

IPC Girder 개념의 건축물에서의 적용

Application of Concept of IPC Girder to Building Structures

이 차 돈*
Lee, Cha Don

한 만 엽**
Han, Man Yop

박 병 엽***
Park, Pyong Yop

ABSTRACT

The applicability of the concept of IPC(Incrementally Prestressed Concrete) girder which effectively reduces the depth of the conventional prestressed girders by introducing prestress in two different stages is theoretically reviewed in this research. Expressions on top and bottom stresses resulting from different loading stages are presented. Beneficial effects of IPC girder compared with those traditional prestressed girders are evaluated by investigating the girder depth for the same span or girder span for the same girder depth. Parking structures and ware house structures which need relatively longer span and are subject to large live loads are considered in comparison. It was found that the single or double tee slab designed by IPC concept could be built upto 50% longer in its span and upto 45% less in its depth compared to those of traditionally prestressed single or double tee slabs. In addition, the amount of prestressing tendons could be reduced.

1. 서론

최근에 제시되어 토목 교량부분에 일부 적용되고 있는 IPC(Incrementally Prestressed Concrete) 공법은 기존의 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 교량에 비해 장경간 확보가 가능하고 보의 춤을 낮출 수 있으며, 이로 인해 경제적인 이점까지 추가로 얻을 수 있다는 장점 때문에 앞으로의 적용 가능성이 점차 넓혀질 것으로 보인다. 이러한 장점은 기존 PSC 보의 설계시 이용된 설계 방법을 하중 및 시공단계별로 나누어 각각의 하중 및 시공단계에서 적절한 만큼의 긴장력을 몇 차에 나누어 도입하여 얻을 수 있다. 건축에서도 최근 대형 할인점이나 주차장, 월드컵 경기장 등에 공장제작된 프리캐스트 부재를 이용하여 많은 시공이 이루어지고 있으며 이때 사용되는 부재는 동일 규격의 부재를 반복 적용함으로써 규격화, 모듈화를 실현시킬 수 있다. 본 논문에서는 IPC를 건축에 적용할 경우 각 단계별 응력등을 검토하였다. 또한, 건축부분에 IPC 적용시 고려하여야 할 몇가지 변수를 고찰·정의하고, 하중종류별에 따라 IPC 및 기존 PSC 부재를 최적설계한 후 기존의 PSC와 비교하여 경제성과 충고절감 효과 및 실의 활용효과 등에 대하여 고찰하였다. 비교대상 부재는 건축구조물의 대부분의 물량을 차지하는 Single-Tee Slab(STS) 및 Double-Tee Slab(DTS)로 하였다.

*정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수

**정회원, 아주대학교 토목설계공학과 교수

***정회원, 중앙대학교 건축공학과 석사과정

2. IPC 부재의 단계별 응력

긴장단계별로 IPC 단면의 응력변화를 살펴보면, 아래의 그림 1과 같다. 참고로 각 그림의 수직선을 중심으로 우측은 압축, 좌측은 인장측의 응력을 나타낸다.

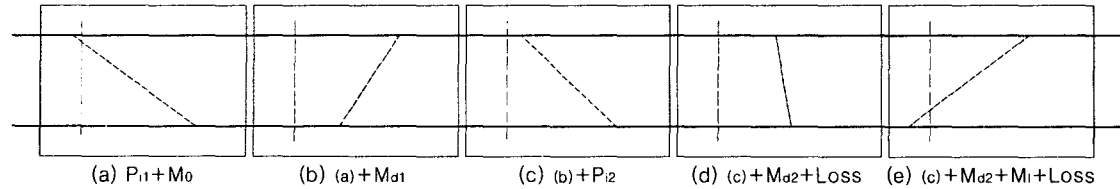


그림 1 IPC의 단계별 발생응력

즉, 1차 긴장력의 도입시점에서는 그림 1(a)에서와 같이 상단부보다 하단부에 큰 압축력이 도입된다. 그러나, 현장거치후 Topping 슬래브를 타설하면, IPC의 도심과 편심의 길이가 짧아 그림 1(b) 경우에 서와 같이 상단부에 하단부보다 큰 압축력이 도입된다. 이때, 추가 마감하중과 활하중에 저항하기 위한 2차 긴장력을 도입하면 부재의 전면적의 응력은 다시 압축측으로 환원되어 그림 1(c)와 같은 응력 분포를 나타내게 된다. 그리고, 장기적인 거동상태는 그림 1(d) 또는 (e)와 같은 양상의 응력분포를 보 이게 된다. 이와 같은 각 단계별 IPC의 거동 및 발생응력의 산정은 다음과 같다.

