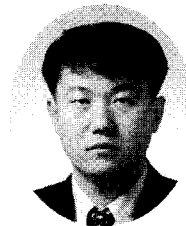
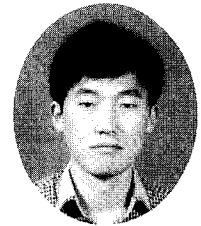


서해대교 FCM 교량에서의 솟음값 산정 및 적용

- Camber Control of FCM Bridge in Seohae Bridge -



김주연*



박찬민**

1. 개요

FCM 공법의 교량은 일반 FSM 교량과는 달리 시공중의 구조와 시공후의 구조가 변화되므로 모든 시공상태가 적절히 구분되어 고려되어야 한다. 다행히 우리나라에서도 FCM교량의 실적이 충분하고 또 한 몇몇 기술자들에 의해 그 경험이 축적되어, 현재는 순수 국내 기술만으로도 설계 및 시공이 가능한 수준에 있다.

그러나, 기존에 시공된 FCM 교량들을 살펴보면 실제 처짐 양상이 구조계산에 의한 예상치짐량보다 큰 경향을 보인다. 이러한 양상은 콘크리트의 물성치에 따른 장기적인 영향이 예상하였던 것보다 큰 것으로 보인다. 따라서, 서해대교 FCM 구간은 직접 현장 배합물드를 이용한 실험을 수행하고, 그 결과를 기존에 사용하였던 모델식과 비교하여 캠버값을 보정하여 적용하였다.

2. 설계조건

2.1 구조형식

- 상부형식 : P.S.C BOX GIRDER
- 교 장 : $L=85+2@165+85=500m$
- 교 폭 : $B=15.7 \times 2=31.4m$
- 평면선형 : $R=3007.855m$ (상행선),
 $R=2992.145m$ (하행선)
- 종단구배 : -1.09%
- 특 징 : 주두부가 교각과 강결된 라멘 구조

2.2 탄성 계수

중전 콘크리트 시방서에서는 콘크리트의 설계기준강도 f_{ck} 가 $400kg/cm^2$ 이한 콘크리트의 시험결과를 근거로 콘크리트 탄성계수 추정식 ($E_c=4270w_c^{1.5}\sqrt{f_{ck}}$

$=3.38 \times 10^5 kg/cm^2$) 콘크리트 압축강도에 관계없이 일률적으로 적용하여 왔다.

그러나, f_{ck} 가 $400kg/cm^2$ 를 초과하는 고강도 콘크리트에 대한 규정을 1999년판 시방서(콘크리트구조설계기준)에서 별도로 추정식 ($E_c=10500\sqrt{f_{ck}}+70,000kg/cm^2=2.8 \times 10^5 kg/cm^2$) 규정함에 따라 기존에 과다 평가된 값을 어느정도 낮추게 되었다. 기존 시공한 교량들은 (구)시방서에 따른 탄성계수치를 적용하다보니 여기서 실측치와의 차이가 발생되었으리라 판단된다.

본 서해대교에서는 새로 개정된 시방서의 탄성계수 추정식과 비교하기 위하여 탄성계수 평가실험을 수행하였다. 실험결과 $2.7 \times 10^5 kg/cm^2$ 값을 나타내고 있어 (신)시방기준에 근접한 결과치를 보이고 있다.

