

콘크리트학회 논문집

Journal of the Korea Concrete Institute

- 109 초고강도 섬유보강 콘크리트 분절형 박스 거더의 휨거동
귀칭용 · 한상묵
- 117 양생 방법에 따른 알칼리활성 시멘트 모르타르의 특성
김지훈 · 이재규 · 형원길
- 125 볼트 접합 및 프리스트레스를 적용한 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 외부접합부의 내진실험
이동주 · 이주동 · 오태수 · 강현구
- 135 부착 및 래핑형 복합소재를 이용한 학교시설의 내진보강
박춘욱 · 김동휘 · 권민호 · 최 열
- 143 고강도 비틀림보강철근을 사용한 철근콘크리트 보의 파괴모드
윤석광 · 이수찬 · 이도형 · 이정윤
- 151 초고성능 콘크리트 바닥판과 역T형 강거더의 합성보를 위한 스티드 및 퍼즐스트립 전단연결재에 관한 연구
이경찬 · 조창빈 · 최은석 · 김지상
- 159 철근콘크리트 전단벽의 횡하중-횡변위 관계의 일반화
문주현 · 양근혁
- 171 외부철판이 사용된 DH Beam의 휨거동에 대한 실험 및 비선형해석
문정호 · 오영훈
- 181 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 단일 현장타설말뚝의 철근비 분석
김재영 · 정상삼 · 김장호
- 189 횡 보강된 프리캐스트와 현장타설 콘크리트 합성보의 전단강도
김철구 · 박홍근 · 홍건호 · 강수민
- 201 콘크리트 배합설계를 고려한 구조물의 전과정 CO₂평가 모델
양근혁 · 서은아
- 211 유럽과 국내기준에 규정된 취성파괴 방지를 위한 휨 최소철근량 고찰
박성재 · 강태성 · 문도영
- 219 유용미생물을 이용한 포러스 콘크리트의 장기간 연속호름 실험을 통한 수질정화 효과 검토
박준석 · 김봉균 · 김우석 · 서대석 · 김화중

Vol.26 No.2(Serial No.140) April, 2014



- f_{ck} : 콘크리트의 압축강도
- b : 보의 폭
- c : 보의 상단(슬래브 측)으로부터 중립축까지 거리
- d_{ot} : 보의 상단(슬래브 측)으로부터 DH 판 중심까지의 거리
- d_s : 휨인장철근에 의한 보의 유효깊이
- d_t : DH 판 및 인장철근의 강도를 고려한 보의 유효깊이
- d' : 보의 상단(슬래브 측)으로부터 압축철근 중심까지의 거리
- A_{ts} : DH 판 전체의 면적
- A_{t1} : DH 측판의 면적
- A_{t2} : DH 하부판의 면적
- A_{tv} : DH 측판의 전단강도 산정을 위한 DH 판의 면적
- A_v : 전단보강철근의 단면적
- A_s : 인장철근의 단면적
- A'_s : 압축철근의 단면적
- f_{yt} : DH 판의 항복강도
- f_{yv} : 전단철근의 항복강도
- f_{ys} : 인장철근의 항복강도

감사의 글

이 논문은 2013년도 한남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

1. Shim, H. J. and Lee, E. T., “Development of Slim Floor System for High-Rise Buildings,” *Proceedings of 3rd Year Workshop for High-rise Buildings Construction Technologies*, Vol. 1, 2005, pp. 25-28.
2. Park, K. Y., Kyung, J. H., Jeon, S. H., Kim, D. K., and Choi, S. M., “Flexural Performance for Deep-Deck Plate using Cap Plate,” *Proceedings of the Architectural Institute of Korea*, 2012, Vol. 32 No. 2, pp. 505-506.
3. Kim, Y. H., Park, Y. S., Park, S. W., Ko, Y. W., Yang, K. H., and Chung, H. S., “An Experimental Study on the Flexural Behavior of Structural Deck Plate Continuous Slabs,” *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 2003, Vol. 15 No. 2, pp. 202-205.
4. Paik, I. K., Yoon, S. H., Chung, L., Cho, S. H., and Hong, E. A., “Structural Performance of Void Deck Slab System,” *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 2012, Vol. 24 No. 1, pp. 693-694.
5. Architectural Institute of Korea, *Design Code for Architectural Structures*, 2009, 769 pp.
6. ACI Committee, 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington hills, Michigan, 2008.
7. TNO Building and Construction Research, *DIANA User’s Manual Material Library*, 2011, 168 pp.

요 약 이 연구는 DH beam의 구조성능을 평가하는 것을 목적으로 하였다. DH beam을 사용하는 DH 공법은 얇은 철판을 성형하여 거푸집 및 구조적 역할을 할 수 있는 철판을 철근과 함께 공장에서 선조립하여 현장으로 반입하여 콘크리트를 타설하는 공법이다. 이 때 DH 판이 거푸집 역할 뿐 아니라 휨강도에 기여할 것으로 여겨져서 이 연구에서는 DH 판의 휨강도 기여도를 평가하고자 하였다. 총 5개의 실험체를 대상으로 실험 및 해석적 연구를 수행하였다. 실험체는 2개의 정모멘트 실험체, 2개의 부모멘트 실험체, 그리고 1개의 RC 실험체로 구성되었다. RC 실험체는 DH beam과 비교를 목적으로 제작하였다. DH beam에 대한 실험 결과는 휨강도를 산정하는 설계식 그리고 RC 실험체에 대한 실험 결과 등과 비교를 통하여 DH beam은 철판이 항복하면서 충분히 휨강도에 기여하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 비선형 구조해석에서는 두 개의 실험체에 대하여 DH 판이 있는 경우와 없는 경우를 대상으로 휨강도, 콘크리트의 주인장변형률, 그리고 철근의 응력을 비교하였으며, 해석에서도 DH 판이 휨강도에 충분히 기여함을 알 수 있었다. 이상과 같은 실험 및 해석적 연구의 결과 DH beam의 철판은 콘크리트와 합성단면을 형성하여 충분한 휨강도를 갖는 것으로 보였다.

핵심용어 : DH beam, 철판 거푸집, 보강요과, 휨강도, 비선형 유한요소해석

콘크리트학회 논문집

제26권 2호 / 2014년 4월

pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842

CONTENTS

- 109 초고강도 섬유보강 콘크리트 분절형 박스 거더의 휨거동
귀창용 · 한상묵
- 117 양생 방법에 따른 알칼리활성 시멘트 모르타르의 특성
김지훈 · 이재규 · 형원길
- 125 볼트 접합 및 프리스트레스를 적용한 프리캐스트 콘크리트 보-기둥 외부접합부의 내진실험
이동주 · 이주동 · 오태수 · 강현구
- 135 부차 및 래핑형 복합소재를 이용한 학교시설의 내진보강
박춘욱 · 김동휘 · 권민호 · 최 열
- 143 고강도 비틀림보강철근을 사용한 철근콘크리트 보의 파괴모드
윤석광 · 이수찬 · 이도형 · 이정윤
- 151 초고성능 콘크리트 바닥판과 역T형 강거더의 합성보를 위한 스티드 및 퍼즐스트립 전단연결자에 관한 연구
이경찬 · 조창빈 · 최은석 · 김지상
- 159 철근콘크리트 전단벽의 횡하중-횡변위 관계의 일반화
문주현 · 양근혁
- 171 외부철판이 사용된 DH Beam의 휨거동에 대한 실험 및 비선형해석
문정호 · 오영훈
- 181 기둥-말뚝의 상호작용을 고려한 단일 현장타설말뚝의 철근비 분석
김재영 · 정상섭 · 김장호
- 189 횡 보강된 프리캐스트와 현장타설 콘크리트 합성보의 전단강도
김철구 · 박홍근 · 홍건호 · 강수민
- 201 콘크리트 배합설계를 고려한 구조물의 전과정 CO₂평가 모델
양근혁 · 서은아
- 211 유럽과 국내기준에 규정된 취성파괴 방지를 위한 휨 최소철근량 고찰
박성재 · 강태성 · 문도영
- 219 유용미생물을 이용한 포러스 콘크리트의 장기간 연속호름 실험을 통한 수질정화 효과 검토
박준석 · 김봉균 · 김우석 · 서대석 · 김화중

