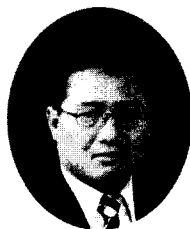


최적이론에 의하여 설계된 최소 깊이 더블티 슬래브의 휨거동 평가

Evaluation on Flexural Behavior of Double-tee Slabs
with the Least Depth from Optimization Process



유승룡*

Yu, Sung-Yong



김대훈**

Kim, Dae-Hoon



유재천***

Ryu, Jae-Chon

ABSTRACT

Precast prestressed double-tee slab may be designed by the PCI Design Handbook. It is based on the bridge construction and is required for reorganization for the use of buildings in the domestic construction environments. Much enhanced sections are developed from the reforming process on the determined design factors in the previous experimental works on double tees. Pre-determined shape, reinforcement detail, and 5000 psi concrete strength can not be expected as the best solution for the domestic construction requirements because large amount of use on that systems are anticipated.

Flexural tests are performed on four full-scale 12.5m proto-type models, "least depth double tee," which are resulted from the optimization process. Domestic superimposed live load regulation, domestic material properties which is available to product, building design requirements and economy in construction are considered as the main factors to establish. The first two sections are double tee section for 1.2 ton/m² market live load with straight and one-point depressed strands and the second two are for 0.6 ton/m² parking live load with those strand types,

All of the specimens tested fully comply with the flexural strength requirements as specified by ACI 318-95. However, the research has shown that following improved considerations are needed for better result in practice. The locations and method of connection for the lowest bottom mild bar, connection method between precast and cast-in-place concrete, and dap-end reinforcement are need to be improved.

Keywords : double-tee, slab, flexure, beam test, leath depth

* 정회원, 동국대학교 공과대학 건축공학과 교수

** 정회원, 동국대학교 공과대학 건축공학과 석사과정

*** 정회원, 삼성물산 주택개발부문 PC설계팀 전무

·본 논문에 대한 토의를 1999년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 12월 호에 토의회답을 게재하겠습니다

1. 서 론

더블티 슬래브는 구미에서 가장 많이 쓰이는 건축·토목 재료중 하나로 건축물의 장스팬 고하중 슬래브 재료, 그리고 토목교량의 슬래브 재료 주로 사용하여 왔다. 이에 대한 연구를 집대성하여, PCI (Prestressed Concrete Institute)가 구조설계자에게 제시한 PCI Design Handbook²⁾ 4번째 교정판이 출판되어 있으나, PCI Design Handbook²⁾만으로는 아래와 같은 사항으로 국내의 특유의 건설환경 요구에 대응할 수 없다.

1) 국내생산 콘크리트, PS강선 품질 적용성 검토
· 국내적용의 초기단계인 더블티 슬래브 구조시스템 적합성 확보를 위해, 국내재료와 관련한 적합성 시험과 시공방법, 외적·내적 하중의 구조적 반응이 검토되어야 한다. 즉, 국내산 PS강선의 부착력, 인성, 강도에 대한 비교·검토를 요한다. 콘크리트의 경우 스팀 양생효과를 위해 일반적으로 Type III 조강시멘트가 사용되나, 국내 1종 시멘트의 적용성에 대한 검토도 이루어져야 한다.

2) 국내 건설회사의 층고와 관련된 요구

· 고강도 콘크리트와 적정설계를 고려한 고품질 최소 깊이 더블티가 요구된다. 국내 더블티 슬래브가 철골, 스틸 데크플레이트와 비교한 엄격한 경제성을 갖기 위하여, 해당 스패에 대한 일정 치수이하의 보깊이(60-70cm이하의 제한)가 요구된다. 더블티에 관한 연구가 순조로이 진행되어도, 제시된 더블티를 위한 단부에서 축소된 깊이를 위한 대안과 더블티를 지지하는 역티형보와 테두리보(spandrel beam)의 설계가 필요하다. 더블티 단부의 댄단부(dapped end)를 위한 설계는 국외에서도 각 PC공장마다 고유한 설계방법과 모델이 제시되어 있다. 또한 역티형보와 테두리 보의 웨브높이와 턱높이는 더블티 댄단부 상·하부 길이보다 작아야 하므로, 고하중의 집중하중에 의한 응력집중을 해결할 수 있는 효과적인 철근배근이 요구된다.

3) 국내 PC 공장 현황

· 구미 PC 공장과 마찬가지로, PCI에 수록된 모든 치수를 생산할 수 없다. 스패와 하중에 따른 한정된 종류의 더블티만이 가능하다. 따라서, 국내 건설 환경과 법규에 적합한 경제적 단면에 대한 논리적 평가가 필요하다.

4) 국내 운송성 등 법규와 관련된 고려사항

· 국내 자동차 길이와 하중, 법규, 운송성, 시공성 등을 고려한 프로토타입 모델을 제시할 필요가 있다. 일반적인 구미의 차량크기나 적재하중

도 국내 차량과 비교하여 Table 1, 2와 같이 다르다.

Table 1 Comparison between the Domestic and PCI Building Code Requirements for Parking Structures

	건교부 구조설계 기준명 최소치	PCI 권장 최소치
주차면적	2.3 x 5.0 m	2.6 x 5.2 m
주차통로(2대차량)	6 m	7.32 m
경사로 구배	1/6(16%) 이하	5%
주차장 높이	주차부위	2.1 m
	통로부위	2.3 m
		2.13 m

Table 2 Current Domestic Code Requirements for Live Load of Small Car in Parking Garage³⁾

	지하 (kg/m ²)	지면 (kg/m ²)	통로 (kg/m ²)
1995 개정, 현행 건교부 구조설계 기준명	500	1,200	500
1997 건축학회 안	400	800	500
PCI Recommendation	244	488	244

· 프리스트레스트 콘크리트 부재설계에서 실제 하중보다 크게 적재하중을 적용하는 것은 과도한 초기 긴장으로 캠버나 부재수축으로 인한 보 상부 균열을 유발할 수 있다. Table 2의 현행 건교부 구조기준명에 따르면 적재하중은 PCI 권장치(244~488kg/m²)보다 2에서 2.5배까지 적재하중이 크게 정하여져 있다. 그러므로 이에 대한 세심한 검토를 요한다.

5) 4계절의 극심한 예상 기후차이와 세설제타설 등을 대비한 시공 및 생산방법의 모색이 필요하다.

6) 더블티 슬래브는 기존 PCI Design Handbook²⁾ 과 극한 강도설계 기준에 의하여 설계할 수 있으나, 토목 교량설계 위주로 구성되어 있고, 국내 여건에 따른 건축적 활용을 위한 재구성이 필요하다.