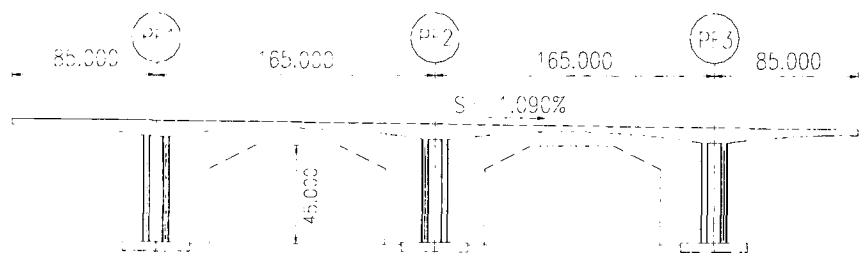
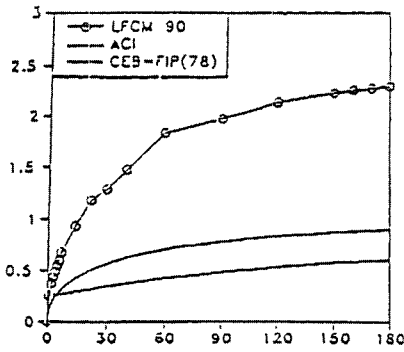
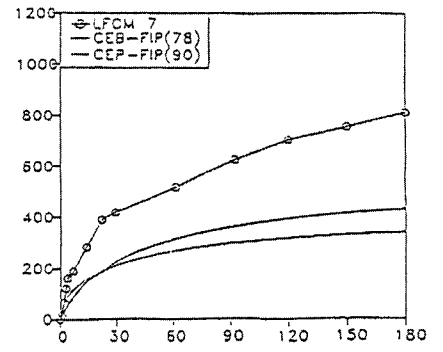
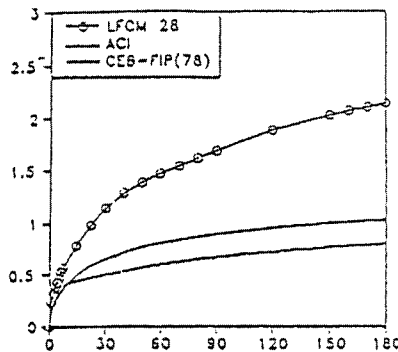


그림 1. 서해대교 FCM 교량 측면도

* 한국도로공사 일산-퇴계원건설사업소 공사과장
** 정희원, 한국도로공사 도로연구소 수석연구원



(a) 크리프 실험결과와 모델식 비교



(b) 건조수축 실험결과와 모델식 비교

그림 2 건조수축 실험결과와 모델식의 비교

따라서, 캠버값 산정을 위한 구조해석 시에 탄성계수치는 $2.7 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 를 사용하였다.

2.3 모델식과 실험치 비교

1) 개요

프리스트레스드 콘크리트박스 거더 교량은 콘크리트의 시간 의존적인 특성(크리프, 건조 수축 등)으로 인하여 응력의 재분배효과, PS 강재의 긴장과 이완, 시공 중의 구조계 변화등을 고려하여야 하므로 구조해석상에 많은 어려움이 있으며 고도의 기술을 요한다. 이러한 어려운 문제중에서 처짐 및 응력을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 콘크리트의 시간 의존적인 특성을 정확하게 알아야만 한다. 그러나 CEB-FIP, ACI, BP-KX 등의 여러 기존의 모델식으로는 우리나라에서 사용되고 있는 콘크리트의 크리프나 건조수축등을 정확히 예측할 수는 없다.

콘크리트 장기 변형을 예측하기 위해서는 먼저 콘크리트의 배합 및 콘크리트 구조물이 놓인 환경조건에 따른 예측 모델이 필요하다. 따라서 많은 나라에서는 이에 대한 모델식을 제시하고 있다. 그러나 이러한 모든 모델식이 실제 철근 콘크리트 구조물에서의 콘크리트의 장기 변형을 정확히 나타낼 수 있는 것은 아니다.

그 이유는,

첫째, 실제 구조물에서 사용되는 콘크리트가 실험실에서 행하는 재료와는 많은 차

이가 있을 수 있으며,

둘째, 콘크리트의 장기변형에 미치는 영향인자를 아직도 정확히 파악하지 못하고 있으므로 그에 대한 이론적, 실험적 연구의 한계가 있고,

셋째, 실제 구조물이 놓이는 환경은 매우 가변적이기 때문에 그러한 가변성을 모두 고려한 모델식의 개발은 불가능하기 때문이다.

따라서 보다 정확한 장기 예측을 위해서는 실제 사용재료와 동일한 재료와 동일한 환경에서의 단기간의 실험값에 의해 보정하는 것과 경험적인 보정이 필요하다.