*이 논문집은 격월간으로 발행되며, 판권은 한국콘크리트학회가 가지고 있습니다.

*이 논문집에 게재된 논문에 대한 토의사항을 2014년 8월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

*논문 전문은 학회 홈페이지(<http://www.jkci.or.kr>)에서 보실 수 있습니다.

발행: 사단법인 한국콘크리트학회

주소: 서울특별시 강남구 테헤란로 7길 22 한국과학기술회관 신관 1009호
우135-703

Tel : 02)568-5984~7 Fax : 02)568-1918 Email : mjh@kci.or.kr

발행인: 정 란

편집인: 김지상

인쇄: 도서출판 씨·아이·알

인쇄일: 2014.4.25

발행일: 2014.4.30

창간일: 1989.10.1

중성지 사용

* 이 학술지는 정부재원(과학기술진흥기금 및 복권기금)으로 한국과학기술단체총연합회의 지원을 받아 출판되었음.

JOURNAL OF THE KOREA CONCRETE INSTITUTE

Vol. 26 No. 2 / April 2014

pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842

CONTENTS

- 109 Flexural Behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete Segmental Box Girder
Qingyong Guo and Sang-Mook Han
- 117 Properties of Alkali-Activated Cement Mortar by Curing Method
Ji-Hoon Kim, Jae-Kyu Lee, and Won-Gil Hyung
- 125 Seismic Experiment of Precast Concrete Exterior Beam-Column Joint Using Bolt Type Connection and Prestressing Method
Dong-Joo Lee, Ju-Dong Lee, Tae-Soo Oh, and Thomas H.-K. Kang
- 135 Seismic Retrofit of School Facilities Using Rapping and Attaching Composite Material
Choon-Wook Park, Dong-Hwi Kim, Min-Ho Kwon, and Yeol Choi
- 143 Failure Modes of RC Beams with High Strength Reinforcement
Seok-Kwang Yoon, Su-Chan Lee, Do-Hyeong Lee, and Jung-Yoon Lee
- 151 Stud and Puzzle-Strip Shear Connector for Composite Beam of UHPC Deck and Inverted-T Steel Girder
Kyoung-Chan Lee, Changbin Joh, Eun-Suk Choi, and Jee-Sang Kim
- 159 Generalized Lateral Load-Displacement Relationship of Reinforced Concrete Shear Walls
Ju-Hyun Mun and Keun-Hyeok Yang
- 171 Experiment and Nonlinear Analysis of DH Beams with Steel Form
Jeong-Ho Moon and Young-Hun Oh
- 181 Analysis of Steel Reinforcement Ratio for Bent Pile Structures Considering Column-Pile Interaction
Jae-Young Kim, Sang-Seom Jeong, and Jang-Ho Jay Kim
- 189 Shear Strength of PC-CIP Composite Beams with Shear Reinforcement
Chul-Goo Kim, Hong-Gun Park, Geon-Ho Hong, and Su-Min Kang
- 201 A Model for Lifecycle CO₂ Assessment of Building Structures Considering the Mixture Proportions of Concrete
Keun-Hyeok Yang and Eun-A Seo
- 211 A Study on the Flexural Minimum Reinforcement for Prevention of Brittle Failure Specified in KCI and EN Codes
Sung-Jae Park, Tae-Sung Kang, and Do-Young Moon
- 219 Investigation on Water Purification Effect Through Long-Term Continuous Flow Test of Porous Concrete Using Effective Microorganisms
Jun-Seok Park, Bong-Kyun Kim, Woo-Suk Kim, Dae-Sok Seo, and Wha-Jung Kim

*This journal is published bimonthly, and the copy right is reserved to the Korea Concrete Institute.

*Any comment or discussion about the contents of this journal can be sent to the Korea Concrete Institute until August 30, 2014. Replies will appear in the issue of October 2014.

*The URL address of the journal is <http://www.jkci.or.kr> where fulltext is available.

Publication : Korea Concrete Institute

Address : Suite 1009, The Korea Science & Technology Center,
22, 7 Gil, Teheran-ro, Kangnam-gu, Seoul 135-703, Korea

Tel : +82-2-568-5984-7 **Fax** : +82-2-568-1918 **E-mail** : mjh@kci.or.kr

Publisher : Lan Chung

Editor : Jee-Sang Kim

Print : CIR

Date of Printing : April 25, 2014

Date of Publication : April 30, 2014

Initial Publication : October 1, 1989

Acid-Free Paper

*This journal was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies(KOFST) Grant funded by the Korean Government.



외부철판이 사용된 DH Beam의 휨거동에 대한 실험 및 비선형해석

문정호¹⁾ · 오영훈^{2)*}

¹⁾한남대학교 건축학부 ²⁾건양대학교 의료공간디자인학과

Experiment and Nonlinear Analysis of DH Beams with Steel Form

Jeong-Ho Moon¹⁾ and Young-Hun Oh^{2)*}

¹⁾Division of Architecture, Hannam University, Daejeon 306-791, Korea

²⁾Dept. of Medical Space Design & Management, Konyang University, Nonsan 320-711, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to evaluate the structural performance of DH beams. DH beam construction method uses thin steel plates as form-works and structural elements. The prefabricated plates and rebars of DH beams were transported to a construction site and erected for casting concrete at the site. In this study, the contribution of steel plates to the flexural strength was evaluated since the plates were expected to play a role as reinforcements. Five test specimens were made for experimental and analytical studies. They consisted of two DH beams for the positive moment test and two DH beams for the negative moment test and a RC beam for the comparison purpose. Test results on DH beams were compared with design equations and the RC beam test result. It was proven that DH beams demonstrated the good flexural behavior showing sufficient strengths and deformation capacities. Flexural strengths, principal strains of concrete, and rebar stresses were evaluated through nonlinear finite element analyses for two test beams. The analyses also showed that steel plates can contribute to the enhancement of flexural strength of DH beams. Based on experimental and analytical studies, it was concluded that steel plates of DH beams can be used as good flexural reinforcements.