본 연구의 목적은 PCI에 규정된 형태, 규정된 350 Kg/cm²의 콘크리트 강도와 강선 배근방법 등이 국내의 건축적 요구 상황에 가장 적합한 단면으로 무조건 받아들이기엔 앞으로 사용될 전체 물량을 고려할 때 낙관적일 수 없고 또한, 서구교량을 위해 구성된 모듈화가 국내 건축적 적용에 일치되는가 의심된다. 따라서 국내 더블티 PC 적용을 위한 12.5m스팬의 4개의 프로토타입 더블티를 제작하여 휨실험을 실행하여 제시된 단면이 강도설계의 규준에 적합한지를 확인하려 한다.

2. 실험체 계획

2.1 최적화 개요

축소된 보깊이를 위하여 최적이론(Optimization Theory)을 적용하여 최소 깊이를 위한 단면, 강선과 철근의 배근, 콘크리트강도 등의 변수의 적정치를 구할 수 있다. 본 연구의 최소 축 더블티 설계는 허용응력에 따른다. 설계의 최적화를 위한 첫 단계의 목적은 긴장력과 단면치수의 근사값을 결정하며, 휨응력에 기초하여 중앙부 및 단부에서의 강선을 모양과 위치를 결정하는 것이다. 프리캐스트 더블티보와 토핑 콘크리트의 자중은 작용하중에 첨가하여 고려되었다. 이 문제에서 고려된 변수는 긴장력, 편심, 보깊이, 플랜지 두께로 보깊이 37.5cm에서 100cm 사이의 값을 검토하였다. 편심 값은 ACI 피복두께 제한치에 제한되어 있다. 플랜지의 치수는 상하한 치가 있다. 이러한 제한은 최적화 문제에 있어서 6가지의 치수 제한을 가지고 있다. 웨브의 폭은 시공의 편리성을 고려하여 하부에서 12cm 상부에서 19.5cm로 맞추어 졌다. 이 수치는 보강근의 적절한 배근 및 거푸집으로부터의 탈형을 용이하게 하기 위하여 필요하다. 플랜지의 폭은 제안된 240 cm이다.

두 번째 단계의 목적은 프리캐스트 부재와 토핑콘크리트를 포함한 더블티보의 깊이축소를 위한 각기 다른 설계에 대한 평가에 의하여 정의된 함수에 따른 최적식을 찾는 것이다. 그후, 최적화 문제는 ACI의 허용응력 제한과 치수에 대한 제한치를 고려하며, 목적함수를 최소화하는 것이다. 이 과정에서 6가지의 치수제한이 제시된다. ACI에 의하여 정의된 허용치는 단면의 상하부에서 압축력과 인장응력의 제한을 제시한다. 단부 및 중앙 단면에서 다음 상황에 대하여 검토되었다.

- 긴장력 전달
- 합성된 보에 대한 자중 적용
- 합성된 보에 대한 적재하중 및 자중 적용

허용응력 허용치에 따른 이러한 조건은 12개의 조건을 만들며 또 다른 6개 조건에 의하여 보충된다. 문제는 목적 함수 및 18가지의 조건에 대하여 비선형이다. 문제를 해결하기 위한 전략은 Sequential Quadratic Programming(SQP) 방법에 기초한다. 목적은 문제를 풀릴 수 있는 좀더 간단한 하위 문제로 바꾸어 반복된 수치해석 과정의 기초로 사용할 수 있게 하는 것이다.

이 방법은 Newton방법과 유사한 방법을 사용매회 반복에 따라 Hessian 의 Lagrangian function에 대한 추정을 가능하게 한다. 이 함수는 quadratic function에 의한 설계에 근사하여 추정할 수 있다.

제한치를 만족시키는 최소한의 보깊이 단면을 찾는데 사용되는 방법은 깊이를 최소화하면서 제한조건을 만족시키는 타당성 있는 값을 찾아정하는 것이다. 모든 제한 조건은 1%이하에서 제한치가 증명되었다.

Mathcad 7.0 Pro Spreadsheet는 휨, 전단, 처짐에 대한 모든 강도설계의 요구사항을 검증할 수 있도록 되어있다. 최적화 과정에 의하여 결정된 단면은 실용적인 목적을 위하여 개량되었다. 사용자는 단면의 치수, 재료물성, 하중, 로스, 기타 분석에 필요한 정보를 입력하여야 한다. 강도설계에 규정된 콘크리트의 응력 제한치가 검증될 수 있다. 필요한 수와 크기의 강선을 정할 수 있다. 수평강선의 적용이 가능한지 혹은 절곡강선이 사용되어야 하는지, 단면에서 강선의 위치를 그래픽으로 체크할 수 있다. 또한, 이 프로그램을 이용하여 초기 최적 프리스트레스트 힘, 필요한 편심을 결정할 수 있다.

2.2 최적설계 결과

최적이론에 의한 12.5m 스패의 4개의 프로토타입 더블티를 설계하였다. 첫 번째 두 개의 더블티 단면은 매장건축에서 1.2 ton/m²의 적재하중을 위한 직선형(Straight)과 일점 절곡형(One-point Depressed)의 강선배근과 관련된 것이고, 두 번째 두 개의 단면은 주차장에서 0.6 ton/m²의 적재하중을 위한 직선형과 일점 절곡형의 강선배근과 관련된 것이다. 각 보의 단부는 층고 축소를 위하여 댐단부로 설계되었고, 해당 보에 대한 휨실험을 실시하여, 요구되는 휨강도의 적정치를 실험하였다. 더블티는 한쪽 싱글티로서 더블티에 관한 충분한 정보를 얻을 수 있으므로, 풀 스케일(full-scale)로 제작(Fig 1, 2 참고), 실험하였고 주어진 재료강도와 하중조건은 다음의 Table 3, 4와 같다.

Table 3 Material Properties

항목	f_{ck} for PC	f_{ck} (initial)	f_t for mild bar & wire	f_{su} for Strand	f_{ck} for CIP topping
설계 강도	500 kg/cm ²	250 kg/cm ²	4,000 kg/cm ²	18,900 kg/cm ²	280 kg/cm ²

Table 4 Design Loading Conditions

Beam No.	용도	Span (m)	강선모양	Superimposed Dead Load, (ton/m ²)	Superimposed Live Load, (ton/m ²)
DT-1S	주차장	12.5	Straight	0.244	0.6
DT-1D	주차장	12.5	One Point Depressed	0.244	0.6
DT-2S	매장	12.5	Straight	0.244	1.2
DT-2D	매장	12.5	One Point Depressed	0.244	1.2

최적이론으로 설계된 시험체의 규격은 다음의 Table 5와 같다. 또한, 시험체의 Dapped End설계에는 다음의 Fig 3과 같다.

