

최소자중 프리캐스트 프리스트레스트 게르버 U형보의 최적화

박현석¹⁾ · 김인규¹⁾ · 유승룡^{1)*}

¹⁾ 동국대학교 건축공학과

(2001년 12월 12일 원고접수, 2002년 5월 31일 심사완료)

Optimization for the Least Weight, Precast Prestressed Gerber's U-Beams

Hyun-Suk Park¹⁾, In-Gyu Kim¹⁾, and Sung-Yong Yu^{1)*}

¹⁾ Architectural Engineering Department, Dongguk University, Seoul, 100-715, Korea

(Received December 12, 2001, Accepted May 31, 2002)

ABSTRACT

The cost on transmission and erection of the precast prestressed concrete members largely depends on the weight of them. Optimum process is performed on a U-beam section to control the prestressing force, to reduce the self-weight, and to meet the required strength and stability. The strength, deflection, and concrete stress at the top and bottom of the section considered are required to check according to each construction step in this process. The weight of the original rectangular concrete beam could be reduced up to 39~50% from this method. Two full scale prototype U-beams were proposed and tested in this study. It was found that the U-beams in the test showed good performance in strength and serviceability within the limits of ultimate strength design method.

Keywords: optimum design, precast, prestressed, self-weight, U-beam, flexure

1. 서 론

1.1 연구개요

본 연구에서는 게르버보 시스템의 중앙부 프리캐스트 프리텐션 보의 자중을 최소화 할 수 있는 직사각형 U-beam 단면을 제안하였다. 국내실경과 규준을 만족하는 '장스팬 프리스트레스트 PC골조 구조시스템' 개발을 위한 연구¹⁾로서, 20~25m의 게르버보의 내부보 분재 길이는 11.5~14.5m로 할 수 있다. 그 자중은 10~20 tf으로서, 실물크기 구조물의 운송 및 시공에서 경제적이지 못하다. 본 연구에서 최적설계에 의하여 "최소 자중 U-beam 단면"을 제안하였다. 제안된 게르버 U형보 단면의 구조성능은 시험을 통하여 그 효율성을 구명하며, 프리스트레스트 PC골조 구조시스템에 의한 건물 구조설계의 합리화를 도모하고 구조체의 안전성과 경제성을 높이는 것을 목적으로 한다.

1.2 단면계획

Fig. 1의 U타입 단면은 최적이론에 의하여 휨 응력의 구속을 받는 단면의 크기와 초기 긴장력의 크기 등을 결

정하여 부재의 자중을 최소화하여 운송 및 시공의 편리성을 극대화하도록 도모하였다.

프리캐스트 프리스트레스트 부재는 1) 프리캐스트 보에 긴장력이 도입될 때, 2) 합성단면에 추가 사하중이 재하될 때, 3) 합성단면에 추가 사하중과 활하중이 재하될 때의 각 시공단계별 응력검토가 필요하다. 본 연구에서는 각 단계별 응력 제한치를 만족하는 최소자중 프리캐스트 U형보를 최적설계에 의하여 평가하여 보았다. 이 경우 가장 주된 문제는 강도설계 규준 범위 내에서 각각의 시공 단계에서 응력 제한치를 초과하지 않는 범위 내에서 프리캐스트 보의 깊이(X(6)-X(5))를 어느 한계까지 절단할 수 있는가에 있다(Fig. 1참조).

콘크리트의 최소 피복두께는 25cm이상으로 하였다. 하프슬래브 두께 7cm와 토폰콘크리트 두께 11.2cm를 위한 18.2cm의 토폰콘크리트를 타설하여 프리캐스트 콘크리트는 목표강도 420 kgf/cm²로, 그리고 토폰콘크리트는 270 kgf/cm²로 계획하였다. 긴장재는 극한 강도 $f_{pu} = 18,900$ kgf/cm²인 7연강선(1/2 in)을 사용하였으며, 긴장력이 도입될 때의 초기 콘크리트 강도는 $f_{ci} = 350$ kgf/cm²이었다 사용하였다.

2. 최소자중 게르버 U형보 개발

* Corresponding author

Tel : 02-2260-3361 Fax : 02-2260-3361

E-mail : ysy@dgu.ac.kr

2.1 개발개요

본 연구에서는 최적이론²⁾을 적용하여 휨 응력의 구속을 받는 단면의 크기와 초기 긴장력의 크기 등을 결정하여 부재의 자중을 최소화하여 운송 및 시공의 편리성을 극대화하는데 있다. 설계 하중으로는 보와 현장타설 토핑콘크리트, 하프슬래브의 자중을 합한 사하중과 추가 활하중은 일반 매장을 고려하여 적용하였다. 각 경간에 따른 설계 하중은 Table 1과 같다.

2.2 구조도

게르버보의 중앙부 단순보의 길이는 아래 식 (1)의 반곡점 위치에 의한다. 즉, 18m, 20m, 25m 경간 게르버보를 위하여 등분포하중이 적용시 반곡점위치를 고려한 내부보의 길이는 각각 10.4m, 11.5m, 14.4m가 된다. 20m 경간 게르버보에서 중앙 11.7m의 보는 기둥 위에 연속된 4.15m의 내민보 위에 단순 지지되어야 한다. 본 연구에서는 이 중앙보가 20cm의 결침턱으로 단순 지지되었다고 가정하였다.

