

스테인레스 강섬유를 이용한 고성능 영구거푸집의 재료 및 구조적 거동특성에 관한 연구

심종성¹⁾·오홍섭²⁾·주민관^{1)*}·김길중¹⁾·신현양³⁾

¹⁾한양대학교 토목공학과 ²⁾진주산업대학교 토목공학과 ³⁾삼성건설 토목기술팀

(2005년 5월 16일 원고접수, 2005년 11월 1일 심사완료)

Material and Structural Characteristics of High Performance Permanent Form Using Stainless Steel Fiber

Jong-Sung Sim¹⁾, Hong-Seob Oh²⁾, Min-Kwan Ju^{1)*}, Kil-Jung Kim¹⁾, and Hyun-Yang Shin³⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Jinju National University, Seongnam 660-758, Korea

³⁾Samsung Engineering and Construction, Jinju 463-721, Korea

(Received May 16, 2005, Accepted November 1, 2005)

ABSTRACT

Nowadays, the general stripping work of form has brought some problems; increase of total constructing cost resulted from the man-dependent form work procedure and environmental issues by wasting the debonded form. In this study, to effectively reduce unnecessary cost and resolve the environmental problems caused by these kinds of reason, a permanent form method using stainless steel fiber was introduced then its material and structural characteristics were evaluated. In the case of material characteristic, the permanent form had a good ductile behavior in the result of flexural test of the permanent form panel and pull-out test of insert bolt which is installed in the permanent form and perfect bonding capacity with a field concrete. In the case of structural characteristic, compressive and tensile behavior of the permanent form was evaluated. It also showed a good structural behavior in the view of load-deflection relationship, crack patterns and additional strengthening effect.

Keywords : stainless steel fiber, material and structural characteristic, permanent form, ductile behavior, strength effect

1. 서 론

건설공사에서의 거푸집 탈형작업은 콘크리트 구조물의 시공에 있어 품질을 결정짓는 주요 공정 중 하나이며, 콘크리트 구성원가의 약 20~40%를 차지하고 있는 고비용 공정이다. 최근까지 건설현장에서의 거푸집 공정은 거푸집의 설치와 탈형작업에 의한 공기연장 및 인건비 상승에 따른 추가적인 비용소모를 발생시켜왔다. 또한, 탈형 후 거푸집 폐자재 폐기에 따른 심각한 환경문제를 유발시켜왔다. 그러나 최근 이와 같은 문제점을 해결하고자 비탈형 영구거푸집 적용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다²⁾.

현재까지 개발, 사용되고 있는 영구거푸집의 경우는 주로 두께가 80~100mm인 철근콘크리트 부재로서 영구거푸집에 의한 추가적인 사하중 증가로 인하여 제작 및 현장 시공성에 큰 어려움이 있는 것이 사실이다. 따라서, 고

강도 및 고내구성을 보유한 박판의 영구거푸집의 개발은 노동력 절감 및 공기 단축에 의한 비용절감 효과, 가설 후의 미관측면 및 건설폐자재의 양산 억제 등과 같은 기존 비탈형 영구거푸집이 보유한 이점 외에 고성능의 영구거푸집 자체가 보유한 특성으로 인하여 영구거푸집을 사용한 구조물의 추가적인 성능향상 효과를 기대할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 스테인레스 강섬유를 이용한 비탈형 영구거푸집의 재료 및 구조적 특성을 실험적으로 분석함으로써 본 공법의 현장 적용성을 분석하고자 한다.

2. 연구 동향

일본의 경우는 대형 단일 거푸집, PC기둥 및 Half PC기둥을 쓰고 있으며, 벽체의 경우는 PC벽체가 주로 적용되고 있다. 보는 대형 단일 거푸집과 부분 PC부재가 채택되고 있으며, 슬래브는 70~80%의 현장이 Half PC부재 위에 표면외장처리 콘크리트를 타설하는 일체화 공법을 사용하고 있다. 철골의 경우는 지상 또는 공장에서 선 조

* Corresponding author

E-mail : mkju@ihanyang.ac.kr

©2006 by Korea Concrete Institute

립하여 시공하고 있다.

독일의 경우는 일본과는 달리 주로 대형 거푸집을 이용하여 벽체와 슬라브를 분리 타설하는 현장 타설 방법이 주를 이루고 있다. 벽체는 대형 패널, 슬라브는 판 형식(table form) 또는 슬라브를 이용한 Half 슬라브 공법을 채택하고 있으며, 계단의 경우 거의 전 현장에서 PC계단을 적용하고 있다.

이와 같이 선진국에서는 인력 절감형 공법과 기계화 시공을 통한 방법에 최대의 관심을 두면서 현장타설과 부분 PC 등을 복합화 시키는 기술개발에 주력해 왔으며, 앞으로 이러한 방향으로의 기술개발이 계속될 전망이다.

국내의 경우 일반적으로 이러한 선진국형 거푸집공법의 적용이 보편화되어 있으나 최근 거푸집 탈형작업에 따른 시공의 비효율성을 줄이고자 비탈형 영구거푸집 공법의 현장적용성에 관한 연구가 다양한 방식으로 진행되고 있다⁴⁾.

3. 고성능 영구거푸집의 소개 및 특성

3.1 고성능 영구거푸집의 개요

본 연구에서 적용된 고성능 영구거푸집의 형식은 2,000 × 1,000 mm의 요철 타입이며 유효두께가 50 mm인 박판형식이다. 또한 다양한 크기의 영구거푸집의 조립을 위해 거푸집 내부에 인서트를 매설하여 현장조립이 가능하게 하였다.

Figs. 1, 2는 고성능 영구거푸집을 나타내고 있다. 고성능 영구거푸집의 재질은 모두 스테인레스 강섬유로 보강된 고강도 모르타르이며, 보통 콘크리트에 비해 건조수축이 작고 동결융해, 탄산화, 염화물 침투, 마모 등에 대한 저항성이 우수하다. 또한 요철부와 인서트는 후 타설 콘크리트와의 부착성능을 향상시킬 목적으로 성형되었다²⁾.