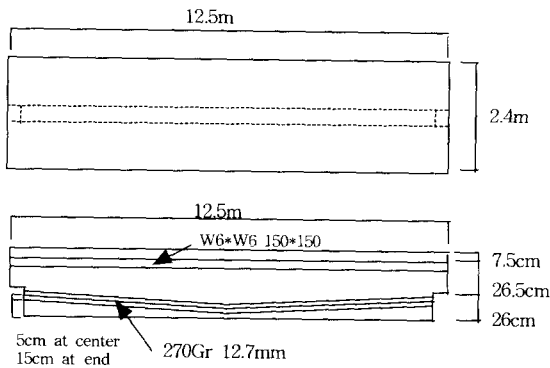


Fig 1. Example of Plan and Section of Single Tee W/D the Least Depth(DT-1D)

Table 5 Dimensions of Precast Specimens

시험체 No.	전체길이(mm)	플렌지 폭(mm)	깊이(mm)
DT-1D	12,500	1,200	525
DT-1S	12,500	1,200	600
DT-2D	12,500	1,200	675
DT-2S	12,500	1,200	750

주어진 하중조건에 대하여 PCI Hand Book²⁾에 의한 설계와 적정이론에 의한 설계깊이를 비교하여 보면 다음의 Table 6과 같다. DT-1D의 설계를 위하여 Table 3의 Superimposed 적재하중과 고정하중의 합은 0.844 t/m²이며, 스패 12.5m에 해당하는 더블티는 2.4m 플렌지폭 더블티에서는 해당사항을 초과하며, 3.0m 플렌지폭의 10DT32+2보의 강선 타입 108-D1을 적용하였을 때, 12.5m 스패 0.874t/m² 하중 합까지 가능하다. 이 경우, 국내 제설제 타설을 고려한 7.5cm 최소 토핑두께

를 고려하면 보의 전체 깊이는 2.5cm 높아진 89cm가 되므로, 본 연구에서 제안한 7.5cm 토핑 콘크리트, DT-1D의 전체 총 60cm보다 29cm 크게 설계한 것으로 생각할 수 있다(PCI hand book, page 2-23). DT-1S, DT-2S, 그리고 DT-2D는 국내의 과도한 적재하중 기준으로 PCI Hand book²⁾ 도표로는 설계할 수 없다.

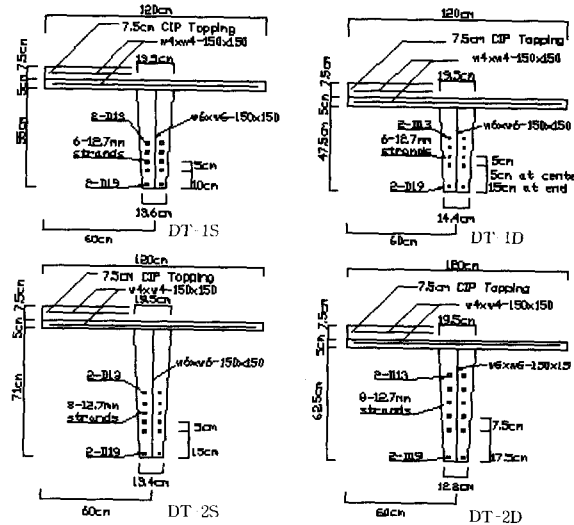


Fig. 2 Sections of Single Tee Specimens

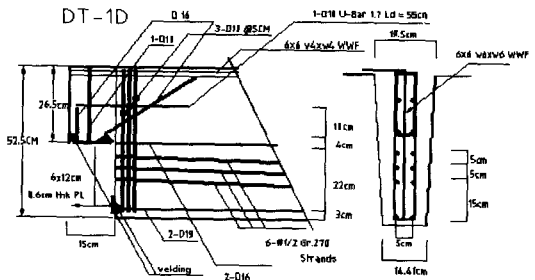


Fig. 3 Examples of Dap End Design According to PCI Methods(DT-1D)

Table 6 Comparison between Suggested Beam Depths and Those of PCI Hand Book

Beam No.	PCI Hand Book 설계깊이, cm	최적이론으로 제안된 설계깊이, cm
DT-1D	89	60
DT-1S	N/C	67.5
DT-2D	N/C	75
DT-2S	N/C	82.5

3. 실 험

3.1 실험체의 생산

시험체는 삼성물산 음성 PC공장에서 생산되었다. 거푸집 형태는 10mm 철판을 사용한 프레임으로 제작되었다(Fig 4참조). 강선의 긴장력을 지지하기 위하여 지반에 버팀대를 설치하는 대신, 자체에서 외력에 저항하도록 프레임을 제작하였고, 긴장용 버팀대 외부에 Fig 4와 같이 강선 높이를 교정하기 위하여 50mm 두께의 강철판들을 사용하였다.

먼저 전단보강근인 용접철망을 하부철근에 연결하여 거푸집안에 설치하였고, 단부를 위해 조립된 철근망은 가조립 상태로 설치하였으며 간격재로 간격을 유지시켰다. PS강선은 국내 제조업체 K사의 직경 12.7mm, 270Gr 7연 강선 사용하였다. PS강선은 거푸집을 통과하여 설치되었고, 늑근 위에 놓이도록 설치하였으며, 슬래브 용접철망을 설치한 후 PS 강선을 긴장시켰다. PS강선은 15ton 용량 유공유압잭을 사용, 전동펌프로 하나씩 긴장시켰다(Fig 5 참조). 강선 긴장력은 유압계이기로 측정하였다. 초기에 약 2~3ton정도 가력한 후 강선의 위치를 재교정 시켜 준 다음 강선을 약 13.5 ton까지 긴장시켰다.



Fig. 4 Jacking Frame for Production



Fig. 5 Strand Jacking Process

콘크리트는 자동화 배치플랜트 설비의 회전식 믹서에 의해 배합된 콘크리트를 퍼커빌트(Purker Bilt)라는 슈트(chute)가 내장된 믹서트럭으로 거푸집안에 타설하면서, 막대진동기로 다져주었고, 상부의 표면은 흙손을 이용하여 마감시킨 후 갈퀴로 거칠게 마감하였다. 콘크리트는 급격히 응결, 경화되므로 마감 후 바로 짚은 포목을 덮고, 약 6시간정도 스팀양생 시켰다.

각개 싱글티마다 12개(10x20cm)의 공시체를 생산하였고, 콘크리트 압축강도는 ASTM C39에 의하여 계속적으로 측정되었다.

콘크리트 압축강도가 300 kg/cm²에 도달하면 강선 절단 실시하였고 강선의 절단방법은 산소가스 불꽃으로 절단하였다. 최 하단부 강선의 잔여 길이를 보단부에서 약 50 cm정도 남겨놓고 절단하였고 남은 강선은 측정기의 부착을 용이하게 하기 위하여 콘크리트 수직면에서 절단하였다.

3.2 재료

3.2.1 강재

PS강선은 가장 일반적으로 적용되는 저이완률(Low-relaxation)의, 직경 12.7mm, 270 Gr. 7연강선으로, 국내 제조업체 K사의 것을 사용하였다.

일반 철근은 항복강도 4,000 kg/cm² 이형철근을 사용하였고, 늑근으로 항복강도 3,000 kg/cm², 지름 4~6mm 150x150 용접철망을 Fig 6과 같이 배근하였다.

