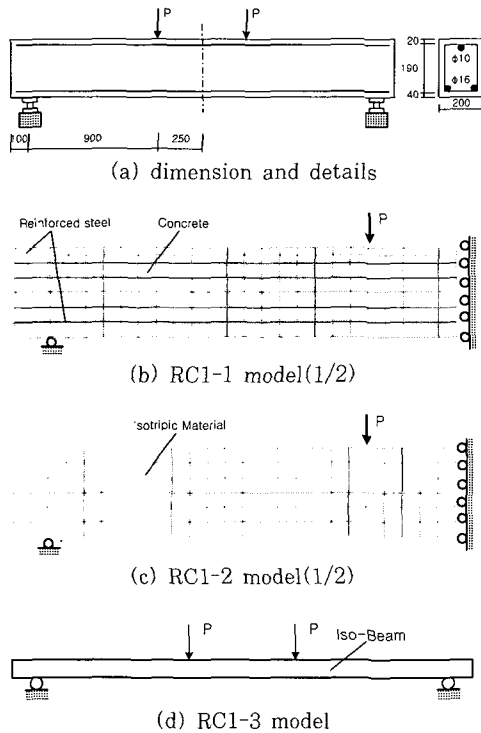


Fig. 9 Details and modeling of RC1

(RC1, RC3)와 휨과 전단이 함께 지배하는 경우 (RC2)를 고려하여 설정하였다. 각 대상구조물에 대한 해석모델은 콘크리트와 철근의 소성거동을 각각 고려하는 2D-plane stress 모델, 치환된 균질·등방 물성을 갖는 2D-plane stress 모델 및 치환된 균질·등방 물성을 갖는 iso-beam 모델 세 가지를 대상으로 하였으며, 각각의 해석결과와 참고문헌에 나타난 실험결과를 비교·분석하였다.

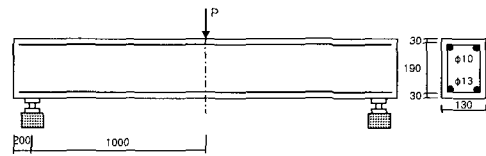


Fig. 10 Details of RC3

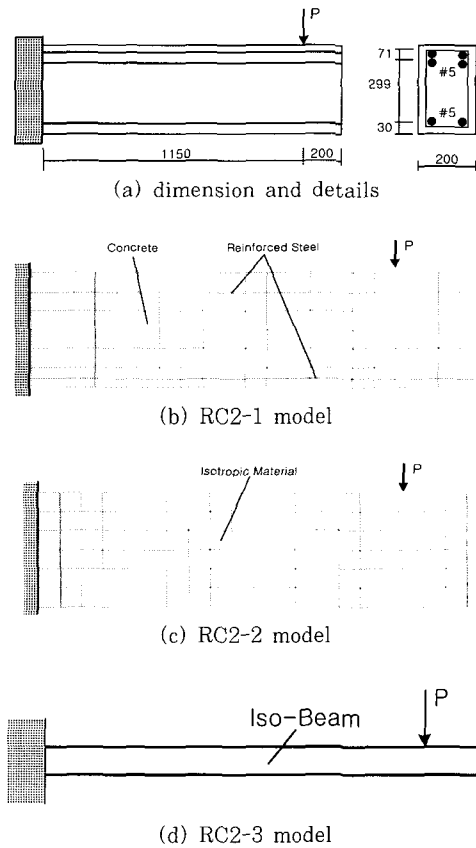


Fig. 11 Details and modeling of RC2

4.1 해석모델

대상구조물은 Fig. 9, Fig. 10의 단순보(RC1, RC3)와 Fig 11.의 내린보(RC2)이며, 각각 다음과 같은 3가지 해석모델(Fig. 9, Fig 11. 참조)에 대한 소성 해석을 실시하였다.