Fig. 2, 3에서 하중폭 길이인 L_2 방향 길이는 5m이며, 40×40cm 기둥에 접합되는 것으로 가정할 때 이 게르버보의 하단 폭은 40cm로 할 수 있다. 이 경우 11.7m의 프리캐스트 보는 보깊이를 1m로 가정할 경우 11.23tf으로 10tf이상의 대용량 크레인을 필요로 한다.

$$L_{\text{중앙보}} = L_1 - 2 \times \left(\frac{L_1}{2} - \sqrt{\frac{1}{12} \times L_1} \right) \quad (1)$$

2.3 단면개발

최적이론을 적용하여 최소 자중을 위한 단면, 강선과 철근의 배근, 콘크리트강도등 변수의 적정치를 구할 수 있다. 최적이론에 의하여 국내 적용 가능한 경간(18m, 20m, 25m)에 대한 각각의 U형보의 단면 최적화 설계를 제시하려 한다. 이 설계로부터 대표적인 경간 10m 실물 실험체 U형보를 제작하고, 휨강도 실험을 하여 설계가 현행 시방서의 강도규정을 만족함을 검토하였다.

U형보의 형상은 다음의 3가지 목적으로 개발되었다. 1)

운송의 효율성과 시공시 10tf 이하 용량의 크레인을 적용하여 조립할 수 있도록 프리캐스트 자중을 최소화한다. 2) 하단면은 강선의 배치를 위한 충분한 면적을 갖으며, 기둥과 동일한 크기를 갖는다. 3) 웨브는 운송 및 시공시 파단을 막을 수 있는 충분한 폭을 갖는다.

프리스트레스 부재로서, 필요한 프리스트레스 강선수는 부재의 길이나 작용하중에 의하여 결정된다. 강선이 일

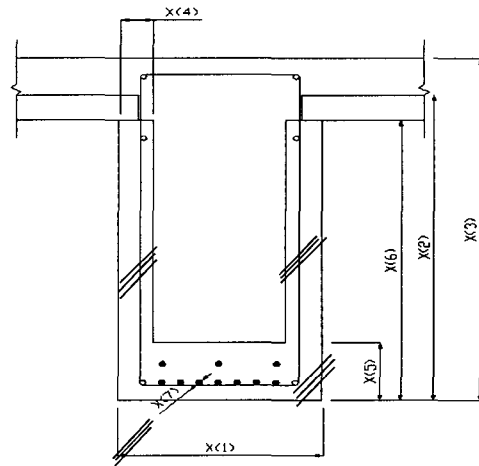


Fig. 1 Section of U-beam

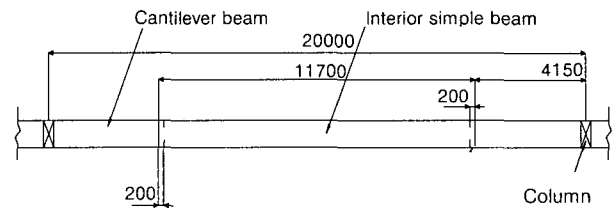


Fig. 2 Structural plan of U-beam in Gerber's beam

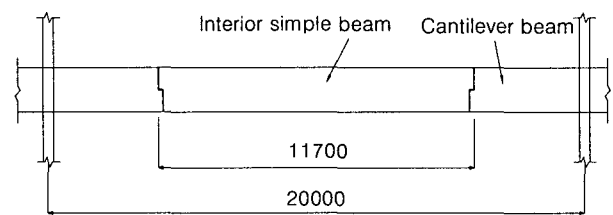


Fig. 3 Section of U-beam in Gerber's beam

Table 1 Design load for each design span (standard floor)

Span		Column size (cm)	Design load				f_{ci} (kgf/cm ²)	f_{ck} (kgf/cm ²)	f_{pu} (kgf/cm ²)
Full span (m)	Interior design span (m)		W_o (kgf/m)	W_{shl} (kgf/m)	W_{sd} (kgf/m ²)	W_L (kgf/m ²)			
5×18	5×10.4	40×40	296.3	421	350	500	300	420	18,900
5×20	5×11.5	40×40	349.0	429					
5×25	5×14.4	50×50	462.2	776					

W_o : Self-weight of precast concrete beam W_{shl} : Super-imposed dead load (topping concrete within shell) W_{sd} : Super-imposed dead load (topping concrete, half slab etc.) W_L : Live load f_{ck} : Design concrete strength of precast beam f_{ci} : Initial concrete strength of precast beam f_{pu} : Ultimate strength of strand

직선으로 놓여진 프리스트레스트 보의 절곡강선 보에 비하여 시공이 편리하며 경제적이므로 본 연구에서는 직선형 강선을 배근하였다^{3,4)}.

