

최소깊이 프리캐스트 프리스트레스트 U형보의 최적화

유승룡 ^{1)*}

¹⁾ 동국대학교 건축공학과

(2003년 2월 24일 원고접수, 2003년 12월 31일 심사완료)

Optimization for Precast Prestressed Wide-U Beams with the Least Depth

Sung-Yong Yu ¹⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Dongguk University, Seoul, 100-715, Korea

(Received February 24, 2003, Accepted December 31, 2003)

ABSTRACT

The cost of underground work is a dominant factor to determine the total construction fee. It is generally 2 ~ 2.5 times higher than that of above ground for building with the same height. "A new precast prestressed framing plan for underground parking building" was suggested with the beam of the least depth - U-type beams. The depth of regular rectangular reinforced concrete beam which is currently used in the underground parking of apartments could be reduced up to 12 ~ 34cm/story due to the development of a U-beam from the optimum process. Two full scale prototype U-beams were tested in this study. It was found that the Wide U-beams in the test showed higher strength than calculated nominal and design, however need to provide temporary supports to meet the flexural moment of construction load at the simply supported state before the topping concrete hardens.

Keywords : optimization, precast, story height, underground parking, beam depth, U-type beam, one-way slab

1. 서 론

1.1 연구 개요

지하주차장의 층고에 대한 시공비는 지반의 영향이 절대적이나 일반적으로 동일한 층고의 지상공사비의 2~2.5 배에 해당한다고 할 수 있다. 국내에서 아파트 지하공사를 주로 철근콘크리트 또는 PC (precast concrete)에 의한 2방향 보-기둥공법으로 시공하고 있다. 본 연구에서 지하공사의 특성을 고려하여 그 층고를 최소화 할 수 있으며 슬래브 물량을 최소화할 수 있는 일방향슬래브구조도 (one-way slab framing plan)를 제안하였으며, 이 슬래브와 효율적으로 병행할 수 있으며, 경제적인 U형보 단면을 최적설계에 의하여 경간과 하중별로 제안하였고 이 U형보에 대한 휨실험을 실시하였다.

본 연구에서 제안하는, U형보를 적용한 PSC 슬래브시스템은 기존의 직사각형 단면의 RC 또는 PC 연속 슬래브보다 보깊이를 최소 12~34cm까지 감축할 수 있을 것으로 평가되었다. 제안된 새로운 PC골조과 단면은 현재의 3

대 주차 module (5.1m×7.5m)의 경간을 4대~6대 주차 module (5.1m×10~15m)로 확대할 수 있는 방안으로 고려하였다¹⁾.

1.2 단면 개발

PC보로 가장 일반적으로 적용되는 직사각형보는 하부 폭이 기둥 코오벨 폭과 일치하는 장점이 있으나 보 깊이의 효율성에 문제가 있다. 지하주차장에 주로 적용되는 보(wide beam)는 상부 압축면의 증가로 층고 축소에 효율적으로 대처할 수 있으나, 코오벨과의 지지부에서 비효율성을 생각할 수 있다.

효과적 단면개선을 위한 Fig. 1의 U타입 단면은 고강도 강선의 최하 단부 배근과 콘크리트 압축 영역 확대와 유효깊이의 최대화로 인한 단면 효율화를 극대화하였으며, 그 생산의 편리성과 노출시 보 하부 시야에서 미관을 도모할 수 있으며, 보의 연속화에도 지장이 없는 단면으로 고려하였다. 하프슬래브(half slab) 두께 9cm, 토핑콘크리트 두께 10cm를 위한 19cm의 토핑콘크리트를 타설하였다 (Fig. 1참조).

* Corresponding author

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

E-mail : ysy@dgu.ac.kr

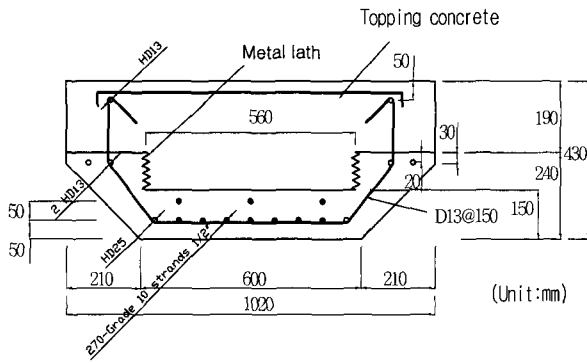


Fig. 1 Specimen section of U-type beam

2. 지하주차장 최소깊이 U형보 개발

2.1 일방향 슬래브 구조도

Fig. 2는 10m 경간의 U형보를 적용한 새로운 지하주차장 슬래브구조도(framing plan)이다. 지하 구조물은 지진 등에 의한 수평력을 고려할 필요가 없으므로 수직력을 위한 일방향슬래브로 지지할 수 있도록 제안하였다. 수압과 토압은 테두리 외부벽과 보로 지지할 수 있도록 한다. 이 보는 가로방향 5.1m와 통로를 위한 6.5m의 수직하중을 지지하여야 한다. 프리캐스트 보는 자중과 토핑콘크리트와 하프슬래브에 의한 처짐에서 초기 솟음(camber)을 차감한 사용성을 만족하여야 하며, 토핑과 일체화 후 합성단면은 활하중에 대한 사용성을 만족하여야 한다^{2,3}. Fig. 3은 5~6층 PC구조의 일반적인 기둥크기 60cm를 기준으로 5.1m × 7.5 ~ 12.5m 경간에서 Fig. 3과 같이 5.1m 경간으로 하프슬래브가 지지할 때 10m 경간에 대한 평면골구조도이며 Fig. 4는 10m 경간 입면 골구조도이다.