3.2 제조 순서

Fig. 3은 고성능 영구거푸집의 제조공정이다. 전체적인 공정은 재료의 수취검사, 배합, 슬립프 및 공기량 등의 사전 품질검사, 출하검사의 과정으로 구성된다.

3.3 고성능 영구거푸집의 배합 및 물성치

고성능 영구거푸집의 표준배합 및 물성치는 Tables 1 과 2에 나타내었다.

Table 1 Standard mixing proportion

W/C ratio (%)	Air (%)	Unit volume(kg/m ³)			High range water reducing agent (P×%)	Shrink reduction agent (P×%)	Stainless steel fiber (vol×%)
		Water	Interlocking agent Cement	Sand			
24.0	3±1	192	696	104	1342	2.0	2.0

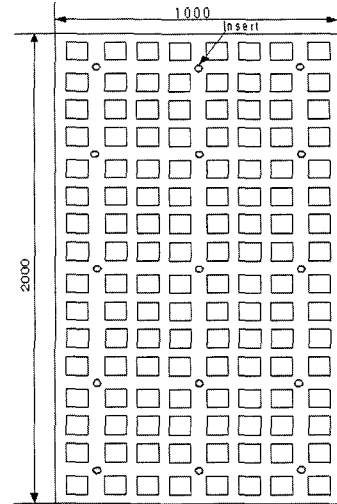


Fig. 1 General shape of HPPF

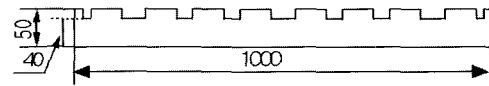


Fig. 2 Cross section of HPPF

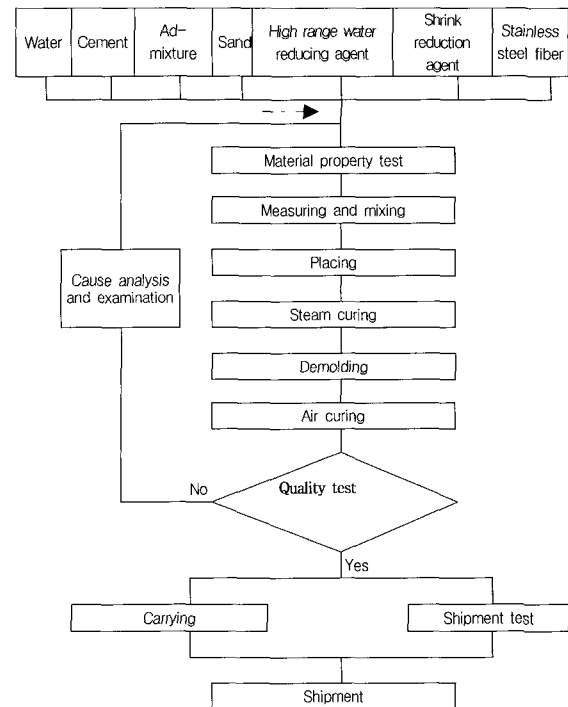


Fig. 3 Manufacturing procedure of HPPF

Table 2 Material strength of HPPF

Section	Tensile strength	Compressive strength	Elastic modulus
High performance mortar	-	80 MPa	35,000 MPa
Stainless steel fiber	900 MPa	-	-

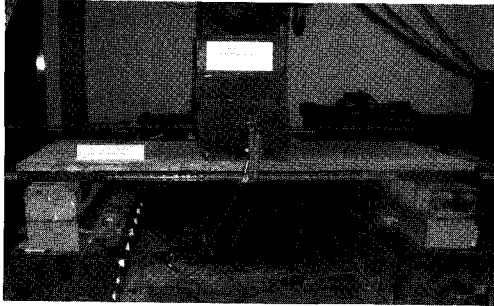


Fig. 4 The setup of flexural test

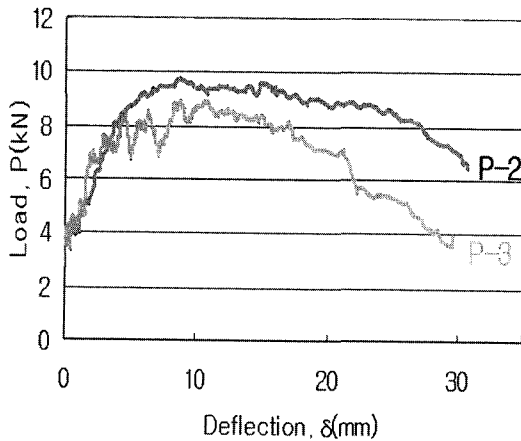


Fig. 5 Load-deflection relationship of HPPF panel

4. 현장적용성 분석 실험

영구거푸집의 현장적용성 분석을 위하여 본 연구에서는 재료 및 구조적 특성 실험을 실시하였다. 재료특성 실험으로는 영구거푸집 패널 휨 재하실험, 인서트 인발시험 및 2년 전단시험이 수행되었으며, 구조실험으로는 휨 거동상태에서의 영구거푸집의 압축단 및 인장단 적용부에서의 구조특성을 분석하는 실험이 수행되었다²⁾.

4.1 고성능 영구거푸집 패널 휨 재하시험

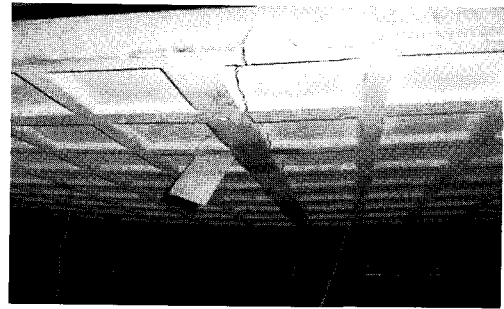
4.1.1 실험 개요

패널 휨 재하시험은 고성능 영구거푸집 패널에 정적하를 가함으로서 박판 거푸집으로서의 충분한 재료특성을 발휘하는지 분석하고자 하는 실험이다.