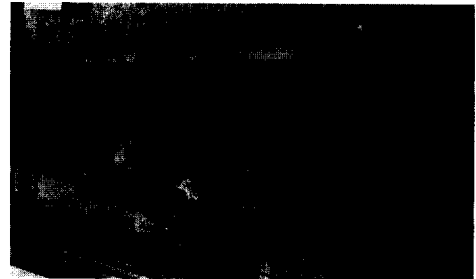


Fig. 6 Reinforcement of Double Tee Specimen

3.2.2 콘크리트

본 실험에서 국내 PC공장의 자동화 배합설비에 의한 고강도 콘크리트 생산을 감안하여, 프리캐스트 콘크리트는 500kg/cm²의 목표강도와 토핑 콘크리트는 300kg/cm²의 강도가 도달 할 때, 실험을 실시하였다. 콘크리트의 28일 설계강도는 500kg/cm²로 최대 골재크기는 19mm, 슬럼프 12cm의 배합을 하였다. 프리캐스트 시험체와 7.5cm 토핑콘크리트의 배합표는 Table 7, 8과 같다.

Table 7 Concrete Mix Design(1)

단위수량 (kg/m ³)	단위시멘트 (kg/m ³)	단위골은 골재량 (kg/m ³)	단위 잔골재량 (kg/m ³)	단위 혼화제량 (kg/m ³)
163	543	1,003	663	8.1

Table 8 Concrete Mix Design(2)

설계 기준 강도, kg/cm ²	골재 최대 입경 (mm)	슬립 프 (cm)	공기 량 (%)	잔골재비 율 (S/A,%)	물-시 멘트 (W/C, %)	단위F/A량 15%,kg/m ³
500	19	14	1.5	40	30	81

3.3 시험일시

시험체의 시험날짜와 생산일로부터의 시간경과는 Table 9, 콘크리트의 압축강도는 Table 10, 11과 같다.

Table 9 Testing Date

시험체 No.	타설 일자	시험시 일자	시험시까지 시간경과(day)
DT-1D	'98.07.14	'98.08.28	45
DT-1S	'98.07.08	'98.08.29	52
DT-2D	'98.07.03	'98.09.01	60
DT-2S	'98.06.20	'98.09.02	74

Table 10 Compressive Strength of Topping Concrete
(Design Strength: 350kg/cm², unit: kg/cm²)

시험체No.	3일 강도	7일 강도	18일 강도	19일 강도	21일 강도	26일 강도
DT-1D	-	285	-	-	-	400
DT-1S	224	-	-	-	340	-
DT-2D	-	-	-	344	-	-
DT-2S	-	-	325	-	-	-

Table 11 Compressive Strength of Precast Concrete
(Design Strength 500Kg/cm², unit: Kg/cm²)

시험체 No.	1일 강도	2일 강도	7일 강도	28일 강도	58일 강도	63일 강도	69일 강도	86일 강도
DT-1D	230	-	331	-	-	517	-	-
DT-1S	196	-	326	-	-	-	511	-
DT-2D	249	-	385	513	524	-	-	-
DT-2S	-	275	366	510	-	-	-	559

3.4 실험계획

12.5m스팬 4개의 기준단면에 대한 4개의 시험

체를 제작하여, 각 시험체에 대한 휨시험 1회를 실시하였다. 결과로 전체 4개의 휨시험 결과치를 얻을 수 있었다. 휨강도시험에서는 축소된 보깊이의 휨성능 적정성을 판단하였다. 순수 휨강도를 산출하기 위하여, 4포인트 하중시험을 실시하여 전단력이 제로가 되는 지역에서 일정한 최대 휨응력 값을 구할 수 있도록 고려하였으며, 하중포인트는 전체정착길이를 초과하여 위치토록 하였다.

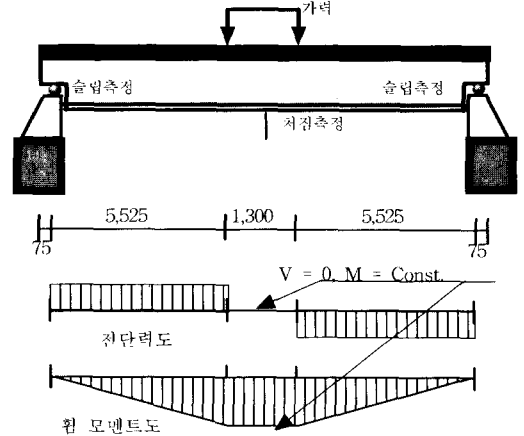


Fig. 7 Testing Plan

이 실험에서 다음과 같은 사항을 검토하였다.

- 1) 초기 균열모멘트,
- 2) 전체 사용하중(Full Service Loading(U=D+L))에서 균열 발생여부(단부, 보 중심)와 처짐,
- 3) 설계하중(Design Loading(U=1.4D+1.7L))에서 보의 거동,
- 4) 보의 단면으로 계산된 공칭내력과의 비교,
- 5) 균열의 확산방법,
- 6) 종국강도(Ultimate Loading)와 파괴방법 및 처짐,
- 7) 맵단부 단부균열과 강선 슬립,
- 8) 각하중 하에서 최대균열 크기 및 분포.

실험체의 계획은 위의 Fig. 7과 같이 하였다.

3.5 실험절차

1) 시험체는 타워크레인을 사용하여, 양쪽 지지점 위에 Fig. 8과 같이 단순지지로 놓여졌고, 양단 플랜지 상부에, 수평레벨을 맞추어, 오차 ± 5mm이하가 되도록 조절하였다. 단부 지지점은 맵단부 하부모서리(15cm) 중앙 7.5cm에 지지점을 위치시켰다.

2) 보 중앙에서 가력보에 가력하여, 가력보 아래 구간에서 Fig. 7과 같이, 전단력 없는 일정 휨모멘트만이 작용하도록 구성하였다. UTM(universal

testing machine)의 하중 면에 로드셀을 설치하여 데이터 로거(data-logger)로 하중을 기록하였고 로드셀 아래의 가력보는 단순 지지되어, 시험체위 2개의 H-형강 위에 놓이게 하였다. 시험체위 2개의 H-형강 중심간격은 일정 휨응력 발생에 충분한 가력폭, 130cm로 설치하였다.

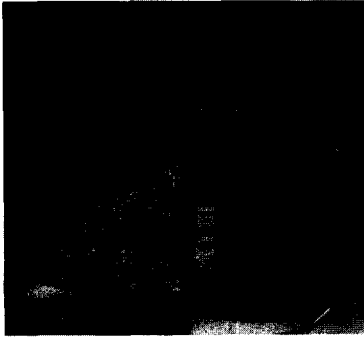


Fig. 8 Dap End Supports

4) 시험체의 양 단부에는 최 하단부 강선 슬립 체크하기 위한 LVDT 두개를 양 단부 강선에 각각 설치하였다. 또한, 시험체 중앙에는 최대 처짐을 계측하기 위하여 LVDT를 2개 설치하였다. LVDT는 시험체의 처짐이 LVDT(100mm측정)의 한계를 넘을 상황을 고려하여, 2개중 한 개를 약 8cm정도 낮추어 설치하였고, 시험도중 높게 설치한 한개의 LVDT와 낮게 설치한 다른 한개의 LVDT가 연속적으로 처짐을 측정하도록 고려하였다.