Keywords : DH beam, steel form, reinforcement effects, flexural strength, nonlinear finite element analysis

1. 서 론

콘크리트를 사용하는 구조에서 거푸집은 구조형상을 만드는데 필요한 요소이기는 하지만, 비용이나 환경 측면에서는 거푸집의 사용을 최소화하는 것이 바람직하다. 거푸집을 최소화하는 방법으로는 부재를 공장에서 생산하는 PC공법이나 거푸집을 영구적으로 제거하지 않는 공법이 있을 수 있다. 거푸집을 영구적으로 사용하는 공법의 대표적인 예는 슬래브에 테크플레이트 등을 사용하는 방법이 있다.¹⁻⁴⁾ 보에 영구적 거푸집을 사용하는 경우는 철판을 사용하여 공장에서 거푸집을 제작하고, 현장에서 콘크리트를 타설하는 방법이 일반적이다.

이 연구에서는 테크플레이트에서 주로 사용되는 철판으로 거푸집을 제작하고 여기에 철근이 선조립된 상태로 현장에 반입하여 사용하는 DH beam 공법을 연구의 대상으로 하였다. DH beam은 콘크리트 타설을 위한 거푸집

의 역할과 함께 콘크리트가 굳은 후에는 구조체 역할도 함께 할 수 있도록 가공된 철판을 사용하는 보를 말한다. DH beam의 제작을 위해서는 철판 성형기로 얇은 철판을 접어서 Fig. 1과 같이 필요한 형상으로 가공하는 방법을 사용한다. DH beam의 철판은 좌우 측판과 하부판이 연속으로 연결된 형태로 되어 있다. Fig. 2는 제작된 DH beam 철판의 형상을 보이고 있다. 판의 면외 강성을 높이기 위하여 보의 길이 방향으로 판이 요철 형태로 접혀 있는 형상을 하고 있다. 철판의 성형이 완성되면 측압철판(lateral pressure plate)을 가로로 설치하여 콘크리트의 측압을 저항할 수 있도록 하며, 소요 철근도 공장에서 배근하여 현장으로 반출한다.

DH beam은 현장작업에 대한 선행공정 혹은 동시공정으로 제작할 수 있어서 공기를 단축시킬 수 있으며, 현장에서 정밀 제작이 가능하므로 엄격한 품질관리가 가능하다. 그리고 현장 거푸집 제작이 불필요하여 현장 관리가 용이하며, 설치공정에 따른 자재운반이 가능하므로 자재 적치 공간이 필요 없다. 현장에 반입된 DH beam 철판은 Fig. 3과 같이 타워 크레인 등으로 양중 및 조립과정을 거친다. 그리고 보-보 혹은 보-기둥의 접합부에 소요되는 철근을 배근한 후 DH beam과 함께 접합부에 콘크리트를

*Corresponding author E-mail : youngoh@konyang.ac.kr

Received October, 7, 2013, Revised December 25, 2013,

Accepted February 12, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute



Fig. 1 DH plate and rebars

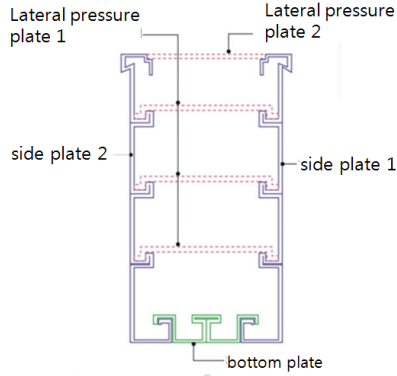


Fig. 2 Shape of DH beam plates



Fig. 3 Erection of DH beam

타설하여 일체화하는 방법으로 시공된다.

DH beam은 철판의 두께 및 요철의 개수 그리고 측압 철판 등을 조정하여 구조체 역할을 할 수 있도록 설계할 수 있다. 그러나 경우에 따라서는 단순히 거푸집 역할만을 하도록 하여 공기단축 및 현장 인력 최소화 등의 목적으로 사용되기도 한다.

2. 연구의 내용 및 목적

이 연구에서는 DH beam의 철판이 구조체의 거동에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 연구는 휨 거동과 전단 거동으로 구분하여 실험 및 해석적 연구를 수행하였으며, 이 논문에서는 5개의 실험체를 대상으로 휨 거동에 대한 분석을 기술하였다. 실험체는 실물 크기로 제작하였으며, PC 공장에서 실험체를 제작하여 실험실로 운반하였다.

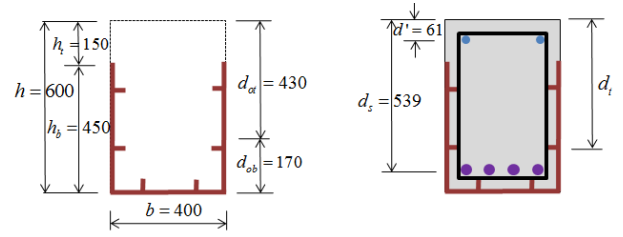


Fig. 4 Section properties (unit: mm)

실험체에 대한 구조해석은 비선형 해석 프로그램을 사용하였으며, 실험 결과의 비교와 함께 DH 판의 효과를 분석하는데 사용하였다.

DH beam은 경간의 길이나 하중의 크기 등에 따라 단면의 크기가 달라지므로 다양한 크기의 제품이 생산되어 사용되고 있다. 따라서 이 연구에서는 현장에서 가장 일반적으로 사용되는 하나의 DH beam을 대상으로 DH 판이 휨강도에 미치는 영향을 분석하였다. DH beam의 설계를 위해서는 단면의 특성을 나타내야 하지만, 콘크리트와 철판의 합성 단면이므로 기호와 치수 등을 Fig. 4와 같이 정리하였다.

DH 판은 경간의 길이나 하중 그리고 평면의 크기 등에 따라 여러 종류가 있으나, Fig. 4에서 숫자로 표시된 치수는 이 연구에서 대상으로 한 DH beam의 치수에 해당한다. 이 연구에서 대상으로 한 DH 철판의 두께는 1.2 mm이며, 요철의 높이는 25 mm에 해당한다.

철근의 휨보강비 ρ_s 및 철근과 DH 판에 의한 휨보강비 ρ_r 은 식 (1)과 (2)와 같이 정의하였으며, 보의 상단(슬래브 측) 표면에서 보강재 중심까지의 거리 d_t 는 식 (3)과 같다.

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd_s} \quad (1)$$

$$\rho_r = \left(A_s + A_{ts} \frac{f_{yt}}{f_{ys}} \right) \frac{1}{bd_s} \quad (2)$$

$$d_t = \frac{A_s f_{ys} d_s + A_{ts} f_{yt} d_{ot}}{A_s f_{ys} + A_{ts} f_{yt}} \quad (3)$$

여기에 사용된 기호는 논문의 후반부에 정리하여 나타내었다.