2.2 단면 계획

U형보의 형상은 외부하중에 의해 발생하는 정 모멘트에 대응하도록 보 하단에 PS강선 배근면적을 크게 하며, 보 상단의 유효 압축 단면적이 크도록 하여, 보의 깊이를 현저히 줄일 수 있어 건물의 전체 층고를 감축시킬 수 있도록 고려하였고, 보 가운데 개구부로 인한 보의 자중 감소로 운송과 조립에 용이토록 하였다(Fig. 1참조). 내부 수직면은 거푸집으로 metal lath 사용을 위하여 고려된 단면이다. metal lath는 기존 거푸집보다 경제적이며, 토핑콘크리트와 PC의 합성작용을 위하여도 효과적이다. 콘크리트의 최소 피복두께는 2.5cm이상으로 하였다.

프리스트레스트 부재로서, 필요한 프리스트레스 강선수는 부재의 길이나 작용하중에 의하여 결정된다. 보 길이

를 따라 변하는 프리스트레스 강선의 편심은 자중이나 작용하중에 의하여 발생하는 휨이나 전단강도에 영향을 미친다. 직선형 강선배치는 절곡 강선배치에 비하여 생산비에서 경제적이므로 본 연구의 U형보는 직선형 강선을 사용하였다.

국내 주차장 및 할인매장 시스템에 U형 보 시스템의 실제 적용을 위하여 가장 경제적인 경간(7.5m, 10m, 12.5m)와 사용하중(국내법과 차량크기 및 건설환경을 고려한 하중)에 대하여 적용하였다. 기타 재료 및 시공성은 국내 PC 업체인 S사의 생산성 및 국내 재료상황을 기준으로 하여 프리캐스트 콘크리트는 목표강도 42.1MPa로, 그리고 토핑콘크리트는 26.5MPa로 계획하였다.

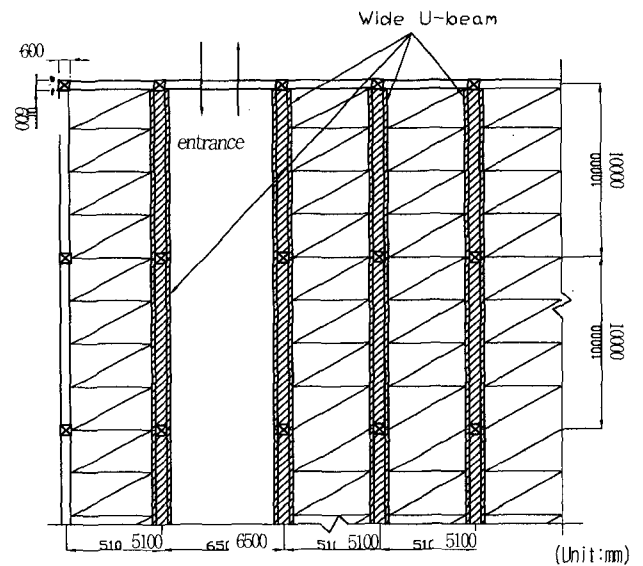


Fig. 2 Framing plan of under ground parking

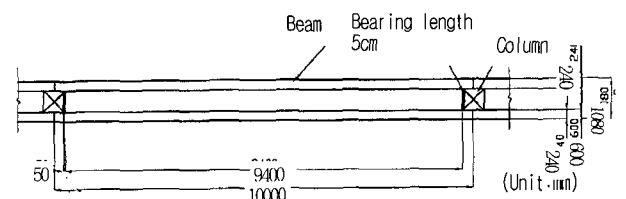


Fig. 3 Plan of frame structure

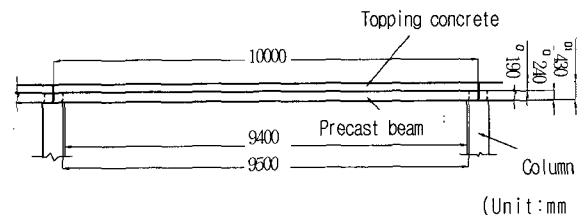


Fig. 4 Elevation of frame structure

2.3 최소깊이 U형보의 최적 설계

2.3.1 최적 휨설계

본 연구에서 최적 이론을 적용하여 U형보를 허용응력 설계법에 의하여 설계하였다. 본 연구의 목적은 최적 이론을 적용하여 휨 상태에서 단면의 크기와 초기 긴장력의 크기, 보의 중심과 단부에서의 강선의 편심을 결정하려 한다. 본 연구에서 전단이나 비틀림에 대한 고려는 포함하지 않았고, 상세한 철근 배근이나 프리캐스트 보와 현장타설 토핑콘크리트 사이의 전단 전달이나 보의 극한 거동에 대한 검증은 포함하지 않았다. 설계에서 허용응력은 ACI 318-99 기준⁴⁾에 따랐으며, 콘크리트의 압축강도, $f_{ck} = 41.2$ MPa를 사용하였고, 긴장재는 극한강도, $f_{pu} = 1853.5$ MPa인 7연 강선을 사용하였다. 긴장력 도입시의 초기 콘크리트의 강도, $f_{ci} = 34.3$ MPa를 사용하였다. 설계하중으로는 10cm의 토핑콘크리트의 자중을 더하여 추가 고정하중 2393 Pa와 활하중 4903 Pa를 사용하였다. 긴장력의 손실은 양생시 국내 공장 생산 여건을 고려하여 20%로 간주하였다. 최적 설계에 의하여 해당 경간과 하중에 대한 최적 단면을 구할 수 있었다⁹⁾.

