

프리스트레스트 콘크리트 보의 솟음 해결방법

金 巨 煥

〈한국건설기술연구원 선임연구원·공학박사〉

1. 序 言

프리스트레스트(P. S)콘크리트 보의 콘크리트의 가장 큰 결점인 낮은 인장응력을 효율적으로 補強한 매우 우수한 構造形式이다. P. S 콘크리트 보의 또 다른 長點중의 하나는 보의 처짐을 일반 콘크리트(R. C)의 경우에 비하여 效果的으로 처리할 수 있다는 점이다. 이는 P. S 보의 경우에는 PC 강선의 긴장력으로 自重 및 死荷重에 의한 처짐을 상쇄시킬 수 있으며, 강선의 배치를 조정함으로써 솟음(Camber)을 調節할 수 있기 때문이다.

그러나 어떤 경우에는(특히 強度面에서 最適에 가깝게 경제적으로 설계된 P. S 보의 경우) 지나친 솟음으로 심각한 문제가 발생하기도 하며, 이는 P. S 보의 長期처짐 및 솟음을 정확히 예측했지 못했기 때문에 일어난다.

本稿에서는 P. S 콘크리트 보의 장기처짐 및 솟음의 一般的 性向에 對하여 간략히 記述하고 솟음을 效率的으로 조정할 수 있는 방법에 대하여 解析例를 通하여 提示하고자 한다.

2. P. S 콘크리트 보의 長期처짐 및 솟음의 一般的 性向

R. C 보와 같이 P. S 보의 장기처짐을 할 때 두

가지 큰 어려움이 따른다. 첫째는 콘크리트의 탄성계수 E_c 의 算定이며, 둘째는 콘크리트의 크리프(Creep) 영향에 대한 고려이다. 콘크리트의 E_c 는 應力의 크기에 따라 달라질 뿐만 아니라 콘크리트의 材齡에 따라 달라진다. 또한 크리프에 의한 영향도 콘크리트의 材料特性 뿐만 아니라 荷重의 載荷時間과 하중(應力)의 크기에 따라 달라진다. 특히 P. S 보의 경우 P. S 에 의한 압축력이 항상 작용하고 있으므로 크리프에 의한 영향은 R. C의 경우보다 훨씬 더 크다.

이와같이 P. S 보의 장기처짐 및 솟음은 時間이 경과함에 따라, 또한 各段階의 荷重의 크기에 따라 計算에 필요한 係數들이 변하기 때문에 手計算에 많은 시간이 소요되며 정확한 계산을 하기 어렵다. 이러한 이유로 P. S 보의 장기처짐 및 솟음을 간략히 算定할 수 있도록 대부분의 시방서에서는 장기처짐 및 솟음에 대한 倍數值를 規定하거나 積載時期에 따른 크리프 係數를 規定하고 있다. 表 1은 PCI (Prestressed Concrete Institute)에서 채용한 P. S 보의 장기처짐 및 솟음 計算을 위한 倍數值이며 表 2는 건설부 제정 프리스트레스트 콘크리트 표준 시방서에서 규정한 재하시기에 대한 크리프 係數이다.

이러한 배수치들은 豫備設計시에 개략적인 算

표 1. 장기처짐 및 수축산정을 위한 배수값⁽¹⁾

	Without Composite Topping	With Composite Topping
<i>At erection</i>		
1. Deflection (downward) component - apply to the elastic deflection due to the member weight at release of prestress.	1.85	1.85
2. Camber (upward) component - apply to the elastic camber due to prestress at the time of release of prestress.	1.80	1.80
<i>Final</i>		
3. Deflection (downward) component - apply to deflection calculated in (1) above.	2.7	2.4
4. Camber (upward) component apply to camber calculated in (2) above.	2.45	2.2
5. Deflection (downward) - apply to elastic deflection due to superimposed dead load only.	3.0	3.0
6. Deflection (downward) - apply to elastic deflection caused by the composite topping.	-	2.30

표 2. 콘크리트의 크리프 계수

프리스트레스 도입시 또는 제하시의 콘크리트의 재형 환경조건	4~7	14	28	90	1년
	일	일	일	일	
옥외의경우	2.8	2.5	2.2	1.9	1.4
옥내의경우	4.3	3.6	3.1	2.4	1.6

정을 위하여 만들어진 것으로 본設計에서 使用하기에는 문제점이 있다. 특히 P.S 보의 경우는 크래프에 의한 영향이 서로 相反되는關係인 처짐과 수축에 모두 작용하기 때문에 더욱精密한 計算이 필요하다. 이러한 이유로 P.S 보의 처짐 및 수축은 흔히 컴퓨터 프로그램을 이용하여 계산한다.

