

해석법 차이에 의한 프리스트레스트 콘크리트 보부재의 잔류변형률 비교

Comparison of Residual Strain of Prestressed Concrete Beam Member by Different Analysis Method

이덕기^{1)*}

Lee, Duck Ki^{1)*}

¹⁾울산과학기술대학교 공간디자인학부

¹⁾Ulsan College School of Environment & Building Design

/ A B S T R A C T /

In the seismic design of building structural members, due to the complexity of the placement of PC steels in prestressed concrete members, it is necessary to review and define the definition of member damage in comparison with reinforced concrete members.

In this study, the results of past experiments compared with the calculation results by 'section Analysis Method', with the aim of reviewing the precision of calculation results when member damage evaluation is performed using the section analysis method. Furthermore, it is also compared with the calculation results by the 'split Element Method'.

In addition, parametric studies were carried out, and the influence of the difference between the amount of PC steels and reinforced bar on the residual strain was examined.

Key words: Performance-based seismic design, Prestressed concrete, Section analysis method, Split element method, Residual ratio

1. 서론

건축구조 부재의 내진 설계에서는 성능기반 내진설계법의 도입이 시작되면서 '부재의 거동'을 '재료 레벨에서의 손상 정도'와 관련지어 파악할 필요성이 제기 되었다. 특히, 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 부재에서는 PC강재가 배치되는 복잡성으로 인하여 철근 콘크리트(RC) 부재에 비해 부재 손상의 정의를 상세히 검토 및 정의할 필요가 있다. 부재 손상을 해석적으로 검토하는 경우는 부재 위험 단면을 대상으로 단면 해석을 실시하는 것이 일반적이다.

단면 해석법의 결점으로는 첫째, 부재 재축방향의 강재 변형의 분포 상황을 고려할 수가 없다. 둘째, 실제의 부재 변형은 단면 해석법의 기본 이론인 '단면에서 발생하는 곡률의 재축방향의 적분'으로 생기는 부재 변형보다도 '재축 방향으로 산발적으로 발생하는 균열에 의해 더욱 좌우되기' 때문에 실제의 부재 변형과 해석에서의 부재 변형의 발생 메커니즘이 근본적

으로 다르다는 점이다. 그러나 기술적인 간편함과 이해하기 쉬운 이론 더욱이 적당한 등가 소성 힌지 길이를 이용해 계산을 실시하는 것으로 부재의 휨 변형 거동을 '어느 정도 정확하게' 추적할 수 있다는 장점도 있다.

이에 본 논문은 부재 손상 평가 요소 중 PSC 보부재의 잔류변형에 주목하고 부재 손상의 검토 수법으로서 단면 해석법을 이용하는 경우의 산정 정밀도를 검토를 위하여 이형 PC강봉을 이용한 PSC 보부재를 대상으로 기존의 실험 결과와 비교를 실시함과 동시에 보다 기술적으로 고도의 해석법인 분할 요소 해석법의 결과와도 비교를 진행하고자 한다. 또한, 단면 해석법 및 분할 요소 해석법에 따르는 파라메트릭 스터디를 실시해 PC강재량과 보통 철근량의 차이가 잔류변형에 미치는 영향에 대하여 검토를 한다.

2. 해석 조건 등의 개요

본 논문에서 이용한 두 해석법, 단면 해석법 및 기술적으로 보다 고도의 부재 해석법인 분할 요소 해석법의 조건 등에 대해 설명한다.

*Corresponding author: Lee, Duck Ki

E-mail: dglee@uc.ac.kr

(Received June 8, 2017; Revised June 19, 2017; Accepted June 20, 2017)

