

콘크리트 장대교량의 구조해석기법

콘크리트 장대교량의 구조해석

Structural Analysis of Long-Span Concrete Bridges



변 근 주*

〈편집자 주〉

학문적 발달과 더불어 컴퓨터의 발달에 의해 매우 복잡하고 거대한 규모의 구조물들도 그 거동을 비교적 사실과 유사하게 해석하는 것이 가능하게 되었다. 특히 교량 구조물의 경우에도 1950년대까지는 전산 처리능력의 부족으로 대규모의 구조해석을 수행하기 어려웠으나 60년 이후 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 기능향상과 더불어 새로운 구조해석 이론이 소개되고 발전되면서 다양한 구조형식에 대한 구조 계산을 가능케 하였고, 근래에 들어와서는 재료의 성능 개선과 함께 국토의 효율적 이용의 필요성이 증대되면서 장기간 및 장대 교량에 대한 구조 해석 기법 및 설계 기술, 시공 기술 분야에서 많은 발전을 이루어 왔다. 따라서 이번 특집에서는 장대 교량의 구조 해석 기법을 주제로 하여, 콘크리트 장대 교량의 거동과 설계에 대한 제반 사항을 알아보고 컴퓨터 기능의 발전과 더불어 눈분신 발전을 해 온 역학 모델의 수치 해석 기법에 대한 내용을 알아본다. 또한 여러가지 공법에 의해 시공되는 장대 기간 교량에 대한 구조 해석과 설계 사례를 예로 들었다.

본 특집에서는 콘크리트 장대 교량의 구조해석 기법에 대한 고찰과 적용 방법을 소개하면서 교량의 구조 해석에 대한 이해를 돕고자 하였으며 끝으로 원고를 준비하여 주신 분들께 깊은 감사를 드린다.

(특집주간 : 목포대학교 토목공학과 이성로 교수)

1. 서 론

인간이 살고 있는 공간은 역학의 법칙에 의해 지배되고, 인간이 이용하는 구조물을 지배하는 역학은 주로 재료역학이나 구조역학이다. 공간은 역학 이외의 법칙, 즉 콘크리트구조는 수화작용, 시간의 존성 특성변화, 환경문제와 관련된 법칙 등의 영향을 받기도 하므로 이런 제약조건을 고려하여 콘크리트교량의 형식, 해석 및 설계, 시공, 유지관리가 고려되어야 한다.

19세기말부터 철근콘크리트(이하 RC), 2차대전 후부터 프리스트레스트 콘크리트(이하 PSC)가 본격적으로 사용되었는데, 우리나라에서는 RC교량은 1920년경부터, PSC교량은 1962년부터 건설되기 시작했다. 더우기 철강자원이 부족한 우리나라에서는 국산재료의 사용, 내구성, 경제성, 유지관리, 소음-진동의 영향, 임의의 형상 구조의 건설용이 등의 장점때문에 많은 콘크리트 교량이 건설되었다. 물론 강재에 비하여 중량이 크고, 균열발생과 같은 단

* 성희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

점도 있으나, 이런 결점은 재료와 시공기술의 진보, 설계와 시공기술의 표준화에 의하여 극복될 수 있었기 때문에, 장대 콘크리트 교량의 설계 및 건설 기술이 급속도로 발전되었다. 특히 고강도 콘크리트, 고강도 PS강재, 프리스트레스트 콘크리트, 컴퓨터를 이용한 구조해석 및 설계기법의 출현은 콘크리트 교량의 장경간화를 촉진시켰다.

현재 콘크리트 장대교량은 대부분 PSC에 의하여 건설되고 있다. 콘크리트 장대교량에 적용되고 있는 구조형식에는 RC 및 PSC아치교, 강-콘크리트 합성교, PSC거더교, 콘크리트浮橋, PSC트러스교, PSC사장교, PSC현수교 등이 있으나, 실제로는 PSC거더교, PSC사장교 형식이 장대 콘크리트교량에 가장 많이 채용되고 있다.