그림 1은 프로그램을 이용하여 계산된 P.S 보의 장기처짐 및 수축을 例示한 것이다. 사용된 프로그램은 1986년 미국 텍사스大에서 개발한 프로그램 캄버(Camber)로 合成 P.S 콘크리트 보의 長期처짐 및 수축을 계산할 수 있다.

그림 1은 P.S 보의 一般의인 長期처짐 및 수축의 性向을 보여준다. 그림 1에서 點A는 P.S 에 의한 탄성수축 1.63in를 나타내며, A-B는 P.S 보의 生産後 現場設置前까지 쌓아둘 때 支點間의 길이(Span)가 감소함으로써 유발되는 추가탄성수축을 나타낸다. 點C는 P.S 보가 現場에 設置되는 時點이며 이 경우의 수축값은 4.91

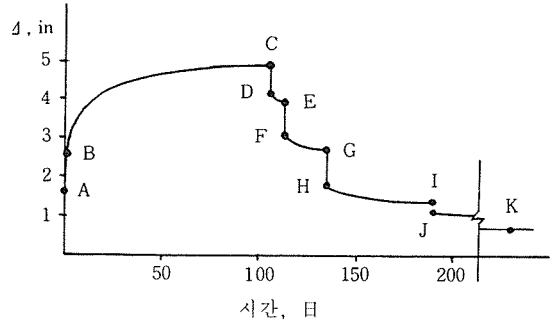


그림 1. P.S 보의 장기처짐

in로 순간탄성수축 1.63in의 3배나 된다. C-D는 P.S 보의 現場設置後 支點間의 길이가 원상복구함으로써 유발되는 수축의 감소, 즉 처짐이다. 이 값은 앞의 A-B값보다 작는데 그 원인은 材齡의 증가로 인한 탄성계수 E_c 의 증가이다. E-F는 첫번째 死荷重(例를 들면 슬래브中 프리캐스트板)에 의한 탄성처짐량이며, G-H, I-J는 각각 두번째, 세번째의 死荷重(슬래브의 現場콘크리트 치기 및 아스팔트 덧씌우기)에 의한 탄성처짐량이다. 이보는 크리프의 영향에 의하여 처짐이 계속되어 크리프의 영향이 무시할 정도로 작게 되는 20年후에는 수축이 0.62in(點 K)가 된다.

그림 1에서 직선은 탄성처짐 및 수축을, 곡선은 크리프에 의한 처짐 및 수축을 각각 나타낸다. 本例에서 C點까지, 즉 P.S 보를 설치하기 직전까지의 총수축량은 4.91in로 B點까지의 탄성수축량 2.65in의 1.85배이다. 즉, 크리프에 의한 추가수축량은 탄성수축량의 85%이다. 이와 유사하게 C-K間的 크리프에 의한 추가처짐량은 탄성처짐량의 60% 정도이다.

3. 長期처짐의 影響要因

3.1 一般事項

P.S 보의 長期처짐 및 수축은 앞에서 記述한 바와 같이 콘크리트의 彈性係數와 크리프係數의 影響을 받는다. 이는 P.S 보의 長期처짐 및 수축이 시멘트등 材料로부터 콘크리트치기 및

습도등 주위환경에 이르기까지 거의 모든 要因의 영향을 받는다는 것을 의미한다. 一般의인 要因들의 影響에 대하여는 많은 研究가 이미 이루어져 왔으며 콘크리트가 存在하는 한 끝없이 계속될 것이다.

本稿에서는 上記한 바와 같은 콘크리트의 材學的인 影響要因이외에 P.S 보의 生産過程에서 養生方法, 養生後 施工前까지 工場 또는 現場에서 쌓아둘 때 支點의 位置와 P.S 보의 施工時期(現場設置時期)의 影響에 대하여 프로그램 캄버를 사용하여 알아보코자 한다.

3.2 解析對象 構造物의 材源

本稿에서의 解析對象 構造物은 道路교량으로 경간길이 127ft, P.S 보 사이의 간격은 4.6ft 이다. 교량의 슬래브는 총두께 7.5in의 콘크리트조이며 4in 두께의 P.C 板과 3.5in 두께의 現場치기 콘크리트로 되어 있으며 슬래브의 表面마감은 1.5in 두께의 아스콘 덧씌우기로 되어있다. P.S 보는 AASHTO Type IV P.S 콘크리트 I-Beam 이며 사용된 강선은 항복강도 270ksi의 1/2in P.S Tendon이며 그의 배치는 그림 2에 나타난 바와 같다.