2.4 최소자중 게르버 U형보의 최적설계

2.4.1 변수

프리캐스트 단면의 보의 하부폭은 기둥 폭 크기를 적용하였다. 프리캐스트 단면의 크기는 일반 RC보의 높이를 상한값으로 하였고, 프리캐스트 단면에서 하부로부터 중공 부분까지의 거리는 강선이 배근될 수 있는 하한값과 상한값을 두어 제한하였다. 따라서 본 연구에서 고려한 변수는 다음과 같고 Fig. 1에 도시되어 있다. Fig. 4는 이를 고려한 최적화 단계이다.

- X(1) - U형보의 하부 폭
- X(2) - 하프슬래브를 포함한 보 높이
- X(3) - 타설 후 보의 최종 높이
- X(4) - PC 단면의 한 쪽면 상부 폭
- X(5) - PC 단면 하부에서 중공이 시작되는 면까지의 거리
- X(6) - PC 단면의 보 높이
- X(7) - 강선의 초기 긴장력 (P)
- X(8) - PC 보(U형 보)의 자중

여기서, X(1) ~ X(3)는 X(5) ~ X(6)의 종속 변수이다.

2.4.2 수식 모델

본 최적화 문제에는 6개의 단면치수 구속과 2개의 강선수 구속을 갖고 있으며, 이는 ACI 318 - 99 기준⁵⁾에서 제시하는 허용응력과 단면의 기하학적 정의에 의해서 구성된다. ACI 시방서에 의해서 단면의 상면과 바닥 면에서의 압축응력과 인장응력이 허용 값을 초과하지 않도록 하며, 각각의 시공단계에서 응력은 보의 중앙과 단부에서 검증된다.

12개의 허용응력에 대한 규정은 앞에서 언급한 6개의 단면치수 구속과 2개의 강선수 구속을 더하여 추가적인 구속을 제공한다. 수식 모델은 아래 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F(X) \\ & \text{subject to} \\ & G_i(X) \leq \text{limit} \end{aligned} \quad (2)$$

목적함수는 $F(X) = X(8)$ 의 최소화

처음의 8가지 구속(단면치수와 강선 구속)은 아래 식 (3)과 같다.

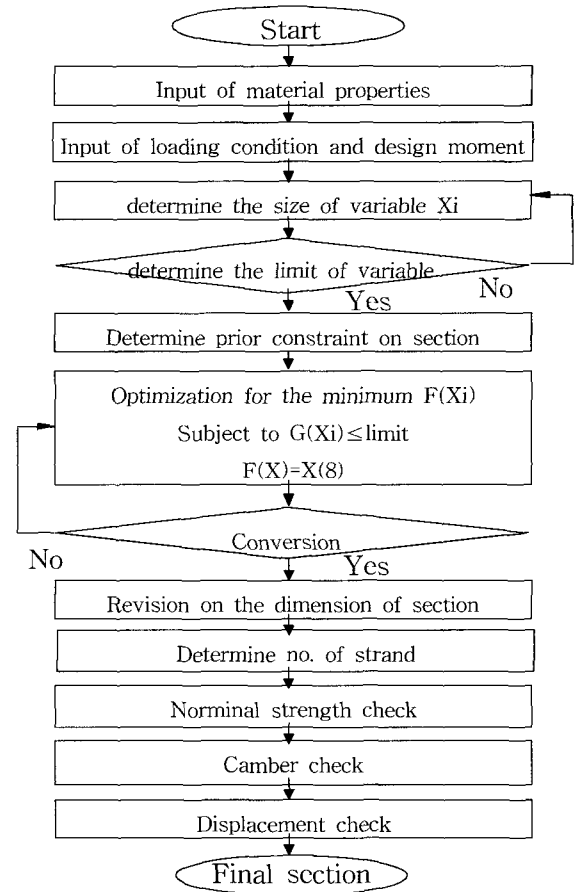


Fig. 4 Optimum process of gerder's U-beams

$$\begin{aligned} G(1) &= X(4) \geq 7 \text{ cm} \\ & X(4) \leq 14 \text{ cm} \\ G(2) &= X(5) \geq 15 \text{ cm} \\ & X(5) \leq 49.5 \text{ cm} \\ G(3) &= X(6) \geq 40 \text{ cm} \\ & X(6) \leq 120 \text{ cm} \\ G(4) &= X(7) \geq 14,347 \text{ kgf} \\ & X(7) \leq 258,249 \text{ kgf} \end{aligned} \quad (3)$$

시공단계에서 보의 중앙과 보의 끝에서의 각각의 압축응력과 인장응력에 대한 제한은 다음과 같다.

