

### 분절 공법에 의해 시공되는 교량의 구조해석

#### Structural Analysis of Segmentally Constructed Superstructures



이 만 섭 \*

#### 1. 서 언

분절공법(segmental method)이라 함은 전체 구조를 작은 세그먼트(segment) 또는 지간으로 분할하여 점진적으로 구조계를 변화 시켜감으로써 전체 구조계에 도달시키는 방식을 의미하며, 현장타설 세그먼트 방식(cast-in-situ segmental method)과 프리캐스트 세그먼트 방식(precast segment method)로 나눌 수 있다. 이를 조금 더 세분하면 표 1에 보이는 바와 같으며, 이들 방식 중에서 FCM(free cantilever method)과 경간진행 방식을 중심으로 해석 과정에서의 공통 고려사항 및 차이점 등을 서술하기로 한다.

#### 2. 분절 공법에 의한 교량 상부구조 시공방식 종류

분절공법에 의한 상부구조 시공방식은 크게 현장

타설방식과 프리캐스트 방식으로 대별될 수 있으며, 이 두가지의 대표적인 공법을 보면 표 1과 같다.

#### 3. 해석 및 설계 흐름

교량의 상부구조 해석은 크게 종방향 해석, 횡방향 해석 및 상부 부분 설계로 나뉘어질 수 있다. 이의 흐름 및 내용을 보면 그림 1과 같다.

분절 공법에 의한 교량 상부 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이 시공 단계별 해석을 포함하게 되며, 각 단계에 해당하는 구조계의 변화, prestress의 순차적 적용, creep과 shrinkage의 단계별 영향 및 시공하중의 변화 등을 고려해야 한다. 이와 같은 단계별 해석 및 시간의존성 해석 과정이 포함되는 것을 제외하고는 일반 P·S 교량의 상부구조 해석과 크게 다른 점은 없다.

#### 4. 종방향 해석

\* 정회원, 브이에스엘 코리아(주) 이사

표 1 분절공법에 의한 교량 상부구조 시공방식

	현장 타설 방식 (Cast-in situ Segmental Method)	프리캐스트 방식 (Precast Segmental Method)
FCM (Free Cantilever Method)	- Form traveller를 이용하여 3~5m 정도의 segment를 점진 시공	- 기계작업 3~4m의 세그먼트를 별도의 device (lifting device 또는 truss)를 이용하여 인양 작업
경간 진행 방식	- MSS (Movable Scaffolding system) 또는 섀레식 동바리를 이용하여 한 경간씩 점진 시공	- Truss에 의해 한 경간에 해당 하는 세그먼트를 동시에 지지하여 종합 완성하여 점진 시공 : Span-by-span method
기타 방식	- ILM (Incremental Launching Method) - 기타	- Progressive method - 기타

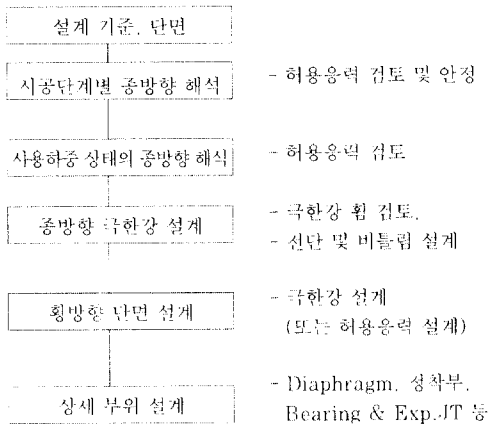


그림 1 상부구조 설계 흐름

분절 공법에 의한 교량 상부 구조의 종방향 해석은 사용 프로그램에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나, 일반적으로 그림 2와 같은 과정을 거치게 된다.

이와 같은 과정에서 보여지는 바와 같이 분절공법에 의한 구조물 해석의 특징은 다음 두가지로 대표된다.

- 시공 단계별 해석(구조계 변화 및 각 단계 하중 조건 변화)
- 시간의 준성 해석(크리프, 건조수축 효과)

#### 4.1 구조 모델링

구조의 모델링 과정에서는 다음과 같은 사항들이 고려되며 언급되지 않은 내용은 일반 구조해석의 모델링과 동일하다.