3.3 養生方法의 영향

P.C 工場에서 P.S 콘크리트 보를 生産할 때 가장 많이 使用하는 養生方法은 습윤양생 (Moisture Curing)이며 生産속도를 빠르게 하기 위하여 증기양생 (Steam Curing)을 사용하기도 한다. 양생방법이 P.S 보의 장기처짐에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 2의 P.S 보를 프로그램 캄버로 해석하였다.

그림 3은 프로그램 캄버에 의한 해석 결과이다. 이 P.S 보에 작용하는 荷重의 種類와 그 順序는 그림 1의 경우와 같다.

즉, A點 : P.S에 의한 初期彈性 沈음

B點 : 支點間길이의 變化(감소)에 의한 추가탄성 沈음

C點 : P.S 보의 現場設置

E點 : P.C 板의 設置

G點 : 現場콘크리트 치기

I點 : 아스콘 덧씌우기

K點 : 20年後 死荷重에 의한 최종 처짐 값이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 P.S 보의 長期처짐 및 沈음은 콘크리트 養生方法의 影響을 받는다.

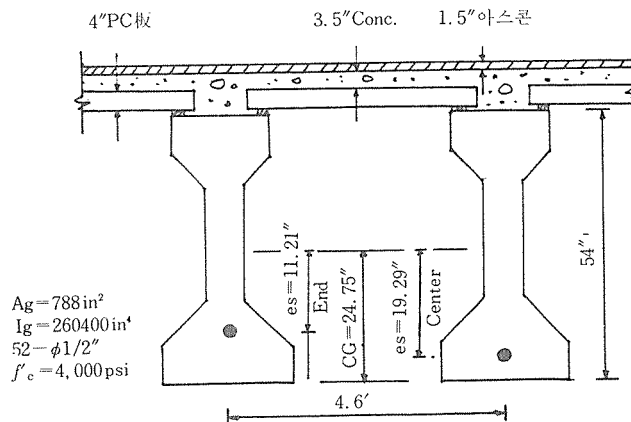


그림 2. 해석대상 구조물 단면도

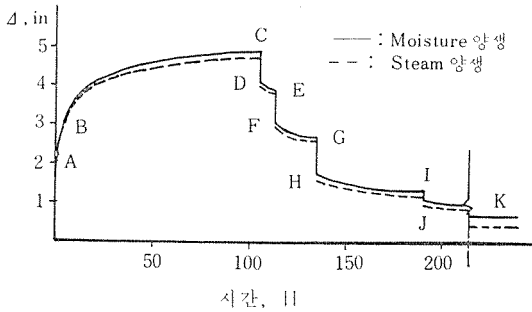


그림 3. 양생방법의 영향

다. 즉, 증기양생의 경우에는 습윤양생의 경우보다 크리프에 의한 長期저침 및 수축량이 적다. 이러한 現象은 콘크리트 양생溫도의 상승이 크리프현상을 감소시키기 때문이다. 크리프의 감소현상은 양생溫도와 양생期間이 증가함에 따라 같이 증가하지만 짧은 양생期間이라도 高溫을 加하면 많은 양의 크리프를 감소시킬 수 있다. 이러한 사실은 그림 4에 나타난 바와 같이 크리프의 크기가 荷重이 加해지는 時期가 늦을수록, 즉 콘크리트의 材齡이 증가할수록 작아지며, 특히 初期段階에서 급격히 감소하는 것으로 알 수 있다. 이러한 現象의 이유는 콘크리트의 硬化反應중 C-S-H ($C_3S_2H_3$) 반응이 초기강도에 큰 영향을 미치며 높은 온도에서 반응속도가 加速化하기 때문인 것으로 알려져 있다.

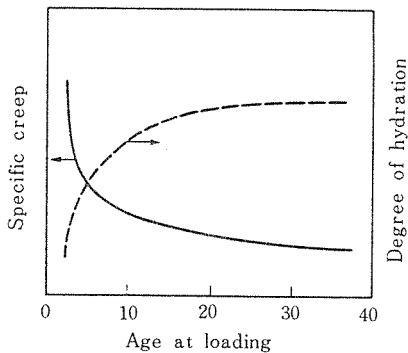


그림 4. 크리프와 재하시기의 관계⁽³⁾

앞의 그림 3의 結果를 數量的으로 살펴보면: 첫째, 現場設置時(C點)의 P.S 보의 수축량은 습윤양생의 경우 4.91in이나 증기양생의 경우에는 4.51in로 0.41in(약 9%) 감소하며,

둘째, 크리프현상이 정지되는 20年뒤에는(K點) 수축값이 0.62in에서 0.1in로 0.51in 감소한다.