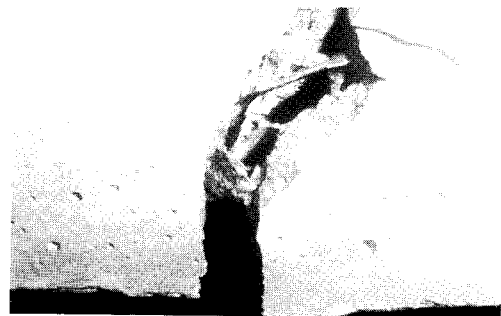
총 3개의 영구거푸집 패널 시험체에 대한 정적 휨 성능 평가를 위하여 정적 하중재하는 250 kN 용량의 하중가력

Table 3 Maximum load and strain of HPPF panel

Specimen	Maximum load(kN)	Maximum deflection(mm)	Nominal flexural strength(MPa)
P-2	9.8	29.6	11.03
P-3	8.8	30.7	9.9



(a) Penetration crack of mid-span



(b) Crack bridging effect of stainless steel fiber

Fig. 6 Crack and failure shape of HPPF

기를 사용하여 순지간은 1,500 mm이고 4점 휨 재하로 실시되었으며, 하중재하 속도는 초당 0.05 mm씩 변위제어를 실시하였다. 중앙부 거동특성을 분석하기 위하여 변위계를 설치하였으며 균열 및 전체 파괴 양상은 육안으로 관찰하였다. Fig. 4는 실험전경을 보여주고 있다.

4.1.2 실험 결과 및 분석

Fig. 5는 영구거푸집 시험체의 정적 휨 재하시 구조거동을 보여주고 있다. 총 3개 시험체 중 하중 민감도 측면에서 비교적 합리적 경향을 보인 2개의 시험체에 대해 분석하였다(Table 3). 실험 결과 평균 최대하중은 9.3 kN을 나타내었으며 이 때의 평균 휨 강도는 10.5 MPa를 나타내었다. 거동양상은 전반적으로 파괴 시까지 강섬유 혼입에 따른 충분한 연성거동을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 패널시험체의 균열 및 파괴양상을 보여주고 있다. 전체적인 파괴거동은 일반 탄성체와 유사한 거동을 보였으나, 내부에 혼입된 스테인레스 강섬유가 최종 파괴시 까지 임계균열부에 대해 크랙 브리징(crack bridging) 효과를 발휘하고 있음이 분석되었다³⁾.

4.2 인서트 인발시험

4.2.1 실험 개요

본 실험은 콘크리트 타설전 거푸집을 고정하고 타설 후 모체콘크리트와의 일체성을 확보하기 위하여 거푸집에

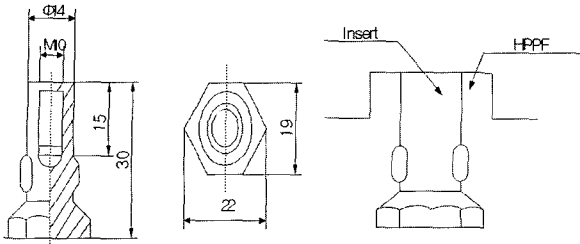


Fig. 7 Shape of insert

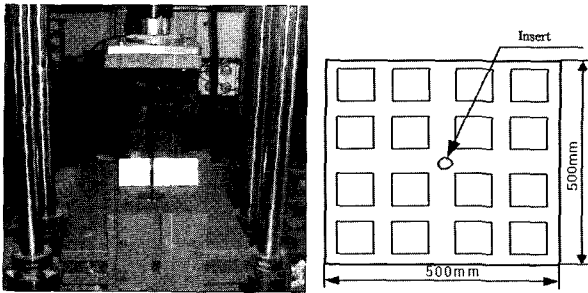


Fig. 8 Test setup and shape of the specimen

매설된 인서트의 인발력을 분석하고자 하는 실험이다. 실험은 중앙부에 인서트가 삽입된 500×500 mm 크기의 영구 거푸집을 재단하여 수행하였으며 고인장 인장 로드를 시험체의 인서트와 250 kN 용량의 하중가력기에 연결하여 인발시험을 실시하였다. 인발하중은 편심이 작용하지 않는 수직하중을 가하였으며 하중은 초당 0.005mm의 재하속도로 변위제어를 실시하였다. Figs. 7과 8은 각각 인서트와 인서트 인발시험 전경을 나타낸다.

4.2.2 실험 결과 및 분석

Fig. 9에 보이는 것처럼, 파괴양상은 콘 형태의 전형적인 인발파괴를 나타내었다. 균열은 약 2kN에서 인서트 주위로 초기 균열이 형성된 후 파괴 시까지 서서히 진전되는 양상을 나타내었다. 최종적인 인발파괴 시, 인장 로드의 미끌림 현상은 발생하지 않았으며 인서트 주변에 다수의 임계균열이 진전되었음에도 충분한 연성거동을 보인 후 파괴되었다. 파괴 콘 형상은 Fig. 10 처럼 약 40°로 형성되었으며, Fig. 11은 최종 인발파괴 시험체의 하중-변위곡선을 보여주고 있다. 약 2kN과 12kN하중지점에서 연성화가 진행되었으며, 약 23kN에서 최종 인발파괴 되었다.