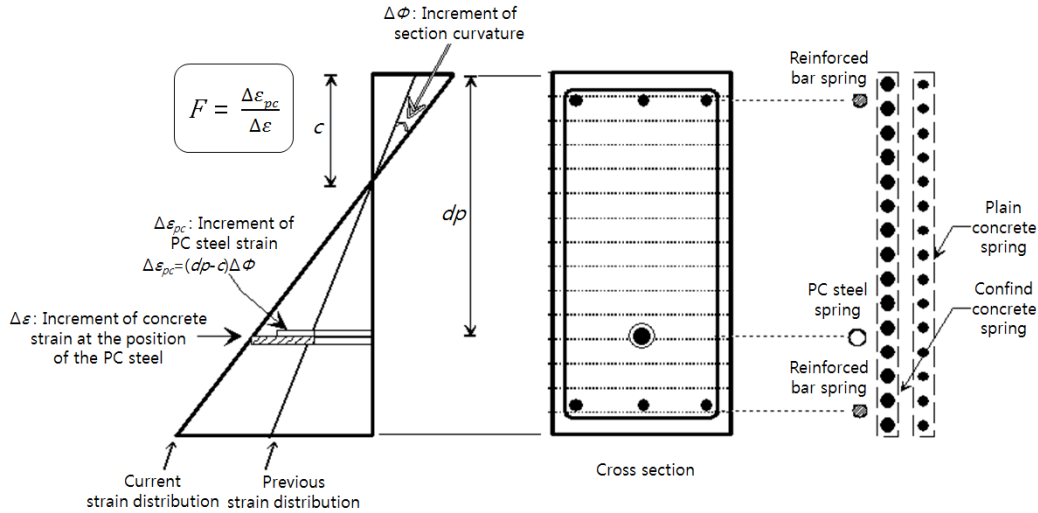


Fig. 1. Modeling and definition of F value

2.1 단면 해석법

보부재 단면을 단면 높이 방향으로 분할(분할 수 100)하고 분할된 각각의 요소에, 콘크리트 및 강재(보통 철근과 PC강재)의 응력도-변형도 관계를 모델화한 스프링을 이용하여 모델화한다. 단면내의 힘의 균형과 평면유지의 가정(변형 전 평면인 단면은 변형 후에도 평면을 유지한다)을 이용하여 단면곡률(φ)을 증가시키며 부재 변형을 계산한다(Fig. 1). 또한, 이 φ가 부재의 소성 힌지 영역(등가소성 힌지 길이(l_{eq} : 1.0D와 0.5D 단, D는 단면 높이))에 동일하게 분포한다고 가정하고 힌지부에 발생하는 회전각(R)을 구한다(식 1).

$$R = \phi \times l_{eq} \tag{1}$$

(식 1)으로부터 알 수 있듯이 l_{eq} 의 크기는 직접 회전각의 크기를 좌우하는 요소이다. l_{eq} 의 크기를 0.5D ~ 1.0D로 한 과거의 연구[1]을 참고하여 본 논문에서는 상한과 하한의 값을 적용하였다.

해석에서는 콘크리트 및 보통 철근에 대해서는 평면유지의 가정이 성립되는 것으로 하고 PC강재의 부착 감퇴에 대해서는, 변형도 적합 계수(F값)를 이용해 계산했다(Fig. 2). 변형도 적합 계수치는 ‘PC강재가 배치되는 위치의 콘크리트 변형도’와 ‘PC강재의 변형도’의 차이($\Delta\epsilon_c - \Delta\epsilon_{pc}$)가 커짐에 따라 작아지도록 즉, 미끄러지기 쉽도록 설정하고, 그 함수는 기존의 실험 결과[2]를 기초로 결정했다(Fig. 2 및 그림 속의 식 참조).

2.2 분할 요소 해석법

분할 요소 해석법은 Nishiyama et al.에 의해 제안된 수법을 기초로 하고 있으며, Fig. 3에서와 같이 부재를 부재 높이 방향 및 재축방향으로 각각 분할하고 부재 강성 매트릭스를 유도하는 방법이다[3]. 재축방향으로 분할된 각 블록내의 콘크리트 및 보통 철근에 대해서는 평면유지의 가정이 성립하고 PC강재와 콘크리트간의 부착-미끄러짐 관계는 Morita·Sumi 모델[4]

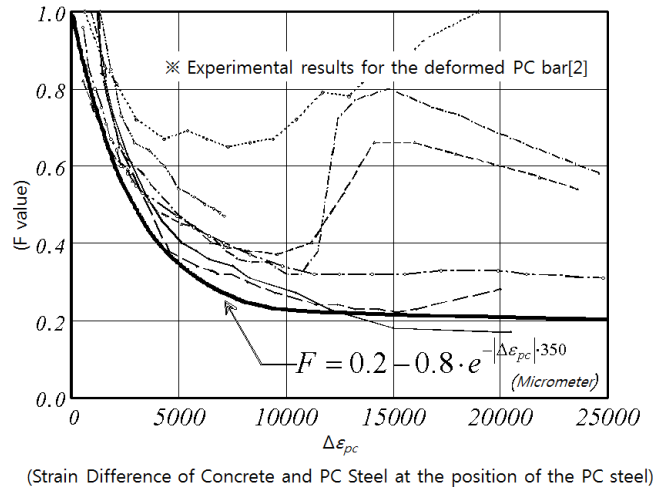


Fig. 2. F value used in the analysis

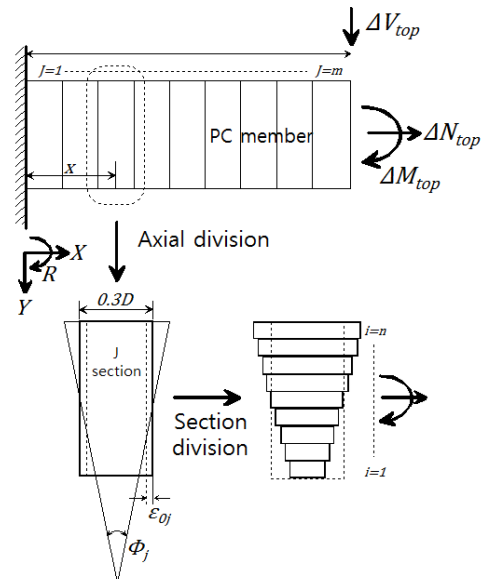


Fig. 3. split element method

을 이용하였다. 또한, 단면 높이 방향의 분할 수는 100으로 하고 재축방향의 분할 폭은 0.3D(D는 단면 높이)로 하였다.