3. 실험계획 및 실험

3.1 실험계획

DH beam에 대한 휨실험에서는 DH 하부판과 하부돌기 그리고 측판과 측면돌기 등이 휨강도에 기여하는 정도를 평가하고자 하였다. DH 판은 하부돌기와 측면돌기가 콘크리트에 묻혀 있는 상태이므로, 하부판과 측판은 각각

의 돌기를 통하여 합성작용에 기여할 것으로 예상되었다. 실험은 정모멘트 실험체 2개, 부모멘트 실험체 2개 그리고 RC 실험체 1개 등 총 5개로 구성되었다. 정모멘트 실험체는 DH beam이 큰 보로 사용될 때를 대상으로 하였으며, 부모멘트 실험체는 DH beam이 작은 보로 사용될 때를 대상으로 하였다. 따라서 정모멘트 실험체에서는 DH 판이 인장측에 위치하며, 부모멘트 실험체는 DH 판이 압축측에 위치한다. 정모멘트 실험체에서 DH 판이 인장측에 위치하므로 휨모멘트에 대한 기여도가 클 것으로 예상되는 반면에, 부모멘트 실험체에서는 DH 판이 압축측에 있게 되어 압축측 콘크리트를 구속하는 상태로 휨모멘트에 기여를 할 것으로 예상되었다. 부모멘트 실험체는 작은 보를 대상으로 하였기 때문에 큰 보와 만나는 부위에서 부모멘트를 받게 하였다. 이 경우 큰 보-작은 보 접합부에서 DH 판이 거동하는 특성에 대한 분석도 함께 진행하고자 하였다. 따라서 부모멘트 실험체를 제작할 때에는 큰 보의 일부가 부착된 상태로 제작하도록 계획하였다. RC 실험체는 DH beam의 실험 결과와 비교하기 위하여 계획하였다.

실험체 변수 및 실험체 단면 형상은 Table 1과 Fig. 5에 나타내었다. 보의 전체 높이는 600 mm, 슬래브 두께는 150 mm, 실험체의 경간은 6 m를 대상으로 하였다. F1과 F2는 단면의 하부에 각각 3-D22와 5-D25를 인장철근으로 사용하였으며, 상부에는 동일하게 2-D22 철근을 사용하였다. F3과 F4는 부모멘트 실험체이므로 단면의 상부에 각각 3-D22와 5-D25를 인장철근으로 사용하였으며, 하부에는 동일하게 2-D22 철근을 사용하였다. RC 실험체인 F5는 F2와 동일하게 배근하면서 DH 판은 사용하지

않은 실험체이다. 모든 휨실험체는 전단파괴가 발생하지 않도록 D10@150의 전단보강근을 사용하였다. 실험체에 대한 전단강도 평가는 콘크리트 구조설계기준의 방법으로 콘크리트와 보강재의 기여도를 합산하는 방법을 사용하였으며, DH 측판의 기여도는 von Mises 항복강도를 적용하여 전단강도에 대한 기여도를 산정하였다.

실험체 F1과 F2는 주철근의 양이 달라질 때 DH 판의 휨모멘트에 대한 기여 정도를 평가하고자 한 실험체이다. 즉 철근에 의한 보강양이 많을 때와 적을 때에 DH 판의 상대적 휨보강 정도를 평가하고자 하였다. 이를 위하여 두 실험체에 대한 보강비(철근과 DH 판 포함)는 최대철근비의 52%와 79%로 선정하였다. F3 실험체와 F4 실험체도 가력 방향은 다르지만 휨철근의 보강비는 F1 및 F2와 동일하게 하였다. 그러나 F1 실험체와 F2 실험체에서 DH 판은 인장측에 있으며, F3 실험체와 F4 실험체에서 DH 판은 압축측에 있게 된다.

3.2 가력 및 측정

지점간의 거리가 6 m인 휨실험체는 Fig. 6과 같이 부재 중앙부에서 휨모멘트만 작용하도록 2점 가력을 하였다. 정모멘트 실험체(혹은 큰 보 실험체)는 보의 상단(슬래브 측)이 압축응력을 받도록 가력하였으며, 부모멘트 실험체(혹은 작은 보 실험체)는 보의 상단(슬래브 측)이 인장을 받도록 가력하였다. 실험체에 대한 가력은 변위제어 방식으로 하였다. 실험체에서는 철근 및 DH 판에서의 변형률과 부재의 주요 위치에서 변위를 측정하기 위하여 적절한 위치에 LVDT와 변형률게이지를 부착하였다.

3.3 예상강도 평가

재료실험 결과 콘크리트의 평균압축강도는 28.3 MPa이었으며, 철근에 대한 재료실험 결과는 Table 2와 같다. 그리고 DH 판은 철판 제작사에 의해서 제출된 항복강도 205 MPa을 사용하였다.

재료실험 결과는 실험체의 예상강도를 산정하는데 사

Table 1 Flexural test specimens

Name	Test variable	Longitudinal rebar	$\frac{\rho_s}{\rho_{max}}$	$\frac{\rho_r}{\rho_{max}}$
F1	DH(+)-3-D22	2-D22 (top) 3-D22 (bottom)	24%	52%
F2	DH(+)-5-D25	2-D22 (top) 5-D25 (bottom)	52%	79%
F3	DH(-)-3-D22	3-D22 (top) 2-D22 (bottom)	24%	24%
F4	DH(-)-5-D25	5-D25 (top) 2-D22 (bottom)	52%	52%
F5	RC(+)-5-D25	2-D22 (top) 5-D25 (bottom)	52%	52%

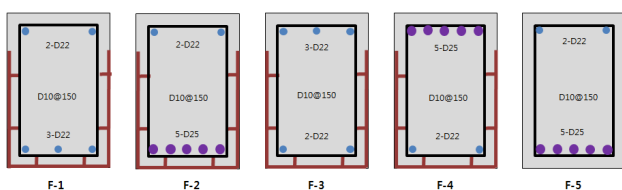


Fig. 5 Specimen sections

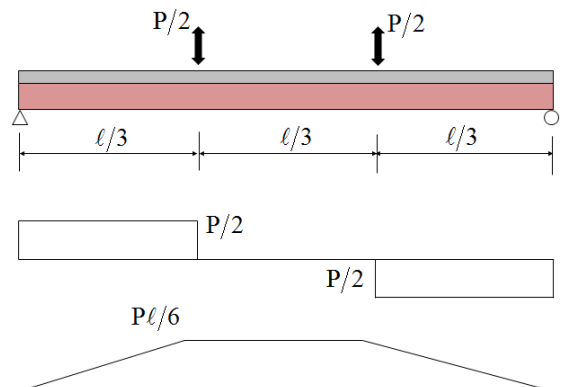


Fig. 6 Applied loads on specimens

용하였다. DH beam의 예상강도는 아래와 같은 방법으로 산정하여, Table 3에 나타내었다.^{5,6)}

$$0.85f_{ck}b\beta_1c + A_s'f_s' = A_s f_{ys} + A_{ts}f_{yt} \quad (4)$$

$$M_n = 0.85f_{ck}ba(d_s - \beta_1c/2) + A_s'f_s'(c - d') + A_s f_{ys}(d_s - c) + A_{ts}f_{yt}(d_t - c) \quad (5)$$

F1 실험체의 경우는 중립축의 높이가 98.3 mm 이므로 DH 판이 모두 인장에 항복하는 것으로 나타났으며, F2 실험체의 경우는 중립축의 높이가 151 mm 이므로 DH 판의 일부가 항복하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 F2 실험체에서 DH 판이 항복하지 않는 부분(Fig. 7(b)에서 50 mm로 표시)의 단면적이 전체 보강재(철근 및 철판)의 1% 정도에 불과하였기 때문에 Table 3의 계산에서는 DH 판 전체가 휨인장에 항복하는 것으로 가정하였다. 이러한 가정은 실험 및 해석적 분석의 과정에서 검증하였다. 이상과 같은 예상강도는 설계의 적절성을 확인하고 실험체의 파괴모드를 확인하기 위한 판단자료로 활용되었다. 실험체의 전단강도에 대한 휨강도의 비는 1.46~2.26배로 나타나고 있으므로 모든 실험체에서 전단파괴가 발생하지 않을 것으로 예상되었다.