Table 4는 파괴시 최대 인발강도를 실험적인 측면과 이론적인 측면에서 분석한 표이다. 해석이론은 소형 앵커볼트에 대해 ACI 349-90에 제시되어 있는 45°원추형 무근 콘크리트 파괴방법에 의거한 인발강도식 식 (1)과 ACI 349-01에 제시되어 있는 3.5°피라미드 파괴형상 방법 식 (2)에 의거한 인발강도식을 적용하였다⁹⁾.

$$N_b = 4 \sqrt{f_c} \pi h_{ef}^2 (1 + d_n/h_{ef}) \quad (1)$$



Fig. 9 Punching failure of insert

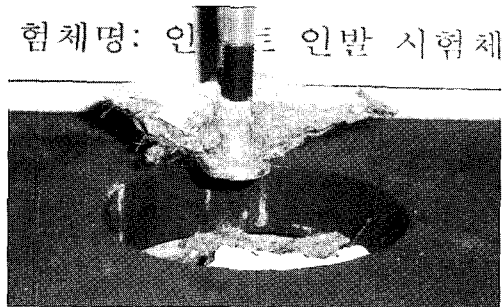


Fig. 10 Pull-out failure of insert

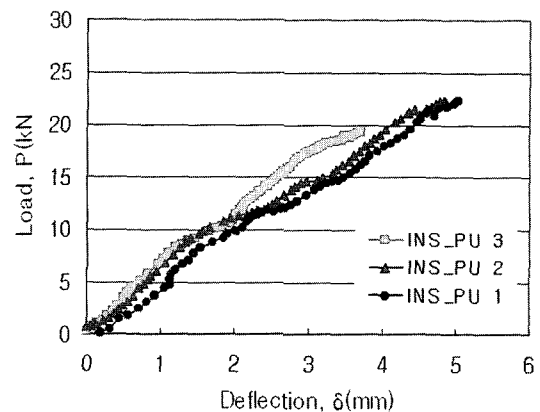


Fig. 11 Load-deflection relationship curve

여기서, f_c = Compressive strength of concrete(psi)
 d_n = Dia. of head of anchor bolt(in)
 h_{ef} = Effective installed depth of the bolt(in)

$$N_b = 1.25k \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} \quad (2)$$

여기서, k=24(head stud or head of anchor bolt)

1.25= In the case of no crack condition

해석 결과, 식 (1)의 경우 실험값이 해석값에 비해 약 76% 큰 것으로 관찰되었으며, 이는 이론적인 인발 파괴 각이 45°로 제한된 것과 강섬유에 의한 인장 증대 및 균열 저항 능력이 계산치에 반영되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 이에 비해 식 (2)의 경우, 실험파괴각이 약 3.5°

로 유사하였으며 피라미드 파괴형상을 나타내었기 때문에 해석 결과와의 오차가 약 25%정도를 보인 것으로 평가되었다. 따라서 본 인서트의 인발강도 해석 시 ACI 349-01에 제시되어 있는 인발파괴 규정에 의거하여 해석하는 것이 보다 바람직한 것으로 분석되었다.

4.3 2면 전단시험

4.3.1 개요

2면 전단시험은 고성능 영구거푸집과 콘크리트 간에 충분한 일체성이 확보되는지의 여부를 분석하고자 하는 실험이다. 시험체에 균일한 2면 전단하중을 가력하기 위하여 특수 제작된 가압판을 설치하였다. 시험변수로는 일반 콘크리트로 이루어진 기준시험체(S_CON) 및 인서트가 삽입된 시험체(S_INS)와 인서트가 매설되지 않고 양면을 영구거푸집만으로 접합한 시험체(S_NO-INS)로 구분하였다. 하중은 초당 0.001 mm의 변위제어를 실시하였으며, Fig. 12는 실험전경을 보여주고 있다.

4.3.2 실험 결과 및 분석

S_CON 시험체의 2면 전단강도는 2.5 MPa로 측정되었으며 S_NO-INS 시험체의 전단강도는 1.3 MPa, S_INS 시험체는 2.5 MPa의 전단강도를 나타냈다.

Fig. 13은 각 시험체별 하중-변위관계를 나타낸 그림이다. 변수 시험체의 경우, 서로 유사한 구조거동을 보였으나 S_CON 시험체에 비해 다소 취성적인 파괴를 보인 것으로 나타났다. 이것은 단일 인서트에 대한 시험결과로서 다수의 인서트 및 앵커볼트가 복합적으로 작용할 경우 충분히 유효한 거동특성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다(Table 5). 파괴양상을 살펴보면, 시험체 모두 가압판이 끝나는 부분에서 균등한 초기균열을 보였다. 변수시험체의 경우, 접합면에서의 전형적인 전단파괴를 나타내었으며 두 계면은 파괴시 동시에 탈락되는 양상을 나타내었다(Fig. 14).

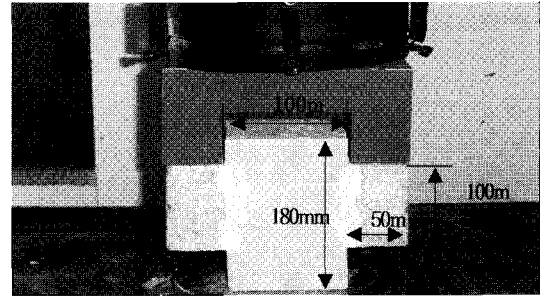
4.4 영구거푸집의 구조거동 시험

Table 4 Maximum pull-out load of insert

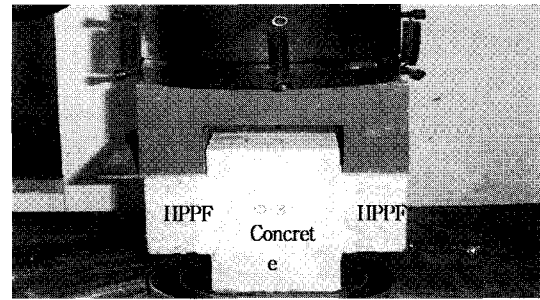
Specimen	Maximum pull-out load(kN)			Maximum displacement(mm)
	Exp.	Eq.(1)	Eq.(2)	
INS_PU 1	22.8	12.3	18.4	5.6
INS_PU 2	22.6	12.3	18.4	5.3
INS_PU 3	19.3	12.3	18.4	4.3