- ① RC1-1, RC2-1, RC3-1 : 실제 콘크리트와 철근의 소성거동을 반영하는 plane stress 모델(2D)
- ② RC1-2, RC2-2, RC3-2 : 치환된 균질·등방 물성을 갖는 plane stress 모델(2D)
- ③ RC1-3, RC2-3, RC3-3 : 치환된 균질·등방 물성을 갖는 iso-beam 모델(2D)

이때 대상구조물 RC1과 RC3에 대한 해석모델인 RC1-1, RC1-2와 RC3-1, RC3-2는 해석상의 편의를 위해 전체 구조물의 1/2에 대해서만 모델링하였다. 이외에 RC1-1, RC2-1, RC3-1 해석모델의 콘크리트와 RC1-2, RC2-2, RC3-2 해석모델의 균질·등방 재료는 8절점을 갖는 사각형 plane stress 요소를 사용하였으며, RC1-1, RC2-1, RC3-1 해석모델의 철근과 RC1-3, RC2-3, RC3-3의 iso-beam 해석모델은 각각 3절점, 2절점을 갖는 beam 요소를 이용하였다.

4.2 기본물성 및 물성 치환

대상구조물 RC1, RC2, RC3의 콘크리트, 철근 및 치환된 균질·등방 재료에 대한 기본물성은 각각 Table 1, Table 2와 같다. 이때 각 대상구조물을 구성하는 콘크리트와 철근의 물성은 참고문헌(4), (5), (8)을 참조하였으며, 불명확한 사항에 대해서는 기존에 알려

진 이상화 모델을 바탕으로 결정하였다.

RC1-1, RC2-1, RC3-1 해석모델에서 이용한 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계는 Fig 12.(a), (b)와 같으며, RC1-2, RC1-3, RC2-2, RC2-3 및 RC3-2, RC3-3 해석모델에서 이용한 RC 구조물과 동일한 소성거동을 나타내도록 치환된 균질·등방 재료의 응력-변형률 관계는 Fig. 12(c)와 같다.

이때 물성 치환에는 bi-linear 형태로 이상화한 콘크리트와 철근의 응력-변형률 관계(Fig. 1 참조)를 이용하여 Fig. 13과 같이 나타나는 RC부재의 모멘트-곡률 관계를 구하였으며, 이로부터 Fig. 12(c)과 같이 bi-linear 형태의 응력-변형률 관계를 갖는 균질·등방의 물성을 생성하였다.

Table 1 Properties of RC material(kg, cm)

Material	RC1	RC2	RC3	
Conc	f_{ck}	365	614	211
	f_t	36.5	61.4	21.1
	E_c	284,900	371,685	217,888
Steel	f_y	4,800	4,200	4,650
	f_u	6,227	5,460	6,700
	E	2,100,000	2,100,000	2,040,000

Table 2 Properties of isotropic material(kg, cm)

	RC1	RC2	RC3
M_y	363,495	1,016,390	231,247
Φ_y	1.57×10^{-4}	0.83×10^{-4}	1.48×10^{-4}
M_u	399,879	1,182,020	265,807
Φ_u	7.93×10^{-4}	6.93×10^{-4}	6.45×10^{-4}
f_y	174.5	190.6	170.8
f_u	151.4	175.8	188.1
E	89,192	114,100	92,595