(1) 1차 긴장력의 도입 시점

$$f_{gt} = \frac{P_{i1}}{A_g} - \frac{P_{i1} \cdot e_1}{Z_{gt}} + \frac{M_0}{Z_{gt}}, \quad f_{gb} = \frac{P_{i1}}{A_g} + \frac{P_{i1} \cdot e_1}{Z_{gb}} - \frac{M_0}{Z_{gb}} \quad (1)$$

여기서, f_{gt}, f_{gb} : 콘크리트 상연 및 하연의 휨응력

P_{i1} : Pre-tension으로 도입되는 1차 긴장력

A_g : 콘크리트 단면의 단면적 e_1 : 1차 긴장력의 편심거리

Z_{gt}, Z_{gb} : 상연 및 하연에 대한 콘크리트 단면의 단면계수

M_0 : 자중에 의한 휨모멘트

(2) 현장거치 시점

손실량이 전체 손실량의 약 50% 정도라고 가정하면, 상하연에 발생하는 응력은 다음과 같다.

$$f_{g2t} = f_{gt} - \frac{1}{2}(1-R_1)\left(\frac{P_{i1}}{A_g} - \frac{P_{i1} \cdot e_1}{Z_{gt}}\right)$$

$$f_{g2b} = f_{gb} - \frac{1}{2}(1-R_1)\left(\frac{P_{i1}}{A_g} + \frac{P_{i1} \cdot e_1}{Z_{gt}}\right) \quad (2)$$

여기서, R_1 : 1차 긴장력의 유효율(effectiveness ratio)

(3) 바닥판(Topping Slab) 타설 시점

$$f_{g3t} = f_{g2t} + \frac{M_{d1}}{Z_{gt}}, \quad f_{g3b} = f_{g2b} - \frac{M_{d1}}{Z_{gt}} \quad (3)$$

여기서, M_{d1} : 바닥판 타설에 의한 발생 휨모멘트

(4) 2차 긴장력의 도입 시점

2차 긴장력의 도입은 바닥판 슬래브가 구조적인 거동을 시작한 후 즉, 합성단면의 완료 후에 실시한다. 건축구조물에서 그 사용용도에 따른 하중을 살펴보면 대체로 고정하중보다는 활하중쪽이 많은 비중을 차지하고 있고, 이에 따라, 1차 긴장시보다 2차 긴장시에 많은 프리스트레스가 도입된다. 따라서, 합성단면 완료 후 2차 긴장력을 도입하는 것이 응력분포상 보다 유리하게 작용되기 때문이다.

$$f_{gt} = f_{gst} + \frac{P_2}{A_c} - \frac{P_2 \cdot e_{2(c)}}{Z_{ct}}, \quad f_{gb} = f_{gsb} + \frac{P_2}{A_c} + \frac{P_2 \cdot e_{2(c)}}{Z_{cb}} \quad (4a)$$

여기서, P_2 : Post-tension으로 도입되는 2차 긴장력
 A_c : 합성단면의 단면적
 $e_{2(c)}$: 합성단면에 대한 2차 긴장력의 편심거리
 Z_{ct}, Z_{cb} : 합성단면중 PC.부의 상연 및 하연에 대한 단면계수

마찬가지로 합성단면으로 거동하는 바닥판 슬래브에 대하여서도 상하연에 발생하는 응력에 대하여 검토하여야 하며 이는 다음과 같다.

$$f_{tt} = \frac{n \cdot P_2}{A_c} - \frac{n \cdot P_2 \cdot e_{2(c)}}{Z_{tt}}, \quad f_{tb} = \frac{n \cdot P_2}{A_c} - \frac{n \cdot P_2 \cdot e_{2(c)}}{Z_{tb}} \quad (4b)$$

여기서, f_{tt}, f_{tb} : Topping 콘크리트 상연 및 하연의 휨응력
 n : 탄성계수비(E_{cs} / E_{ck})
 Z_{tt}, Z_{tb} : Topping 슬래브의 상연 및 하연에 대한 단면계수