1) 긴장력 도입시

프리캐스트 콘크리트 보에 긴장력이 도입될 때, 상·하부면에서 응력제한은 다음과 같다.

a) 중앙부

$$\text{상부 } G(5) = -M_o/S_t - P/A_c + P_i \cdot e_t/S_t \leq 0.8 \sqrt{f_{ci}} \quad (4)$$

$$\text{하부 } G(6) = M_o/S_b - P/A_c + P_i \cdot e_t/S_b \geq 0.6 f_{ci} \quad (5)$$

b) 단부

$$\text{상부G(7)} = - P_i/A_c + P_e \times e_i/S_t \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (6)$$

$$\text{하부G(8)} = - P_i/A_c - P_e \times e_i/S_b \geq 0.6f_{ci} \quad (7)$$

2) 합성 단면에 추가 사하중이 재하될 때

a) 중앙부(근사값)

$$\text{상부G(9)} = - M_d/S_{tc} - P_o/A_{cc} + P_e \times e_i/S_{tc} \geq 0.45f_{ck} \quad (8)$$

$$\text{하부G(10)} = M_d/S_{bc} - P_o/A_{cc} + P_e \times e_i/S_{bc} \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (9)$$

b) 단부

$$\text{상부G(11)} = - P_o/A_{cc} + P_e \times e_i/S_{tc} \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (10)$$

$$\text{하부G(12)} = - P_o/A_{cc} - P_e \times e_i/S_{bc} \geq 0.45f_{ck} \quad (11)$$

3) 합성 단면에 추가 사하중과 활하중이 재하될 때

a) 중앙부(근사값)

$$\text{상부G(13)} = - M_t/S_{tc} - P_o/A_{cc} + P_e \times e_i/S_{tc} \geq 0.6f_{ck} \quad (12)$$

$$\text{하부G(14)} = M_t/S_{bc} - P_o/A_{cc} + P_e \times e_i/S_{bc} \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (13)$$

b) 단부

$$\text{상부G(15)} = - P_o/A_{cc} - P_e \times e_i/S_{tc} \leq 1.6 \sqrt{f_{ci}} \quad (14)$$

$$\text{하부G(16)} = - P_o/A_{cc} - P_e \times e_i/S_{bc} \geq 0.6f_{ck} \quad (15)$$

여기서,

- M_t : 전체 사하중 및 활하중에 의한 보중앙 휨모멘트
- M_d : 보와 현장타설 사하중에 의한 보중앙 휨모멘트
- M_o : 보의 자중에 의한 보중앙 휨모멘트
- S_b : 프리캐스트 단면의 하단에 대한 단면계수
- S_t : 프리캐스트 단면의 상연에 대한 단면계수

- S_{bc} : 합성 단면의 하단에 대한 단면계수
- S_{tc} : 합성 단면의 상연에 대한 단면계수
- P_i : 강선의 초기 긴장력,
- P_e : 강선의 모든 손실 후 긴장력
- A : 콘크리트의 단면적, e : 강선의 편심거리
- f_{ck} : 콘크리트의 압축강도
- f_{ci} : 초기 콘크리트의 압축강도

2.4.3 최적설계 결과

경간에 대한 최적설계 결과는 Table 2, 3과 같다. 1항의 전체경간에 대한 중앙 단순보의 경간은 2항에 도시되었다. 보하단은 3항의 기둥크기와 일치한다. 이 결과는 5.0m를 L_2 길이로 한 18, 20, 25m 경간 게르버보의 중앙보를 위한 결과이다. Table 2와 Table 3의 11.5m의 게르버보를 위한 실험체를 제작 정적 휨실험을 실행하였다(Fig. 5, 6 참조).

게르버 U형보는 11.5m×5m 모듈의 하프 슬래브시스템에서, Table 4의 활하중 500 kgf/m²를 적용하여 실험크기 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 게르버 U형보 2개를 제작하였다. Table 4에 콘크리트가 굳기전 단순지지 상태에서 시공하중에 의한 적용모멘트를 산출하였고, 콘크리트가 굳은 후 구속되지 않은 2방향 연속 슬래브 보가

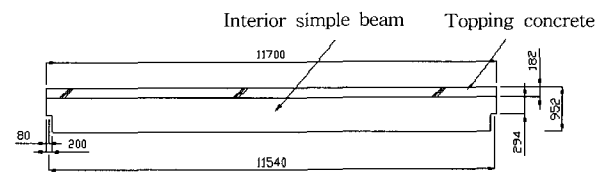


Fig. 5 Elevation of interior portion of Gerber's U-beams

Table 2 Result of optimum design of Gerber's U-beam I

(1) Full span ($L_1 \times L_2$) (m)	(2) Interior design span ($L_1 \times L_2$) (m)	(3) Column size (cm)	(3) Size of bottom dimension (cm)	(5) Depth from the bottom of hole to bottom of the beam (cm)	(6) Total depth of precast section (cm)	(7) Size of web at the top of precast section (cm)	(8) No. of strand (ea)	Available maximum no. of strand in one layer (ea)	Non prestressed tensile steel at bottom	Self load (tf)
18 × 5	10.4 × 5	40×40	40	15	65	7	8	7	2-D ₂₅	3.22
20 × 5	11.5 × 5	40×40	40	15	77	7	9	7	2-D ₂₅	4.03
25 × 5	14.4 × 5	50×50	50	15	100	7	12	9	2-D ₂₅	6.67

Table 3 Result of optimum design for Gerber's U-beam II

Full span ($L_1 \times L_2$) (m)	Interior design span ($L_1 \times L_2$) (m)	Column size (cm)	Flexural strength (tf · m)	Camber (cm)	Deflection under the construction loading (cm)	Deflection under the service loading (cm)	Deflection at failure (cm)
18 × 5	10.4 × 5	40×40	119.290	1.533	0.849	0.805	-14.707
20 × 5	11.5 × 5	40×40	156.033	1.808	0.967	0.914	-18.903
25 × 5	14.4 × 5	50×50	248.627	2.131	0.866	0.808	-21.161

전체하중을 지지한다고 가정하여 설계 모멘트 150.56 tf · m를 산출하였다.