이 解析結果로 양생方法이 크리프에 미치는 영향은 그다지 크지 않으며 初期段階에 주로 작용한다는 사실을 알 수 있다.

이 解析에서는 양생方法 自体(單一變數)의 영향을 알아보기 위하여 콘크리트의 材齡에 따른 強度는 습윤양생이나 증기양생의 경우 모두 同一하다고 가정하였다.

3.4 施工時期의 影響

P.S 보는 現場콘크리트치가 아닌 工場生産品이므로 生産에서 現場設置까지의 期間이 各各 다를 수 있다. 특히 注文生産이 아닌 既成品인 경우에는 그 期間의 차이가 수십일이상이 될 경우도 있다. 또한 注文生産의 경우라도 構造物의 일부를 보수 또는 대체하는 경우에는 既存의 보와 新設되는 보와의 처짐량 또는 수축량이 크게 달라질 경우가 있다.

이러한 施工時期의 差異가 P.S 보의 처짐 및 수축에 미치는 影響을 프로그램 컴퓨터를 이용하여 살펴보았다. 그림 5는 解析結果를 圖示化한 것으로 프리스트레스後 現場設置까지의 期間을 各各 112日, 52日, 12日로 가정하였다. 現場設置後에 構造物에 加해지는 荷重의 크기, 종류 및 施工期間 다른 모든 조건은 同一하다. 그림 5를 살펴보면 세선(52日), 점선(12日)의 경우가 실선(112日)을 평행이동한 것과 매우 근사하다. 이는 크리프에 의한 영향이 初期段階에서 주로 이루어지며 材齡에 따른 콘크리트 強度變化에 의한 영향이 그리 크지 않음을 의미한다.

解析結果의 數置는;

첫째, 現場設置時의 P.S 보의 수축치는 112日의 경우에는 4.91in이며, 52日의 경우 4.72in 12日의 경우 3.88in, 各各 112日의 경우에 비하

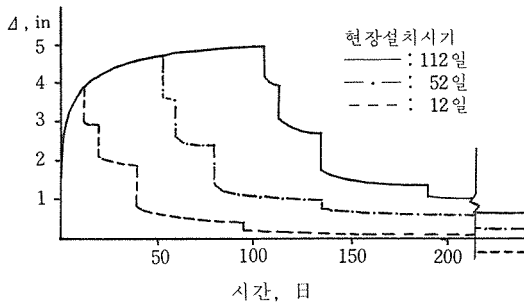


그림 5. 시공시기의 영향

여 0.19in (4%), 1.03in (21%) 감소하였다.

둘째, 20년후에의 보의 솟음값이 112일의 경우에는 0.62in이며 52일과 12일의 경우에는 0.35in, -0.32in로 각각 0.24in, 0.94in 감소하였다.

이 해석의 결과에서 솟음치의 감소량이 현장설치시보다 20년후에 오히려 작아지는 것은 조기설치시의 콘크리트 강도, 즉 탄성계수가 상대적으로 작아서 이로 인한 탄성처짐량이 증가하였기 때문이다.

3.5 支點위치의 영향

P.S 보를 生産後 現場設置前까지 쌓아둘 때는 P.S 보의 사이에 持支物(보통의 경우 木材)를 넣어 野積하는 것이 보통이다. 이 경우 P.S 보의 支間거리는 강선의 긴장력을 해제할 때의 支間거리 보다 작아지며 支點의 위치를 보통보의 단부에서 4~6ft 정도로 한다(그림 6). 이때 지점위치 (즉, 지간거리)의 변화는 P.S보의 솟음량에 영향을 미치게 된다.

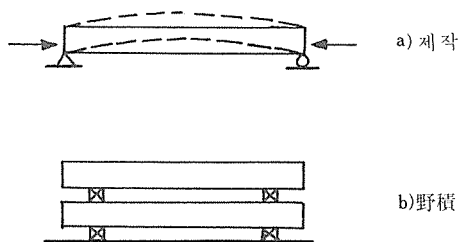


그림 6. P.S 보의 支點 위치변화

그림 7은 野積期間중 支點의 위치를 보의 단부에서 각각 6ft, 4ft, 2ft로 하였을 때 P.S보의 장기처짐및 솟음을 나타낸 것이다. 지점의 위치가 보의 단부에서 멀어질수록, 즉 支間길이 작아질수록 보의 솟음량은 증가하는데 이는 보의 自重에 의한 휨모멘트가 작아지기 때문이며 당연한 결과이나, 그 영향의 크기가 전술한 養生方法이나 施工時期의 영향보다 훨씬 크다.