- 세그먼트 분할 : 시공성을 고려한 세그먼트의

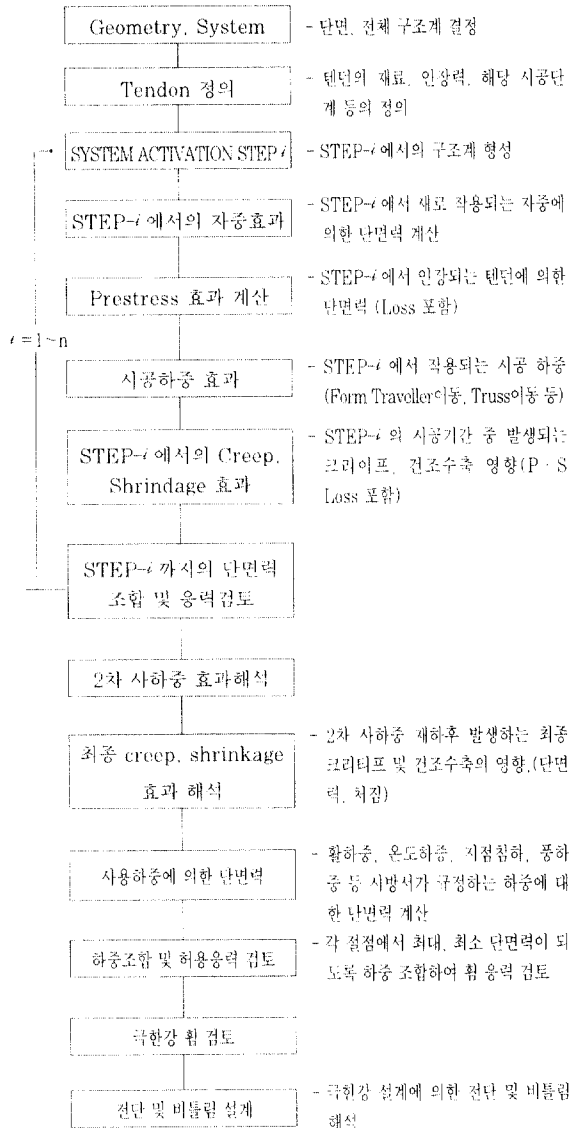


그림 2 종방향 해석의 흐름

- 크기, 시공이음부 등에 따른 절점 형성
- 경계 조건의 변화 : 구조계 변화에 따른 지점 경계조건의 변화
- 기타 프로그램 특성에 따른 절점 및 요소 형성

#### 4.2 시공 단계별 해석

##### 4.2.1 System activation

각 시공단계에서 해당되는 구조계의 부재 및 지

점조건 등을 activation 시켜 강도 매트릭스를 형성하게 된다. 일반적으로는 각 시공단계에서 완성되는 부재로 해당 구조계가 형성되나 precast segment에 의한 FCM에서 casting curve (segment 제작시의 camber)를 구하고자 할 경우의 system activation은 일반적인 경우와는 조금 다르다. 현장타설 FCM 방식과, precast segment 방식에 의한 FCM방식에서 시공단계별 system activation의 차이를 보면 그림 3과 같다.

그림에서 보여지는 바와 같이 precast segment 방식에 의한 FCM에 있어서 casting curve를 얻기 위하여는, match-casting에 의해 생산되는 일련의 세그먼트들은 모두 activation 되어야 한다. 그러

단 계	현장타설 FCM	프리캐스트 세그먼트 FCM
완성된 Cantilever 구조계	3 2 1 1 2 3	3 2 1 1 2 3
STEP 1	1 1	3 2 1 1 2 3
STEP 2	2 1 1 2	3 2 1 1 2 3
STEP 3	3 2 1 1 2 3	3 2 1 1 2 3

그림 3 현장 타설 FCM과 프리캐스트 세그먼트 FCM에서의 시공단계별 system activation

나 이 사항이 단면력에 영향을 주지는 않으므로, 단면력 해석만 대상이 될 경우는 어떠한 구조계를 택하여도 문제는 없으며, 또한 해석 프로그램에 따라서는 이의 구분이 없을 수도 있다.