2.4.4 단면비교

Table 5는 최적설계에 의한 U형보와 그와 같은 면적의 직사각형보의 무게를 비교한 표이다. Table 5에서 알 수 있듯이 10 m경간까지는 제안된 U형보는 직사각형보의 50 %정도의 무게 감축을 보여준다. 그러나 경간 12.5 m에서 두 보 사이의 무게차이 비는 약 39 %로 더욱 커짐을 알 수 있다.

3. 실험

3.1 개요

본 실험의 목적은 최적이론에 의하여 설계된 단순지지 11.5m 경간 게르버 U형보의 휨에 대한 적정성과 그 문제점을 파악하기 위하여 실험체는 설계제함에 가장 밀접하게 계획하여 제작되었다. 프리캐스트 게르버 U형 PC보는 보, 슬래브, 토폭 콘크리트의 자중을 지지할 수 있어야 하며, 토폭콘크리트가 강도를 발휘하면 합성재로서 부가된 활하중에도 대응할 수 있어야 한다. 게르버 U형보는 동일한 실험체에 전단실험을 병행하기 위하여 전장 13.5 m인 실물크기 프리캐스트 프리텐션 콘크리트 게르버 U형 보 2개를 제작하였다.

3.2 시험체 제작

실험체 제작 몰드는 10 mm철판을 사용하여 제작하였고, 긴장용 버팀대 외부에 강선 높이를 교정하기 위한 50 mm 철관이 사용되었다. 보강 철근을 제작한 후 몰드(Fig. 7)에 설치하고 PC강선을 설치한 후 유공유압잭으로 각 강선을 긴장시켰다.

강선의 긴장력은 20 tf용량의 유공 로드셀로 측정하였으며, 초기에 2~3 tf만큼 긴장시킨 후 강선의 위치를 재 교정한 후에 정해진 14 tf만큼 강선을 긴장하였다. 그리고 자

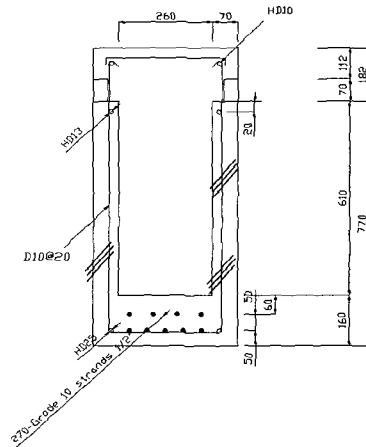


Fig. 6 Section of interior portion of Gerber's U-beams

Table 5 Weight of the rectangular RC beam and U-beam

Span \ Dimension	7.5m	10m	12.5m
	10.4×0.65×0.4	11.5×0.77×0.4	14.4×1.0×0.5
RC Beam	6.5 tf	8.5 tf	17.3 tf
Gerber's U-beams	3.22 tf	4.03 tf	6.67 tf

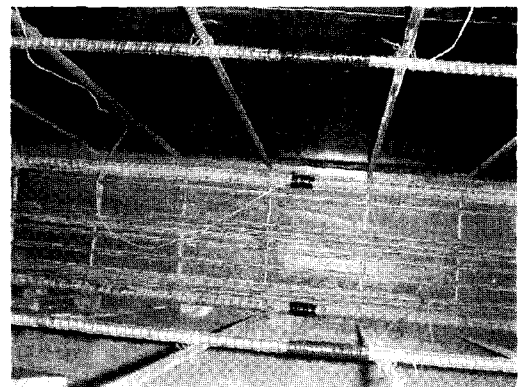


Fig. 7 Reinforcement of Gerber's U-beams

Table 4 Design moment of Gerber's U-beam with 11.5×5 m span module in half slab systems

Type of loadings	Load (kgf/m)	Construction loading condition moment (tf · m)	Full service loading condition	Design moment (tf · m)
W _g : Girder(self)	304.8	5.04	5.04	7.05
W _{sl} : Half slab(7 cm)	840	13.89	13.89	19.44
ceilling	100		1.65	2.31
Artificial stone finish	300		4.96	6.94
partition	200		3.31	4.63
Topping: (11.2 cm)	1344	22.22	22.22	31.11
Center hole	381	6.30	6.30	8.82
W _i : Live load	2500		41.33	70.26
Total	5,969.8	47.4	98.7	150.56

동화 배치플랜트 설비의 회전식 믹서로 배합된 콘크리트를 진동기를 사용하여 타설하였다. 게르버 U형보의 상부는 토핑콘크리트와의 부착확보를 위하여 거칠게 마감하였다. 프리캐스트 콘크리트의 압축강도가 350 kgf/cm²에 도달하였을 때 산소 절단기를 이용하여 강선 절단을 하였고, 프리캐스트 실험체(Fig. 8)의 캠버를 측정한 후 곧 바로 토핑콘크리트를 타설하였다. 콘크리트를 타설할 때마다 각 12개의 표준 공시체를 제작하여 실험강도를 얻을 때까지 압축강도를 측정하였다.

