斜張橋의 解析 및 設計

方 明 錫*

1. 序言

桁橋와 懸垂橋의 장점을 결합시켜 개발된 橋梁形式인 斜張橋는 시공성과 경제성이 뛰어난 것으로 알려져, 국내에서도 1985년에 완공된 진도대교와 돌산대교를 비롯하여 1989년에 완공된 올림픽대교, 현재공사중인 팔당대교 및 설계중에 있는 서해대교 등 5개의 교량이 있다. 외국의 경우를 보면 독일이 2차대전후 라인강변에 다수의 斜張橋를 架設하면서 기술이 개발·확립되었고 최근에는 일본·중국 등에 다수의 長大橋梁이 설치될 것으로 예상되는 바 計劃·設計 및 施工技術의 자립화가 시급하다고 하겠다. 本 橋에서는 斜張橋의 設計時에 필요한 주의사항 및 특성을 소개하고자 한다.

2. 構成要素의 特性 및 設計要領

斜張橋는 강성부재인 補強桁(stiffening girder), 主塔(pylon)과 유연성 부재인 케이블이 결합된 구조물이므로 補強桁·主塔과 케이블간의 剛性比 및 하중분담률이 중요하며 또한 지진이나 태풍과 같은 極限狀態에서 전체구조물 및 각 부재상호간의 安定性에도 주의해야 한다. 斜張橋의 구성요소인 下部構造, 主塔, 케이블, 補強桁의 특성 및 설계시 주의점은 다음과 같다.

*韓國建設技術硏究院 構造硏究室長, 工博

2.1 下部構造

- 海底나 河床의 기초암반조사에 따라 工法을 결정한다. 일반적으로 대형 케이슨 공법이 사용되며 기초암반이 경사진 경우에는 암반의 굴착비용이 과다하므로 大口徑 말뚝기초상에 케이슨기초를 설치한다.
- 말뚝과 케이슨의 結合基礎인 경우에는 이를 라아멘구조로 모델링하여 구조해석을 수행하고 지진하중 下에서 미끄러짐(sliding)과 顚倒(rocking)에 대한 安定性 검토를 수행해야 한다.
- 라아멘 구조의 지점구조에서는 말뚝의 수직·전단·회전 spring의 탄성계수를 산정해야 한다.
- 主塔基礎는 主塔의 정착후레임(anchor frame) 설치에 충분한 크기여야 하며 水中타설되는 프리팩트 콘크리트에 引張應力이 발생되지 않도록 설계되어야 한다.

2.2 主塔(pylon)

- 主塔은 전체 교량의 美觀에 결정적인 영향을 미친다. 일반적으로 두개의 기둥형이 기본이며 補強桁 下部부분을 안쪽으로 경사지게 하여 하부 케이슨의 크기를 줄이고자 할 경우에는 정밀한 구조해석이 필요하다.
- 主塔下部와 케이슨 상부의 연결방법으로 힌지연결형식인 경우에는 역학적으로 유리하지

만 主塔의 높이가 높고 反力이 큰 경우에는 施工性이 문제가 있으며, 고정지지형식인 경우에는 유연성 구조(flexible structure)로 설계하여야 한다.

- 主塔上에 케이블 설치부에서는 단면을 보강하거나 두께를 증대시켜야 하며 架設時에 張力導入이나 교체작업을 위한 최소간격을 확보해야 한다.
- 主塔의 挫屈(buckling)解析을 위한 고유치해석을 실시하여 有效挫屈長(effective length)을 결정해야 한다.

2.3 케이블

- 형식결정시에는 fan형처럼 水平分力이 지간중앙에서 가장 크고 主塔 부근에서 가장 작아지는 경우와 하프형처럼 補強桁 어느 부근에서도 水平分力이 일정한 경우가 있는데 일반적으로 fan형이 경제적이나 하프형이 미관에서는 유리하다.
- 케이블面(plane)數는 二面배치가 비틀림 강성과 주행성이 양호하고 케이블과 補強桁 사이에 힘의 전달이 명확하나 橋幅의 크기에 따라 一面이나 三面을 사용하기도 한다.
- 케이블의 장력 도입시에는 主塔의 사하중 모멘트가 0이 되어야 하며, 케이블강성확보를 위해 初期剛性導入이 필요하고 主塔에 교번응력(stress reversal)이 발생되지 않아야 한다.

2.4 補強桁(stiffening girder)

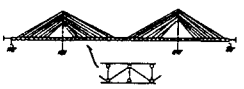
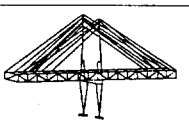
- 補強桁은 전 구간에 걸쳐서 동일크기와 동일모양인 것이 施工性에서는 유리하나 非經濟性의 원인이 되므로 케이블의 배치형상을 고려하고 활하중 응력을 검토하여 補強桁의 크기 및 死荷重을 조정해야 한다.
- 補強桁이 트러스구조인 경우에는 케이블이 上部構造에 가설되므로 上弦材에 過多應力發生의 원인이 된다. 이러한 경우에는 합성바닥판구조를 채용하므로써 응력의 分配를 이룰 수 있다.

3. 解析 및 設計

3.1 解析

- 해석방법으로는 面內靜的解析, 面外靜的解析, 動的解析이 있으며 面外靜的解析은 全體三次元解析과 部分三次元解析이 있고, 動的解析으로는 橋軸方向解析과 橋軸直角方向解析이 있다. 모델기법은 표 1과 같다.