#### 4.2.2 단계별 작용하중의 영향

단계별 구조계에 작용하는 하중에 대한 해석은 일반적인 변위법을 이용한 해석 프로그램을 이용하게 되며 이의 내용은 널리 알려져 있는 바와 같다.

Precast-segmental 방식이나 중량 가시설을 이용하는 현장타설 방식에서는 시공하중이 구조물 단면력에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 이의 적절한 반영에 주의를 요한다.

또한 지점조건의 변화시 전단계에서의 지점(또는

스프링)에 작용되었던 반력이 새로운 구조계의 지점 조건에 반대하중으로 작용되게 된다.

#### 4.2.3 크리이프와 건조수축 해석

(1) 크리이프 계수와 건조수축 변형률의 정의

크리이프 계수와 건조수축 변형률의 정의에는 다음과 같은 model을 사용하게 된다.

- CEB-FIP model 1978, 1990

- ACI model

- BP model(BP-KX model)

우리나라의 도로교 시방서에서 제시하는 값은 CEB-FIP 1978 model을 따르고 있다.

(2) 시간 의존성 해석

세그먼트 방식에 의한 구조물은 각 시공단계에서 각 요소의 재령이 서로 다르게 된다. 이에 따른 시간 의존성 해석 방법에는 Dischinger 또는 Trost 방식 등이 있으며, 이들 개념을 기본으로 유한 차분법(Finite-Difference Method)에 의한 컴퓨터 해석을 통하여 복잡한 문제들을 해결하는 것이 보통이다.

이에 의해 해석 과정은 다음과 같다.

- 모든 해당요소들에 대한 크리이프, 건조수축 변형률 정의

- 정의된 요소들에 대한 외력 재배치, 각 단면에서의 응력 상태계산

- 긴장 재응력 변화 및 secondary 효과 계산

- 모든 요소의 절점에서 변형 및 단면력

위의 과정에서 구조계의 기존 강도 매트릭스를 변화시키는 경우에는 크리이프와 건조수축 영향 해석 이후의 새로운 하중에 대한 해석이 이루어지기 위해서 새로이 구조계 매트릭스를 구성시켜야 한다.

(3) 단면력 재분배의 간편 계산

시공단계별 해석과 시간의존성 해석에 의한 단면력 재분배 효과는 간단한 구조물의 경우 별도의 정밀해석을 통하지 않고 다음과 같은 간편식에 의해 구해질 수도 있다.

$$M_{\infty} = \sum Ms_i + (M_E - \sum Ms_i) \frac{\Phi_{\infty}}{1 + \rho \Phi_{\infty}}$$

$\sum Ms_i$  : 시공단계별 해석에 의한 단면력

$\sum M_E$  : 모든 구조계가 한번에 시공된 경우의 단면력

$\rho$  : relaxation계수(약 0.7~0.9)

To가 10일을 초과하고 cycle이 21일보다 큰 경우 위에 의한 계산은 큰 편차를 보이지 않으며, 설계 및 해석의 목적에 크게 벗어나지 않는다.

그러나 이와 같은 간편식은 초기 계획 단계에서의 검토 목적 등으로 사용하는 것이 바람직하다.

### 4.3 종방향 극한강 해석

종방향 극한강 해석은 휨강도 해석, 전단 및 비틀 해석이 추가되며, 이들은 도로교 표준시방서에 준하여 각각 별개로 수행되는 것이 일반적이며 이러한 시방서 해석 ACI 및 AASHTO와 거의 비슷한 방법을 택하고 있다.

이 방법외에 strut-tie-model을 이용한 방법이 적용되고 있는데 이를 간단히 소개하면 다음과 같다.