2.3.2 설계 변수

프리캐스트 단면의 보깊이와 플랜지 폭과의 각은 건축적 활용을 고려하여 30° ~ 45°의 사이 값을 적용하였다. 프리캐스트 보의 복부 폭은 층고 4~5층 건물의 지하층 정방형기둥 한변 크기를 적용하였다. 프리캐스트 단면의 크기는 일반 RC보의 깊이를 상한 값으로 하였고, 프리캐스트 단면의 압축 깊이는 강선이 배근될 수 있는 하한 값과 상한 값을 두어 제한하였다. 따라서, 본 연구에서 고려한 변수는 Fig. 5와 같다. 여기서, X(1), ~ X(4)는 X(5), ~ X(6)의 종속 변수이다.

- X(1) - U형보의 하부 폭
- X(2) - 하프슬래브를 포함한 보 깊이
- X(3) - 타설 후 보의 최종 깊이
- X(4) - 프리캐스트 단면의 복부 상부 폭
- X(5) - 프리캐스트 단면의 보 깊이
- X(6) - 프리캐스트 단면의 복부 경사각
- X(7) - 프리캐스트 단면 하부에서 중공이 시작되는 면까지의 거리
- X(8) - 강선의 초기 긴장력 (P_i)
- X(9) - 프리캐스트 보(U형 보)의 자중

2.3.3 수식 모델

본 최적화 문제에는 6개의 단면치수 제약(constraint)과 2개의 강선수 제약을 갖고 있으며, 이는 ACI 318-99 기준에서 제시하는 허용응력과 단면의 기하학적 정의에 의해서 구성된다. Fig. 6은 이를 고려한 U형보의 최적화 단

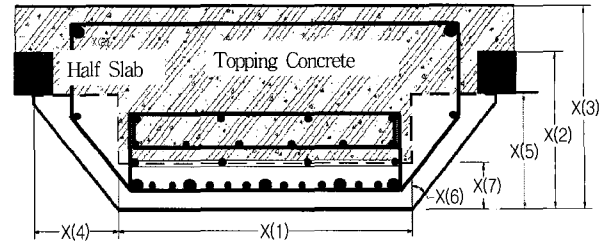


Fig. 5 Section of U-type beam

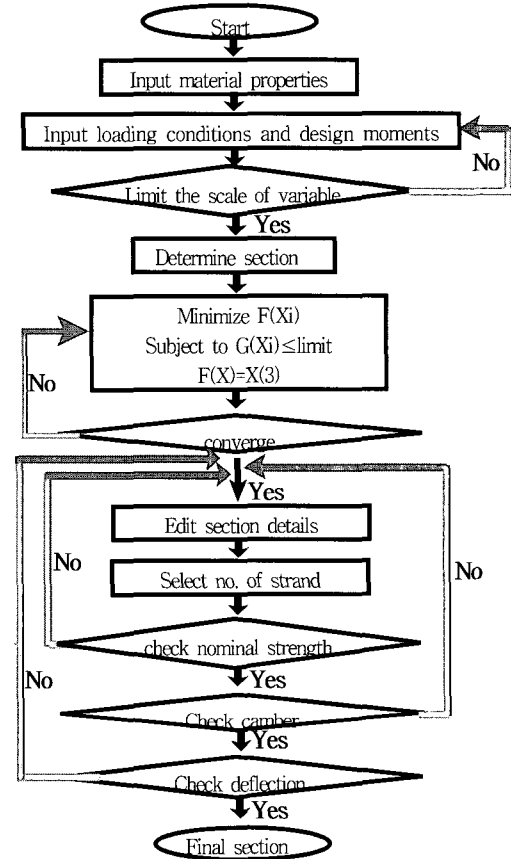


Fig. 6 Optimization step of U-type beam

계이다. ACI 시방서에 의해서 단면의 상면과 바닥 면에서의 압축응력과 인장응력이 허용 값을 초과하지 않도록 하며, 다음 각각의 시공단계에서 응력은 보의 중앙과 단부에서 검증된다.

- 1) 프리캐스트 보에 긴장력이 도입될 때
- 2) 합성단면에 추가 고정하중이 재하될 때
- 3) 합성단면에 추가 고정하중과 적재하중이 재하될 때

12개의 허용응력에 대한 규정은 앞에서 언급한 6개의 단면치수 제약과 2개의 강선수 제약을 포함한 추가적인 제약을 제공한다. 수식 모델은 아래 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } F(X) \\ & \text{Subject to } G_i(X) \leq \text{limit} \end{aligned} \quad (1)$$

목적함수는 : $F(X) = X(3)$ 의 최소화
 처음의 8가지 제약(단면치수와 강선)은 아래 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} G(1) &= X(5) \geq 15 \text{ cm}, X(5) \leq 90 \text{ cm} \\ G(2) &= X(6) \geq 30^\circ, X(6) \leq 60^\circ \quad (2) \\ G(3) &= X(7) \geq 15 \text{ cm}, X(7) \leq 20 \text{ cm} \\ G(4) &= X(8) \geq 13,800 \text{ kgf} \\ &X(8) \leq 19,420 \text{ kgf (경간 10m일 경우)} \end{aligned}$$

시공단계에서 보의 중앙과 보의 끝에서의 각각의 압축 응력과 인장응력에 대한 제한은 다음과 같다.