2.3 재료 이력 모델

재료의 이력 모델은 단면 해석법과 분할 요소 해석법 모두 같은 모델을 사용하고 있다. 콘크리트의 응력-변형도 이력은, Watanabe 모델[5]을 사용하였다. 보통 철근은 Ramberg-Osgood 식에 근거해 바우싱거 효과를 고려한 이력 모델[2]을 사용하였고, PC강재는 Menegotto-Pinto 식에 근거하는 이력모델[6]을 이용하였다.

3. 기존 실험 결과와의 비교

3.1 실험 개요

Fig. 4에 검토 대상으로 한 실험의 개요[7]을 나타내었다. 대상으로 한 시험체는 2개이며 모두 단면 폭 200 mm, 높이 500 mm의 직사각형 단면을 가지는 일체형 PSC보 시험체이다. PC강재는 이형 PC강봉을 이용하고 있으며, 초기 프리스트레스 도입력은 항복 강도(1100.0 N/mm²)의 50%이고, 또한, 보통 철근의 철근비는 0.3%로 작아서 RC적인 성질보다는 PC적 성질이 지극히 강한 부재이다. 2개의 시험체는 스패ん길이와 전단 보강근량만 다른 시험체이며, 여기에서는 스패ん길이 짧은 시험체(스패ん길이=3D : D는 단면 높이)를 시험체(A), 스패ん길이 긴 시험체(스패ん길이=5D)를 시험체(B)로 부른다.

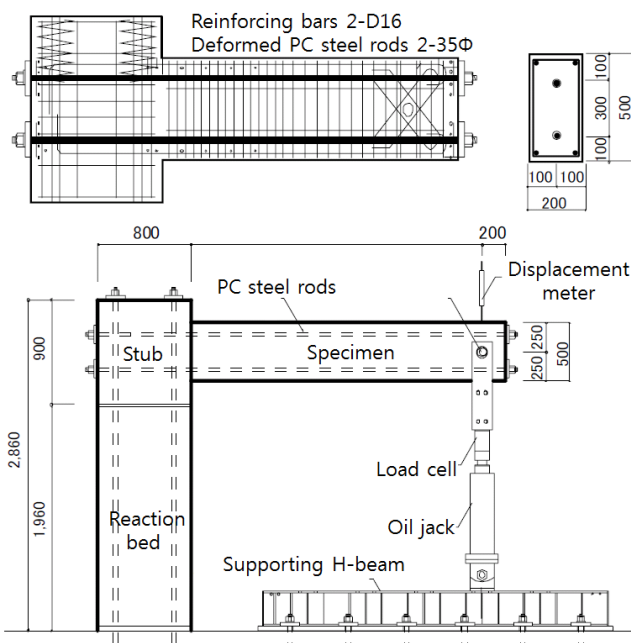


Fig. 4. Summary of specimen

3.2 해석 결과와 실험 결과의 비교

3.2.1 하중-부재 변형각 관계

Fig. 5에 해석 및 실험에서의 하중-변형각(P-R) 관계를 나타낸다. 단, 단면 해석법에서는 스패ん길이의 차이를 해석에 고려할 수가 없다. 즉, 단면 해석법으로 얻을 수 있는 시험체(A), 시험체(B)의 P-R관계는 단면 해석법으로 얻을 수 있는 똑같은 모멘트 값을 각각의 스패ん길이로 나눈 것이 되고, 이력의 형상에 차이는 없다. 따라서 시험체(A)의 P-R관계만 나타내고 시험체(B)의 P-R관계는 생략한다. 또한, 단면 해석에서는 소성 힌지 길이(l_{eq})를 2종류(0.5D, 1.0D) 설정했기 때문에 그 2종류 모두의 결과를 나타낸다. Fig. 5를 개괄적으로 보면 단면 해석과 분할 요소 해석 모두 PC부재 특유의 원점 지향성이 강한 이력 모델을 잘 재현하고 있지만, 최대 내력은 실험값에 비하여 과소평가를 하고 있다. 따라서, 구체적으로 변형 레벨별로 상황을 검토한다.