그림 4에서 단위 Truss의 길이는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$e_{zs} = z \cdot \sin \alpha (\cot \theta + \cot \alpha)$$

$$e_{ds} = z \cdot \sin \theta (\cot \theta + \cot \alpha)$$

압축 strut의 경사각  $\theta$ 는 주응력의 계산으로 이루어질 수 있으며 보통  $30^\circ \sim 60^\circ$  사이에 분포하나 P.S 콘크리트, 교량의 설계 목적으로  $45^\circ$ 를 택하여도 큰 문제는 없다. 인장 tie의 경사각  $\alpha$ 는 실무적으로는 보통  $90^\circ$ 를 택하는 것이 일반적이다.

압축 chord의 압축력 D와 인장 chord의 인장력은 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{M}{Z} - \frac{V}{2} (\cot \theta - \cot \alpha)$$

$$Z = \frac{M}{Z} + \frac{V}{2} (\cot \theta - \cot \alpha)$$

이때 stirrup이 받아야 할 인장력은

$$Z'_{stirrups} = \frac{V}{Z} \cdot \frac{1}{\sin^2 \alpha (\cot \theta + \cot \alpha)}$$

$$A_{s, stirrups} = \frac{Z'_{stirrups}}{\sigma_{s, stirrups}} \cdot e_{stirrups} \cdot \sin \alpha$$

로 표현되어, 이에 필요한 철근량은 다음과 같이 된다.

위에서 비틀림( $M_T$ )작용할 경우에 V 대신  $V^* = V + T$ 가 되며 여기에서  $T = M_T \cdot Z / (2A_k)$ 가 된다.

FCM방식에서와 같이 변단면이 사용되어 바닥 압축 chord가 될 경우 전단 철근의 인장력은 줄어드

나 인장 chord의 힘은 증가하게 된다. 그림 5과 같은

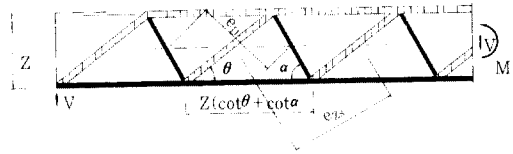


그림 4 형고가 일정할 경우 휨-전단의 strut-tie-model

변단면에서 다음과 같이 압축 및 인장력이 표현된다.

$$Z = \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cot \theta \cdot \tan \beta} \left[ \frac{M}{Z} (1 - \cot \theta \cdot \tan \beta) + \frac{1}{2} V \cdot \cot \theta \right]$$

$$D \cdot \cos \beta = \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cot \theta \cdot \tan \beta} \left[ -\frac{M}{Z} + \frac{1}{2} V \cdot \cot \theta \right]$$

$$V_{eff} = D' \cdot \sin \theta = \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \cot \theta \cdot \tan \beta} \left[ V - \frac{M}{Z} \tan \beta \right]$$

$$Z'_{stirrups} = D' \cdot \frac{S}{Z} \sin \theta \cdot \tan \theta$$

그림 4, 5와 같은 model에서 휨, 전단, 비틀림 등에 대한 극한강 해석이 모두 이루어지게 되며, 이 모델에서 계산된 web의 주압축 응력은 모멘트 철근을 산정하는 데 직접 이용될 수 있다.

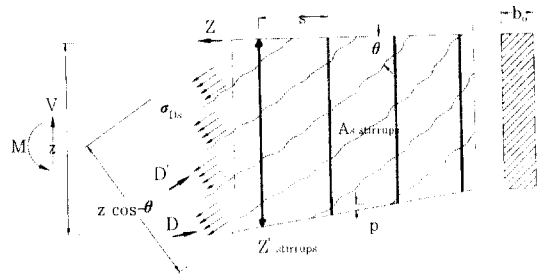


그림 5 변단면에서의 자유 물체동 model

## 5. 횡방향 설계 및 해석

횡방향 설계는 일반적으로 하중의 결정, 구조물 해석에 의한 단면력 및 철근량 산정 등의 순서로 이루어지고 있다.

### 5.1 하중의 결정

설계에 적용되는 하중은 도로교 시방에 주어진 일반