현재까지 건설된 장대교량의 대표적인 것을 소개하면, RC arch교량으로는 유고의 St. Marko교(지간 390m, 1979년), 강-콘크리트 합성사장교로는 프랑스의 Normandie(547.5 + 856.0 + 737.5m, 중앙경간의 일부는 steel box girder, 나머지는 PSC box girder, 1994)와 서해대교(중앙경간장 470m, 공사중), PSC거더교로는 Paraguay River교(중앙지간 270m, 1979)와 안양동교(지간 160m, 공사중), 콘크리트浮橋로는 미국 Washington주의 Hood Canal Bridge(길이 2km), RC트러스교로는 Ivory교(지간 134.63m, 1930), PSC트러스교로는 독일의 Mangfoll교(지간 108m, 1960), PSC사장교로는 스페인의 Luna교(지간 440m, 1983)과 울림꼭대교(지간 150m, 1990), PSC현수교로는 일본의 速日峰橋(지간

46.8m, 1977)등이 있다.

앞으로 Smart Concrete, Intelligent Bridge의 기술개발에 따라 새로운 개념이나 형식의 콘크리트 장대교량이 건설될 전망이다.

본고에서는 장대교량에 국내외적으로 널리 채용되고 있는 PSC장대교량의 해석기법을 중심으로 소개하고자 한다.

2. 콘크리트 장대교량의 건설공법

2.1 가설공법의 분류

PSC장대교량은 시공단계별로 구조계가 변화하고, 시공중과 완성후의 구조계의 거동이 상이하게 되는 경우가 많으므로 설계착수전에 건설공법을 선정할 필요가 있다. 현재까지 개발된 PSC장대교량의 건설 공법을 분류하면 표 1과 같다.

콘크리트의 현장 타설 공법과 프리캐스트 공법은 현장조건, 교량의 규모, 공사기간, 가용 장비의 종류와 접근 조건, 환경제약등을 고려하여 선정되는 것이 일반적이다. 특히 프리캐스트 세그멘탈공법에서는 세그먼트의 운반과 가설 용량에 따라 그 크기와 중량이 결정되지만, 한개의 Segment 중량이 250톤을 초과하지 않는 것이 경제적이다. 그러나 동바리를 사용하지 않는 현장 타설공법에서는 form traveler의 중량이 중요하지만 프리캐스트의 경우와 같은 제한을 받지 않는다.

여러 공법중에서 현재 많이 사용되고 있는 대표적인 공법만을 도시하면 그림 1과 같다.

표 1 PSC장대교량의 건설공법

동바리의 유무	콘크리트시공	공 법
동바리사용	현장타설	支柱式 공법
		거더 支柱式 공법
		거더 支柱式 공법
동바리를 사용하지 않는 공법	현장타설	Balanced Cantilever 공법
		Span-by-Span 공법 (이동식 비계공법)
		Incremental Launching 및 Push-out 공법(압출공법)
		회전공법
	프리캐스트	세그멘탈 공법
프리캐스트	프리캐스트 거더 공법	Balanced Cantilever 공법
		Span-by-Span 공법
		Progressive Placement 공법

2.2 가설 공법의 특징

여러 가설공법중 공법의 선정에 도움을 줄 수 있는 공법별 특징을 정리하면 표 2와 같다.

2.3 공법의 선정

공법을 선정할 때에는 적용경간장, 특징, 경간 변화의 융통성, 선형이나 폭에 대한 적용성, 다경간교량에서의 적용성과 경제성, 교하공간, 기계화 시공, 시공속도, 자재 및 부재운반, 시공점유면적,