[R=1/200, R=1/100] : 실험 결과에서는 R=1/200때의 내력은 최대 내력의 65%정도인데 대하여 단면 해석($l_{eq}=0.5D$)에서는 거의 최대 내력에 도달하고, 단면 해석($l_{eq}=1.0D$)에서는 약 85%가 되고 있다. 또, R=1/100 때에는 실험 결과는 약 80%인데 반하여, 단면 해석($l_{eq}=1.0D$)에서는 최대 내력에 이르고 있다. 이상으로부터 단면 해석법에서는 R=1/100 정도 이하의 비교적 작은 변형 영역에서는 PC강재 등의 재료 변형도를 상당히 과대하게 산정하는 경향이 있는 것을 알 수 있다. 한편, 분할 요소 해석법에서의 R=1/200와 1/100때의 내력비(최대 내력에 대한 비율)는 각각 약 65%와 85%로 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

[R=1/50, R=1/30] : R=1/50을 넘어서는 영역에서는 재료의 소성화 정도가 커져 잔류변형량이 문제가 되기 때문에 제하시의 원점 지향성에 대해 검토한다. 단면 해석($l_{eq}=1.0D$)의 경우 R=1/30으로부터의 제하시의 이력 형상이 실험 결과와 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, 실험 결과에서는 R=1/50 이하의 변형 영역에서 나타난 원점 지향성의 강한 이력이 R=1/30에서는 없어지고 있는데 반하여, $l_{eq}=1.0D$ 의 이력에서는 R=1/30에서도 원점 지향성의 강한 이력을 나타내고 있다. 이것에 대하여 $l_{eq}=0.5D$ 의 결과에서는 실험 결과와 같이 원점 지향성이 약해지고 있다. 이것은 l_{eq} 의 값이 커지면 커질수록 같은 변형각이 되는 곡률(ϕ)이 작아도 괜찮기 때문에 재료(콘크리트, 보통 철근, PC강재)가 받는 변형도도 작아지기 때문이다.

한편, 분할 요소 해석법에서의 이력은 스패ん길이의 길고 짧음에 관계없이 실험 결과와 같게 R=1/50이하에서는 원점 지향성의 강한 이력을, R=1/30에는 그 경향이 약해지는 현상이 나타나고 있다. 또, 스패ん길이 5D(시험체(B))에 대하여 스패ん길이 3D(시험체(A))의 경우, 약간 에너지 흡수가 좋은 즉, 면적이 약 2배 큰 이력이 되고 있으며 이 점에 대해서도 실험 결과를 잘 추적하고 있다고 말할 수 있다.

3.2.2 재료 변형-부재 변형각 관계

여기에서는 PC강재 및 콘크리트에 발생하는 변형도를 부재각과의 관계로 비교하고 해석법의 재료 손상 평가의 정밀도에 대해 검토한다. Fig. 6은 시험체(A)에 대해 실험과 해석에 의해 얻을 수 있는 PC강재의 변형도(%)