Table 5 Shear resistance of two-surface shearing specimen

Specimen	Shear strength(MPa)
S_CON	2.5
S_No-INS	1.3
S_INS	2.5



(a) S_INS



(b) S_NO-INS

Fig. 12 Variable specimen of two-surface shearing test

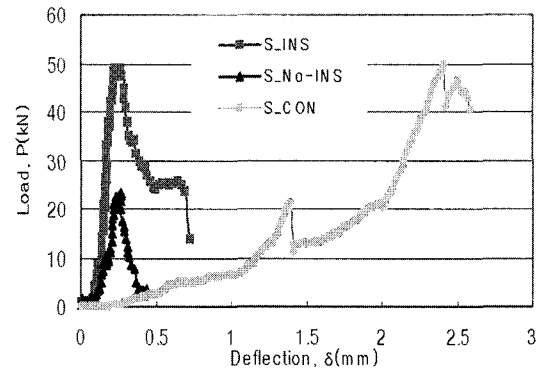


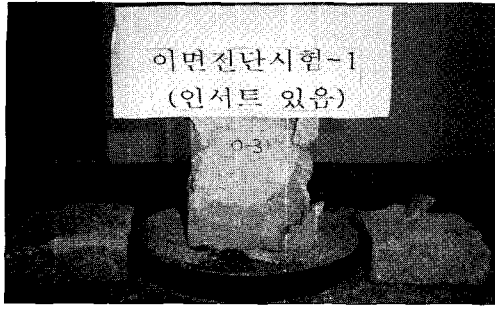
Fig. 13 Load-deflection relationship of two-surface shearing test

4.4.1 개요

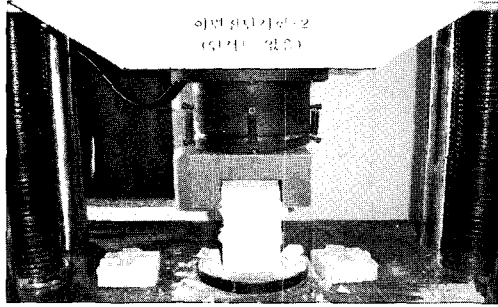
본 실험은 영구거푸집을 적용한 철근콘크리트 보와 일반 거푸집을 사용한 철근콘크리트 보의 구조거동 차이를 분석하기 위한 실험이다. Figs. 15, 16 및 Table 6과 같이 일반 철근콘크리트 보의 단면과 영구거푸집을 적용한 보의 전체 단면을 동일하게 적용함으로써 영구거푸집에 의한 보의 휨 거동특성을 분석하였다.

4.4.2 실험 방법

고성능 영구거푸집의 압축단 및 인장단 적용 시험체의 구조성능 평가를 위하여 500 kN 용량의 정적하중 가력장치를 사용하여 Fig. 13과 같이 4점 휨 재하를 실시하였으



(a) S_INS specimen



(b) S_NO-INS specimen

Fig. 14 Failure mode of S_INS and S_NO-INS

며, 하중재하는 초당 0.05mm씩 변위제어를 실시하였다. 시험체 중앙하부에는 시험체의 처짐량을 측정하기 위해 변위계를 설치하였다. 영구거푸집 적용 구조체의 합리적인 거동분석을 위해 1차 강성저하 전까지는 매 20kN씩 그리고 1차 강성저하 후 파괴시까지 매 10kN마다 계측을 실시하였다.

4.4.3 실험 결과 및 분석

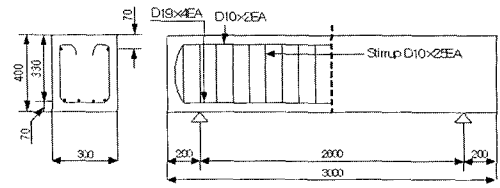
1) 균열 및 파괴양상

모든 시험체의 균열 양상은 모두 하중가력점을 향하는 휨 균열 형태를 보였으며 인장부에서 다수의 관통균열 발생한 후 압축단이 파괴에 의해 시험체가 파괴되었다. Fig. 17은 CONTROL 시험체의 균열형상 전경이다. 균열은 약 30kN 부근에서 중앙부 초기균열로 시작하였으며 이후 다수의 휨 균열이 발생하여 최대변위 33mm까지 진전되다가 파괴되었다.

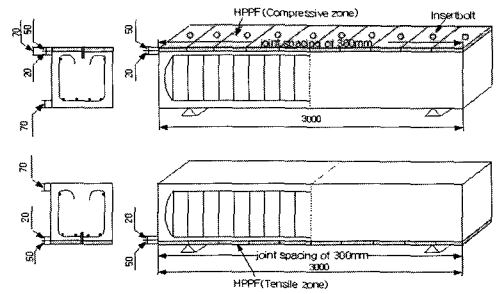
Figs. 18과 19는 고성능 영구거푸집 압축단 적용시험체 (COM)의 파괴양상이다. 두 시험체 모두 다수의 휨 균열이 인장부의 관통균열로 진전되어 약 45mm~50mm의 파괴

Table 6 Definition of variable specimens

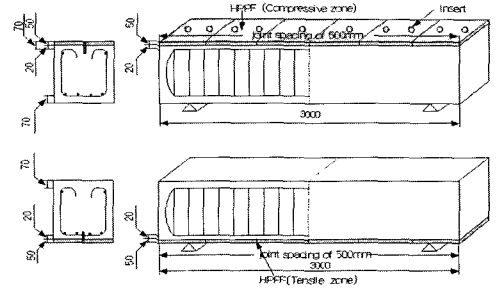
Specimen	Adopting section of HPPF	Joint spacing
COM-300	Compression section	300 mm
COM-500		500 mm
TEN-300	Tensile section	300 mm
TEN-500		500 mm