1) 긴장력 도입시

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

a) 중앙부

$$\begin{aligned} - \text{상부}G(5) &= -M_0/S_t - P_1/A_c + P_1 \times e_1/S_t \leq 0.8\sqrt{f_{ci}} \quad (3) \\ - \text{하부}G(6) &= M_0/S_b - P_1/A_c + P_1 \times e_1/S_b \geq 0.6f_{ci} \quad (4) \end{aligned}$$

b) 단부

$$\begin{aligned} - \text{상부}G(7) &= -P_1/A_c + P_1 \times e_1/S_t \leq 1.6\sqrt{f_{ci}} \quad (5) \\ - \text{하부}G(8) &= -P_1/A_c - P_1 \times e_1/S_b \geq 0.6f_{ci} \quad (6) \end{aligned}$$

2) 합성 단면에 추가 고정하중이 재하 될 때

a) 중앙부(근사 값)

$$\begin{aligned} - \text{상부}G(9) &= -M_d/S_{tc} - P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{tc} \geq 0.45f_{ck} \quad (7) \\ - \text{하부}G(10) &= M_d/S_{bc} - P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{bc} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}} \quad (8) \end{aligned}$$

b) 단부

$$\begin{aligned} - \text{상부}G(11) &= -P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{tc} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}} \quad (9) \\ - \text{하부}G(12) &= -P_e/A_{cc} - P_e \times e_2/S_{bc} \geq 0.45f_{ck} \quad (10) \end{aligned}$$

3) 합성 단면에 추가 고정하중과 적재하중이 재하될 때

a) 중앙부(근사 값)

$$- \text{상부}G(13) = -M_l/S_{tc} - P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{tc} \geq 0.6f_{ck} \quad (11)$$

$$- \text{하부}G(14) = M_l/S_{bc} - P_e/A_{cc} + P_e \times e_2/S_{bc} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}} \quad (12)$$

b) 단부

$$- \text{상부}G(15) = -P_e/A_{cc} - P_e \times e_2/S_{tc} \leq 1.6\sqrt{f_{ck}} \quad (13)$$

$$- \text{하부}G(16) = -P_e/A_{cc} - P_e \times e_2/S_{bc} \geq 0.6f_{ck} \quad (14)$$

여기서,

M_l : 보와 현장타설 고정하중 및 적재하중에 의한 보 중앙 휨모멘트

M_d : 보와 현장타설 고정하중에 의한 보 중앙에서의 휨모멘트

M_0 : 보의 자중에 의한 보 중앙에서의 휨모멘트

S_b : 프리캐스트 단면의 하단에 대한 단면계수

S_t : 프리캐스트 단면의 상단에 대한 단면계수

S_{bc} : 합성 단면의 하단에 대한 단면계수

S_{tc} : 합성 단면의 상단에 대한 단면계수

P_1 : 강선의 초기 긴장력, f_{ci} : 초기 콘크리트의 압축강도

P_e : 유효 긴장력, A : 콘크리트의 단면적

e : 강선의 편심거리, f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도

2.3.4 최적 설계 결과

경간에 대한 최적 설계 결과는 Table 1, Table 2와 같다. 처음 세 개의 결과는 양쪽으로 5.1m의 L_2 길이를 갖는 7.5, 10, 12.5m 경간 보의 결과이며, 후반 세 개의 결과는 5.1m와 6.5m 통로(평균 5.8m)를 L_2 길이로 한 7.5, 10, 12.5m 경간 보의 결과이다. 본 연구에서 10m×5.8m에 대하여 실험체를 제작 정적휨 실험을 실행하였다. 각 최적 설계 결과는 Table 1과 Table 2 그리고 Fig. 7~9에 도시하였다.

Table 1 Optimization design results of underground parking lot U-type beam I

Span($L_1 \times L_2$) (m)	Size of column (cm)	Bottom width of U-beam (cm)	Precast concrete beam depth (cm)	Total beam depth (cm)	Upper flange width of precast concrete (cm)	No. of strand (ea)	Maximum no. of strand / layer (ea)	Lower tensile re-bar
7.5 × 5.1	50x50	50	17	36	17	5	5	2-D ₂₅
10 × 5.1	60x60	60	22	41	22	9	7	2-D ₂₅
12.5 × 5.1	60x60	60	32	51	32	13	7	2-D ₂₅
7.5 × 5.8	50x50	50	18	37	18	6	5	2-D ₂₅
10 × 5.8	60x60	60	24	43	24	10	7	2-D ₂₅
12.5 × 5.8	60x60	60	36	55	36	13	7	2-D ₂₅

Table 2 Optimization design results of underground parking lot U-type beam II

Span($L_1 \times L_2$) (m)	Size of column (cm)	Flexural strength (kN · m)	Initial camber (cm)	Deflection after election (cm)	Deflection with service loading (cm)	Deflection with ultimate test loading (cm)
7.5 × 5.1	50 × 50	282.8	0.605	-2.426	-2.492	-32.099
10 × 5.1	60 × 60	477.9	0.907	-3.859	-3.838	-54.843
12.5 × 5.1	60 × 60	779.0	1.556	-2.947	-3.086	-64.335
7.5 × 5.8	50 × 50	319.7	0.763	-2.151	-2.220	-32.982
10 × 5.8	60 × 60	537.9	1.185	-2.962	-3.077	-51.399
12.5 × 5.8	60 × 60	892.7	1.699	-2.074	-2.196	-56.665

2.3.5 단면비교

Table 3은 기존 RC보와 제안된 U형보의 슬래브 깊이(19cm)를 제외한 돌출된 하단 보깊이를 비교한 것이다. Table 3에서 알 수 있듯이 7.5m경간까지는 보 깊이가 차이가 12cm로 뚜렷하지 않으나, 경간이 10m부터는 기존의 RC보와 제안된 U형보 사이에 약 2배 차이가 나타난다.