5) 싱글티 웹의 제일 하단부에는 균열크기 측정을 위하여 시험체의 중앙을 기준으로 양쪽으로 1.5m씩 5cm간격으로 게이지포인트를 설치하였고, 시험 전 디지털게이지(2/1000오차)를 이용하여 초기 값을 기록하였다.

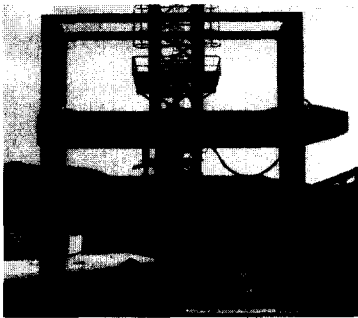


Fig. 9 Testing Frame

6) 계측장비설치가 끝난 후 음성 PC공장의 UTM으로 가력하였다(Fig 9. 참조). 첫 균열이 발

생되기 전까지 3ton씩 하중을 증가시켜 주었고, 그후 2ton씩, 그리고 균열양상이 최종 파괴에 이른다고 판단되면, 1ton씩 증가하중을 조절 적용하여 하중에 대한 균열크기와 처짐을 관찰, 기록하였다.

7) 균열은 검정 유성 펜으로 해당하중과 함께 도식함으로써 하중과 균열의 관계를 표시하였다. 균열분포가 상당히 넓으므로, 한 면에 3~4명의 실험인이 체크하였다.

8) 일정 하중마다 디지털게이지를 사용하여 게이지포인트값을 기록하였다. 시험체가 파괴되기 전까지 3-4차례 균열의 크기를 체크하였다.

9) 시험체는 완전한 종국파괴까지 계속 가력하였다.

4. 실험결과

4.1 실험개요

본 연구에서는 국내규준의 적재하중을 적용하였을 때, 강도설계의 모든 규준을 만족하면서, 국내에서 구입 가능한 재료를 사용하여, 생산과 시공의 경제성을 고려한 “최소 깊이 더블티 단면”을 최적이론에 의하여 제시한 단면에 대한 휨시험을 병행하였다. 본 실험은 다음 사항에 특히 유의하여 실험하였다.

- 1) 더블티 국내생산 시 발생할 수 있는 문제점의 도출 및 해석,
- 2) 최소 깊이 보의 휨강도의 적합성,
- 3) 최소 깊이 보의 휨파괴 거동의 적합성,
- 4) 최소 깊이 보와 두꺼운 7.5cm 토엠펜과의 연결 된 거동의 문제점 파악 및 분석,
- 5) 최소 깊이 보에서 댄단부의 전단내력 과 보의 휨내력 비교분석.

본 실험을 결과 및 의견개진을 4.2절에서 요약하였다.

4.2 보의 거동요약 및 의견개진

강도설계규준¹⁾은 풀프리스트레스(full prestress)를 기초로 고안되었으므로, 전체 사용하중 하에서 파셜프리스트레스(partial prestress)에 의한 균열을 허용하지 않는다.⁴⁾⁶⁾ 이 실험의 모든 시험체의 초기균열은 보 중앙 가력부 하부에서 순수 휨균열로 시작되었다. 1D, 1S시험체의 가력모멘트 22.04t·m~25.28t·m에서, 그리고 2D, 2S시험체는 41.72~37.74t·m에서 초기 균열이 시작되었으며, 이는 계산된 전체 사용하중(full service loading)을 초과한 외력에서 초기균열이 관찰되었

다. 초기균열시의 처짐은 10.84~17.18mm로 평균 14.4mm로 계측되었다.

모든 보의 균열확산방법은 유사하였으며, 평균 약 30cm간격으로 중앙에서 단부방향으로 새로운 휨균열이 계속 발생되었고, 가력을 증가시키자 단부부근의 휨균열은 휨·전단균열로 가력위치 방향으로 경사 되어 발달하였다.

하중계수 적용하중인 설계하중을 넘어서서 부터, 처음균열의 사이로 새로운 균열이 계속 발생 되어 평균 균열간격은 약 15cm정도가 되며, 보 전체스팬에 넓게 분포되었다.

일점 절곡강선(one-point depressed)의 DT-1D와 DT-2D는 강선 디바이스(절곡근 제작을 위한 삽입재)에 걸려 올바르게 연결되지 않은 HD-19로 인한 인장파괴로 파괴되었으나, DT-1D는 최하단 휨철근이 하부 콘크리트의 탈락과 함께, 철근이 외부로 튀어나온 후 파괴되었고, DT-2D는 DT-1D와 같이 외부로 튀어나오지는 않았으나 하부 철근피복이 완전히 보인 후 파괴되었다. 두 개의 보는 지점까지 확산된 수십 개의 휨균열을 만들어낸 후 하부철근 이음불량 및 이음부 위치 불량으로 인한 Fig. 10과 같은 순수 인장파괴를 초래하였다.

12.5m의 보를 생산하기 위하여 최 하단부 휨철근은 맵단부 웹 하단에서 전단균열에 의한 인발력에 저항하기 위하여 Fig. 3과 같이 철판에 용접하도록 되어 있다. 동일한 철근이 휨과 전단저항에 중추적으로 활용되므로 12.5m 전장을 적용하는 것이 바람직하나, 국내생산 및 운송의 문제점으로, 부득이 할 경우 이음부는 단부에서 철근의 전체 정착길이 1.7L_d를 넘어서 이음할 것이 권장되며, 단부는 앵글, 플레이트, 혹은 가로철근등에 용접·정착하는 것이 바람직한 것으로 판단된다(참조 PCI Hand Design Handbook, Design Aid 11. 2. 8: Table A, pp. 11-25)²⁾.



Fig. 10 Example of Flexural Failure(DT-2D)

수평균을 적용한 DT-1S와 2S는 프리캐스트 보와 토핑콘크리트가 큰 소리와 함께 완전 분리

되어, Fig. 11과 같이 압축 파괴되었으며 DT-2S의 경우상부 플렌지 밑면까지 균열이 확산된 후 파괴되었다. DT-1D와 2D에서도 토핑분리는 발생되었으나, 인장파괴의 후속으로 발생되어 보 중앙부 1/4지점까지의 분리만 확인할 수 있었고 단부에서 분리는 없었다.