3.3 강재 및 콘크리트

PS강선은 저 이완율, 직경 12.7 mm, Gr. 270, 7연 강선으로, 국내 제조업체 K사의 것을 사용하였다. 일반 철근은 항복강도 4,000 kgf/cm² 이형철근을 사용하였다. 프리캐스트 콘크리트와 토핑 콘크리트의 배합표는 다음의 Table 6~9와 같다.

3.4 실험

3.4.1 실험개요

본 실험의 목적은 최적이론에 의하여 설계된 20m 게르버보의 내부부재 U형보의 휨 적정성을 검토하는데 있다. 실험단면은 아래의 Fig. 9와 같다. 실험크기로 전장 13.5m의 U형보 2개의 실험체에 대하여 휨실험을 실시하였다. 적용경간은 Fig. 9와 같이 10 m를 적용하였고, 가력경간은 보 중앙에서 1 m를 적용하고 가력점 하단에는 처짐계(LVDT)

를 설치하여 보의 처짐을 측정하였다. 보 중앙부 철근에 스트레인 게이지를 설치하였고 실험자료는 데이터 로거로 측정, 저장하였다(Fig. 9 참조).

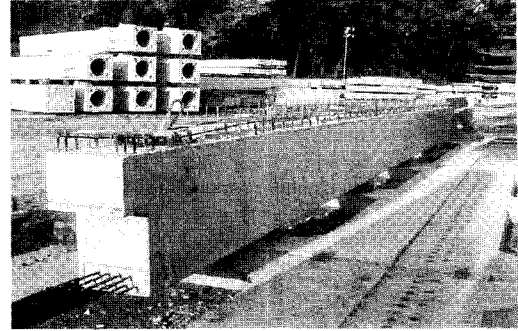


Fig. 8 Precast Gerber's U-beam

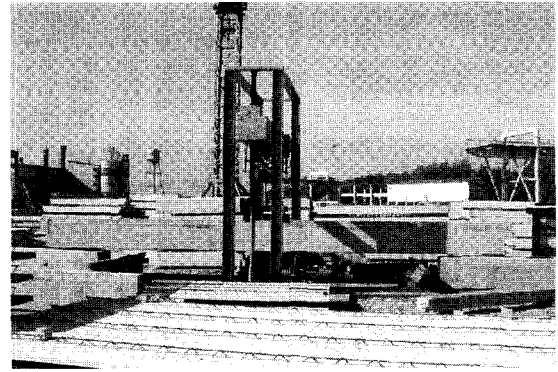


Fig. 9 View of test

Table 6 Precast concrete mix design (I)

Specified concrete strength (kgf/cm ²)	Maximum size of aggregate (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	Fine aggregate ratio (%)	Water-cement ratio (%)	F/A (kgf/m ³)
500	19	12	2	35	29	57.2

Table 7 Precast concrete mix design (II)

Water (kgf/m ³)	Cement (kgf/m ³)	Coarse aggregate (kgf/m ³)	Fine aggregate (kgf/m ³)	Addmixture (kgf/m ³)
166	572	1,054	572	8.6

Table 8 Topping concrete mix design(I)

Specified concrete strength (kgf/cm ²)	Maximum size of aggregate(mm)	Slump (cm)	Air content (%)	Fine aggregate ratio(%)	Water-cement ratio (%)
270	25	8	1.5	43	46

Table 9 Topping concrete mix design(II)

Water (kgf/m ³)	Cement (kgf/m ³)	Coarse aggregate (kgf/m ³)	Fine aggregate (kgf/m ³)
163	354	1,079	784

4. 실험결과 및 분석

4.1 휨강도 및 처짐

실험체의 결과/예측 비율은 아래의 Table 10과 같이 강도설계기준, 공칭 휨강도 산정방법에 의한 예측에 대한 결과 비율은 1.08-1.09로 강도설계로 예측한 공칭강도를 상회하여 중국 파괴되었다(Fig. 10참조). G-1 시험체는 중국 파괴시(167.24 tf·m) 넓게 분산된 휨균열을 보여주었으며, 압괴에 의한 상부 콘크리트 파괴는 없었다. G-2시험체도 G-1 시험체와 거의 유사한 강도(169.24 tf·m)에서 중국 파괴되었으며, 상부 가력점 하부에 압괴가 발생하였다. G-1, G-2 시험체 모두 비슷한 균열양상을 보여주었고, 유사한 강도에서 중국 파괴되었다. 토핑콘크리트를 타설한 두 개의 게르버 U형보 휨 실험에서 두 보 모두 공칭강도를 평균 85% 상회하여 중국 파괴되었다. 아울러, 두개의 보는 모두 설계강도도 상회하였다. 초기균열은 전체 사용하중을 적용한 설계강도에 평균 19%를 상회하여 발생하였다.