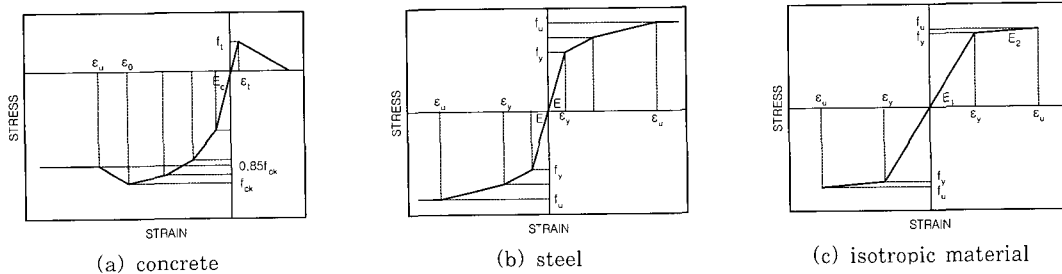


Fig. 12 Stress-strain relation of each material

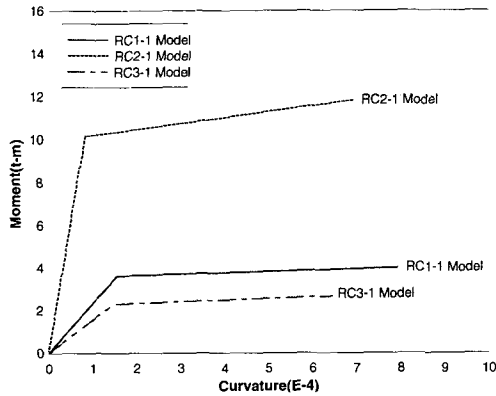


Fig. 13 M-φ curve

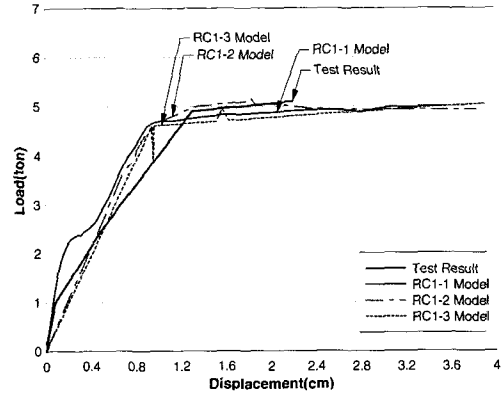


Fig. 14 RC1 analysis results

4.3 소성해석 및 결과분석

4.2절에 나타난 물성을 바탕으로 대상구조물 RC1, RC2, RC3의 각 해석모델에 대한 소성해석을 실시하였다. 구조해석은 범용 구조해석 프로그램인 DIANA를 이용하였으며, 각 모델에 대한 소성해석 결과를 바탕으로 RC1, RC3은 중앙경간에서의 처짐, RC2는 하중재하점에서의 처짐 결과를 이용한 하중-처짐 관계로부터 각 대상구조물에 대한 세 가지 해석모델의 항복하중, 극한하중 등의 소성거동을 비교·분석하였다. 대상구조물 RC1, RC2, RC3에 대해 각각 세 가지 해석모델에 대한 소성해석 결과와 참고문헌(4,5,8)에

나타난 실험결과는 각각 Table 3 및 Fig. 14~Fig. 16과 같다.

해석결과를 비교·분석한 결과 항복하중, 극한하중 등의 소성거동 측면에서 RC1, RC2, RC3 모두 치환된 균질·등방 물성을 이용한 모델의 해석결과가 실험 결과 및 실제 해석모델(RC1-1, RC2-1, RC1-3 모델)의 결과와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

항복하중에 대한 비교·분석 결과, RC1의 경우 RC1-1, RC1-2, RC1-3 모델에서의 항복하중은 실험결과와 비교해 각각 -5.7, -4.1, -6.1%의 오차를 나타내고, RC2의 경우 RC2-1, RC2-2, RC2-3 모델에서 각각 0.7, 1.4, -2.7%의 오차를, RC3-1,

Table 3 Analysis results

models	results	yielding loads and displ.				ultimate loads			CPU time	
		loads (ton)	displ. (cm)	error(1) (%)	error(2) (%)	loads (ton)	error(1) (%)	error(2) (%)	time (sec)	ratio (%)
RC1	Test	4.90	1.30	-	-	5.10	-	-	-	-
	RC1-1	4.62	0.90	-5.7%	-	5.00	-2.0%	-	140.4	100%
	RC1-2	4.70	1.02	-4.1%	1.7%	5.05	-1.0%	1.0%	100.0	71.3%
	RC1-3	4.60	0.95	-6.1%	-0.4%	5.05	-1.0%	1.0%	62.2	44.3%
RC2	Test	11.00	2.50	-	-	12.00	-	-	-	-
	RC2-1	11.08	0.80	0.7%	-	11.90	-0.8%	-	200.1	100%
	RC2-2	11.15	0.80	1.4%	0.6%	11.86	-1.1%	-0.3%	143.1	71.5%
	RC2-3	10.70	0.75	-2.7%	-3.4%	12.00	0.0%	0.8%	58.9	29.4%
RC3	Test	4.80	0.50	-	-	5.40	-	-	-	-
	RC3-1	4.88	0.52	1.7%	-	5.34	-1.1%	-	175.2	100%
	RC3-2	4.78	0.60	-0.4%	-2.0%	5.34	-1.1%	0.0%	125.9	71.7%
	RC3-3	4.89	0.62	1.9%	0.2%	5.26	-2.6%	-1.5%	78.8	45.0%