표 2 공법별 특징

가설 공법	시공방법	특징			
		하부조건	급속성	경제성	안전성
동바리공법	동바리를 설치하고 그위에 콘크리트를 타설하여 상부구조를 제작하고 프리캐스팅 작업을 실시한다. 동바리는 교량 가설 후 설치한다.	동바리 형식에 따라 약간씩 다르나 하부제작에 지장을 가져온다.	동바리 거푸집의 설치 작업으로 시공속도가 가장 느리다.	동바리의 높이에 따라 경제성이 좌우되며 교각의 높이가 낮을 경우엔 경제성이 높다.	동바리 거푸집의 해체, 조립에 대해서 문제가 있어 주의를 요한다.
캔틸레버 공법	교각시공후 교각상에 이동식 작업차를 설치한 후 교각을 중심으로 좌우로 상부구조를 가설해 나간다.	가설지점 윗쪽은 거더제작 작업으로 다소간 지장을 가져온다.	작업을 대부분 이동식 작업차 안에서 실시하므로 시공속도가 빠르며 작업차의 수를 늘려 더욱 빨리 할 수 있다.	교각의 높이가 높을 경우에 경제성이 높다.	가설지점 위쪽은 거더 제작작업으로 도로, 철도 등을 횡단할 경우에는 위치에 따라 약간의 교통규제를 필요로 한다.
프리캐스트 세그먼트 공법	세그먼트 제작장에서 이미 제작한 후 가설 위치로 운반하여 크레인 등 가설장치를 이용하여 상부구조를 가설한다.	세그먼트를 설치하는 가설장비에 따라 다르다.	세그먼트를 제작하여 미리 저장해 놓을 수 있으므로 시공속도가 매우 빠르다.	운반비, 세그먼트 결합비등에 의해 공사비가 증가할 수 있으나 현장경비, 급속성으로 공사비를 줄일 수도 있다.	세그먼트 운반 및 취급 등에 있어 주의를 요한다.
프리캐스트 거더공법	상부구조를 제작장에서 경간길이를 제작하여 가설지점으로 운반한 후 가설장치를 이용하여 가설한다.	가설장치에 따라 약간씩 다르나 하부조건에 따라 지장을 가져온다.	교량을 경간길이 당 가설하므로 시공속도가 매우 빠르다.	프리캐스트 세그먼트공법의 특징과 유사하다.	거더의 운반에 있어 특히 주의를 요한다.
이동식기계 공법	상부구조 제작에 있어 소요되는 대부분의 장비가 교각상에서 그대로 다음 경간으로 이동하여 선교량을 가설한다.	가설장비가 교각상으로 이동하므로 하부조건에 지장을 가져오지 않는다.	한 경산시공에 약 10여일 소요되므로 시공속도가 매우 빠르다.	다경간 교량의 시공에 유리하다.	모든 작업이 가설장비안에서 실시되므로 다른 공법에 비해 비교적 안전하다.
압출공법	교대후방에 위치한 작업장에서 일정한 길이의 세그먼트를 제작하여 압출장비를 이용하여 압출하여 교량을 가설한다.	가설중 하부조건에 전혀 지장을 가져오지 않는다.	한 세그먼트의 작업사이클이 7~14일 정도이므로 시공속도가 비교적 빠르다.	작업장설치에 소요되는 공사비등이 있으나 교각의 높이가 높을 경우에는 매우 경제성이 높다.	가설중 하부조건에 전혀 지장을 가져오지 않았으므로 다른 공법에 비해 안전성이 가장 우수하다.

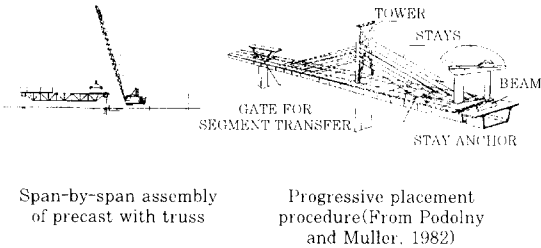
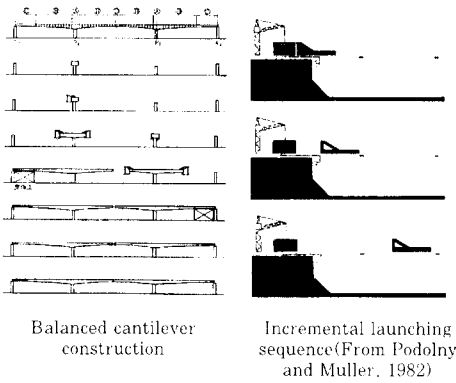


그림 1 PCS장대교량의 건설공법

교각형상, 거더의 연속성, 입지환경(도시, 하천, 산악, 해안등), 현장환경등을 검토하여야 한다. 참고로 각 공법의 적용경간장을 도시하면 그림 2과 같다.

3. PSC 장대교량의 구조해석 개념

3.1 상부구조의 형상

PSC 장대교량의 상부구조는 대부분 box girder로 구성된다. 이 box girder 상부구조의 종방향 profile을 도시하면 그림 3와 같고, 미국에서 사용되는 횡단면은 그림 4와 같다.