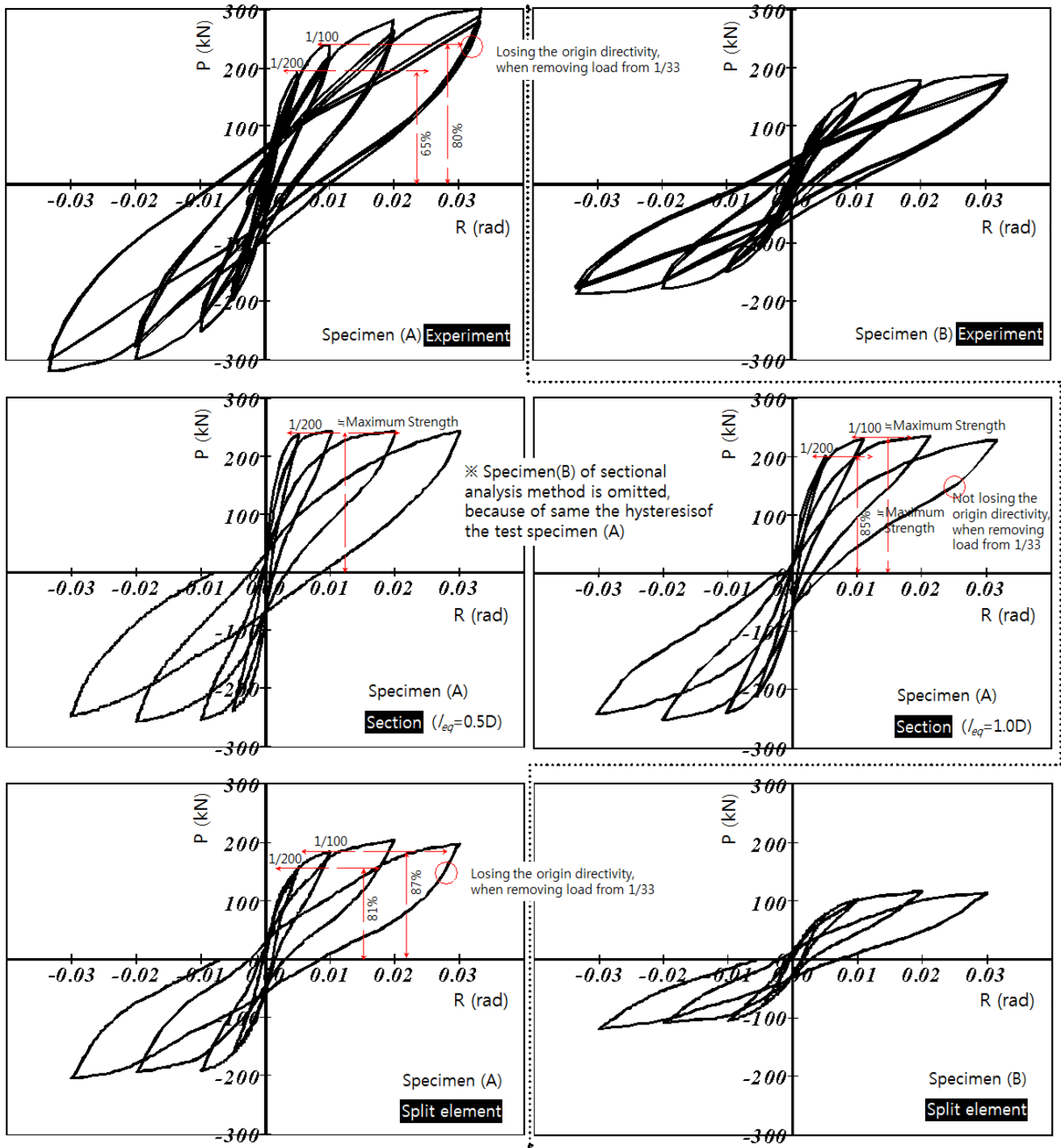


Fig. 5. Load - Rotation (P-R)

를 세로축으로 변형각을 가로축으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 두 해석법에 의한 PC강재 변형은 전반적으로 실험값보다 과대평가하고 있는 것을 알 수 있다. 다만, 변형 증가에 수반하는 변형도 증가분의 관점으로 보면 단면 해석($I_{eq}=0.5D$)의 기울기는 실험값의 것과 거의 같다. 분할 요소 해석법에 따르는 값은 $R=1/100$ 시점에서는 가장 실험값(0.6%)에 가까운 값(0.59%)을 나타내고 있지만, 변형 증가에 수반하는 증가분은 가장 크고, $R=1/30$ 시점은 실험값(0.8%)의 대략 2배의 값(1.48%)이 되고 있다.

Fig. 7은 Fig. 6과 같이 콘크리트 표면의 변형도를 나타낸 것이다. 실험

값은 불명(계측할 수 없었음)이기 때문에 비교는 할 수 없지만, 각 해석값의 경향은 PC강재의 변형도의 경우와 같다. 즉, 단면 해석에서는 변형의 작은 영역에서는 상대적으로 큰 변형도가 되지만, 변형의 증가에 수반하는 증가분은 분할 요소 해석법에 비해 작다. 분할 요소 해석법에서는 스펙길이 3D의 경우의 값은 5D의 경우의 값에 비교해 전반적으로 크고, 그 차이는 변형각에 의하지 않고 거의 일정한 것을 알 수 있다.