(a) CONTROL specimen



(b) COM-300 and TEN-300 specimens



(c) COM-500 and TEN-500 specimens

Fig. 15 CONTROL and variable specimens

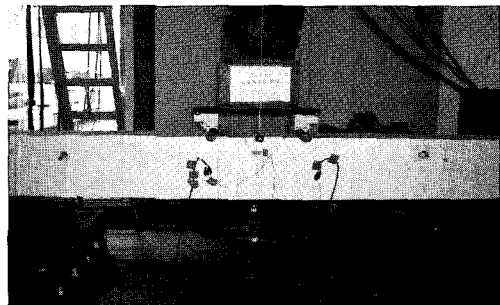


Fig. 16 Overall view of test specimen

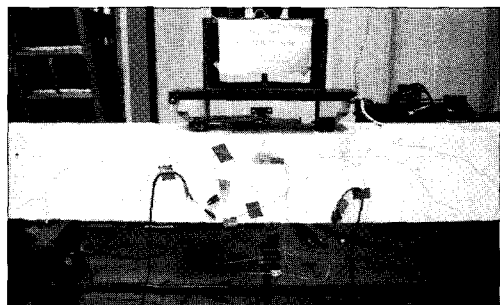


Fig. 17 Crack patterns of control specimen

변위를 보인 후 파괴되었다.

일반적인 COM 시험체의 경우, 파괴에 임박함에 따라 계면을 따르는 균열들이 미소하게 형성되었지만 계면탈락과 같은 취성적 파괴거동은 보이지 않았다.

Figs. 20과 21은 고성능 영구거푸집 인장단 적용시험체(TEN)의 파괴양상이다. TEN 시험체의 경우, 줄눈부에서

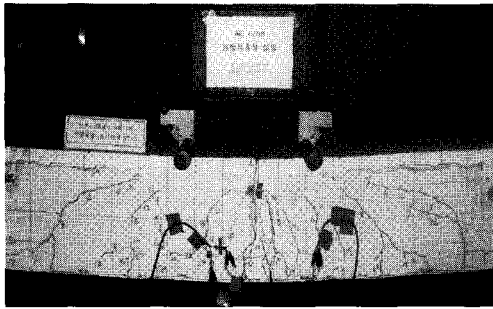


Fig. 18 Crack pattern of COM-300

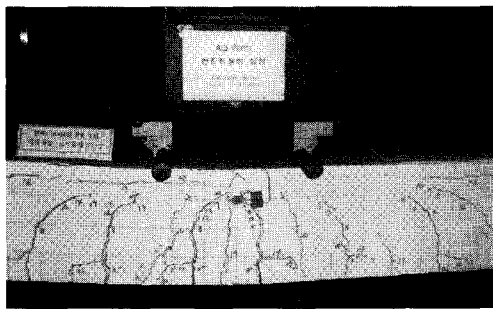


Fig. 19 Crack pattern of COM-500

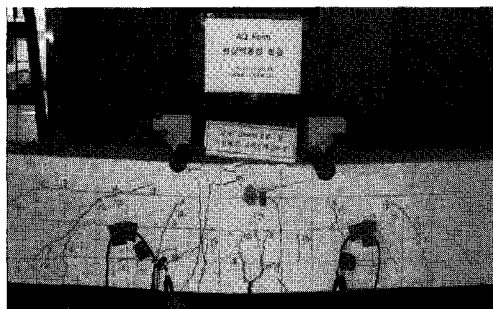


Fig. 20 Crack pattern of TEN-300

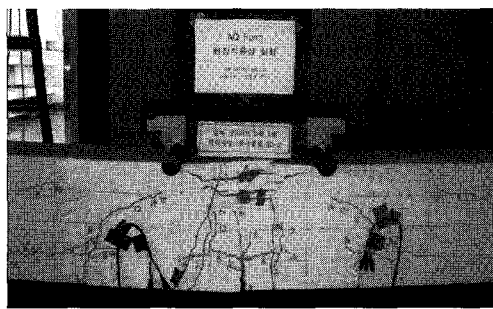


Fig. 21 Crack pattern of TEN-500

시작된 균열이 파괴시까지 진전되어 파괴되는 형태로 나타났다. 이 균열은 극한하중의 80%까지는 줄눈부를 제외한 인장부 부근의 다른 균열들을 거의 발생시키지 않았으나 파괴에 임박함에 따라 사인장 균열들이 발생하였다. 접합계면부의 경우, 파괴시까지 인장부의 계면탈락이 없는 일체화된 거동을 보였다.

2) 하중-변위곡선

기본적으로 극한하중 면에서 CONTROL 시험체보다 영구거푸집 적용시험체가 보다 향상된 구조 거동을 나타내었다. CONTROL 시험체의 경우 140 kN에서 철근이 항복한 후 극한하중은 약 160 kN을 나타내었다. COM 시험체는 158 kN에서 항복한 후 190 kN까지 점진적인 하중증가를 나타내었고, TEN 적용 시험체는 191 kN에서 항복거동을 보인 후 파괴시까지 압축단 파괴에 따른 하중저하 현상이 관찰되었다.