게르버 U형보 실험체의 이론 캠버치와 강선 절단시 실험체 중앙에서 실측한 캠버치를 Table 11에 기입하였다. Table 11의 ①에서 보듯이 강선절단시 보중앙에서 실측한 캠버치는 이론 캠버보다 평균 3.2 mm정도 큰 값을 산출하였다. 사용하중 적용시 실측처짐은 평균 5.28 mm로 캠

버를 제한 처짐은 평균 -16.71 mm로 여전히 위로 캠버된 상태이며, 단기하중하의 허용 처짐, 31.94 mm보다 훨씬 작은 값을 산출하였다.

4.2 휨파괴 거동

게르버 U형보는 중국하중까지 넓은 균열분포를 갖으며 파괴되었다. 그러나, Fig. 11, 12에서 볼 수 있듯이 균열폭은 일반적으로 2~3 mm 가량으로 최종 파괴시 약 5 mm를 초과하지 않았다. 균열의 양상은 가력점 밑에서 초기 휨균열이 발생한 후 지속적으로 새로운 균열들이 발생되

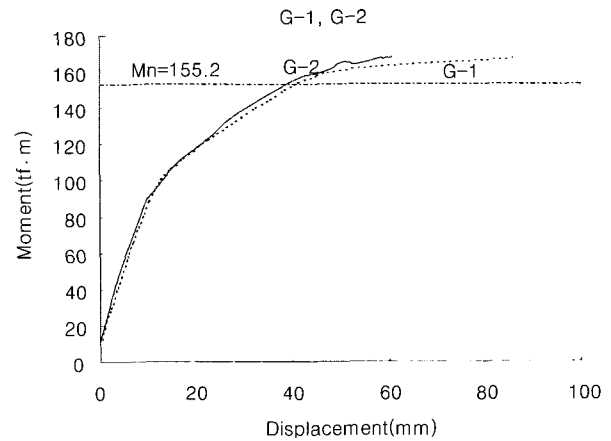


Fig. 10 Moment-displacement relationships

Table 10 Test results-flexural strength of Gerber's U-beams

Name of specimens	Precast concrete cylinder strength fck (kgf/cm ²)	Topping concrete cylinder strength fck (kgf/cm ²)	Full service loading condition						Failing loading condition			
			Construction loading condition (tf·m)	① Actual slab w/d service loading condition (tf·m)	② Experimental slab w/d service loading condition (tf·m)	③ Cracking moment Mcr (tf·m)	④ Test cracking strength (tf·m)	④ Test/② Design	⑤ Nominal strength (tf·m)	Desing moment (tf·m)	⑥ Test (tf·m)	⑥ Test/⑤ Calculated
G-1	430	305	47.4	98.7	77.93	78.92	94.94	1.22	155.03	150.56	167.24	1.08
G-2	380	310	47.4	98.7	77.93	77.46	90.44	1.16	155.38	150.56	169.24	1.09
Average	405	205.67	47.4	98.7	77.93	78.2	92.7	1.19	155.2	150.6	168.2	1.085

Comments : Initial cracking moment ③Mcr are calculated from the center of the beam with an equation

$$Mcr=2\sqrt{f_{ck}}S_2 + P_e(r^2/C_2+e).$$

The concrete strength are measured at the day of test.

The initial cracking strength in test ④ and test result ⑦ are resulted from the addition of tested value and calculated moment due to the self weight - 9.44tf·m.

Theoretical cracking moment ① under the full service loadings are calculated from the actual T slab with a topping concrete. Experimental cracking moment ② are calculated from the 79% of actual T ① by dividing rectangular and flange portion of them.

Table 11 Test results-displacements of Gerber's U-beams

Name of specimens	Theory of camber at beam center (mm)	① Measured camber (mm)	② Measured deflection at service loading condition (mm)	②-① (mm)	Maximum allowable deflection L/360 (mm)	Measured deflection at failure (mm)
G-1	-18.08	-20.0	5.74	-14.26	31.94	87.19
G-2	-18.08	-24.0	4.83	-19.17	31.94	60.82
Average	-18.08	-22.00	5.29	-11.14	31.94	74.00

었다. 수직 균열과 사인장 균열이 고루 발생하였으며, 균열은 실험체의 전 단면에 걸쳐 상당히 폭 넓게 발생되었다.

최종 파괴하중에 이르러서는 G-1 시험체는 167.24 tf·m에서 종국 하중에 도달될 때까지 상당히 고른 균열 양상을 보여주었으며, 상부 압축측 콘크리트의 압괴를 동반한 하부 인장파괴로 종국 파괴되었다. G-2 시험체는 보 상부에 종국파괴시 압괴가 일어났으며, 169.24 tf·m에서 종국 파괴되었다. G-1, G-2 시험체 모두 비슷한 균열 양상을 보여주었고, 균열은 수직균열과 사인장 균열이 고루 분포하였으며, 유사한 하중에서 종국 파괴되었다(Fig. 11, 12참조).