3. 실험

3.1 개요

본 연구에서는 활하중 4903 Pa를 적용하여 최적 설계한 경간10m 실물크기 지하주차장 프리캐스트 프리스트레스트 U형보 실험체 2개를 제작하였다. 프리캐스트 U형

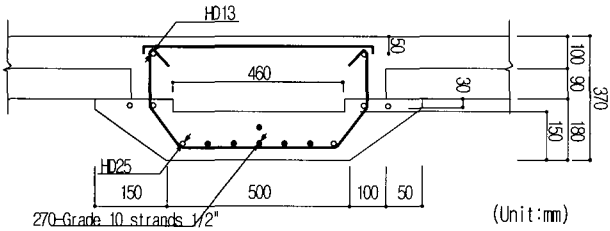


Fig. 7 Optimization design result of 7.5x5.8m span

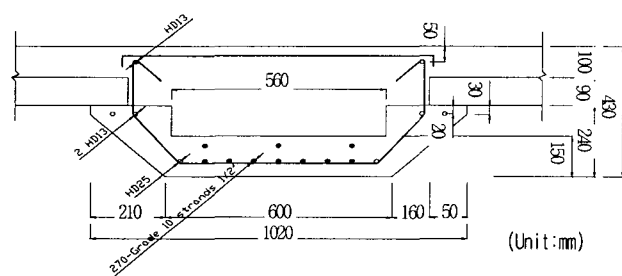


Fig. 8 Optimization design result of 10x5.8m span

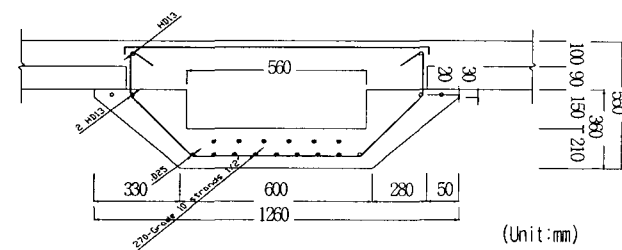


Fig. 9 Optimization design result of 12.5x5.8m span

Table 3 Comparison on the depth of rectangular RC and U-type beams

Depth \ span	7.5m	10m	12.5m
Continuous PC\RC beam	30cm	55cm	70cm
U-type beam	18cm	24cm	36cm

복부 보는 보, 슬래브, 토핑콘크리트의 자중을 지지할 수 있어야 하며, 토핑콘크리트가 강도를 발휘하면 합성재로서 부가된 활하중에도 대응할 수 있어야 한다. 실험을 통하여 설계결과의 개선점 또는 문제점을 파악하기 위하여 실험체는 설계 제한에 가장 밀접하게 계획하여 제작되었다. 토핑콘크리트를 타설한 2개의 U형보에 대하여 2번의 휨 실험을 하였다.

3.2 실험체 제작

실험체 제작 몰드는 10mm철판을 사용하여 제작하였고, 긴장용 버팀대 외부에 강선 위치를 고정하기 위한 50mm 철판이 사용된다. 보강 철근을 제작한 후 몰드(Fig. 10)에 설치하고 강선을 설치한 후 유공유압잭으로 각 강선을 긴장시켰다. 강선의 긴장력은 200kN용량의 유공 로드셀로 측정하였으며, 초기에 20~30kN만큼 긴장시킨 후 강선의 위치를 재 고정한 후에 정해진 137.3kN만큼 강선을 긴장하였다. 그리고 자동화 배치플랜트 설비의 회전식 믹서로 배합된 콘크리트를 진동기를 사용하여 타설하였다. U형보의 상부는 토핑콘크리트와의 부착 확보를 위하여 거칠게 마감하였다. 프리캐스트 콘크리트의 압축강도가 34.3MPa에 도달하였을 때 산소절단기를 이용하여 강선절단을 하였고, 프리캐스트 실험체(Fig. 11)의 솟음(camber)을 측정 한 후 곧 바로 토핑콘크리트를 타설하였다. 콘크리트 타설할 때마다 각 12개의 표준 공시체를 제작하여 실험 강도를 얻을 때까지 압축강도를 측정하였다.

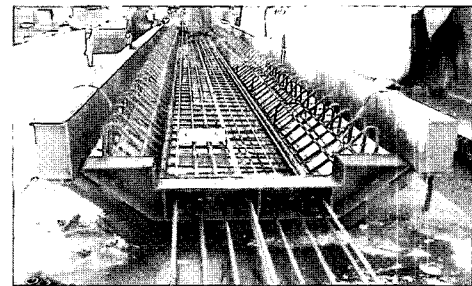


Fig. 10 Reinforcement of U-type beam

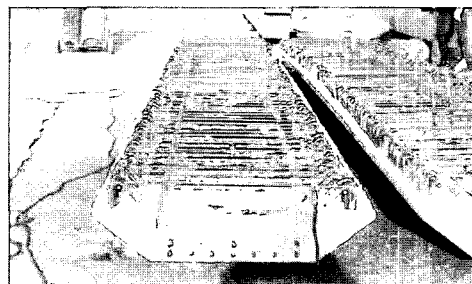


Fig. 11 Precast U-type beam

U형보는 10.0m×5.8m 모듈의 하프슬래브 시스템에서, Table 4의 활하중 4903 Pa를 적용하여 순 지간거리 10 m인 보를 목표로 실물크기 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 U형 보 2개를 제작하였다. Table 4에 콘크리트가 굳기 전 단순지지 상태에서 시공하중에 의한 적용 모멘트를 산출하였고, 콘크리트가 굳은 후 구속되지 않은 2 방향 연속슬래브보 중앙부 모멘트를 57%로 가정하여 보가 전체 하중을 지지한다고 가정하여 설계모멘트 648.8 kN·m를 산출하였다.