3.2 PS 강재의 배치

PSC교량은 시공단계별 구조계, 시공중과 완성후의 구조계가 상이하고, 시간의존성영향을 고려해야 하기 때문에 구조해석단계가 많고 복잡하다. PS강재는 종방향으로 배치되지만, 복부간격에 따라 횡방향으로도 PS강재가 배치된다. 여기서는 종방향배치된 캔틸레버공법에 관하여만 기술하고자 한다.

종방향 PS강재는 다음과 같이 두 종류가 있다.

(i) 캔틸레버 시공중 발생하는 사하중 모멘트에 저항하기 위하여 거더의 플랜지에 배치하는 PS강재(그림 5(a)).

(ii) 양쪽 교각에서 대칭으로 시공한 캔틸레버를 지간 중앙부에서 연결하여 부정정구조로 거동하도록 거더의 플랜지 및 복부에 배치하는 연속화(Continuity) PS강재(그림 5(b)).

그림5와 같은 구조에서는 cantilever 시공이 진

	20	40	60	80	100	120	140	160	140	160	180	200	200이상
동바리공법													
캔틸레버공법													
프리캐스트 세그먼트공법													
프리캐스트공법													
이동식비계공법													
임출공법													

그림 2 공법의 적용경간장

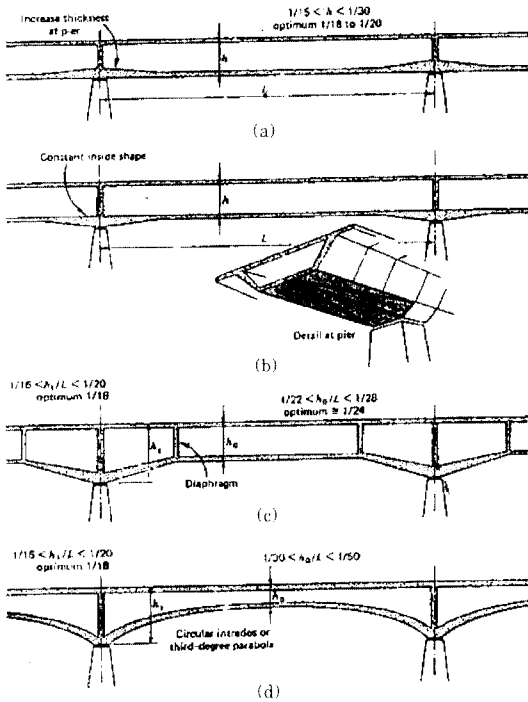


그림 3
Longitudinal profile for segmental bridges
(a) constant depth
(b) semiconstant depth
(c) straight haunches
(d) variable depth

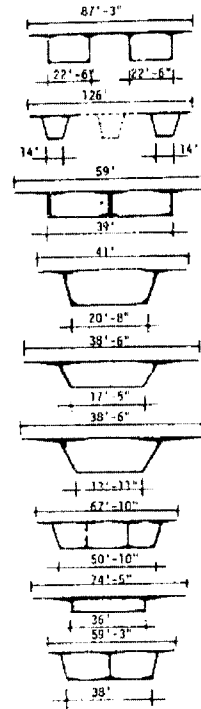


그림 4
Box Girder 단면

행됨에 따라 구조계가 계속 변하게 되어 그림 6과 같은 시공단계별 단면력변화를 고려하지 않으면 안 된다.

3.3 해석방법

PSC Box Girder교의 해석은 횡방향해석과 종방향해석으로 나누어 수행된다.

① 횡방향해석

Box Girder의 횡방향 휨거동은 종방향길이 1m의 뼈대구조(rigid frame)로 모형화하여 해석된다. 이 모형에 대한 활하중설계 휨모멘트를 구하려면 탄성해석개념의 유한요소해석으로부터 유효하중분포폭을 결정하거나 Influence Surface (Homberg and Rogers, 1963 ; Homberg, 1968 ; Puncher, 1969) 및 기타 탄성해석방법을 사용하면 된다. Beam-type의 segmental bridge deck에 대하여는 도로교 표준시방서 설계편의 콘크리트 교편 7.4.2(프리스트레스트 콘크리트 바닥판)에 따

라 설계 휨모멘트를 구하면 된다.