(5) 합성단면 후 사용하중에 따른 응력

$$f_{st} = f_{gst} + \frac{M_d + M_l}{Z_{ct}} - \frac{1}{2}(1-R_1)\left(\frac{P_1}{A_c} - \frac{P_1 \cdot e_{1(c)}}{Z_{ct}}\right) - (1-R_2)\left(\frac{P_2}{A_c} - \frac{P_2 \cdot e_{2(c)}}{Z_{ct}}\right) \quad (5a)$$

$$f_{sb} = f_{gsb} - \frac{M_d + M_l}{Z_{cb}} - \frac{1}{2}(1-R_1)\left(\frac{P_1}{A_c} + \frac{P_1 \cdot e_{1(c)}}{Z_{cb}}\right) - (1-R_2)\left(\frac{P_2}{A_c} + \frac{P_2 \cdot e_{2(c)}}{Z_{cb}}\right)$$

여기서 M_d, M_l : 바닥마감 및 활하중에 의한 휨모멘트
 $e_{1(c)}$: 합성단면에 대한 1차 긴장력의 편심거리
 R_2 : 2차 긴장력의 유효율(effectiveness ratio)

Topping 슬래브의 상하연 응력은 다음과 같다.

$$f_{st} = f_{tt} + n \frac{M_d + M_l}{Z_{tt}} + \frac{1}{2}(1-R_1)\left(\frac{n P_1 e_{1(c)}}{Z_{tt}}\right) - (1-R_2)\left(\frac{n P_2}{A_c} - \frac{n P_2 e_{2(c)}}{Z_{tt}}\right) \quad (5b)$$

$$f_{sb} = f_{tb} + n \frac{M_d + M_l}{Z_{tb}} + \frac{1}{2}(1-R_1)\left(\frac{n P_1 e_{1(c)}}{Z_{tb}}\right) - (1-R_2)\left(\frac{n P_2}{A_c} - \frac{n P_2 e_{2(c)}}{Z_{tb}}\right)$$

3. 검토시 고려한 변수

IPC를 실제 적용가능한 부재로 검토하기 위해서는 하중 및 시공단계의 파악 이외에도 많은 설계변수를 고려하여야 하는데, 특히 기존의 PSC STS 또는 DTS와 비교하기 위해 몇가지를 변수를 동일조건하에 두어야 할 필요가 있다. 표 1에서는 검토시 고려한 변수를 정리하였다.

또한, 기준에 근거한 극한강도 설계 및 지압판의 발생응력과 처짐에 대하여도 검토한 후 설계범위내에서 가능한 모든 경우를 검토하여 데이터베이스를 구축하였다.

표 1 검토시 고려한 변수

	PSC 검토시	IPC 검토시
하중조건 1 : 주차장 계획	D.L = 400kgf/m ² L.L = 400kgf/m ²	
하중조건 2 : 창고형 매장의 계획	D.L = 80kgf/m ² L.L = 1,000kgf/m ²	
PC부 콘크리트 강도 (f_{ck1})	350kgf/cm ²	
바닥판 콘크리트 강도 (f_{ck2})	270kgf/cm ²	
사용 Tendon	SWPC 7B 12.7mm, 15.2mm (Bonded Tendon)	SWPC 7B 12.7mm, 15.2mm (Bonded & Unbonded Tendon)
부재의 플랜지 폭	STS 경우 90, 120, 150cm DTS 경우 180, 210, 240, 270cm	
부재의 플랜지 두께	5.0cm	
바닥판 슬래브 두께	7.5cm	
PC부 부재의 높이	40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80cm	
부재의 경간 길이	800cm부터 가능한 길이	

4. 설계검토 결과

본 논문에서 고려한 비교대상 단면은 그림 2와 같다. 그리고, 최적화된 PSC 및 IPC의 설계검토결과 의 일부를 다음의 표 2와 표 3에서 보였다. 표 2와 표 3에서 PSC는 각 경간에서 최적화된 단면의 높이와 Tendon량을 보여주며 IPC-1은 최적화된 PSC의 부재높이일때의 사용 Tendon량의 변화를 보고자 하였다. 또한, IPC-2항에서는 최적화된 IPC 단면을 통하여 각 경간별 최소 부재의 높이를 검토하였다. 결과에서 알 수 있듯이 하중 단계별로 프리스트레스를 도입한 IPC의 경우 기존 설계법의 PSC에 비하여 동일높이에서는 사용 Tendon량을 줄일 수 있는 것으로 검토되었으며, 이러한 감소량은 장경간으로 갈수록 그 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 경간의 구현에 있어서는 20%이상 최대 50%까지 장경간을 실현시킬 수 있었다.