Table 2 Material properties of reinforcing bars (unit: MPa)

	Young's modulus	Yield strength	Failure strength
D10	175820	515	622
D22	198647	454	581
D25	205607	485	404

Table 3 Predicted strengths

Name	c (mm)	M _n (KN·m)	V _c (KN)	V _s (KN)	V _n (KN)	P(V _n)/P(M _n)
F1	98.3	468	197	332	529	2.26
F2	151.0	723	197	332	529	1.46
F3	57.6	240	197	332	529	4.40
F4	98.3	501	197	332	529	2.11
F5	98.3	501	197	204	401	1.60

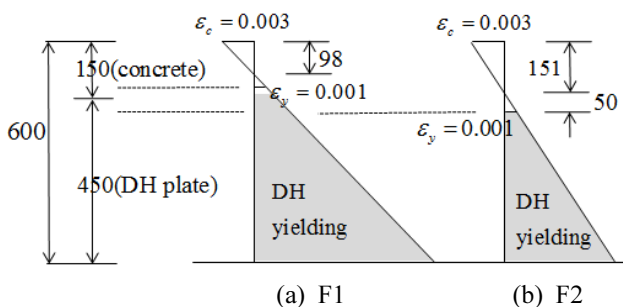


Fig. 7 Strain distribution at nominal strength (unit: mm)

4. 실험 결과

4.1 파괴형상

실험체는 모두 전형적인 휨파괴 형상의 파괴모드를 보였다. 정모멘트 실험체는 DH 측판 및 하부판이 콘크리트와 충분한 합성작용을 하면서 매우 연성적인 거동을 보였다. 최종파괴는 Fig. 8과 같이 압축측 콘크리트에서 압괴가 발생하면서 서서히 강도가 감소하였다. 실험체들은 충분한 연성적인 거동을 보인 후에도 변형이 지속되었다.

부모멘트 실험체는 DH 판이 압축측 콘크리트를 감싸고 있으며, 큰 보가 좌우로 연결되어 있기 때문에 콘크리트가 구속되는 효과를 볼 수 있었다. 실험체의 파괴는 Fig. 9와 같이 인장측에 있는 콘크리트에서 상당한 균열을 보이면서 발생하였다. 부모멘트 실험체가 정모멘트



Fig. 8 Concrete crushing of positive moment test



Fig. 9 Concrete cracks of negative moment test

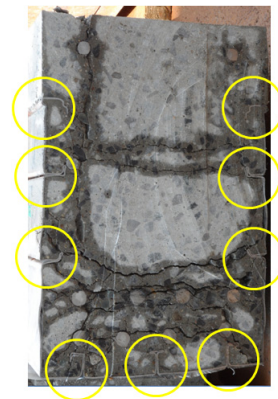


Fig. 10 Beam section by saw-cut

실험체와 다른 점은 큰 보에 의해서 구속된 부분에서는 변형이 작게 발생하였으며, 큰 보-작은 보 접합부에 인접한 부위에서 파괴가 집중되는 형태를 보였다는 것이다. 따라서 중앙부를 중심으로 양측이 강체와 유사한 형태의 변형을 보였다. 부모멘트 실험체 역시 충분히 연성적 거동을 나타내며 큰 변형상태를 지속하였다.

Fig. 10은 실험이 종료된 후 콘크리트 톱으로 중앙부 단면을 절단하여 나타낸 것으로 콘크리트가 타설된 상태 및 균열양상을 보이고 있다. DH 판의 요철이 있는 곳을 동그라미로 표시하였다. 절단된 면을 보았을 때, DH 판의 요철 주변에 콘크리트가 밀실하게 채워져 있음을 알 수 있었다. 콘크리트 충전정도를 확인하기 위해서 2개의 실험체에 대해서 총 5군데를 절단해 보았으며, 대부분 Fig. 10과 유사한 양상을 보였으며 타설에서 문제가 되는 현상은 나타나지 않았다.

4.2 하중-변위 관계

휨 실험체에 대한 하중-변위 관계도에서 실험체 F1, F2, F5를 비교한 결과는 Fig. 11, 실험체 F3, F4, F5를 비교한 결과는 Fig. 12에 나타내었다.

모든 실험체는 20 mm의 변위(경간의 1/300 정도)까지는 탄성거동을 보였으며, 35 mm 정도의 변위(경간의 1/175 정도)에서 항복하기 시작하였다. 그리고 F2 실험체를 제외하고는 모두 경간의 1/30 정도까지 충분한 연성적

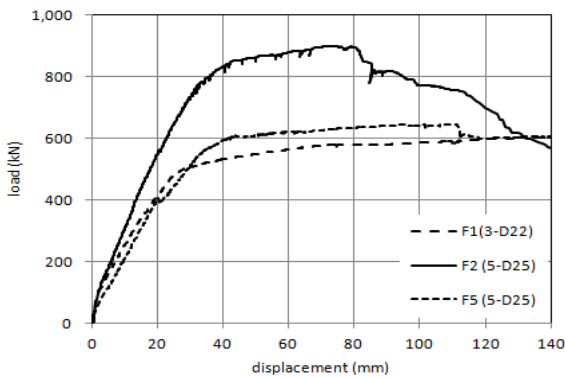


Fig. 11 Comparison of F1, F2 and F5

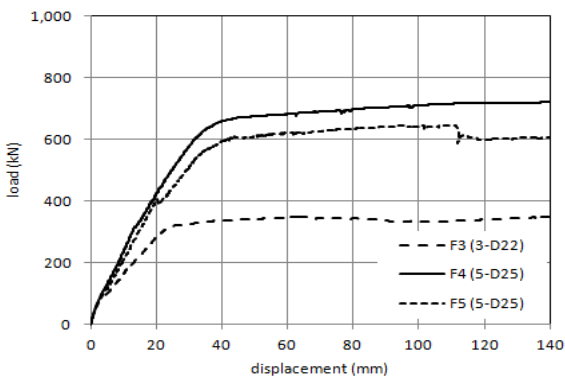


Fig. 12 Comparison of F3, F4 and F5

거동을 보였다.

Fig. 11은 최대철근비에 대한 보강비율이 각각 52%와 79%인 F1과 F2를 RC 실험체인 F5와 비교한 것이다. 실험체 F2와 RC 실험체 F5는 인장철근량은 동일한 반면에 F2에는 DH 판이 사용된 점이 다르다. 따라서 두 실험체 사이의 강도차이는 DH 판에 의한 효과로 판단할 수 있다. 실험체 F1은 3-D22 철근과 DH 판이 사용되었으며, 실험체 F5는 5-D25 철근이 사용된 실험체이다. 하중-변위 관계의 비교를 보면 실험체 F1과 실험체 F5의 강도가 유사하게 나타났다. 따라서 보강철근의 양이 F5에 비하여 1/2 정도인 F1 실험체가 유사한 강도를 보인 것은 DH 판이 충분한 역할을 하였기 때문인 것으로 판단되었다.