또한 편심하중의 재하로 인한 복부전단력의 증가, 프리스트레싱으로 인한 탄성 및 크리프 변형, 건조수축, 2차모멘트(secondary moment), 온도

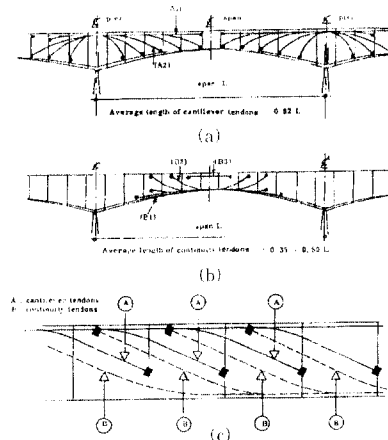


그림 5 Typical layout of longitudinal prestress
(a) Cantilever tendons (b) Continuity tendons (c) Standardized layout of tendons for constant-depth segments.

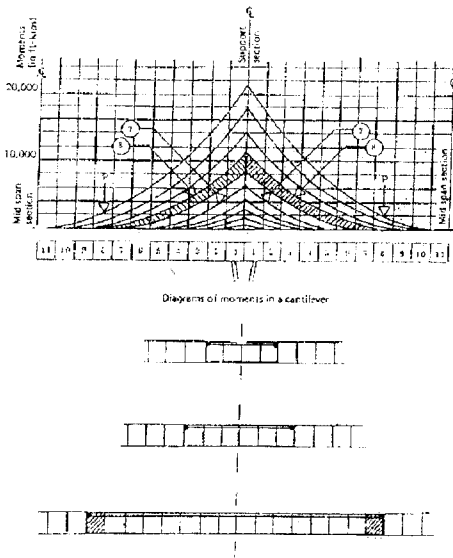


그림 6 Typical cantilever moments and prestress
When placing unit 8, the increase of bending moment is represented by the hatched area and the resultant curve is transferred from position 7 to position 8. Additional sets of cantilever prestressing tendons are placed each time a pair of segments is erected. This procedure allows the magnitude of prestress to follow very closely the various steps of construction.

의 영향등을 고려해야 한다. 그리고 시간효과, 시공 schedule, 가설공법 및 단계등을 고려하여 설계변수를 정의할 필요가 있다.

시공중 및 사용중의 모든 구조계에 대한 PSC교량구조의 시간의존해석을 위한 software가 국내에 많이 소개되어 있으므로 쉽게 구조를 해석할 수 있다. 현재 국내에 널리 소개된 DIANA, RM, SP-FRAME 이외에도 Ketchum(1986), Shushkewich(1986), Danon 및 Gamble(1977)에 의해 개발된 software도 PSC교량의 구조해석에 사용될 수 있다.

크리프와 건조수축은 CEB-FIP(1978) model 개념을 도입한 한국도로교 표준시방서의 규정에 따라 구조해석에 반영하면 된다. 이 경우 ACI model과는 다소 차이가 있으므로 유의해야 한다.

② 종방향해석

한국도로교 표준시방서는 교량가설공법, 시공 schedule, 크리프, 건조수축, prestress손실등의 시간효과를 고려하여 구조해석하도록 요구하고 있다. 또한, prestressing으로 인한 2차모멘트도 탄성구조해석 및 단면해석에 고려하여야 하고, 극한 상태에서의 휨모멘트 및 전단력도 고려하여야 한다.

시공중 및 완성단계의 해석을 위하여는 단계별 하중조합(도로교 표준시방서 공통편 3.2.2 및 3.3.2), 응력, 안정성, 사용성을 검토해야 한다. 특히, 완성단계에서는 완성된 구조에 대하여 크리프와 건조수축때문에 생기는 모멘트 재분배, Cantilever공법에서 지간중간부에서의 폐합으로 인하여 정정구조계가 부정정구조계로 변환되는 문제, 온도영향도 구조해석에 반영해야 한다.