* error(1) : error to test results, error(2) : error to RC1-1, RC2-1, RC3-1

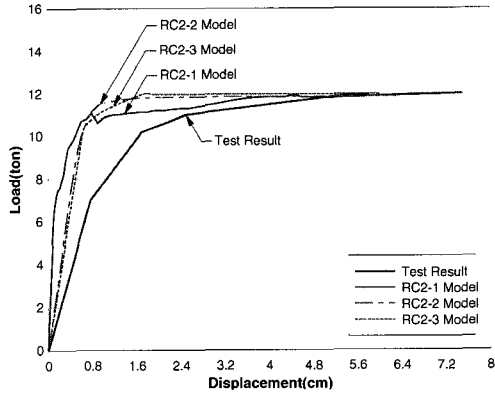


Fig. 15 RC2 analysis results

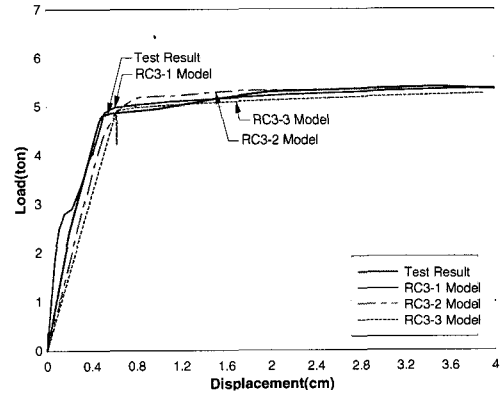


Fig. 16 RC3 analysis results

RC3-2, RC3-3 모델에서는 각각 1.7, -0.4, 1.9%의 오차를 나타내고 있다. 극한하중에 대한 비교·분석 결과, RC1의 경우 RC1-1, RC1-2, RC1-3 모델에서의 극한하중은 실험결과와 비교해 각각 -2.0, -1.0, -1.0%의 오차를 나타내고, RC2의 경우 RC2-1, RC2-2, RC2-3 모델에서 각각 -0.8, -1.1, 0.0%의 오차를, RC3의 경우 RC3-1, RC3-2, RC3-3 모델에서 각각 -1.1, -1.1, -2.6%의 오차를 나타내고 있다. 또한 실제 해석모델과 치환된 물성을 이용한 해석 모델 사이의 비교·분석에서는 RC1의 경우 실제 해석 모델 RC1-1 모델의 항복하중과 극한하중에 대해 치환된 물성을 이용한 RC1-2, RC1-3 모델의 항복하중과 극한하중은 각각 1.7, -0.4%와 1.0, 1.0%의 오차를 나타내고, RC2에서는 각각 0.6, -3.4%와 -0.3, 0.8%의 오차를, RC3에서는 각각 -2.0, 0.2%와 0.0, -1.5%의 오차를 나타내고 있다.

결과적으로 RC1, RC2, RC3의 실험결과와 각 해석모델의 항복하중과 극한하중에서 발생한 오차는 각각 -6.1~1.9%, -2.6~0.0% 수준이고, 각 해석모델 사이의 항복하중과 극한하중에서 발생한 오차는 각각 -3.4~1.7%, -1.5~1.0% 수준이다. 따라서 본 연구에서 제시한 균질·등방물성이 RC 부재의 항복하중과 극한하중 등의 소성거동 특성을 잘 나타내는 것으로 판단되며, 이것은 본 연구에서 목적으로 하는 간편한 RC 구조물의 소성거동 분석에 잘 부합되는 것으로 판단된다.