Fig. 11 Flexural Loading Test(DT-1S)

프리스트레스트 프리캐스트 콘크리트 싱글티는 철근콘크리트보 보다 매우 연성이 있으므로, 종국 강도에서는 일반적으로 높은 처짐을 유발하며 파괴한다. 고강도 콘크리트는 매우 빨리 응결되므로 표면을 급히 거칠게 마감하기 위하여 진동 스크리딩(screeding)설치가 국내생산에서 필요하나, 부득이 할 경우 수평전단력에 대한 보강이 이루어져야 된다고 생각된다. 모든 맵단부 단부에서 Fig. 12와 같은 균열과 0.03~0.05mm에 이르는 강선 슬립이 발생되었으나, 맵단부의 균열로 파괴된 보는 없었다. 대부분의 균열은 맵단부 모서리에서 45° 각도로 시작되어 DT-2S의 경우 최종파괴시에 단부에서는 웹에서부터 발생한 약 0.3mm폭의 균열이 플렌지 밑면에까지 확장됨이 관찰되었다. 일반적으로 맵엔드 균열과 슬립은 함께 발생되었으나, 최종파괴에서 그 크기에 직접적인 연관관계를 파악할 수 없었다.



Fig.12 Crackings at Dap End (DT-2S)

본 연구에서의 모든 보의 댄단부는 PCI 설계기준으로 설계되었으며, 충고축소를 위하여 그 한계 권장치-보의 50% 깊이를 댄단부 깊이로 설계하였다. 실험초기 첫 번째 의문은 휨파괴보다 먼저 댄 전단파괴로 보가 파괴될 것인가 이었고, 두 번째는 댄균열이 발생할 것인가 이었다. 웹에서 시작하는 웹 전단균열은 일반적으로 정착구 파괴 균열로 연결되므로 휨실험에서는 반드시 발생하지 말아야 한다. PCI기준에 따른 배근방법⁸⁾은 충고축소를 고려할 때 좁은 면적에 과도한 철근 배근을 초래하므로, 축소된 깊이의 너블티를 위한 보다 효과적인 배근방법이 필요한 것으로 사료된다.

4.3 긴장력과 캠버

강선 절단 후, 바로 측정된 캠버크기는 Table 12와 같다. 계산된 캠버와 측정된 캠버의 차이는 평균 0.44mm이하로, 적용된 긴장력이 바르게 전달되었음을 확인할 수 있었다. 캠버계산은 PCI 방법에 의하여 Table 12와 같이 산정하였다(부록1 참조).

Table 12 Camber

시험체	P _s (ton)	계산된 캠버(mm)	측정캠버 (mm)
DT-1S	79.2	18.9	21.0
DT-1D	79.2	25.7	23.0
DT-2S	105.6	16.1	19.0
DT-2D	105.6	20.6	20.0

4.4 싱글티의 휨성능 평가

전체 사용하중 하에서 균열유무, 그리고 설계하중(full service loading) 하에서의 보의 거동을 비교 분석하여 보았고, 초기 균열발생시의 하중을 기록하였다. Table 13에서 실험체는 모두 전체사용하중 이후, 설계하중 이전에 초기균열이 발생되었음을 알 수가 있다.

Table 13 Loadings for Initial Cracking

시험체 No.	Full Service Strength		Design Strength		초기 균열 발생 시		
	예상 강도 (t*m)	예상 하중 (ton)	예상 강도 (t*m)	예상 하중 (ton)	실험 강도 (t*m)	실험 하중 (ton)	처짐 (cm)
DT-1D	21.09	7.64	33.75	12.22	22.04	7.98	14.64
DT-1S	21.09	7.64	33.75	12.22	25.28	9.15	14.77
DT-2D	35.16	12.73	57.66	20.87	41.22	14.92	17.18
DT-2S	35.16	12.73	57.66	20.87	37.74	13.66	10.84

최대 예상 적재하중 하에서 균열발생이 일반적으로 일시적인 것이므로, 최대 적재사용하중이

제거되면 균열은 자연 복구되므로 프리스트레스트 보를 무 균열 재료로 호칭할 수 있다. 이 일시적인 균열은 일반적으로 내부 철근의 부식을 초래하지 않으므로, 유럽 기준들은 자중경감을 위하여, 파설 프리스트레스트 개념을 PS보에 많이 적용하여 설계한다. 그러나, 아직 초기단계인 국내 건설환경을 고려하여, 본 연구에서의 보는 강도설계의 보수적인 설계개념을 그 기초로 하였으므로, 전체 사용하중 하에서 보에 균열은 발생하지 않아야 한다.

Table 14 Comparison Calculated Nominal Strength with Test Strength

시험체 NO.	계산된 중국 강도		중국파괴시 시험체 강도		비율
	예상강도 (t*m)	예상하중 (ton)	실험강도 (t*m)	실험하중 (ton)	
DT-1D	56.81	20.2	-	-	-
DT-1S	60.33	22.08	72.07	26.09	1.20
DT-2D	87.06	31.51	94.59	34.24	1.09
DT-2S	90.14	32.62	109.88	39.76	1.22

휨강도 실험결과는 Table 14와 같이 강도설계의 설계휨강도를 상회하여 파괴되었다(부록 2 참조). 1S와 2S는 예상강도보다 약 20~22%를 상회하는 강도에서 중국파괴를 초래하였다. 1D와 2D는 절곡근 설치에서 삽입장치 불량으로 인한 부실한 연결부가 보 중앙하단에 배치되었으나, 2D는 9% 상회한 하중에서, 1D는 예상하중에 3% 못 미치는 54.28t*m까지 가력할 수 있었다(예상강도 계산 부록2 참조). 특히, 1D는 UTM 작동실수로 중국파괴까지의 하중을 적용하지 못하였다. 휨실험 시와 중국파괴 시의 처짐량은 Table 15와 같다. Table 15와 같이 전체 처짐은 설계 처짐보다 훨씬 상회한 평균 13.2cm까지 보 중앙 처짐이 발생한 후 파괴되었다. 휨실험에서 하중-처짐 곡선의 예는 다음의 Fig. 13과 같다.

Table 15 Deflections of Specimen at Flexural Failure

시험체 No.	중국파괴시 하중 (ton)	처짐량 (mm)
DT-1D	-	-
DT-1S	26.09	123.85
DT-2D	34.24	156.58
DT-2S	39.76	114.94

일반적으로 보 중앙에서 시험체의 처짐은 초기 균열이 발생되기 전까지는 매우 선형적인 양상을

보이나, 이후 하중이 계속 증가되고 균열이 계속 진행되면서, 처짐 양상은 비선형으로 급격한 증가를 산출하였다.

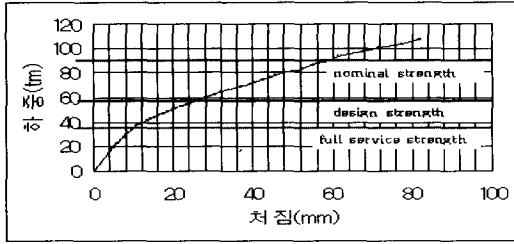


Fig. 13 Load - Deflection Curve (DT-2S)

5. 결론

본 연구에서 국내규준의 적재하중을 적용하였을 때, 강도설계의 모든 규준을 만족하면서, 국내에서 구입 가능한 재료를 사용하여, 생산과 시공의 경제성을 고려한 "최소 깊이 더블티 단면"을 최적이론에 의하여 제시한 단면에 대한 휨시험을 실행하였다. 이 연구에서의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에 적용된 단면은 전체 사용하중에 균열발생이 없었고, 휨 공칭강도를 평균 약 17%를 상회하여 최종파괴가 되었으므로 강도 설계규준에 합당한 휨거동을 보여주었다.