2) 실험결과 분석

크리프 및 건조수축에 대한 현장배합 몰드의 실험 결과에서는 CEB-FIP(78) 모델식에 의한 Graph와 유사한 형태를

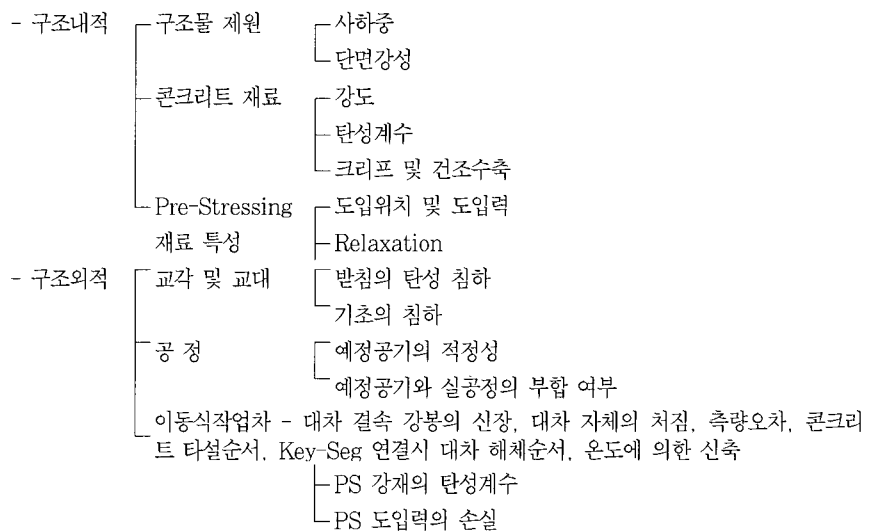
갖추고 있다. 본 교량에 대한 콘크리트의 크리프와 건조수축에 대한 실험 결과를 살펴보면 실험값이 CEB-FIP CODE(78)을 적용하여 계산한 값보다 2배 이상의 값을 보이고 있다.

즉, 단순히 CEB-FIP CODE(78)만을 적용하여 캠버를 계산하면, 기 시공된 교량들의 시공사례를 보아 알 수 있듯이, 크리프와 건조수축등에 의해 처짐이 예상보다 크게 발생하게 됨을 알 수 있다.

서해대교에서는 이와 같은 실험 결과를 반영하여 기존 모델식에서 산출된 계수를 2배로 보정하여 처짐량을 산정하였다.

3. 캠버관리

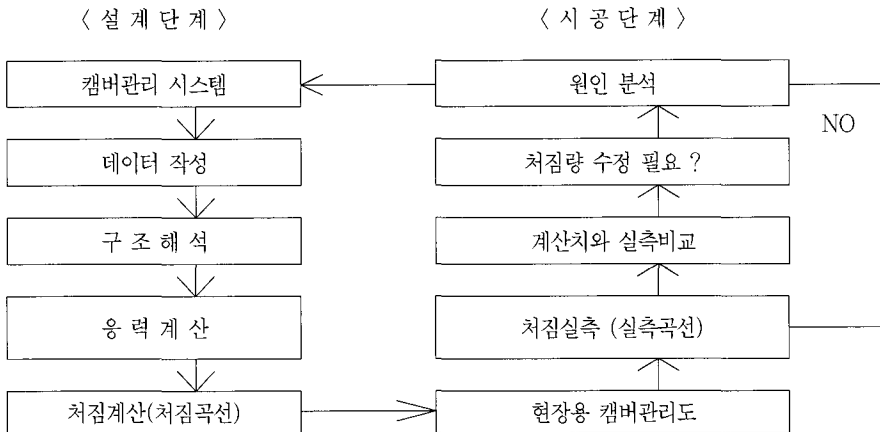
3.1 캠버관리에 영향을 주는 요소



3.2 처짐관리의 단계

- 주두부에서 각 Seg.를 가설하여 Key-Seg. 연결 직전까지의 처짐관리
- Key Seg. 접합 단계에서의 처짐관리
- 최종 시공단계에서의 처짐관리
- 장기처짐 (추가처짐) 관리

3.3 캠버관리 흐름도



4. 사해대교 FCM 교량의 거동 분석

4.1 해석적 거동분석

앞에서 언급한 캠버관리 절차에 따라,

실제 현장에서 사용하기 위한 캠버량을 산출하기 위하여 아래와 같은 3가지 경우에 대하여 해석적으로 거동변화량을 분석하였다.

위의 3가지 경우에 대하여 캔틸레버 완공시까지의 하향거동, Key-Segment 시공시의 상향거동, 구조물 완공후에 발생하는 크리프와 건조수축에 의한 하향거동 등

나타나, 캔틸레버 완공시까지의 거동 및 Key-Segment 시공시의 거동량은 크리프와 건조수축 계수의 영향을 거의 받지않고 탄성거동이 지배적임을 알 수 있다.

따라서 캠버 계획시 시공중의 탄성거동과 완공후의 크리프, 건조수축 거동을 분리하여 계획을 수립하였다.

4.2 실교량 거동분석

실제 고속도로 상에 건설된 몇몇 FCM 교량에서의 처짐 결과를 살펴보면 다음과 같다.