그러나 RC2 해석모델에서는 항복변위가 실험결과에 비해 다소 차이(약 1.6cm)를 나타내는데, 이것은 실험조건과 해석조건에서 설정한 고정단 경계조건의

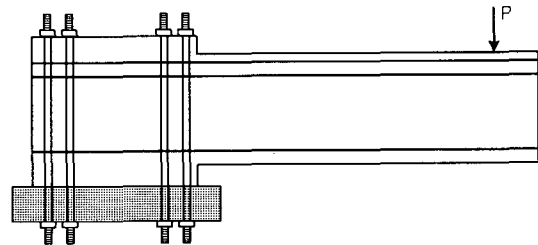


Fig. 17 Boundary condition for test (RC2)

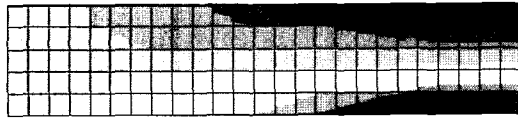
차이 때문인 것으로 판단된다. Fig. 17에 나타난 바와 같이 RC2의 실험조건은 내민보와 연속적으로 연결되어 있는 RC부재로 고정단을 형성한 반면, 해석 조건에서는 Fig 11.과 같이 완전 고정단으로 처리하였다. 따라서 실험조건에서는 내민보에 연결되어 고정단을 구성하는 RC부재의 거동영향으로 동일한 하중 하에서 해석결과 보다 다소 많은 처짐이 발생한 것으로 판단된다.

각 해석모델의 자유도 수와 이에 따라 발생하는 해석수행시간, 수렴성 등 해석수행의 효율성에 대해 비교·분석하였다. RC1-1, RC1-2와 RC1-3 해석모델은 각각 1026개, 387개의 자유도로, RC2-1, RC2-2와 RC2-3 해석모델은 각각 826개, 163개의 자유도, RC3-1, RC3-2와 RC3-3 해석모델은 각각 986개, 397개의 자유도로 구성되어 있다. 따라서 균질·등방물성을 이용한 해석모델은 모델링의 규모와 계산용량 측면에서 훨씬 효율적이며, 이것은 해석수행에 소요되는 시간과 수렴성에 영향을 미치게 된다.

RC1, RC2, RC3의 각 해석모델에서 동일한 조건 하에 해석수행에 소요된 CPU 시간은 Table 3에 나



(a) RC1-1 (yield state, 4.62 ton)



(b) RC1-2 (yield state, 4.70 ton)

Fig. 18 Stress distribution of RC1

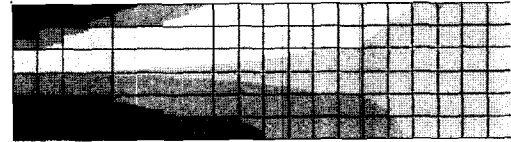
타난 바와 같다. RC1의 경우 RC1-1을 기준으로 RC1-2와 RC1-3에서 각각 71.3%, 44.3% 수준의 해석시간이 소요되었으며, RC2의 경우 각각 71.5%, 29.4% 수준의, RC3의 경우 각각 71.7%, 45.04% 수준의 해석시간이 소요되었다. 여기서 RC1-1, RC2-1과 RC3-1, RC3-2 해석모델은 해석상의 편의를 위한 1/2 모델임을 감안하면 RC1-3, RC3-3 해석모델과의 자유도 차이는 더욱 크게 발생하고 이에 따른 시간적 측면에서의 효율성도 더욱 커질 것이다. 따라서 RC 구조물의 소성해석시 본 연구에서 제시한 균질·등방 물성의 이용은 시간적인 면에서 상당히 효율적이며, 대형 RC 구조물 소성해석의 경우 이러한 시간적 측면에서의 효율성은 더욱 증진될 것이다.

또한 일반적으로 RC 구조물의 소성해석에서는 콘크리트의 균열 발생시점, 항복점 등 내부 부재의 응력상태가 급격히 변화하는 하중단계에서 수렴성에 많은 문제점을 내포하고 있으며, 이 경우 해석이 중단되는 현상이 발생한다. 이러한 하중단계에서 수렴성이 저하되는 문제점은 증가시키는 하중 크기나 수렴방법 등을 조절하여 해결 가능하지만, 여기에는 많은 시행착오와 시간적 노력이 필요하다. 그러나 본 연구에서 제시한 균질·등방 물성을 이용하는 경우 이러한 수렴성 저하의 문제점은 발생하지 않으며, 따라서 실제 RC 구조물의 해석모델에 비해 시간과 노력면에서 상대적으로 효율적인 장점을 갖고 있다.