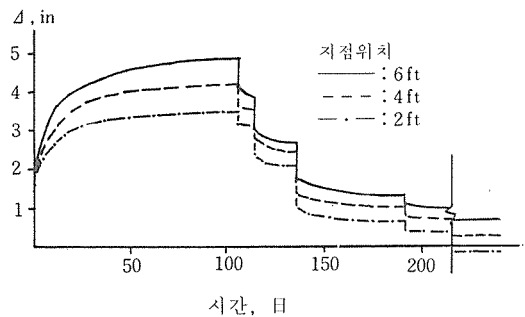


그림 7. 지점위치의 영향

먼저 現場設置時의 P.S 보의 솟음량은 지점 위치가 6ft일 경우 4.91in이며 지점 위치가 4ft, 2ft일 때 솟음량은 4.20in와 3.49in로 각각 0.71in (14%), 1.42in (29%) 감소하였다.

20년후의 솟음치는 지점 위치가 6ft일 경우 0.62in에서 4ft일 경우 0.24in로 0.38in 감소하고 2ft일 경우 -0.13in로 0.75in 감소하였다.

各경우의 솟음차이가 現場設置직전에 最大가 되며 현장설치 직후에는 솟음차이가 현저히 줄어들고 그 이후에는 솟음차이의 變化가 거의 없다. 이는 야적시 지점 위치가 보의 단부에 가까울수록 P.S에 의한 솟음량이 작아지지만 현장설치시 보의 自重에 의한 처짐량도 작아지기 때문이다. 예를 들어 지점 위치 6ft일 경우 현장설치시의 처짐량 0.79in에 대하여 지점 위치 2ft일 경우 처짐량은 0.26in이며, 만일 지점 위치 0ft (野積時 支點 위치가 구조물에서 보의 지점 위치와 同一할 때)일 경우에는 현장설치시 처짐량은 0일 것이다.

4. P.S 보의 솟음처리방법

4.1 P.S 構造物에서 솟음差異의 問題點

前述한 바와 같이 P.S 보를 使用한 構造物의 일부를 補修 또는 代替하는 경우에는 既存의 P.S 보와 新設되는 P.S 보의 솟음이 크게 달라지는 경우가 많다. 이러한 솟음의 차이는 施工 및 設計상의 적지 않은 문제점을 야기시킨다.

예를들어 P.S 콘크리트 4차선 교량을 6차선으로 증설할 경우, 기존교량의 中央부분의 솟음값은 그림 1에서 0.62in(K點)이다. 그러나 新設되는 P.S 보의 솟음값은 현장설치시 4.91in, PC板 설치시 3.95in이며 현장 콘크리트 치기 직전에는 (그림 1에서 點 G) 2.76in가 되어 기존의 P.S 보와는 2.14in가 더 크다. 이 솟음값의 차이는 PC板이 없이 슬래브를 모두 현장치기 콘크리트로 할 경우에는 3.33in(3.95-0.62)로 더욱 심각해진다. 이러한 경우 교량슬래브의 水平을 유지하려면 기존 P.S 보 부분의 슬래브 또는 아스콘 덧씌우기가 2.14in 또는 3.33in 더 두꺼워져야 하므로 工事物量이 증가할 뿐 아니라 既存構造物의 安全性을 再檢討하여야 한다.

이러한 솟음차이를 해소하는 방법으로는 新設될 P.S 보를 設計할 때 기존 P.S 보의 솟음에 맞추기 위하여 斷面形態를 변경하거나 PC 강선의 배치를 조정하거나 콘크리트의 品質을 조절하는등 여러가지 方法을 강구할 수 있으나 既存構造物과의 美的調化를 해치거나 솟음차이를 처리할 수 있는 한例가 있는등 技術的인 어려움과 경제적인 손실이 뒤따르게 된다.

이러한 경우에 앞의 3章에서 기술한 바와 같은 솟음에 영향을 미치는 要因들의 特性을利用하면 構造物의 美를 해치지 않고 경제적으로 손쉽게 솟음차이 문제를 해결할 수 있다. 本稿에서는 P.S 보의 솟음차이를 해결하는 方法을 例를 들어 說明하고자 한다.