2. 모든 보는 지점까지 확산된 새로운 휨균열을 수십 개 만들어낸 후 평균 13.2cm의 최대 처짐에서 상부 토폰콘크리트 분리로 인한 압축파괴 또는 하부 철근 이음불량에 의한 인장파괴를 초래하였다.

3. 최 하단부 휨철근은 일반적으로 동일한 철근이 휨과 전단저항에 중추적으로 활용되므로 12.5m 전장을 적용하는 것이 바람직하나, 국내생산 및 운송의 문제점으로, 부득이 할 경우 이음부는 단부에서 철근의 전체 정착길이 $1.7L_d$ 를 넘어서 이음할 것이 권장되며, 단부는 앵글, 플래이트, 혹은 가로철근등에 용접·정착하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4. 고강도 콘크리트는 매우 빨리 응결되므로 표면을 급히 거칠게 마감하기 위하여 전동 스크리딩설치가 필요하나, 부득이 할 경우 수평전단력에 대한 보강이 필요한 것으로 판단된다.

5. PCI규준에 따른 배근방법은 층고속도를 고려하여 그 한계 권장치-보의 50% 깊이를 댄단부 깊이로 설계하였을 때, 좁은 면적에 과도한 철근

배근을 초래하므로, 축소된 깊이의 더블티를 위한 보다 효과적인 배근방법에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

6. 부록

6.1 더블티 초기 캠버 산정

프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트부재의 초기긴장력에 의한 초기캠버는 PCI Hand Book²⁾에 제안된 모멘트·면적 방정식에 기초한다. 즉, 초기 강선긴장력에 의한 캠버와 자중에 의한 처짐 영향을 고려하여 다음과 같이 규정되었다.

① 수평근의 경우;

$$\Delta \uparrow = \frac{P_o e l^2}{8 E_c I} \quad (b-1)$$

$$\Delta \downarrow = \frac{5 W_o l^4}{384 E_c I} \quad (b-2)$$

여기서, P_o = 강선수 × 초기긴장력(kg)

e = 중립 축에서 강선까지의 거리(cm)

E_c = 콘크리트의 초기 탄성계수(Kg/cm²)

I = 환산 단면 이차모멘트(cm⁴)

② 일점 절곡형의 경우;

$$\Delta \uparrow = \frac{P_o e l^2}{8 E_c I} + \frac{P_o e' l^2}{12 E_c I} \quad (b-3)$$

$$\Delta \downarrow = \frac{5 W_o l^4}{384 E_c I} \quad (b-4)$$

여기서 e' = 강선의 격인 높이(cm)

그러므로, 전체 캠버 = $\Delta \uparrow + \Delta \downarrow$ 이다.
Table 17은 각 시험체의 초기긴장력에 의한 캠버를 위의 식(b-1)~(b-4)에 의하여 산정한 결과이다.

6.2 더블티 장기 캠버 산정

프리캐스트 프리스트레스트 부재의 장기캠버는 시간경과에 따른 강선긴장력의 손실과 강선풀림 후 시간경과에 따라 콘크리트 강도증진 등을 고려해야 한다. 부재의 캠버나 처짐은 강선 절단 초기나 부재가 설치되는 최종 순간에 만 중요한 것이 아니라 통상적으로 콘크리트 타설후 30-60일이 경과되는 운반(erection)의 시기의 캠버도 고려해야 한다. 더블티 슬래브의 장기캠버는 통상적으로 초기캠버에 경험적으로 얻어진 계수를 적용시켜 구하고, 계산된 초기캠버에 계수를 적용시킬 때에는 긴장력에 의한 캠버와 부재자중에 의한 캠버를 별도로 나누어서 계수를 적용시켜야 한다. 즉, 시간경과에 따른 강선 긴장력손실은 강선긴장

력에 의한 캠버만 영향을 미치기 때문이다.

다음 Table 16은 운반(erection)시와 최종변형(final)시 부재캠버 산정시 초기 캠버에 적용시켜야 하는 계수일람표이다. 다음의 계수 일람표를 근거로 운반시와 최종시의 시험체캠버를 산정하여 다음의 Table 18~19와 같이 산정하였다.

6.3 더블티 공칭 휨강도 산정⁴⁾⁵⁾⁶⁾

더블티 시험체의 공칭 휨강도는 평형방정식에 의하여 식 (b-5)과 같다.

$$M_n = A_{ps} f_{ps} \left(d_b - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (b-5)$$

여기서, A_{ps} = 강선의 단면적, d_b = 단면의 유효 춤

$$a = (A_p f_{ps} + A_s f_y) / (0.85 f_{ck} b)$$

b = 단면 유효 폭, A_s = 인장철근 단면적

f_y = 철근의 인장강도

보의 공칭강도에서 강선응력, f_{ps} 는 다음과 같다.

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - \frac{\gamma_P}{\beta_1} \left[\frac{\rho_p f_{pu}}{f_{cs}'} + \frac{d}{d_b} (\omega - \omega') \right] \right) \quad (b-6)$$

여기서, f_{pu} = 강선의 종국강도

$\gamma_P = 0.28$, $f_{py}/f_{pu} \geq 0.9$ 인 low-lax 강선

$$\rho_p = A_p / (bd_p)$$

$$\rho = A_s / (bd_p)$$

$$\rho' = A_s' / (bd_p)$$

$$\omega = \rho (f_y / f_{ck}), \quad \omega' = \rho' (f_y / f_{ck})$$

Table 20은 위의 식을 근거로 각 시험체의 공칭 강도를 산정한 값이다.

Table 16 Coefficients for Deflection

사항	도펑 없을 때	도펑있을때
운반시 (At erection)	1.85	1.85
(1) 처짐(↓) - 부재의 자중으로 인한 탄성 처짐		
(2) 캠버(↑) - 강선 긴장력에 의한 탄성캠버	1.80	1.80
최종시 (At final)		
(1) 처짐(↓) - 부재 자중에 의한 탄성 처짐	2.70	2.40
(2) 캠버(↑) - 강선 긴장력에 의한 탄성캠버	2.45	2.20
(3) 처짐(↓) - 하중계수 적용치 않는 고정하중에 의한탄성처짐	3.00	3.00
(4) 처짐(↓) - 도펑 콘크리트의 자중으로 인한 탄성 처짐	-	2.30