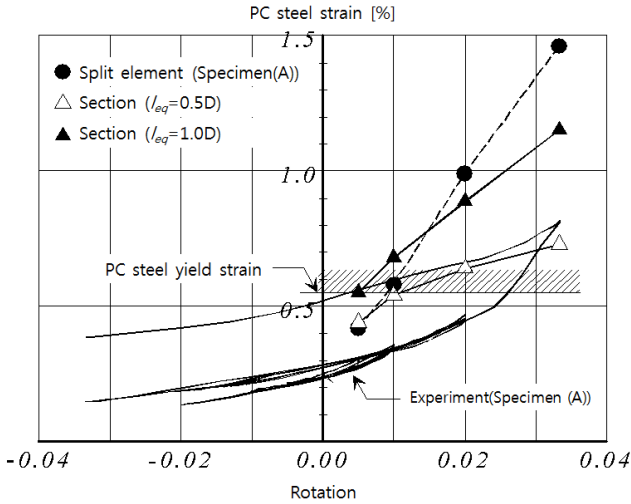


Fig. 6. PC steel strain - Rotation

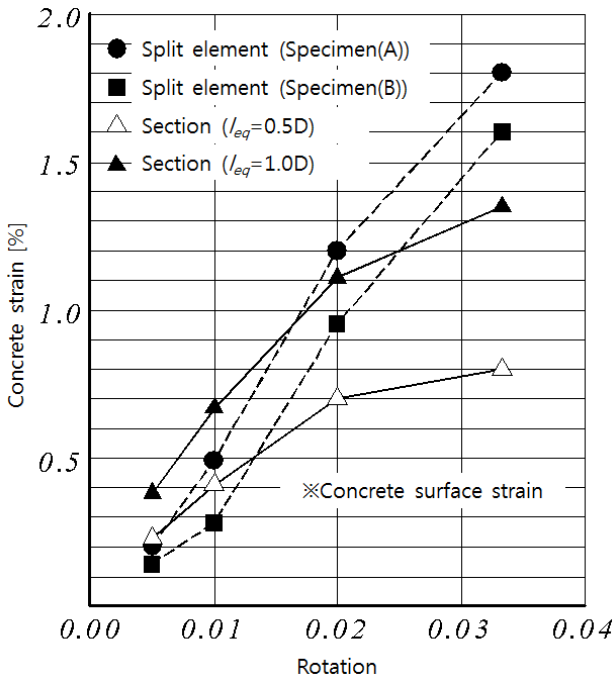


Fig. 7. Concrete strain - Rotation

3.2.3 잔류변형률-부재 변형각 관계

Fig. 8은 실험 및 해석에 의한 잔류변형률(경험 최대 변형각에 대한 하중 0 시점의 변형각의 비율)을 나타낸다. 이 그림에서, 전반적으로 해석값은 실험값보다 작은 값이 되고 있는 것을 알 수 있다. 상세하게 R=1/50과 R=1/33의 경우를 살펴보면 단면 해석($l_{eq}=1.0D$)의 값(1.16, 0.27)은 스패ん 길이 5D의 실험값(0.18, 0.31)과 비교적 잘 일치하고 있다. 이것에 대해, 단면 해석($l_{eq}=0.5D$)의 값은 큰 폭으로 실험값(0.1, 0.15)을 과소평가하고 있어 실험값의 절반 정도의 값이 되고 있다. 분할 요소 해석법에 의한 값은, 대체로 단면 해석에 의한 $l_{eq}=0.5D$ 와 $1.0D$ 의 사이의 값(0.12, 0.22)이 되고 있다. 앞에서 말한 것처럼 실험값과의 대응에서는 단면 해석($l_{eq}=0.5D$)의 경우가 가장 가까운 값이 되고 있지만, 분할 요소 해석값에서의 전단스팬비

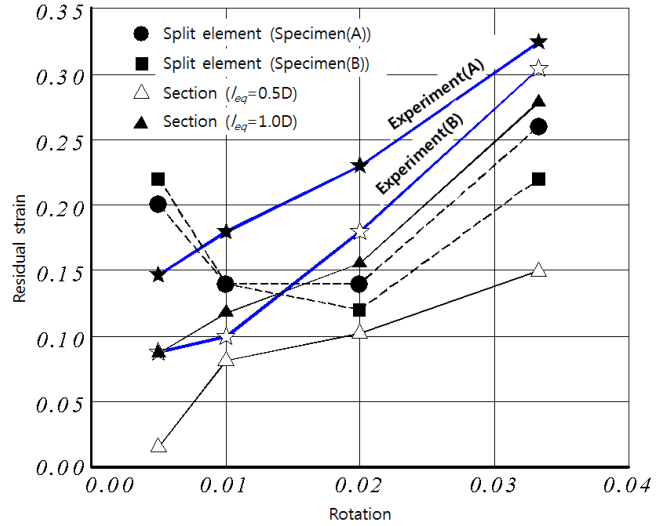


Fig. 8. Residual strain - Rotation

의 다른 점에 의한 차이는 실험값에서의 전단스팬비의 다른 점에 의한 차이와 잘 일치하고 있어 적용성이 높다고 볼 수가 있다.

4. 파라메트릭 스터디

본 장에서는 단면 해석 및 부재 해석에 의한 파라메트릭 스터디를 실시하여, PC강재량과 보통 철근의 량의 차이가 잔류변형에 미치는 영향에 대해 검토한다.

4.1 해석 조건과 파라미터

해석 대상으로 한 부재는 3장에서의 시험체(A)를 기본으로 하고, 과거의 연구[8]을 참고하여 강재 계수 q_{sp} (식 2)와 프리스트레싱 계수 λ_t (식 3)의 2개의 지표를 이용하여 PC강재량 및 보통 철근량을 결정하고 해석을 실시했다. 강재 계수 q_{sp} 는 PC강재량 그 자체를 나타내는 계수이고 $q_{sp}=0.3$ 의 경우의 PC강재량은 $q_{sp}=0.1$ 의 경우의 3배를 의미한다. 또한, 프리스트레싱 계수 λ_t 는 PC적 성질의 강함을 나타내는 계수이고 $\lambda_t=1.0$ 의 경우 순수PC부재를 의미하고 $\lambda_t=0$ 의 경우 RC부재를 의미한다. 두 지표의 수준은 $q_{sp}=0.15, 0.265$ (시험체(A)의 값), 0.35의 3종류와, $\lambda_t=0.5, 0.7, 0.91$ (시험체(A)의 값)의 3종류를 사용하고, 각각을 조합한 $9(3 \times 3)$ 경우에 대해 해석을 실시했다.