교량 A는 교각과 상부구조 사이에 받침이 놓이는 교량이고 교량 B와 C는 교각과 상부구조가 일체로 강결되는 구조이다. 탄성거동의 경우, 위의 예에서 보듯이 설계값보다도 다소 많은 양이 처지는 것을 알 수 있다. 물론 각 교량별로 서로 다른 시공오차가 포함되어 있어 정확한 처짐값을 비교하기는 어렵지만, 그러한 오차를 무시한다면 캔틸레버 끝단에 가까울수록 실측치와 계산값과의 거동차이가 커져 교량 B와 C의 경우 20~50% 정도 더 처지는 양상을 나타내며 교량 A의 경우 66% 정도 더 처진 것을 알 수가 있다.

이는 교각이 강결된 라멘구조와 받침이 있는 연속보 형식과의 차이에서 오는 차이도 배제할 수가 없으리라 판단된다. 그렇지만, 탄성거동량의 50% 정도를 추가적으로 적용하는 것도 무리가 없음을 알 수가 있다.

의 주요거동을 비교하면 <표 1>과 같다. 이 결과치에 의하면 구조물 완공후에 발생하는 크리프와 건조수축에 의한 하향 거동량은 각 경우에 대하여 차이가 크게

구분	탄성 계수	Creep, 건조수축계수	비고
A	$2.8 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$	CEB-FIP Model Code(78) 적용	이론식
B	$2.7 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$	이론값 $\times 1.5$	실험치 보정
C	$2.7 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$	이론값 $\times 2.0$	실험치 보정

표 1. 주요 거동변화량(PF2)

(단위 : mm)

경우	Seg	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
		A	①	2	43	70	84	78	71	62	52	43	35	26	20	16	11	11	10	9	7
	②	48	47	46	43	39	35	30	25	21	17	14	11	9	6	5	3	3	1	1	1
	③	45	45	44	42	40	38	35	32	29	26	24	22	20	18	16	14	13	11	10	10
B	①	4	46	73	85	80	71	62	51	41	33	25	19	15	12	11	10	9	9	8	8
	②	45	44	42	40	37	32	29	24	20	16	12	10	7	6	4	3	1	1	0	0
	③	75	74	71	69	65	61	57	52	47	42	37	34	30	28	24	22	19	17	15	14
C	①	17	59	84	96	81	71	61	50	41	33	24	19	15	12	11	11	10	10	9	9
	②	43	43	41	38	35	31	27	23	20	16	12	10	8	6	4	2	2	1	0	0
	③	93	91	88	85	80	75	70	64	58	52	46	42	39	35	31	27	25	22	20	18