Table 17 Camber at Releasing of Strands

시험체	P_{asc} (ton)	e (cm)	e' (cm)	L_o^2 (m ²)	f_{ci}' (kg/cm ²)	E_{ci} (kg/cm ²)	I (cm ⁴)	W_o (t/m)	P_{asc} 캠버 (mm)	W_o (mm)	전체캠버 (mm)
DT-1S	79.2	25.76	0	156.25	326	270,832.1	412,789.1	0.37056	35.637	10.537	25.100
DT-1D	79.2	25.76	10	156.25	331	272,901.1	578,674	0.37056	31.758	7.459	24.299
DT-2S	105.3	27.94	0	156.25	366	286,966.9	790,032	0.41744	25.418	5.853	19.565
DT-2D	105.6	27.94	10	156.25	385	294,321.3	1,095,752	0.41744	22.132	4.115	18.017

Table 18 Cambers at Erection

시험체	$E_{c,0.5\text{령}}/E_{c,1\text{령}}$ 비율(1)	W_o 에 의한 처짐 (mm)	P에 의한 캠버 (mm)	$E_{c,0.5\text{령}}$ (kg/cm ²)	$1.85W_o$ 에 의한 처짐(2) (mm)	$1.80P$ 에 의한 캠버(3) (mm)	[(2)+(3)]×(1) (mm)	I_{comp} (cm ⁴)	$W_o, 0.5\text{령}$ 에 의한 처짐 (mm)	전체 캠버 (mm)
DT-1S	0.77	-10	35	300,000	-18,500	63	34,265	642,460	-0.683	33,582
DT-1D	0.78	-7	31	300,000	-12,950	55	32,799	883,219	0.497	32,302
DT-2S	0.76	-5	25	300,000	9,250	45	27,170	1,178,386	-0.372	26,798
DT-2D	0.72	-4	22	300,000	7,400	39	22,752	1,586,878	-0.276	22,476

Table 19 Cambers at Final

시험체	$E_{c,도평}/E_{c,PK}$ 비율(1)	W_o 에 의 한 치 짐 (mm)	P_i 에 의 한 캠버 (mm)	$E_{c,도평}$ (kg/cm^2)	$2.40W_o$ 에 의 한 치 짐 (2),(mm)	$2.20P_i$ 에 의 한 캠버 (3),(mm)	$[(2)+(3)] \times (1)$ (mm)	$I_{c,도평}$ (cm^4)	W_o 에 의 한 치 짐 (mm)	$2.30W_o$ 에 의 한 치 짐 (mm)	전체 캠버 (mm)
DT-1S	0.77	-10	35	300,000	-24	77	40	642,460	-0.683	-1.570	38
DT-1D	0.78	-7	31	300,000	-16	68	40	883,219	-0.497	-1.143	38
DT-2S	0.76	-5	25	300,000	-12	55	32	1,178,386	-0.372	-0.855	31
DT-2D	0.72	-4	22	300,000	-9	48	27	1,586,878	-0.276	-0.634	26

Table 20 Flexural Strength of Specimens

시험체	A_{ps} (cm^2)	b (cm)	d (cm)	d_p (cm)	d/d_p	f_{pu} (kg/cm^2)	γ_p	ρ_p	β_1	f'_{cs} (kg/cm^2)	f_{ps} (kg/cm^2)	A_s (cm^2)	ω	a (cm)	M_n (t*m)
DT-1D	5.9	120	56	42.5	1.32	18983	0.28	0.00116	0.7	300	18139.6	5.7	0.0113	4.26	55.81
DT-1S	5.9	120	63.5	45	1.41	18983	0.28	0.00109	0.7	300	18186.4	5.7	0.0101	4.27	60.33
DT-2D	7.9	120	71	52.5	1.35	18983	0.28	0.00125	0.7	300	18150.2	5.7	0.0089	5.43	87.06
DT-2S	7.9	120	79.5	53.3	1.49	18983	0.28	0.00123	0.7	300	18162.1	5.7	0.0080	5.43	90.14

감사의 글

본 연구는 과학기술 정책관리 연구소 (Kistep)와 삼성물산 건설부문의 연구비 지원에 의하여 수행되어 진 것으로 협조해 주신 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI 318-95, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary(ACI 318- 95)". Detroit, Michigan.
2. PCI Design Hand Book, 4th ed, Prestressed Concrete Institute, Chicago.
3. 대한건축학회, 철근콘크리트 구조계산 기준 및 해설, 1995.
4. Nilson, A. H., 2rd, "Design of Prestressed Concrete." John, W., and Sons, Inc., 1978.
5. Nilson, A. H., "Flexure Design Equations for Concrete Members," Journal of PCI, V. 14, NO. 1, February 1969, pp. 62-71.
6. Orbison, J. G., "Generalized Flexure Design Equations for Prestressed Concrete," Journal of PCI, V. 30, NO. 2, March/April 1985, pp. 172-182.
7. Lin, T. Y., "Load Balancing Method for Design and Analysis of Prestressed Concrete Structures," Journal of PCI, V. 60, NO. 6, June, 1963, pp. 719-742.
8. Lin, T. Y., and Burns, N. H., Design of Prestressed Concrete Structures, 3rd ed, Newyork, 1981, pp. 646.
9. Nawy, E. G., and Huang, P. T., "Crack and Deflection Control of Pretensioned Prestressed Beams," Journal of PCI, V. 22, NO. 3, May-June 1977, pp. 30-47.

요 약

더블티 슬래브는 PCI Design Handbook에 의하여 설계할 수 있으나, 교량설계 위주로 구성되어 있고, 국내 여건에 따른 건축적 활용을 위한 재구성이 필요하다. 기존 더블티 관련 실험들은 규정된 설계요소에 대한 변형으로 훨씬 개선된 거동의 단면들을 제시하여 왔다. PCI에 규정된 형태, 규정된 $350 Kg/cm^2$ 의 콘크리트 강도와 배근방법 등이 국내의 건축적 요구 상황에 가장 적합한 단면으로 무조건 받아들이기엔 앞으로 사용될 전체물량을 고려할 때 바람직 할 수 없다.

본 연구에서 국내규준의 적재하중을 적용하였을 때, 강도설계의 모든 규준을 만족하면서, 국내에서 구입 가능한 재료를 사용하여, 생산과 시공의 경제성을 고려한 "최소 춤 더블티 단면"을 최적이론에 의하여 제시한 12.5m 스패의 4개의 프로토타입 더블티단면에 대한 휨시험을 병행하였다. 첫 번째 두 개의 더블티 단면은 매장건축에서 $1.2 ton/m^2$ 의 적재하중을 위한 직선형(Straight)과 일점 절곡형(One-point Depressed)의 강선배근과 관련된 것이고, 두 번째 두 개의 단면은 주차장에서 $0.6 ton/m^2$ 의 적재하중을 위한 직선형과 일점 절곡형의 강선배근과 관련된 것이다.

제시된 단면들은 강도설계 휨규준의 모든 요구사항을 만족시켰으나, 최 하단 철근이음부의 위치 및 방법, 상부 토핑콘크리트와 PC 콘크리트 접합부, 댄단부의 보강방법에서 개선할 필요가 있는 것으로 파악되었다.

(접수일자 : 1999. 2. 24)