Fig. 12는 F3과 F4를 F5와 비교한 것이다. 실험체 F3과 F4는 부모멘트 실험체이며 F5 실험체는 정모멘트 RC 실험체이다. 이 때 F4와 F5는 모두 인장철근량은 동일하므로, 두 실험체에서의 차이는 DH 판이 압축측에 있을 때 휨 거동에 미치는 영향을 간접적으로 평가할 수 있다. 실험체 F4와 실험체 F5는 매우 유사한 거동을 보였으며, F4의 강도가 약간 크게 나타났다. 따라서 DH 판이 압축측에 있는 경우 약간의 강도 증가가 발생할 수도 있음을 알 수 있다.

4.3 하중-변형률 관계

각 실험체의 변형률은 DH 측판에 보 높이를 따라 부착한 변형률게이지를 사용하여 측정하였으며, 실험체 F1과 F2에 대한 측정 결과를 Fig. 13과 14에 나타내었다.

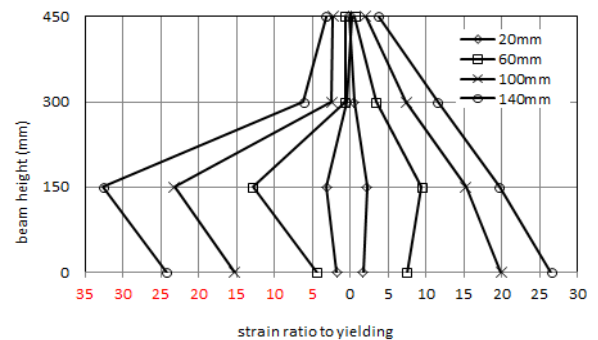


Fig. 13 Strain distribution at DH plates (F1)

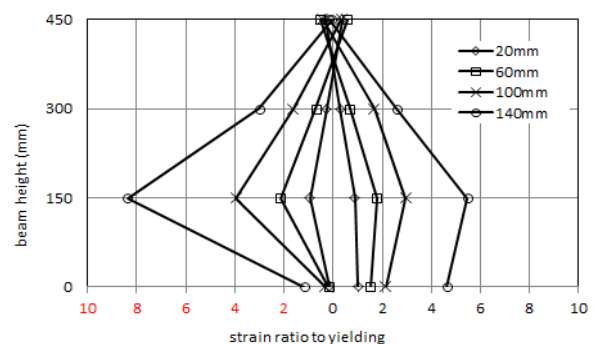


Fig. 14 Strain distribution at DH plates (F2)

Fig. 13과 14는 중앙부 처짐값이 20 mm, 60 mm, 100 mm, 140 mm일 때 DH 판 변형률 값을 나타낸 것이며, DH 판의 변형률은 항복변형률에 대한 비율로 나타내었다. DH 판은 항복강도가 205 MPa인 철판을 사용하였으므로 항복변형률 값을 0.001로 산정했다.

그림에서 세로축은 보의 높이를 나타내며, 그 값이 영인 곳의 값은 DH 하부판에 부착된 게이지에서 측정된 값이다. 그림에는 가로축의 원점을 중심으로 좌측과 우측에 각각 좌측 및 우측의 DH 판 변형률을 나타내었다. 실험체의 하중-변위 관계 그림을 보았을 때, 35 mm 정도의 처짐값에서 부재의 항복이 발생한 것으로 보여졌기 때문에 변위가 20 mm와 60 mm 사이 정도에서 부재가 항복한 것으로 여겨진다.

Fig. 15는 F1 실험체에서 DH 하부판과 인장철근에서의 하중-변형률 관계를 보이고 있다. Rebar-1은 항복(항복 변형률 = 0.002) 이후에 게이지 손상으로 더 이상의 측정을 하지 못하였지만, 나머지 게이지들로부터 DH 하부판과 인장철근이 충분히 항복했음을 알 수 있다. F2 실험체에 대해서도 동일한 경향을 보였다.

변형률분포 그림들에서 알 수 있는 것처럼 DH 판은 충분한 합성거동을 하면서 항복하였으며, 상당히 큰 변형이 발생할 때까지 연성적인 거동을 하였다. 그러나 보 높이에 따른 변형률 분포를 보았을 때 F1과 F2의 좌측 DH 하부판의 변형률이 측판의 변형률보다 낮게 나타나는 경향을 보였다. 그 이유로는 변형률 게이지는 국부적인 부분의 변형률을 측정하기 때문이기도 하며, 큰 변형이 발생한 후에는 콘크리트의 균열로 인하여 하부판 위

치에서 콘크리트와 하부판 사이에서 부분적으로 미끄러짐이 발생했을 수도 있다. 그러나 모든 경우에서 DH 판의 변형도는 항복값을 넘었기 때문에 충분한 합성 거동이 발생한 것으로 판단할 수 있다.

Table 4에는 각 실험체에 대한 예상강도와 실험강도, 예상강도에 대한 실험강도의 비율, 그리고 RC 실험체인 F5 실험체의 강도에 대한 비율을 나타내었다. 실험강도는 변위 80 mm에서의 하중을 읽은 값이다. 실험체 상호간의 강도비교를 위해서는 기준점이 필요하므로 이 연구에서는 부재가 항복한 후 상당한 변형(약 2.5배 정도)이 진행된 상태의 비교를 위한 기준점으로 선정된 것이다. 모든 실험체는 철근의 변형경화 등의 이유로 예상강도를 크게 상회하는 실험강도를 보였다. 표에서 알 수 있는 것처럼 F1~F4 실험체는 모두 예상강도 보다 20%를 상회하는 강도를 보였으며, F5 실험체에 비해서도 충분한 강도를 보였다. F5 실험체와 동일한 인장철근을 가진 F4는 약 10% 정도의 강도 증가를 나타내었으며, 인장철근량은 동일하지만 DH 판이 추가로 배근된 F2 실험체는 40% 이상의 강도증가를 보였다. 따라서 DH 판이 인장측에 있을 경우에는 상당한 강도 증가가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

5. 구조해석

5.1 재료의 특성

유한요소해석은 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 콘크리트, 철근, 철판 각각에 대한 재료의 비선형 특성을 반영하여 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 midas FEA로 하였다.⁷⁾ 해석에서 콘크리트에 대한 재료모델은 주변형률을 산정하여 그 값을 일축방향 응력-변형률 관계에 적용하는 방법인 전변형률 균열모델(total strain crack model)을 사용하였다. 전변형률 균열모델에서 콘크리트의 균열각은 초기 균열에서 발생한 균열각이 변하지 않는 고정균열각 모델(fixed crack model)을 사용하였으며, 콘크리트의 인장강도는 무시하였다. 콘크리트의 평균 압축강도는 28.3 MPa이며, 전단지연계수(shear retention coefficient)는 0.2를 사용하였다.