크리프와 건조수축, 응력손실은 횡방향해석과 같은 개념으로 해석하고, 횡방향해석에서 소개된 software를 이용하면 모든 PSC 교량의 시공단계, 시간의존성을 포함한 2D 및 3D의 정적 및 동적 구조해석이 효율적으로 수행될 수 있다.

4. 설계방법

4.1 설계개념

PSC장대교량은 도로교표준시방서와 콘크리트표준시방서에 제시되어 있는 허용응력설계법(Working Stress Design, Service Load Design)에 의해 설계된 후 부재의 극한강도를 검토하도록 되어 있다.

현재, 외국에서는 PSC교량의 설계에 한계상태설계법(Limit State Design), 하중-저항계수 설계법(Load and Resistance Factor Design)을 도입하고 있는 국가들도 많이 있다. 국내에서도 향후에는 하중-저항계수설계개념으로 변환하기 위한 일 단계로 1996년도 도로교표준시방서의 부록에 하중-저항계수설계편을 수록하여, 그 개념을 소개하고 있는 상황이다.

허용응력설계법(이하 WSD)에서는 사용하중하에서 계산된 휨응력이 허용응력을 초과할 수 없도록

록 규정하고 있는데, 이는 응력이 허용응력을 초과하지 않으면 자동적으로 극한 상태를 만족된다는 것을 의미한다. 그러나 재료강도나 하중의 변동성에 따라서는 이 의미가 타당하지 않을 수도 있기 때문에, 처짐한계상태와 균열쪽 한계상태같은 사용성의 검토가 필요하게된다.

따라서 많은 연구자들은 WSD의 중요한 결점으로 재료강도와 하중변동의 정량화 불가능, 안전수준의 정확성 결여, 특성이 상이한 하중들의 고려불가능등을 지적하고 있다. 이런 의미에서 앞으로는 확률에 근거를 두고 있는 하중-저항계수 설계법을 도입하여 교량을 설계하는 것이 합리적일 것이다.

4.2 설계 고려사항

교량형식별 설계요구사항은 이 특집의 다른 분야에서 기술된 것이므로 여기서는 고려해야 할 항목만 제시하고자 한다.

① 일반요구사항

(i) 적용범위 : 현재의 도로교 표준시방서는 기간 200m이하의 교량에만 적용할 수 있도록 규정되어 있으므로 기간이 200m를 초과하는 장대교량의 설계시에는 교량의 종류, 구조형식, 가설지점의 상황에 따라 신뢰할 수 있는 방법으로 보정을 한 후 사용할 필요가 있다.

(ii) 크리프와 건조수축 : 장기지속하중에 의한 완성 단계의 교량 거동을 해석할 때는 유효탄성계수($E_{eff} = \frac{E_c}{\psi}$)를 사용할 수도 있다.

(iii) 가설하중 : 가설도중의 영향을 하중조합 및 응력에 반영하여야 한다.

(iv) 사용성 설계 : 휨에 의해 설계된 후 사용하중 조건에 대한 사용성이 검토되어야 한다

② 휨, 전단 및 비틀림

(i) 보거동 구역에서는 Bernoulli가정에 근거한 선형 변형률 분포를 사용하고, 불연속 구역(discontinuity region)에서는 선형분포를 가정할 수 없으므로 이런 경우에는 Strut-and-Tie model을 사용할 수도 있다. Strut-and-Tie model은 거

동을 올바르게 표현할 수 있는 방법, 즉 유한요소해석 결과나 실험결과와 병행하여 사용되어야 한다.

(ii) 모든 설계단면력은 단면력의 포락선도(envelop curve)로부터 구해야 한다.

(iii) 성질이 다른 재료가 교량구조에 사용되었을 경우에는 실제에 shear transfer design, Strut-and-Tie model을 사용할 수도 있다.

(iv) 전단의 계산시 이동윤하중의 전단효과, 크기와 방향이 변하는 prestressing force등을 고려하여야 한다.

③ 피로

(i) 보통철근에 대한 피로한계응력은 콘크리트시방서의 설계편 6.5에 제시되어 있으므로 활하중에 의하여 균열이 생길수 있는 콘크리트 바닥판 철근의 응력이 한계치 이내일 때는 피로를 검토할 필요가 없다.