IPC가 PSC보다 동일한 부재의 높이로 보다 장경간을 구현할 수 있게됨으로써 얻을 수 있는 장점은 부재의 경간에 의한 경제성 확보만이 아니라 한정된 대지 내에서의 건축물 신축 시 부차적인 이득을 취할 수 있다. 즉, 층고 절감에 의한 경제성 확보 뿐 아니라 기둥의 개소를 줄임으로써 보다 넓은 공간의 확보와 주차계획상에도 유리하게 작용하게 된다. 예를 들어, 125m 폭의 하중조건 2의 조건을 가진 건물에서 80cm 높이의 PSC DTS를 사용하여 건물을 계획하면, 13.0m의 경간이 가능하므로 기둥의 수는 10개(80×80cm 크기로 가정), 한 열의 최대 주차대수는 45대가 가능하다.

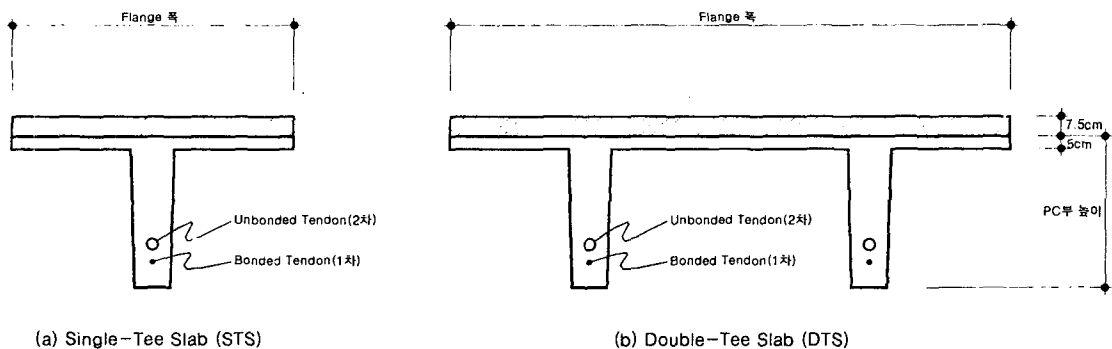


그림 2 비교대상 IPC 단면 (STS, DTS)

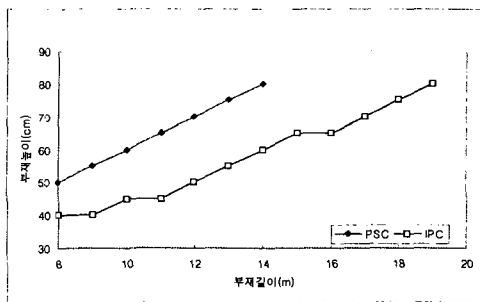
반면, 동일 높이의 IPC DTS를 사용할 경우에는 최대 17.0 또는 18.0m의 경간이 가능하고, 8개의 기둥만이 필요하고 49대의 주차가 가능하게 된다.

표 2 Single-Tee Slab(STS)일 경우의 PSC와 IPC의 비교

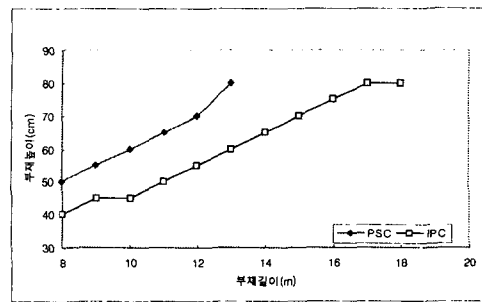
경간(m)	하중조건 1						하중조건 2					
	PSC		IPC-1		IPC-2		PSC		IPC-1		IPC-2	
	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon
8	50	3	50	3	40	4	50	4	50	4	40	5
9	55	4	55	4	40	6	55	5	55	4	45	6
10	60	5	60	4	45	7	60	6	60	5	45	8
11	65	5	65	5	45	9	65	7	65	5	50	8
12	70	6	70	5	50	9	70	8	70	6	55	9
13	75	7	75	6	55	9	80	7	80	7	60	9
14	80	8	80	6	60	10	-	-	-	-	65	10
15	-	-	-	-	65	10	-	-	-	-	70	11
16	-	-	-	-	65	13	-	-	-	-	75	11
17	-	-	-	-	70	13	-	-	-	-	80	12
18	-	-	-	-	75	14	-	-	-	-	80	16
19	-	-	-	-	80	14	-	-	-	-	-	-