철근과 DH 판 그리고 콘크리트에 대한 재료모델은 재료실험의 값이며, Fig. 16 및 17과 같다. 철근에 대해서는 항복 후 변형경화를 재료실험의 결과에 따라 고려하였지만, DH 판의 변형경화는 고려하지 않았다. 콘크리트의 경우에는 최대응력 후의 거동을 실험에서 찾을 수 없었으므로, 최대응력 후에는 Fig. 17과 같은 기울기로 응력이 감소하는 것으로 가정하였다.

5.2 해석모델

구조해석에서는 DH 판은 판요소, 콘크리트는 입체요

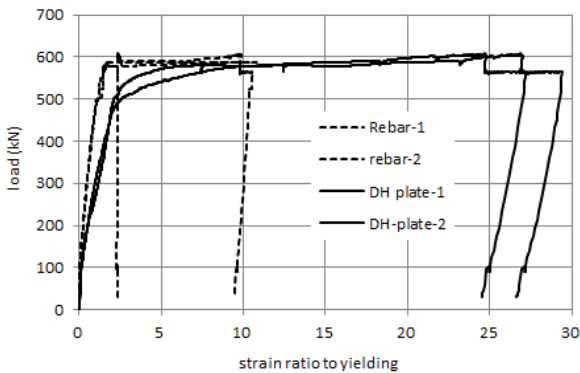


Fig. 15 Rebar and DH plate strain ratios (F1)

Table 4 Comparison test strength to predictions for flexural tests

Name	Predicted strength (kN)	Test strength (kN)	Test / predicted	Strength ratio to F5
F1	468	588	1.26	-
F2	723	897	1.24	1.40
F3	240	333	1.39	-
F4	501	712	1.42	1.11
F5	501	643	1.28	-

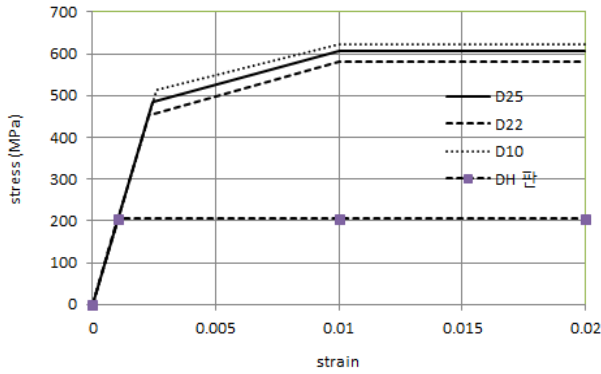


Fig. 16 Stress-strain relation of reinforcements

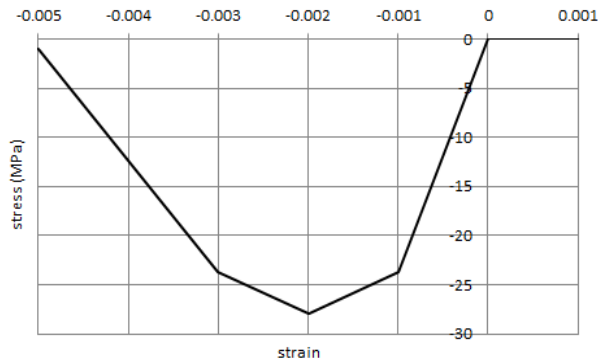


Fig. 17 Stress-strain relation of concrete

소, 그리고 철근은 콘크리트 요소에 매립되는 요소 (embedded element)를 사용하였다. 콘크리트와 철근 그리고 콘크리트와 DH 판 사이의 미끄러짐은 발생하지 않는 것으로 가정하였다. 실험체는 부재 중앙을 중심으로 좌우 대칭이며, 부재 축을 따라 앞뒤로도 대칭이므로, Fig. 18과 같이 1/4만을 모델하여 해석하였다.

Fig. 19와 20에는 콘크리트, DH 판 및 철근을 유한요소로 모델한 그림을 보여준다. 실험체에 대한 가력은 부재 중앙부의 처짐을 대상으로 변위제어 방식을 사용하였으며, 응력집중을 피하기 위하여 Fig. 19처럼 하중이 가해지는 구역의 범위를 넓혀서 가력하였다.

DH beam에 대한 구조해석의 목적은 그 첫 번째가 설계식 및 실험에 의한 분석에 해석적 분석을 추가하여 보다 심도있게 DH beam의 거동을 이해하는 것이며, 두 번째는 DH 판의 휨 거동에 대한 기여도를 평가하는 것이다. 이 연구에서 실험과 해석을 비교한 목적은 해석과 실험이 정교하게 맞는지 확인하고자 한 것이 아니라 DH beam의 거동을 보다 더 잘 이해하는데 있었기 때문에 실험과 해석의 결과를 보다 더 정확하게 맞추려는 노력에 많은 시간을 기울이지는 않았다. 따라서 가능한 유한요소 해석에 필요한 각각의 변수에 대한 가정은 최소화하였다.

Fig. 21에는 F1과 F2 실험체에 대한 비교를 나타내었다. DH beam에 대한 구조해석에서는 부재의 항복전 강성을 약간 과대평가하였으며, 최대강도는 거의 유사하게 예측하였다. 논문에 포함하지는 않았지만 그 밖의 실험체에서는 구조해석이 강도와 강성을 조금씩 과대평가하

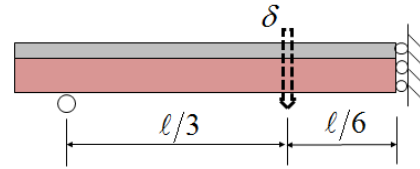


Fig. 18 1/4 model

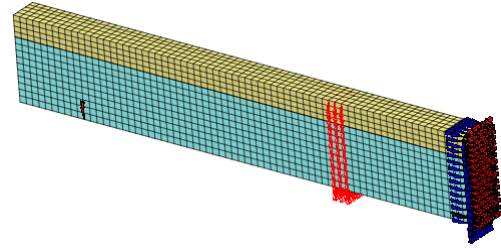


Fig. 19 Concrete model

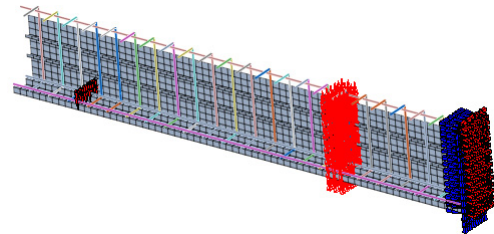


Fig. 20 DH plate and rebar model

는 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 RC 실험체인 F5 실험체에서도 동일하게 나타났다.

Fig. 22는 비선형해석에서 얻어진 DH 측판에서의 측방향 변형률을 나타낸 것이다. 그림으로부터 DH beam의 측판은 휨거동에 충분히 기여하고 있음을 알 수 있다. 또한 설계식의 가정을 나타내는 Fig. 7과 실험 결과를 나타낸 Fig. 13 및 14과 비교해 보았을 때에도 동일한 경향을 확인할 수 있다. 세 가지 그림 모두에서 DH 측판의 변형률은 중립축으로부터의 거리에 비례하는 형상을 보이면서 휨거동에 기여함을 보였다고 할 수 있다. 설계 가정에 비하여 실험이나 비선형해석의 중립축이 설계가정에 비하여 약간씩 하향 이동한 이유는 변형경화 현상을 고려하였는가에 기인한다. 설계가정에서는 변형경화를 고려하지 않는 반면에, 실험과 해석에는 변형경화가 반영되어 있으므로 중립축이 하향 이동하여 나타난 현상으로 사료된다.