(ii) PSC교량의 설계에서는 콘크리트의 균열을 허용하지 않고, 응력범위가 응력수준에 비하여 낮으므로 피로에 대하여는 검토하지 않아도 된다. 또한 PS강재와 쉬즈관 사이의 마찰에 의하여 생길수 있는 fretting fatigue도 비균열 단면에서는 검토하지 않아도 된다.

④ 일반정착구역(General Anchorage Zones)과 국부적인 정착구역(Local Anchorage Zones)

(i) 일반정착구역은 정착장치가 있는 거더단부에서 거더 전높이만큼 종방향으로 떨어진 위치사이의 구역을 말한다. 부재의 단부가 아닌 곳에 정착장치가 있을 경우에는 정착장치가 있는 위치로부터 수평 방향으로 거더높이만큼 떨어져 있는 위치사이의 구역을 취한다.

(ii) 국부적인 정착구역은 정착장치를 둘러싸고 있는 구역을 취한다.

(iii) 일반구역내에는 정착장치의 bursting force에 견딜 수 있는 철근을 배근하되, 철근량은 공인된 경험식이나 Strut and Tie model을 이용하여 구할 수 있고, 이 철근량은 국부정착구역의 철근과는 별도로 설계되어야 하고, 이 경우 bursting force의 중심은 정착구역이 있는 단면높이의 약 3/8위치에 있다고 보면 된다.

⑤ 추가 Tendon Holes의 설치 : 향후 단면보강이나 retensioning을 위해 둔다.

⑥ 내풍성검토 : 사장교나 지간이 긴 거더교에 대하여는 내풍안전성을 검토해야 하고, 필요한 경우에는 풍동실험도 수행할 필요가 있다.

⑦ 기타 특별사항

(i) 받침부 시스템의 일부 또는 전체의 변경으로 생길 수 있는 가설응력, 크리프 및 건조수축으로 인한 장기 응력재분배를 고려하여야 한다.

(ii) 시공 중에 발생할 수 있는 콘크리트의 크리프와 건조수축 특성 변동, 시공 schedule의 변경등을 설계시 엄밀하게 추정할 수 없으므로, 배합설계시 변동계수를 30%정도로 취하는 것이 좋다.

(iii) 압출공법을 적용할 경우에는 시공중 거더에는 정 및 부모멘트가 교대로 발생하고 가설교각과 압출 nose의 영향을 받으므로, 다음과 같이 가설하중으로 고려하는 것이 유리하다.

종방향으로 배치된 두 인접 받침부 사이의 높이차 : 5mm

횡방향으로 배치된 두 인접 받침부 사이의 높이차 : 2.5mm

종횡방향의 가설 장비와 시공면사이의 높이차 : 2.5mm

복부 외측의 횡방향 높이차 : 2.5mm

5. 결 론

프리스트레스드 콘크리트 교량의 사용이 점차 증

가하는 것이 세계적인 추세이다. 그러나 아직도 국내에는 콘크리트 장대 교량의 구조 해석, 구조세목의 설계, 가설 공법 분야의 국산화가 낮기 때문에 상당부분을 외국 기업에 의존하고 있는 실정이다. 콘크리트 기술의 국제화를 위하여 이런 문제들이 국내 연구자나 기술자들에 의하여 해결될 때 콘크리트 구조의 설계기술이 향상되고, 콘크리트의 신뢰도가 구축될 수 있을 것이다. 이 특집을 계기로 비록 개요만 소개되었지만 많은 교량 기술자들에게 콘크리트 장대교량의 설계기술향상 및 개발에 관심을 갖게 하는 기틀이 마련되기를 기대한다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부, 도로교 표준시방서, 건설교통부, 1996
2. 건설교통부, 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 1996
3. AASHTO, Standard Specifications for Highway Bridges, AASHTO, 1992
4. Xanthakos, P.P., Theory and Design of Bridges, John Wiley & Sons, 1994
5. Podolny, W. & Muller, J.M., Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges, John Wiley & Sons, 1982
6. 大塚一雄, "PC斜張橋の設計技術の現状", 콘크리트工學, Vol. 33, No. 2, JCI, 1995
7. 池田尙治, "土木における新構造形式", 콘크리트工學, Vol. 30, No. 3, JCI, 1992