표 3 Double-Tee Slab(DTS)일 경우의 PSC와 IPC의 비교

경간(m)	하중조건 1						하중조건 2					
	PSC		IPC-1		IPC-2		PSC		IPC-1		IPC-2	
	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon	H(cm)	Tendon
8	45	6	45	6	45	6	45	8	45	8	45	8
9	50	8	50	8	45	10	50	10	50	8	45	10
10	55	12	55	10	45	14	60	12	60	10	45	16
11	60	14	60	10	50	16	65	14	65	10	50	16
12	65	16	65	12	55	14	70	16	70	12	55	20
13	75	14	75	12	55	18	80	14	80	12	60	18
14	80	16	80	12	60	20	-	-	-	-	65	20
15	-	-	-	-	65	22	-	-	-	-	70	22
16	-	-	-	-	65	26	-	-	-	-	75	24
17	-	-	-	-	70	26	-	-	-	-	80	24
18	-	-	-	-	75	30	-	-	-	-	80	32
19	-	-	-	-	80	28	-	-	-	-	-	-

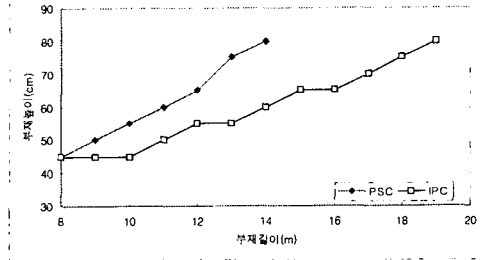


(a) STS - 하중조건 1

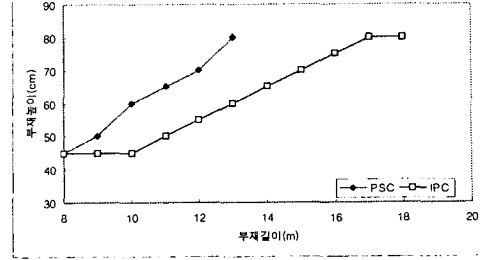


(b) STS - 하중조건 2

그림 2 하중조건 1, 2의 PSC/IPC STS 검토결과



(a) DTS - 하중조건 1



(b) DTS - 하중조건 2

그림 3 하중조건 1, 2의 PSC/IPC DTS 검토결과

5. 결론

본 논문에서는 IPC Girder의 개념을 건축물에 적용하여 기존의 PSC와 비교해 볼 때 IPC가 층고의 확보나 장경간의 확보면에서 유효함을 이론적으로 증명하였다. 대상 부재는 건축물에서 가장 많은 물량을 차지하는 STS와 DTS로 하여 검토 가능한 모든 변수를 적용하여 최적설계를 수행하였고 가능한 단면에 대한 데이터베이스를 확보하였다. 이러한 검토 결과, IPC가 기존 설계방식을 따른 PSC와 비교할 때 최대 50%, 평균 30% 내외의 장경간을 확보할 수 있고, 동일 경간내에서도 부재의 높이를 최대 45%, 평균 25%내외로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한, IPC의 적용으로 누릴 수 있는 장점은 단면의 절감이나 장경간의 확보만이 아니라 부차적인 장점도 가질 수 있다. 특히, 동일한 부재가 반복적으로, 대량으로 제작될 수 있는 건축물의 특성을 고려할 때 부가자재의 재활용 및 모듈화, 기계화로 보다 많은 경제적인 이점 또한 가질 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2000년도 ICT(인터컨스텍(주))의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한만엽, 김진근, 박선규, 황의승, 이차돈, "장경간 IPC 거더 개발연구", 아주대학교 토목기술연구센터, 1999.
2. 한만엽, 김진근, 박선규, 황의승, 이차돈, "IPC 거더 설계, 시공 지침", 한국콘크리트학회, 2000.
3. PCI Design Handbook, 4th ed., Prestressed Concrete Institute.
4. Guidelines for The Use of Structural Precast Concrete in Buildings, 2nd ed., NewZealand Concrete Society, 1999.
5. Antoine E. Naaman: "Ultimate Analysis of Prestressed and Partially Prestressed Sections by Strain Compatibility," PCI Journal, vol. 22, no. 1, January/February 1977, pp. 32-51.
6. Stone, W. C. and Breen, J. E., "Behavior of Post-Tensioned Girder Anchorage Zones", PCI Journal, Vol. 29, No. 1, Jan-Feb. 1984, pp.64-109.
7. Stone, W. C. and Breen, J. E., "Design of Post-Tensioned Girder Anchorage Zones", PCI Journal, Vol. 29, No. 2, Mar-Apr. 1984, pp.28-61.
8. Naaman, A. E., "Partially Prestressed Concrete: Review and Recommendations", PCI Journal, Vol. 30, No. 6, Nov-Dec. 1985, pp. 30-71.