F1 실험체와 F2 실험체를 대상으로 DH 판이 있는 경우와 없는 경우를 대상으로 휨강도, 콘크리트의 주인장 변형도, 철근의 응력도 등을 비교하여 Fig. 23~25에 나타내었다.

콘크리트의 주인장변형도와 철근의 응력도는 하중점에서 단면의 연단부 값을 나타낸 것이다. Fig. 23은 DH 판이 휨강도에 미치는 영향을 보여준다. DH 판이 없는 경우에 대한 DH 판이 있는 경우의 강도 차이는 F1에서

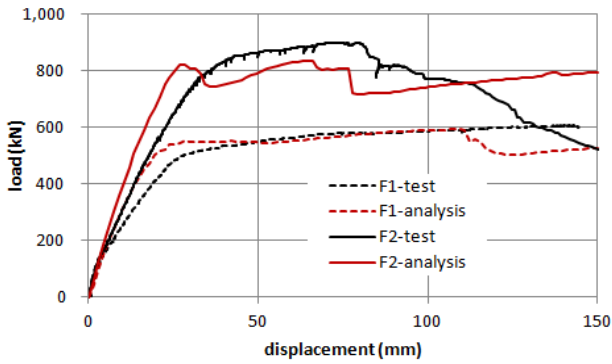


Fig. 21 Comparison of strengths

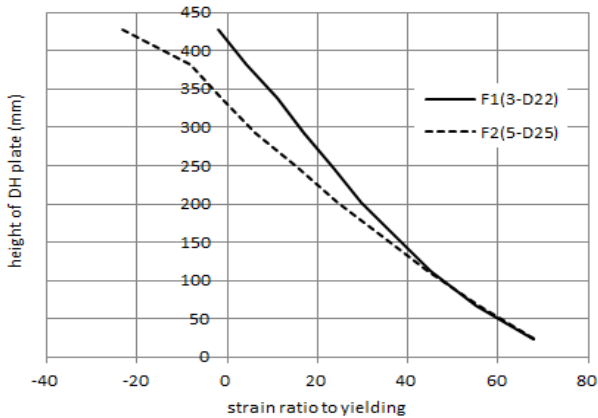


Fig. 22 Strain distributions at DH plates

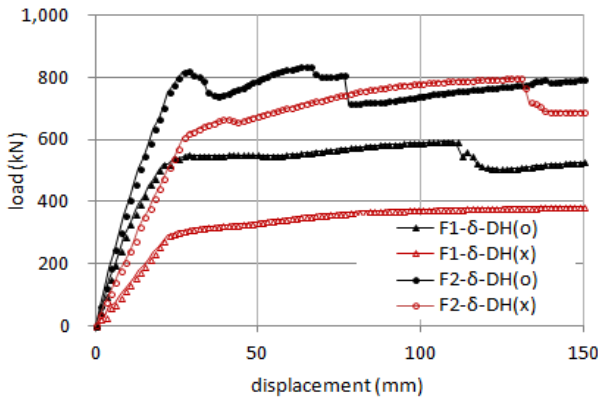


Fig. 23 Comparison of deflections

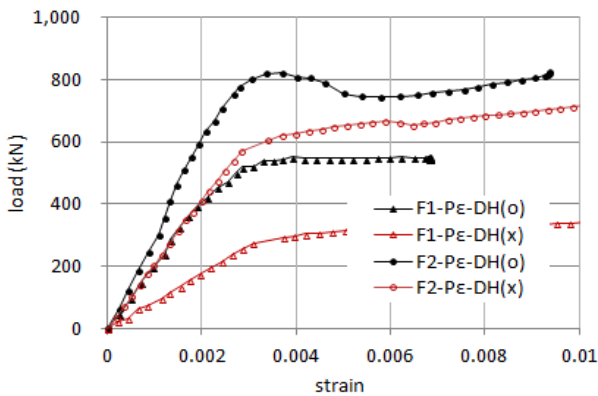


Fig. 24 Comparison of principal tensile strains

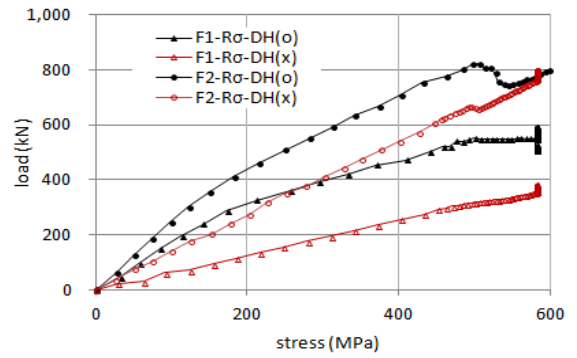


Fig. 25 Comparison of rebar stresses

더 크게 나타났다. 이 결과로부터 보강철근량이 상대적으로 작을수록 DH 판이 휨강도에 미치는 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

그리고 Fig. 24와 25는 DH 판이 있는 경우에 같은 하중에서 DH 판이 없는 경우에 비해서 콘크리트 및 철근이 받는 변형률과 응력이 낮게 나타남을 보여준다. 즉 DH 판이 휨강도에 기여하기 때문에 상대적으로 콘크리트와 철근에서는 변형이 더 적게 발생한 것이다.

6. 결 론

이 연구에서는 DH beam의 철판이 구조체의 거동에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 실험과 해석 연구를 수행하였으며, 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) DH beam에 대한 실험에서 DH 판은 콘크리트와의 충분한 합성거동을 보였으며, 실험 후 실험체 단면을 톱으로 절단해 보았을 때에도 콘크리트가 밀실하게 채워져 있었음을 확인할 수 있었다.
- 2) DH beam 실험체들은 항복 이후에도 충분한 연성 거동을 보이면서 휨과괴 형상으로 파괴되었다.
- 3) 변형률은 중립축으로부터의 거리에 비례한다는 설계식의 가정, 실험 결과로 얻어진 변형률, 그리고 비선형해석에서 얻어진 변형률 등에 대한 분석을 통해서 DH beam의 하부판과 측판은 부재의 휨거동에 충분히 기여함을 보였다.
- 4) DH 판이 인장측에 위치한 실험체에서는 철근비가 증가하여도 DH 판 대부분의 단면이 인장에 항복하는 것으로 나타났으며, DH 판이 압축측에 위치한 실험체에서는 DH 판이 콘크리트로부터 분리되지 않고 콘크리트를 구속하는 효과를 보였다.
- 5) DH beam 실험체를 RC 실험체와 설계식, 실험, 그리고 비선형해석의 관점에서 비교해 보았을 때, DH 판의 인장력에 대한 기여도는 철근과 동일한 방법으로 산정할 수 있을 것으로 사료된다.
- 6) 비선형해석을 통하여 DH 판 자체가 휨강도에 기여하는 정도를 분석하였으며, 그 결과 DH 판이 있는 경우에는 철근 및 콘크리트의 변형을 감소시키면서 휨강도에 기여함을 보였다.