3.3 강재 및 콘크리트

PS강선은 저 이완율, 직경 12.7 mm, Gr. 270, 7연 강선으로, 국내 제조업체 K사의 것을 사용하였다. 일반 철근은 항복강도 392.3 MPa 이형철근을 사용하였다. 프리캐스트 콘크리트와 토폰콘크리트의 배합표는 다음의 Table 5~8과 같다.

3.4 실험

본 실험의 목적은 최적 이론에 의하여 설계된 10 m 경간 U형보의 휨 적정성과 그 문제점을 파악하는데 있다. 실험체 W-1과 W-2는 프리캐스트 콘크리트 강도만 다를 뿐 기타 모든 조건은 동일한 조건에서 실험하였다. 실험 단면은 Fig. 1과 같다. 실물 크기로 경간 10.5m의 U형보 2개의 실험체에 대하여 휨실험을 실시하였다(Fig. 12 참조). 적용 경간은 Fig 13과 같이 8m를 적용하였고, 가력 경간은 보 중앙에서 1.0m를 적용하였으며, 가력점 하단에는 LVDT를 설치하여 보의 처짐을 측정하였다. 보 중앙부 철근에 스트레인 게이지를 설치하였고 실험 자료는 데이터 로거로 측정, 저장하였다. 계속 장비의 설치가 완료되고 가력을 시작한 후 균열이 발생되기 전에는 29.4kN씩, 균열 발생 후에는 19.6kN씩, 균열 양상이 파괴에 이른다 판단이 될 시에는 9.8kN씩 하중을 증가시키면서 균열의 양상과 진행방향을 표시하였다. 실험체는 최종 파괴까지 계속 가력하였고 최종 파괴 양상을 기록하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 강도

강도설계기준 공칭휨강도 산정 방법의 예측 강도에 대한 실험결과와 비율은 1.18과 1.23으로 평균 20%이상의 휨내력을 보여주었으며, 아울러 설계휨강도(649.2kN·m)를 상회하여 최종 파괴되었다(Table 9 참조). 한편, 초기 균열모멘트 실험결과와 평균 444.2kN·m로 초기균열모멘트 예측식에 의한 계산치 339.8kN·m를 상회하여 발생되었다.

Table 4 Design moment of wide U-beam with 10.0×5.8 m span module in half slab systems

Type	Load (kN/m)	Loading at election (simple state) moment (kN·m)	Total service loading (kN·m)	Design moment (kN·m)
W _o : self weight	3.30	42.29	23.54	32.95
W _{sd} : half slab(9 cm) topping at center hole topping slab (10 cm)	12.29	153.57	87.57	122.55
W _l : Live load	28.44	-	202.60	344.47
Total	58.95	381.38	420.02	648.81

Table 5 Precast concrete mix design (I)

Specified concrete strength (MPa)	Maximum size of aggregate (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	Fine aggregate ratio (%)	Water-cement ratio (%)
49.03	19	12	2	35	29

Table 6 Precast concrete mix design (II)

Water (N/m ³)	Cement (N/m ³)	Coarse aggregate (N/m ³)	Fine aggregate (N/m ³)	Add-mixture (N/m ³)
1,628	5,609	10,336	5,609	84

Table 7 Topping concrete mix design(I)

Specified concrete strength (MPa)	Maximum size of aggregate (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	Fine aggregate ratio (%)	Water-cement ratio (%)
26.48	25	8	1.5	43	46

Table 8 Topping concrete mix design(II)

Water (N/m ³)	Cement (N/m ³)	Coarse aggregate (N/m ³)	Fine aggregate (N/m ³)
1,598	3,472	10,581	7,688

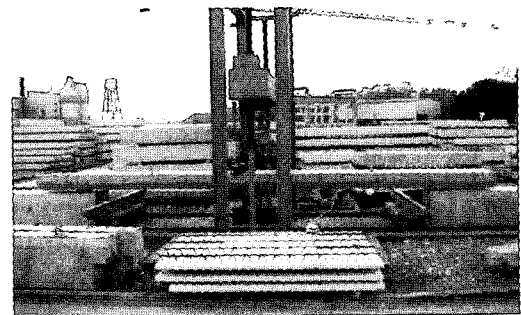


Fig. 12 Installation of specimen

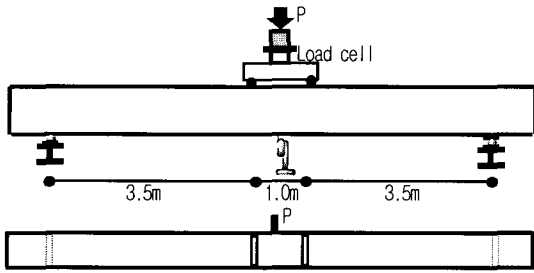


Fig. 13 Plan of test

또한, 초기 설정된 시공하중에 의한 단순지지 상태의 휨모멘트 381.5 kN·m를 상회하여 발생되었으며, 전체 사용하중 적용시의 휨모멘트 419.7 kN·m이후에 발생하였다. 전체 사용하중 적용시의 휨모멘트는 주열대에서 보와 슬래브의 합성작용에 의한 T형보 작용에 의하여 추가 강도 평균 93.2 kN·m를 고려하지 않은 것으로 크게 문제되지 않으나, 단순지지 상태에서 1.96 kN·m(Table 9의 ①, ③참조)의 오차로 시공하중에 의한 균열이 유발될 수 있는바, 시공 지주(temporary support)를 사용하는 것이 요구된다. U형보 실험체의 이론 솟음치와 강선 절단 시 중앙에서의 실측 솟음치를 Table 10-①에 기입하였다. 사용하중 적용시 실측 처짐은 17.1 mm로 솟음을 제한 처짐은 평균 1.6 mm로 단기하중 하의 허용처짐, 27.8 mm보다 훨씬 작은 값을 산출하였다. Fig. 14와 같이 강선 절단 파괴로 최종 파괴된 시험체 W-2는 강선 절단 파괴가 없었던 시험체 W-1보다 취성적이었으나 두 시험체 모두 예측 공칭강도를 초과하여 파괴되었고 유사한 강도에서 최종