4.2 P.S 보 솟음處理의 例

本例에서 使用된 P.S 보의 斷面性能 및 구조물의 材源은 3章에서의 경우와 同一하다. 本例에서 利用할 P.S 보 솟음의 영향요인에 관한 3章에서의 解析結果를 종합하면:

1. P.S 보의 現場設置時期가 빠를수록 솟음량은 감소하고,
2. 野積時 支間위치가 P.S 보의 단부에 가까울수록 솟음량은 감소하며,
3. 습윤양생의 경우보다 증기양생의 경우 솟음량은 감소한다.

그림 9에서 既存 P.S 보의 中央처 솟음량은 0.62in이며, 동일조건하의 新設 P.S 보의 처짐량은 현장 슬래브 콘크리트 타설시 2.76in로 솟음량의 차이 $d\Delta_0$ 는 2.14in이다.

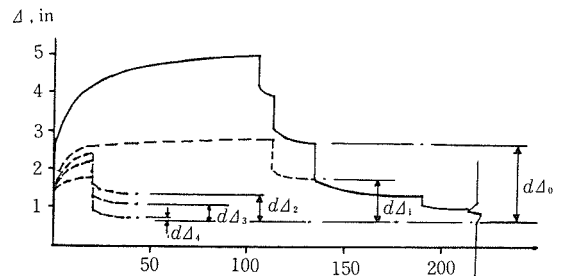


그림 8. Camber 처리의 예

이 솟음차이를 해소하기 위하여 먼저 3章의 영향요인중 가장 큰 영향을 미치는 野積時의 支間위치를 P.S 보의 端部에 설치하면 현장콘크리트치기 직전의 보의 솟음값은 1.71in로 기존 P.S 보의 솟음과의 차이는 1.09in(그림 8에서 $d\Delta_1$)로 줄어들며 이 값은 원래의 솟음 차이 2.14in를 49% 감소시킬 값이다(그림 8참조).

다음에는 시공시기를 112日에서 12日로 단축시키면 솟음차이는 0.76in(그림 8에서 $d\Delta_2$)로 64% 감소한다. 이 솟음차이 0.76in는 현장에서 處理할 수 있는 정도지만 증기양생을함으로써 솟음차이는 0.55in(그림 8에서 $d\Delta_3$)로 74% 감소시킬 수 있다.

솟음차이 0.55in는 計算上의 오차로도 발생할 수 있는 정도이나, 굳이 수치상으로 솟음량을 일치시키려면 증기양생시간을 약간 증가시킴으로써 쉽게 조절할 수 있다, 本例에서의 증기양생시간 18時間을 24時間으로 연장하면 솟음차이는 0.06in(그림 8에서 dA_4)로 원래의 솟음차이 2.14in의 97%를 해소시킬 수 있다.

5. 結 言

P. S 보는 P. S에 의한 압축력을 받으므로 크리프현상에 의한 長期처짐 및 솟음이 일반 R. C 構造의 경우보다 더욱 크다. 이에 따라 施工時 또는 補修時에 과도한 솟음에 의한 여러가지 문제점이 發生한다. 이러한 P. S 보의 솟음에 관한 문제점의 기본적인 해결책으로는 斷面設計時의 斷面形態 變更, PC 강선의 배치 調整, 또는 콘크리트 品質을 조절하는 등 여러가지 가능한 방법이 있으나, 既存構造物과의 美的調化를 해치거나 技術的인 어려움과 경제적인 손실이 뒤따른다.

이러한 경우 本稿에서 다룬 솟음의 영향요인들-養生方法, 野積時 支點위치 및 現場設置時期를 적절히 調整함으로써 경제적이며 손쉽게 P. S 보의 솟음차이를 處理할 수 있을 것이다.*

(참고문헌)

1. Lin, T. Y., Burns, N. H., "Design of Prestressed Concrete Structures", 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1981.
2. 建設部, 프리스트레스트 콘크리트 표준시방서, 서울, 1977.
3. Mindness, S., Young, J. F., "Concrete", Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1981.
4. PCI, "PCI Design Handbook", Prestressed Concrete Institute, Chicago, 1978.
5. Kelly, D., Breen, J. E., User's Guide For Computer Program Camber, University of Texas, Austin, 1986.
6. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI SP 27-3, ACI, 1971.

화합하여 더욱 안정 단합하여 힘찬 전진