$$q_{sp} = \frac{T_{py} + T_{ry} - C_{ry}}{b \cdot D \cdot F_c} = \frac{T_{py}}{b \cdot D \cdot F_c} \quad (2)$$

$$\lambda_t = \frac{T_{py}}{T_{py} + T_y} \quad (3)$$

여기서, T_{py} :인장축 PC강재 항복시 응력

T_{ry} :인장축 보통 철근 항복시 응력

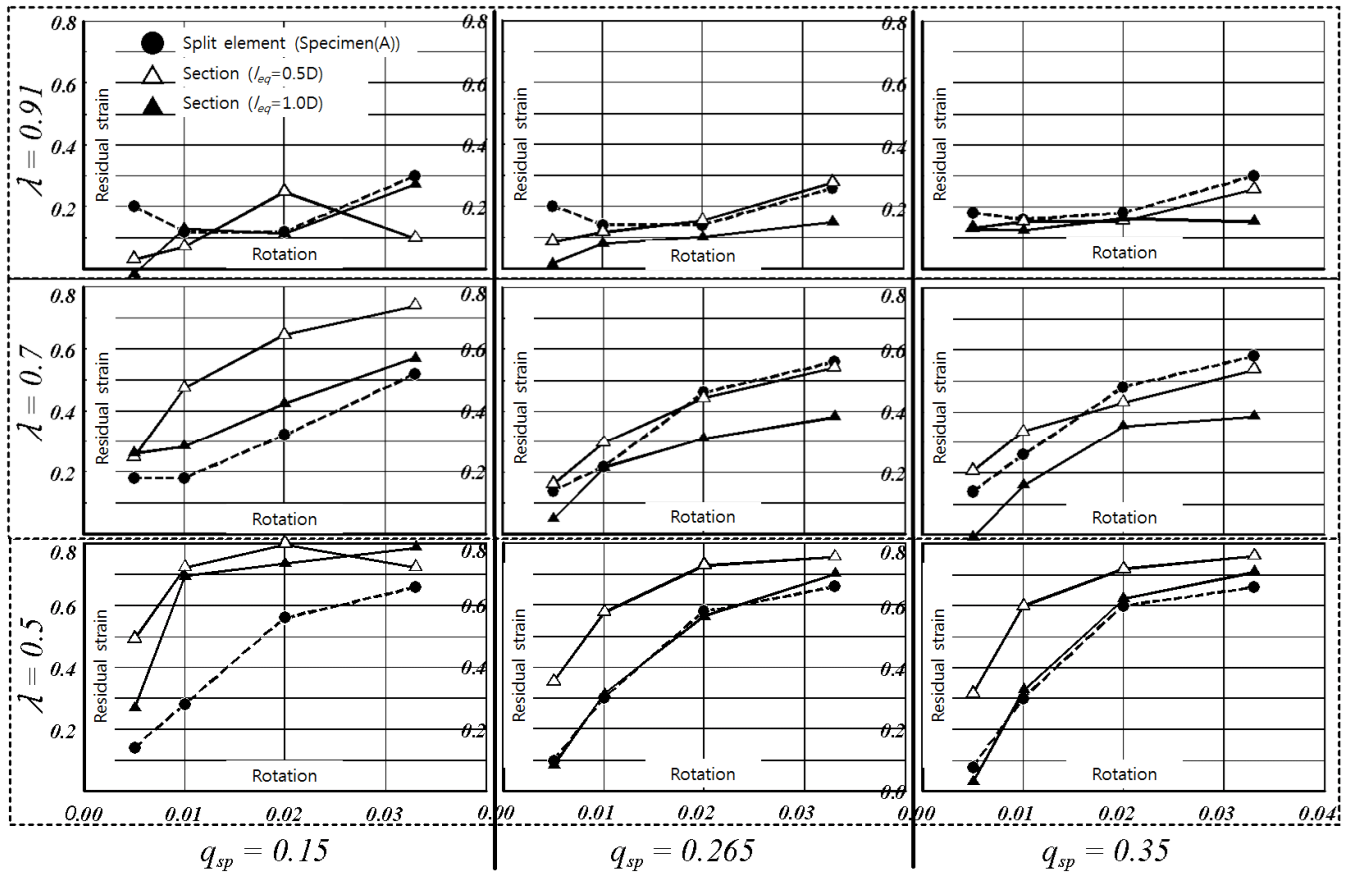


Fig. 9. Residual strain - Rotation by q_{sp} and λ_t

C_{ry} : 압축축 보통 철근 항복시 압축력

b : 단면의 폭, D : 단면 깊이

F_c : 콘크리트 압축강도

4.2 해석 결과

Fig. 9에 계산 결과를 나타낸다. PC적 성질이 매우 강한 λ_t 가 0.91의 경우, 단면 해석법과 분할 요소 해석법의 결과 모두 q_{sp} 의 차이에 의한 잔류변형률의 차이는 나타나지 않고 해석법의 차이에 의한 의미 있는 차이가 나타나지 않는다. 또한, 대부분의 경우 잔류변형률은 0.2이하로 매우 작다. λ_t 가 0.7의 경우, 단면 해석법에서는 q_{sp} 가 커짐에 따라 잔류변형률이 작아지는 경향이 있는데 비하여, 분할 요소 해석법에서는 대부분의 경우 영향이 없다. $q_{sp}=0.265$ 와 $q_{sp}=0.35$ 에서는 양쪽의 값은 비슷하지만, $q_{sp}=0.15$ 의 경우, 단면 해석의 값은 분할 요소 해석의 값을 큰 폭으로 상회하고 있다. RC적 성질이 강한 λ_t 가 0.5의 경우, $q_{sp}=0.265$ 와 $q_{sp}=0.35$ 에서는 분할 요소 해석의 값과 단면 해석($l_{eq}=1.0D$)의 값은 비슷하지만, $l_{eq}=0.5D$ 의 경우는, 이러한 값을 크게 상회한다. 다만, 변형각의 증가에 따른 차는 오히려 작아져서, R=1/50 때에는 대략 15%~20%, R=1/30 때에는 10%이하가 되고 있다. 이상으로부터, PC적 성질이 강한 영역에서는 PC강제에 의해 제하시 곡률 복원량이 크기 때문에 두 해석법 모두 잔류변형률이 매우 작다. 하지만, RC적 성질이 강한 영역에서는 제하시 PC강제의 변형은 인장의 범위 내에 머

물고 탄성 영역이 길기 때문에 선형적 거동을 한다. 이에 비해, 보통 철근은 제하시작시의 변형은 인장의 범위에 있지만 이후 압축 변형을 받게 되고 바우싱거 효과에 의해 비선형 거동을 하게 된다. 이러한 변형의 차이를 분할 요소 해석법은 잘 추적하고 있지만, 단면 해석법은 그렇지 않다.

5. 결론

부재 손상의 검토 방법으로서 단면 해석법을 이용하는 경우의 산정 정밀도를 검토하는 것을 목적으로, 단면 해석법에 따르는 산정 결과와 기존의 실험 결과와 비교를 하였다. 또한, 분할 요소 해석법의 결과와 비교도 실시했다. 지극히 한정된 조건에서의 검토이기 때문에 일반적인 결과라고 말하기는 힘들지만 등가소성 힌지 길이(l_{eq})를 단면 높이의 0.5~1.0 정도로 설정함으로써 재료 변형 및 잔류변형을 어느 정도 추정할 수 있는 가능성을 보였다. 하지만, 향후 광범위한 데이터를 가지고 적합성에 대한 광범위한 검토를 할 필요가 있다.