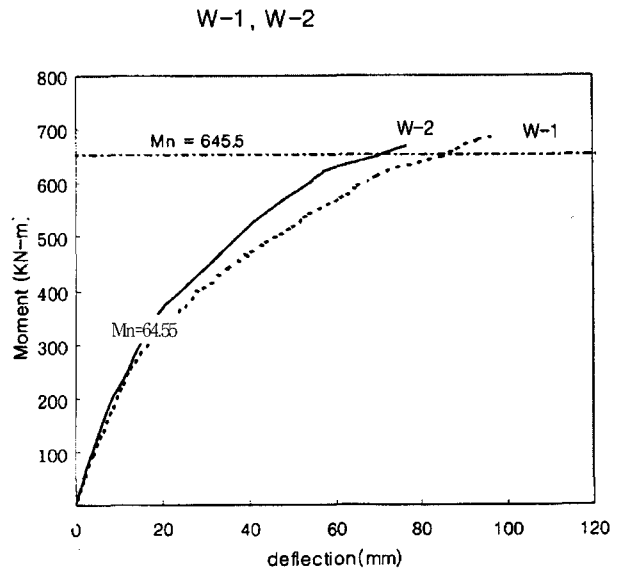


Fig. 14 Moment-displacement relationships

파괴되었다. 토핑콘크리트가 타설되는 프리캐스트 상부면은 거칠게 마감하였고, 그 내부에는 일체거동을 위한 추가적인 보강은 없었으나, 두 보는 최종 파괴 시까지 일체 거동하였고, 단부의 분리균열도 발생하지 않았다.

4.2 휨파괴 거동

균열의 양상은 가력점 밑에서 초기 휨균열이 발생한 후 지속적으로 균열들이 발생되어 중립축까지는 수직으로 진

Table 9 Test results-flexural strength of U-type beam

Name of specimens	Full service loading condition					
	① Construction loading condition (kN·m)	Service loading condition (kN·m)	② Cracking moment M_{cr} (kN·m)	③ Test cracking strength (kN·m)	③ Test ② Calculated	③ Test ① Design
W-1	381.9	419.7	340.3	448.2	1.32	1.17
W-2	381.9	419.7	339.3	441.3	1.30	1.16
Average	381.9	419.7	339.8	445.2	1.31	1.17
Name of specimens	Precast concrete cylinder strength f_{ck} (MPa)	Topping concrete cylinder strength f_{ck} (MPa)	Failing loading condition			
			④ Nominal strength (kN·m)	Design strength (kN·m)	⑥ Test result (kN·m)	⑥ Test/④ Calculated
W-1	40.2	30.4	630.6	649.2	743.3	1.18
W-2	39.6	31.4	635.5	649.2	779.6	1.23
Average	39.9	30.9	633.1	649.2	761.5	1.21

② $M_{cr} = 2\sqrt{f_{ck}S_2} + P_e(r^2/C_2 + e)$, Concrete cylinder strength is obtained at the day of test

Initial cracking concrete strength ③ and test result ⑥ include the moment of self weight of specimen 6.74tf·m

Table 10 Test results - displacements of wide U-beam

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)
W-1	-11.8	-15.0	17.9	2.9	27.8	96.3
W-2	-11.8	-16.0	16.2	0.2	27.8	82.1
Average	-11.8	-15.5	17.1	1.03	27.8	89.2

행되었고, 중립축을 넘어서 가력점으로 경사져 진행되었다. 균열폭은 최종 파괴 시 까지 약 1mm를 초과하지 않았다. 그러나 균열은 실험체의 전 단면에 걸쳐 상당히 폭 넓게 발생되었다.

최종 파괴하중에 이르러서는 W-1 시험체는 743.3kN·m에서 최종 파괴될 때까지 상당히 고른 균열 양상을 보여주었으며, 상부 압축측 콘크리트의 압괴를 동반한 하부 인장파괴로 최종 파괴되었다. W-2 시험체는 보 상부에 압괴에 의한 균열은 최종 파괴시까지 없었으나, 768.8kN·m에서 강선 하나가 큰 소음과 함께 절단되며, 바로 최종하중 779.6kN·m에 도달하였다. W-1, W-2 시험체 모두 비슷한 균열 양상을 보여주었고, 매우 연성적으로 파괴되었으며, 유사한 하중에서 최종 파괴되었다(Fig. 15, 16 참조).