4.3 철근변형률

Fig. 13에 G-1 휨실험 결과는 수평선상에 놓인 두 철근 게이지 평균값으로 처리하였다. 하부 인장 철근과 상부 압축근은 항복 변형률-1904×10⁻⁶을 상회하여 변형하였다. 단, G-1, 실험체의 상부 압축근 ①은 하강하는 변형을 보여주며, 프리캐스트 상부 철근 ②는 초기에는 압축력을 받으며 하강하다가, 중립축의 이동으로 인장력을 받으며 증가되는 변형을 보여주었다. 그러나, 항복 변형률은 상회하지 못하였다. 가력 초기부터 증가하여 항복 변형률을 상회한 하부 인장철근 ③은 가장 많은 변형을 보인 것으로 판단된다. 아울러 철근 변형을 곡선에서 토핑 콘크리트와 PC 콘크리트는 보 파괴시까지 완전히 일체 거동을 하는 것을 확인할 수 있었다.

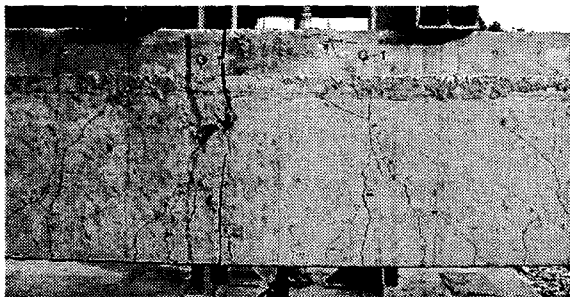


Fig. 11 Example of flexural crackings at failure stage (G-1)



Fig. 12 Example of flexural crackings at failure stage (G-2)

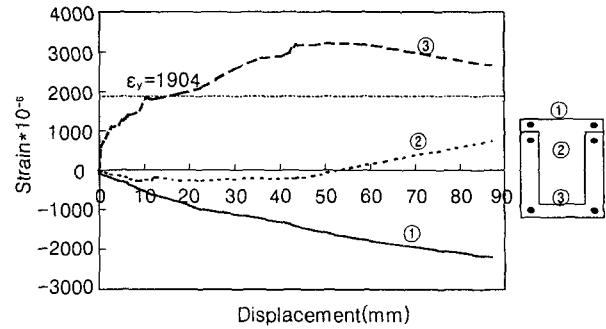


Fig. 13 Steel strain-displacement relationships (G-1)

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 직사각형 보의 슬래브 시스템을 개선할 수 있는 게르버 U형보 단면에 대하여 휨실험을 수행하였다. 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 최적설계에 의해 제안된 U형 PC보는 기존의 직사각형 단면과 유사한 강도와 사용성에서, 직사각형 단면보다 50~39%까지의 자중감축이 가능할 것으로 판단된다.
- 2) 실험체의 강도설계기준, 공칭 휨강도 산정방법에 의한 예측에 대한 결과 비율은 1.08-1.09로 강도설계로 예측한 공칭강도보다 평균 8.5% 상회한 값에서 종국 파괴되었다. 아울러 설계강도를 상회하여 종국 파괴되었다.
- 3) 사용하중 적용시 실측처짐은 평균 5.28 mm로 캠버를 제한 처짐은 평균 -16.71 mm로 여전히 위로 캠버된 상태이며, 단기하중하의 허용 처짐, 31.94 mm보다 훨씬 작은 값을 산출하였다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부와 (주)삼성물산 삼연 PCE의 연구지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상식, 유승룡, "프리스트레스를 도입한 장스팬 PC골조 구조 시스템의 개발," 건설교통부 1년차 보고서, 2000건설 교통부.
2. 유승룡, 민창식, "프리스트레스트 프리캐스트 더블 티형보의 최적설계," 콘크리트학회논문집, 제11권 6호, 1999.
3. *PCI Design Handbook*, Fifth Edition, Chicago, Illinois, 1999.
4. Nilson, A. H., "Design of Prestressed Concrete," Second Edition, Wiley, 1987.
5. ACI 318-99, "Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-99)," Detroit, Michigan.

요 약

프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 보의 크기와 자중은 그 운송과 조립에 드는 비용을 결정한다. 본 연구에서는 단면 최적화에 의하여 휨 응력의 구속을 받는 단면의 크기와 초기 긴장력의 크기 등을 결정하여 부재의 자중을 최소화하여 운송 및 시공의 편리성을 극대화하려한다. 프리캐스트 부재는 각 시공단계별 강도, 처짐, 그리고 부재 상, 하단에서 응력검토가 필요하다. 각 단계별 응력 제한치를 만족하는 최소자중 프리캐스트 U형보를 최적설계에 의하여 제안하였다. 최적설계에 의해 제안된 U형보는 기존의 직사각형 단면보다 39~50%까지의 자중감축이 가능할 것으로 예상된다. 본 연구에서 두 개의 대표적인 실물크기 U형보를 실험하였다. 이 실험에서 U형보는 설계하중과 공칭강도를 상회하는 휨강도에서 종국 파괴되었다.

핵심용어 : 최적설계, 프리캐스트, 프리스트레스트, 자중, U형보, 휨