/ REFERENCES /

1. Ishii T, Kamihigashi H, Nakatsuka T, Kishimoto I. Estimation of load deformation relations of PC beams using equivalent lengths of plastic hinge zones and analysis for flexural sections. AIJ, 1999; C-2, Structures IV:1043-1044.

2. Enomoto Hidefumi, Analytical properties related to the PRC beams, Osaka University, c1981.
3. Nishiyama M, Muguruma H, Watanabe F. Hysteretic Restoring Force Characteristics of Unbonded Prestressed Concrete Structure Under Earthquake Loads, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1989 Jun;22(2):112-121.
4. Morita S, Sumi, T. Bond-slip relationship under repeated loading, Transactions of the architectural Institute of Japan, 1975; 229:15-24.
5. Watanabe F, Lee JY, Nishiyama M. Structural Performance of Reinforced Concrete Columns with Different Grade Longitudinal Bars. ACI Structural Journal, 1995;92(4):412-418.
6. Misumi T, Tagawa H, Nishiyama M. The idealization of stress-strain prestressing steel bar. AIJ, 1997;C-2, Structures IV:885-886.
7. Nakatsuka T, Masayuki A. Experimental Study on Load Bearing and Deformation Mechanism and Structural Performance of Cantilever Type Prestressed Concrete Beams with Different Connecting System (Compressed or unit type) and PC Tendon Type (round or deformed). Concrete research and technology, 2000;11(3):97-110.
8. Lee DK. Research of residual strain calculation of prestressed concrete beam element, Journal of the Korea Concrete Institute, 2014 Aug;26(4):555-562.