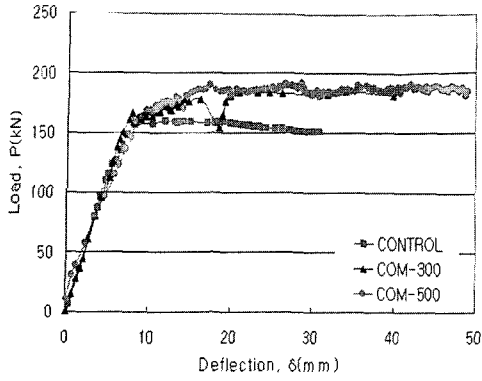
Fig. 22는 줄눈간격에 따른 영구거푸집 적용구조체의 하중-변위곡선을 나타내고 있다. 모든 거푸집 시험체가 CONTROL 시험체보다 향상된 구조거동을 나타내었으나 줄눈간격에 따른 구조거동의 변화는 거의 없는 것으로 분석되었다. Fig. 23은 영구거푸집의 적용 위치에 대한 분석 결과이다. 극한하중까지는 TEN 시험체가 COM 시험체보다 높은 극한하중을 나타내었으나, 항복거동 이후 파괴시까지 거동은 두 시험체가 상이한 양상을 나타내었다. TEN 시험체는 철근의 항복 후 압축부의 파괴가 진전됨에 따라 점진적인 강성저하를 나타내었으나 COM 시험체의 경우, TEN 시험체보다 최대하중은 다소 낮았음에도 불구하고 파괴시까지 점진적으로 하중이 증가하였다. TEN 시험체의 경우, TEN-300 시험체가 TEN-500 시험체보다 효율적인 연성거동을 나타내었다. 이는 비교적 많은 줄눈을 확보한 TEN-300 시험체가 인장부의 다수의 잔균열로 인해 외력에 대한 응력분배가 효율적으로 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. Table 7은 실험 결과를 정리한 표이다.

4.5 에너지 개념에 의한 구조거동 분석

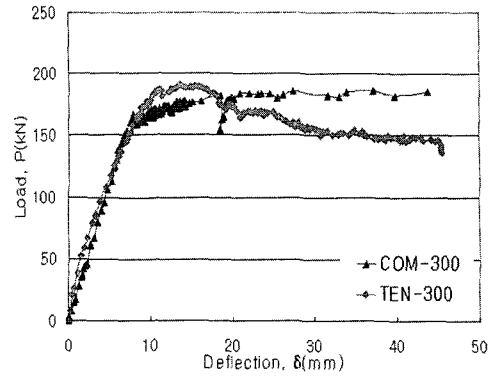
영구거푸집이 적용된 구조체의 효율적인 구조거동 분석을 위하여 영구거푸집 압축단 및 인장단 적용시험체에 대해 에너지 개념에 의한 연성지수⁶⁾ 및 균열저항계수¹⁾를 분석하였으며, 그 해석 이론 및 분석 결과는 다음과 같다.

Table 7 Ultimate load and flexural strength

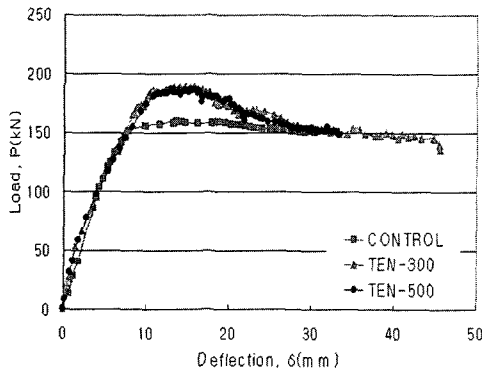
Specimen	Ultimate load(kN)	Flexural strength(MPa)
CONTROL	159.0	13.0
COM-300	171.0	15.1
COM-500	170.0	14.4
TEN-300	191.0	15.5
TEN-500	188.0	15.3



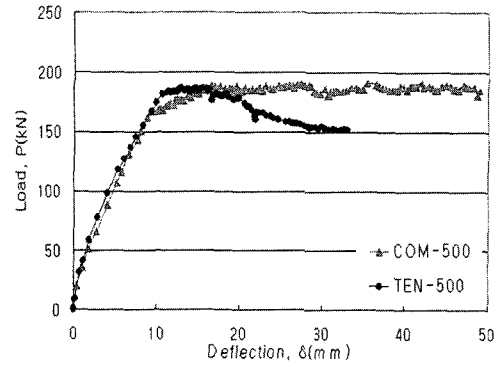
(a) COM specimens



(a) COM specimens



(b) TEN specimens



(b) TEN specimens

Fig. 22 Load-deflection relationship for joint spacing

Fig. 23 Load-deflection relationship for installed section of HPPF

4.5.1 연성지수에 의한 거동분석

연성(ductility)은 강성 및 극한강도와 함께 구조물의 안전도를 평가함에 있어서 고려해야 할 가장 중요한 요소 중에 하나이다.

일반적으로 연성에 대한 정량적인 평가방법은 다음 식 (3)과 같이 곡률 θ , 회전 θ , 처짐 δ 등의 항복상태와 극한상태의 비로 나타내며, 이를 연성비(ductility ratio) 또는 연성지수(ductility index)라고 부른다.

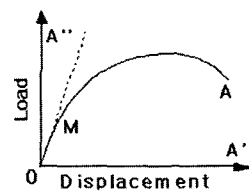
$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \text{ (or } \frac{\theta_u}{\theta_y} \text{ or } \frac{\delta_u}{\delta_y} \text{)} \quad (3)$$

4.5.2 에너지 개념에 의한 거동분석

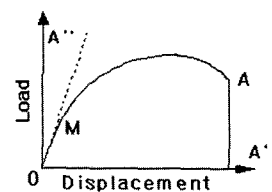
에너지 개념을 통하여 구조물의 거동을 분석하면 Fig. 24와 같다. 이때 E_{total} 은 총 흡수에너지로서 부재의 하중-변위 곡선 또는 단면의 모멘트-곡률 곡선에서 극한상태까지의 총 면적으로 계산되며, $E_{elastic}$ 은 탄성에너지로 총 에너지 중 소모되지 않고 저장되는 변형에너지를 의미한다. 즉, Fig. 24의 (a)와 같은 하중-변위관계를 갖는 구조물에서 총 흡수에너지는 (b)와 같이 나타난다. 이때, 탄성 에너지는 (c)와 같이 $\triangle OAA'$ 의 면적으로 계산된다. 따라

서, 균열저항 에너지는 (d)와 같음을 알 수 있다.