※ ① : 캔틸레버 완공시 하향 처짐량
 ② : Key Seg. 연결시 상향 처짐량
 ③ : 완공후 크리프, 건조수축에 의한 하향 처짐량

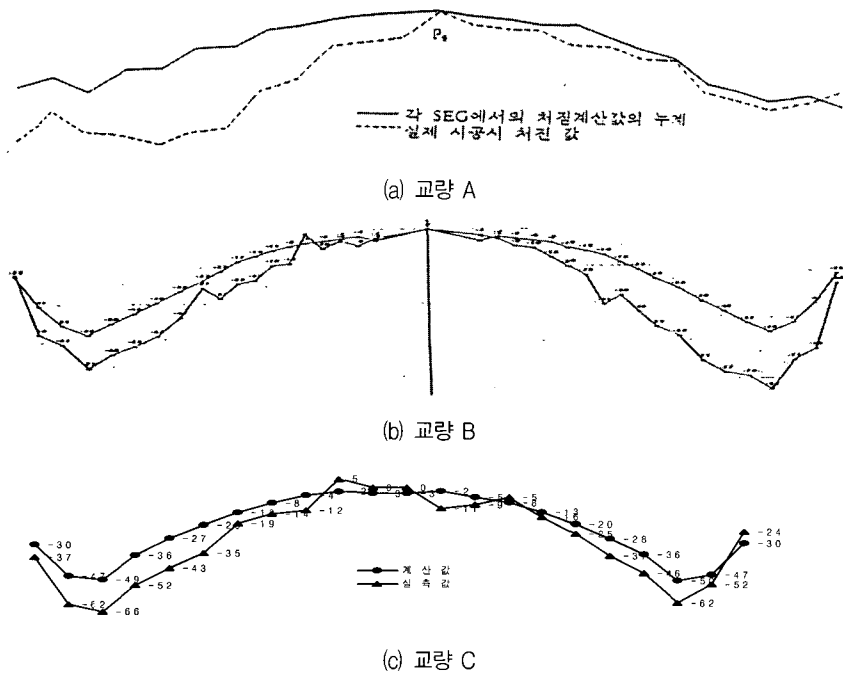


그림 3. 실교량 처짐계산값과 실측값 비교

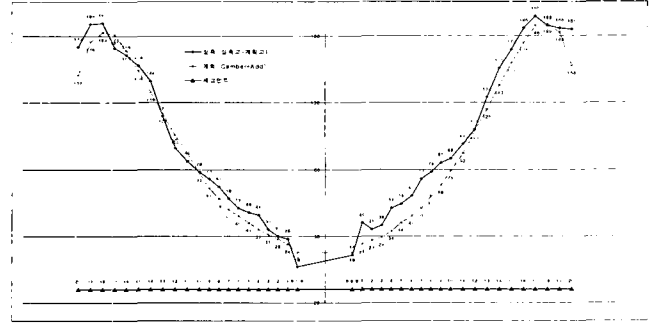


그림 4. 처짐계산값과 실측값 비교

4.3 추가캠버량 산정

실험치에 따라 보정된 크리프와 건조수축 계수를 사용한 캠버량 계산과는 별도로, 경험적으로 위에서 비교한 실교량의 예를 참고하여, 계산에 의한 처짐과 실제 구조물의 처짐 차이를 제거하고자 추가캠버량을 산정하였다. 이 때 아래와 같은 3가지 방법을 검토하였다.

1) 방법 1

교 각	PF1		PF2		PF3	
상향 처짐값	1	37	43	58	44	6
상향 처짐값의 40%	0.4	14.8	17.2	23.2	17.6	2.4

2) 방법 2

구조물의 Cantilever 길이(L)에 비례하여 L/1000를 각 Seg에 비례배분하여 적용한다.

$$\delta = 73.75m / 1000 = 73.8mm$$

3) 방법 3

구 분 \ 교 각	PF1		PF2		PF3	
캔틸레버 완공시까지의 하향 처짐값	58	59	16	17	58	58
key seg. 연결시의 상향 처짐값	1	37	43	58	44	6
소계(절대치)	59	96	59	75	102	64
소계의 50%	30	48	30	38	51	32

Key-Segment 접합시에 발생하는 설계상의 구조물 상향처짐값이 경험상으로 작게 발생하므로 상향처짐값의 40%를 직선비례로 추가 배분하여 적용한다.

캔틸레버 완공시까지의 하향 처짐량과 Key-Segment 연결시의 상향 처짐량의 절대치합의 50%를 추가 캠버량으로 산정하여 적용한다.

캔틸레버 완공시까지의 거동 및 Key-Segment 시공시의 거동량은 크리프와 건조수축 계수의 영향보다는 탄성거동이 지배적이며, 최근에 시공한 FCM 교량의 시공결과를 참고할 때 캔틸레버 끝단에 가까울수록 거동량이 크고 계산치와 실제 값과의 거동 차이가 커서 약 20~65% 정도 더 처지는 경향이 있다는 것에서 이미 언급하였다.

또한 Key Segment 접합시에 발생하는 설계상의 구조물 상향 처짐값보다 실제 FCM 교량에서 거동량이 부족하게 일어나는 것도 일반적이다.

서해대교에서는 이를 감안하여 캔틸레버 완공시까지의 하향처짐량과 Key Segment 연결시의 상향처짐량의 절대치의 합계의 50%를 추가캠버량으로 산정하여 계산한 "방법 3"을 적용하였다.

5. 결론

본 서해대교 FCM 교량에 있어서는 기존 FCM 교량에서 적용하지 않았던 현장배합 콘크리트에 대한 실험치를 기준으로 계수(기준 모델식 계수의 2배)를 적용하였기 때문에 장기처짐으로 발생하는 문제들을 많이 해소하였다고 판단한다.

또한, 본 교량에서는 위와 같은 보정을 기본으로 하여 캠버량을 산출하고, 교량의 거동에 대한 해석적인 방법과 기시공된 실교량의 사례분석을 통하여 캔틸레버 완공시까지의 하향처짐량과 Key-Segment 연결시의 처짐 변화량 합계의 50%를 추가캠버량으로 적용하여 캠버관리를 하였다.

그 결과 <그림 4>와 같은 비교적 만족할 만한 결과를 얻었다. □