4.3 철근변형률

Fig. 17, 18의 W-1과 W-2 휨실험에서 보는 바와 같이 대부분의 철근이 항복 변형률 $1,904 \times 10^{-6}$ 을 상회하였다. W-1, W-2 실험체의 보하단 3번 인장철근변형률은 가장 경사진 변화를 보여주었고, 반면 토핑콘크리트의 1번 철근은 상부 압축의 영향으로 하강하는 곡선을 보여주었다. 철근변형은 하부 인장철근이 가장 많은 변형을 보이고, 상부철근의 변형은 완만한 것으로 확인되었다. 토핑콘크리트의 상부 압축철근은 아래로 하강하는 변형을 보여주었다. 아울러, 철근 변형률 곡선에서 토핑 콘크리트와 복부 콘크리트는 보 파괴 시까지 완전히 일체거동을 하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

지하주차장의 층고에 대한 시공비는 지반의 영향이 절대적이나 일반적으로 동일한 층고의 지상공사비의 2-2.5 배에 해당한다. 최소깊이 프리캐스트 U형보를 최적설계에 의하여 경간별로 제안하였다. 본 연구에서 두 개의 대표적인 실물크기 U형보를 실험하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 제안된 U형보는 기존의 직사각형 단면 철근콘크리트보 보다 보깊이를 최소 12~34cm 까지 감축이 가능할 것으로 예상된다.
- 2) 강도설계기준 공칭 휨강도 산정방법의 예측강도에 대한 실험결과와의 비율은 1.18과 1.23으로 평균 20%이상의 휨내력을 보여주었으며, 아울러 설계강도를 상회하여 최종 파괴되었다.
- 3) 사용하중 적용시 실측치침은 17.1mm로 솟음을 제외한 처짐은 평균 1.6mm로 단기하중하의 허용 처짐, 27.8mm



Fig. 15 Flexural cracking at failure (W-1)

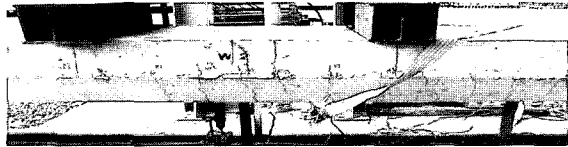


Fig. 16 Flexural cracking at failure (W-2)

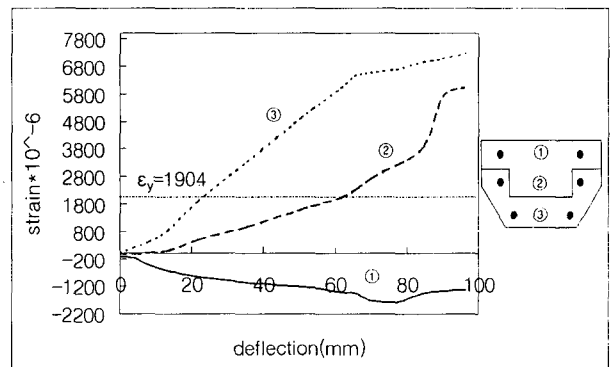


Fig. 17 Displacement-steel strain relationships (W-1)

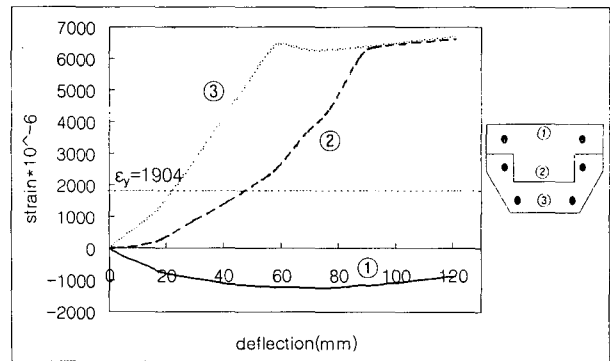


Fig. 18 Displacement-steel strain relationships (W-2)

보다 훨씬 작은 값을 산출하였다. 단, 단순지지 상태에서 시공하중에 의한 균열이 유발될 수 있는바, 보 중앙에 가설 시공지주를 사용하는 것이 요구된다.

감사의 글

이 연구는 (주)삼성물산 삼연PCE와 건설교통부의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상식, 유승룡, “프리스트레스를 도입한 장스팬 PC골조 구조 시스템의 개발”, 건설교통부 1년차 보고서, 건설교통부, 2000. pp.172~286.
2. “PCI Design Handbook,” Fifth Edition, Chicago, Illinois, 1999.
3. Arthur H. Nilson, “Design of Prestressed Concrete,” Second Edition, Wiley, 1987, pp.121~190.
4. ACI 318-99, “Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-99),” American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2000.
5. 유승룡, 민창식, “프리스트레스트 프리캐스트 더블 티형보의 최적설계”, 콘크리트학회논문집, 제11권 6호, 1999. 12. pp.57~68.
6. 박현석, 김인규, 이종민, 유승룡, “프리스트레스트 프리캐스트 와이드 U형보의 휨실험”, 대한건축학회 학술발표회논문집 제21권 1호, 2001.4, pp.27~30.

요 약

지하공사비는 전체공사비를 결정짓는 중요한 요소로서 일반적으로 동일한 층고의 지상공사비의 2~2.5배에 해당한다. 본 연구에서 지하주차장 층고를 대폭적으로 감소할 수 있는 일방향 슬래브 구조도와 최소깊이 U형보를 제안하였다. 최적설계에 의해 제안된 U형보는 기존의 직사각형 단면보다 보깊이를 최소 12~34cm 까지 감축이 가능할 것으로 예상된다. 본 연구에서 두 개의 대표적인 실물크기 U형보를 실험하였다. 이 실험에서 U형보는 설계하중과 공칭강도를 상회하는 휨강도에서 최종 파괴되었다. 그러나 토핑콘크리트가 굳기전 단순지지 상태에서 시공 하중에 의한 휨균열이 발생할 가능성이 있는 것으로 판단되었으므로 보중앙에 가설 시공지주를 사용하는 것이 요구된다.

핵심용어 : 최적화, 프리캐스트, 층고, 지하주차장, 보깊이, U형보, 일방향 슬래브