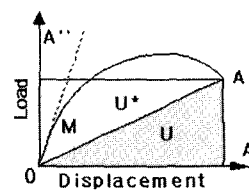
$$E_{total} = E_{elastic} + E_{crack} \quad (4)$$



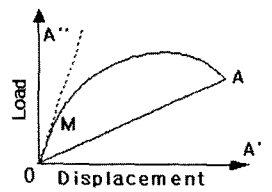
(a) Load-displacement



(b) Total work



(c) Elastic energy complementary energy



(d) Dissipated energy in failure

Fig. 24 Crack resistance energy based on the energy theory

$$\text{여기서, } E_{total} = \int_0^{\Delta} P d\Delta$$

= Total energy of external work

$$E_{elastic} = \frac{1}{2} P\Delta = \text{Energy of elastic transformation}$$

E_{crack} = Emitting energy at crack surface

① 연성지수 평가식

(식 5)는 ACI에서 제안하고 있는 연성지수 평가식을 나타내고 있다.

$$\mu = \frac{1}{2} \left(\frac{E_{total}}{E_{elastic}} + 1 \right) \quad (5)$$

② 균열저항지수 평가제안식

(식 6)은 균열거동에 대한 균열 저항지수 제안식을 나타내고 있다.

$$\Pi_E = \frac{E_{crack}}{E_{total}} = \frac{E_{crack}}{E_{elastic} + E_{crack}} \quad (6)$$

여기서, Π_E = Coefficient of crack resistance

Table 8은 영구거푸집 압축단 및 인장단 적용 시험체의 연성지수 및 균열저항지수를 평가한 표이다. 표에서 보듯이 인장단 적용 시험체가 CONTROL 및 압축단 적용 시험체에 비해 연성 및 균열저항 측면에서 효율적임이 분석되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 영구거푸집의 현장 적용성 분석을 위하여 고성능 영구거푸집의 재료 및 구조적 특성을 실험 및 해석적 방법을 사용하여 분석하였으며 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 영구거푸집 패널의 휨 거동특성 결과 우수한 연성거동을 보인 것으로 나타났다. 2면전단 시험의 경우, 인서트 가 삽입된 시험체는 콘크리트 일체 시험체와 동일한 2면전단 강도특성을 나타내었다. 강섬유가 혼입된 영구거푸집의 인서트 인발강도의 경우, ACI 349- 01에서 규정하고 있는 해석원리를 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료되며 해석 결과치를 상회하는 인발강도를 나타내었다. 따라서 본 영구거푸집의 재료적 적합성이 확인되었다.
- 2) 영구거푸집의 압축단 및 인장단 적용 시험체의 경우, 모든 시험체가 CONTROL 시험체 보다 향상된 구조거동을 나타내었다. 또한 적용위치에 대한 영향은 거의 없었으며, 인장부 줄눈간격의 경우 상대적으로 다수의

Table 8 Coefficient of ductility and crack resistance

Specimen	Coefficient of ductility(μ)	Coefficient of crack resistance(Π_E)
CONTROL	1.42	0.45
COM-300	1.38	0.43
COM-500	1.37	0.42
TEN-300	1.61	0.55
TEN-500	1.51	0.52

줄눈간격을 보유한 시험체가 효율적인 구조거동을 나타내었다. 또한 모든 변수시험체는 최종 파괴시까지 영구거푸집 접합계면의 완전부착 특성을 나타내었다. 따라서 본 영구거푸집을 사용한 일체 구조체는 외부하중에 대해 충분한 구조특성을 발휘할 수 있는 것으로 판단된다.

- 3) 영구거푸집 압축단 및 인장단 시험체의 연성 및 균열 저항지수 평가의 경우, 인장단 적용시험체가 압축단 적용시험체보다 효율적인 구조거동을 발휘한 것으로 분석되었다. 따라서 본 영구거푸집 공법을 적용한 현장구조물의 경우, 압축부 보다는 인장특성이 지배적인 부분에 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주)건설부문의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김민수, “장기간 교량을 위해 제안된 Spliced PSC-I형 거더의 구조거동 연구”, 한양대학교 석사학위논문, 1999. 79pp.
2. 삼성물산(주), “스테인레스 강섬유를 이용한 고내구성 영구거푸집의 현장적용성에 대한 연구”, 연구보고서, 한양대학교, 2004, pp.1~27.
3. 오홍섭, “흑트강섬유보강 철근콘크리트 보의 構造舉動에 관한 研究”, 한양대학교 석사학위논문, 1995, pp.1~45.
4. 김형남 외 3인, “비탈형 영구 거푸집의 시공성능과 경제성 평가에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집 구조계, 15권, 4호, 1999, pp.91~99.
5. ACI Committee 349, *Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-01); Appendix B Anchoring to Concrete*, ACI, 2001, pp.81~88.
6. 정상모, “FRP 긴장재를 이용한 콘크리트 보의 연성지수 평가”, 대한토목학회 학술발표회논문집(I), 1998, pp.237~240.

요 약

최근까지의 거푸집 공법은 거푸집의 설치 및 탈형공정에 따른 공기연장, 인건비 상승에 따른 추가적인 비용소모, 거푸집 탈형 후 발생하는 건설 폐자재로 인한 환경문제 유발 등의 직·간접적인 문제를 발생시켜 왔다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하고자 스테인레스 강섬유를 이용한 고성능 영구거푸집 공법에 대한 재료 및 구조적 거동특성을 분석하였다. 재료적 거동특성의 경우, 고성능 영구거푸집의 휨 거동에 있어 안정적인 연성거동 특성을 나타내었으며 후타설 콘크리트와의 부착성능도 우수한 것으로 나타났다. 구조적 거동특성의 경우, 고성능 영구거푸집의 압축단 및 인장단 거동특성이 분석되었으며 실험결과, 추가적인 보강성능 이외에 충분한 구조거동 특성을 발휘한 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 스테인레스 강섬유, 재료 및 구조적 거동특성, 고성능 영구거푸집, 연성거동, 보강성능