그러나 RC 구조물의 소성해석시 본 연구에서 제시한 균질·등방 물성을 이용하는 것이 항상 유리한 것은 아니다. 균질·등방 물성은 RC 부재의 전체적인 소성거동에 따라 치환하였으므로 국부적인 응력상태



(a) RC2-1 (yield state, 11.08 ton)



(b) RC2-2 (yield state, 11.15 ton)

Fig. 19 Stress distribution of RC2

는 실제 RC 부재와 상이한 결과를 나타낸다. 본 해석에서의 실제 RC 해석모델(RC1-1, RC2-1)과 치환된 물성을 이용한 해석모델(RC1-2, RC2-2)사이 부재내부에 발생하는 응력상태는 Fig. 18, Fig. 19와 같다.

따라서 본 연구에서 제시한 균질·등방 물성을 이용한 RC 구조물의 소성해석은 균열, 응력상태 등 국부적인 해석 목적에는 적합하지 않지만, 모델링의 간편성, 모델링 규모, 계산용량, 해석수행시간 및 수렴성 등에서의 효율성으로 RC 구조체의 전체적인 탄소성 거동 분석 및 성능평가 등에는 매우 적합한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 간편한 RC 구조물의 소성해석을 위해 RC 부재와 동일한 소성거동(모멘트-곡률 관계)을 나타내는 균질·등방 재료로의 물성치환 방법을 제시하였으며, 다양한 해석모델에 대한 소성해석을 수행하여 타당성을 검증하였다.

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제시한 방법에 의해 치환된 균질·등방 재료를 이용한 RC 구조물의 소성해석 결과 항복하중, 극한하중 등의 소성거동 측면에서 실험결과 및 콘크리트와 철근의 소성거동을 각각 고려한 해석모델과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.
- 2) 또한 본 연구에서 제시한 균질·등방 물성을 이용한 해석모델은 자유도 수를 감소시켜 모델링의 규

모와 계산용량 측면에서 효율적이며, 이에 따라 해석수행 시간의 절약과 수렴성을 향상시켜 전체적인 소성해석 수행의 효율성을 향상시키는 것으로 나타났다. 이러한 점은 대형 RC 구조물의 소성해석 경우에 더욱 증진될 것이다.

- 3) 그러나 본 연구에서 제시한 균질·등방 물성을 이용한 소성해석 결과는 균열, 응력상태 등 국부적인 측면에서 실제 RC 부재와 상이한 결과를 나타내므로, 국부적이고 정밀한 해석이 목적인 경우에는 적용할 수 없는 단점을 갖고 있다.
- 4) 이상의 결과를 종합하면 본 연구에서 제시한 물성치환 방법은 국부적인 해석에는 적합하지 않지만, 모델링의 간편성, 모델링 규모, 계산용량, 해석수행시간 및 수렴성 등에서의 효율성으로 RC 구조체의 전체적인 탄소성 거동 분석 및 성능평가 등에는 적합한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Chen, W.F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, 1982, p.463
2. Kotsovos, M.D., and Pavlovic, M.N., *Structural Concrete - Finite Element Analysis for Limit State Design*, Thomas Telford, 1995, p.550
3. Park, R., and Paulay, T., *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, 1975, p.769
4. Alsayed, S.H., "Flexural Deflection of Reinforced Fibrous Concrete Beam", *ACI Struatural Journal*, V.90, No.1, 1993, pp.72~76
5. Fang, I.K., Wang, C.S., and Hong, K.L., "Cyclic Behavior of High-Strength Concrete Short Beams with Lower Amount of Flexural Reinforcement", *ACI Struatural Journal*, V.91, No.1, 1994, pp.10~18
6. Cervenka, V., 콘크리트 구조물의 비선형 해석, STRESS (advanced STructure RESearch Station), 1998
7. "SINTER 빌딩의 2개소 건물의 구조 및 열화성능 연구", KICT/96-SE-1205-1, 한국건설기술연구원, 1996, p.301
8. 심종성, 배인환, "강판 및 탄소섬유로 보강된 철근 콘크리트보에 대한 해석적 연구", 콘크리트학회지, 제9권, 제6호, 1997, pp.129~137
9. 이재홍, "유한요소법에 의한 철근콘크리트 부재의 거동 해석", 전산구조공학, 제9권, 제4호, 1996, pp.30~34 (접수일자 : 2000. 5. 10)