표1. 解析方法 및 모델

解析方法		解析모델
面內靜的解析		
面外 靜的解析	全體 三次元 解析	보요소
	部分 三次元 解析	
動的解析	橋軸方向解析	보요소
	橋軸直角方向 解析	보요소

- 케이블은 一定量의 장력에 도달하기 전까지는 비선형거동을 보인다. 따라서 정적해석에서 가장 많이 사용되는 모델기법은 等價彈性係數(응력의 함수임)을 사용하는 트러스요소를 사용하는 기법이다.
- 動的解析의 경우에는 부재수가 過多하므로 super element를 사용하여 部材數를 줄일 필요가 있다.

3.2 補強桁 設計時의 死荷重分配

補強桁과 케이블의 설치간격 및 케이블形象은 斜張橋의 구조적성능에 결정적인 영향을 미친다. 懸垂橋의 경우에는 主케이블과 補強桁을 연결하는 행거(suspender, hanger) 들이 垂直方向을 유지하기 때문에 補強桁에 水平分力을 발생시키지 않고, 모든 垂直成分의 크기를 같게 함으로서 補強桁의 死荷重모멘트를 동일하게 하고 설계상 편리와 施工性을 도모하고 있으나, 斜張橋의 경우에는 케이블 張力과 補強桁의 死荷重, 그리고 活荷重재하를 총체적으로 고려한 설계가 이루어져야 한다. 補強桁의 모멘트는 活荷重모멘트와 死荷重모멘트로 나눌 수 있는데 활하중에 의해서 임의 단면에 발생되는 正·負모멘트가 설계 最大·最小 모멘트보다 너무 크거나 너무 작은 단면이 발생할 수 있다. 이 경우에는 부재 크기를 조절하여 死荷重모멘트 크기를 적절히 분포시킴으로서 過多活荷重모멘트를 상쇄시키는 것이 가장 흔히 사용되는 설계기법이며 그 순서는 다음과 같다.

① 補強桁의 一般圖(치수, 모양 등)는 규정상의 最小値를 만족하는 단면으로 구성하여 斷面係數와 死荷重을 결정한다.

② 가정된 最小斷面에 근거를 두고 斜張橋의 一般圖를 구성하여 構造解析(전체하중에 대한)을 수행하여, 最大·最小모멘트 곡선을 결정한다.

③ ②에서 구한 케이블 장력의 수평분력에 의한 보강형의 응력크기를 고려하여, 補強桁의 支持모멘트 크기를 결정하고 最大·最小모멘트 곡선을 구한다.

④ ②와 ③에서 구한 모멘트 곡선을 비교함으로서, 最大·最小모멘트 크기가 支持모멘트를 초과하는 區間에서는 부재두께를 늘이거나 死荷重 分布圖를 변화시킨다.

⑤ ①~④과정을 反復遂行하여 最終部材크기를 결정한다.

3.3 施工過程을 고려한 初期張力의 결정

施工中에 補強桁의 가설과 케이블의 설치를 반복적으로 수행하는 과정에서 정확한 初期導入張力이 사전에 결정되지 않으면 施工段階마다 가설되어 있는 케이블들의 張力補正을 실시해야 한다. 그러나 이러한 번거로움을 피하고 시공중에 오직 한번만 케이블에 장력을 도입하는 것이 가장 이상적인 설계이다. 이러한 정확한 初期導入張力 결정방법으로 가장 많이 사용되는 기법으로는 施工段階(construction sequence)와 逆順으로 解體段階(demolishing sequence)를 해석하는 방법이 있다. 이 방법은 〈그림1〉과 같고 解析順序는 다음과 같다.

① 二次死荷重(鋪裝, 연석, 난간 등)의 除去後 解析過程으로 $-W_s$하중을 재하하여 해석한 단면력을 $\triangle T_1$, $\triangle M_1$, $\triangle N_1$이라 한다. 이 단면력을 完成時 해석한 단면력에 合算함으로서 二次死荷重除去時의 부재단면력을 구한다.

$$(T_1, M_1, N_1)=(T_0+\triangle T_1, M_0+\triangle M_1, N_0+\triangle N_1)$$

이때 지간중앙에서의 모멘트 $M_0+\triangle M_1$은 施工時에 양켄틸레버를 연결하기 위한 縫合모멘트 Y_a와 같다.

② 中央지간 연결이 解除된 켄틸레버 구조물에 $-Y_a(=M_0-\triangle M_1)$의 모멘트 하중을 재하하여 구한 단면력을 $\triangle T_2$, $\triangle M_2$, $\triangle N_2$라고 한다. 또한 이 構造系에 施工區間의 사하중 $-W_g$를 재하하고 해석한 부재력을 $\triangle T_3$, $\triangle M_3$, $\triangle N_3$라고 하면 이때 케이블 b의 張力은 다음과 같이 결정된다.

$$T_b=T_{b0}+\triangle T_{b1}+\triangle T_{b2}+\triangle T_{b3}$$

③ 定着部Ⓒ에 $-T_b$의 모멘트 하중과 施工區間 Ⓒ~Ⓑ의 사하중 -Wg를 재하하여 구한 단면력을 $\triangle T_4$, $\triangle M_4$, $\triangle N_4$라고 할 때, 케이블 C의 導入張力은 다음과 같다.

$$T_c=T_{c0}+\triangle T_{c1}+\triangle T_{c2}+\triangle T_{c3}+\triangle T_{c4}$$

④ 위의 과정을 따라서 케이블과 補強材를 解體하면서 해석을 수행하면 케이블의 初期張力을 구할 수 있다.

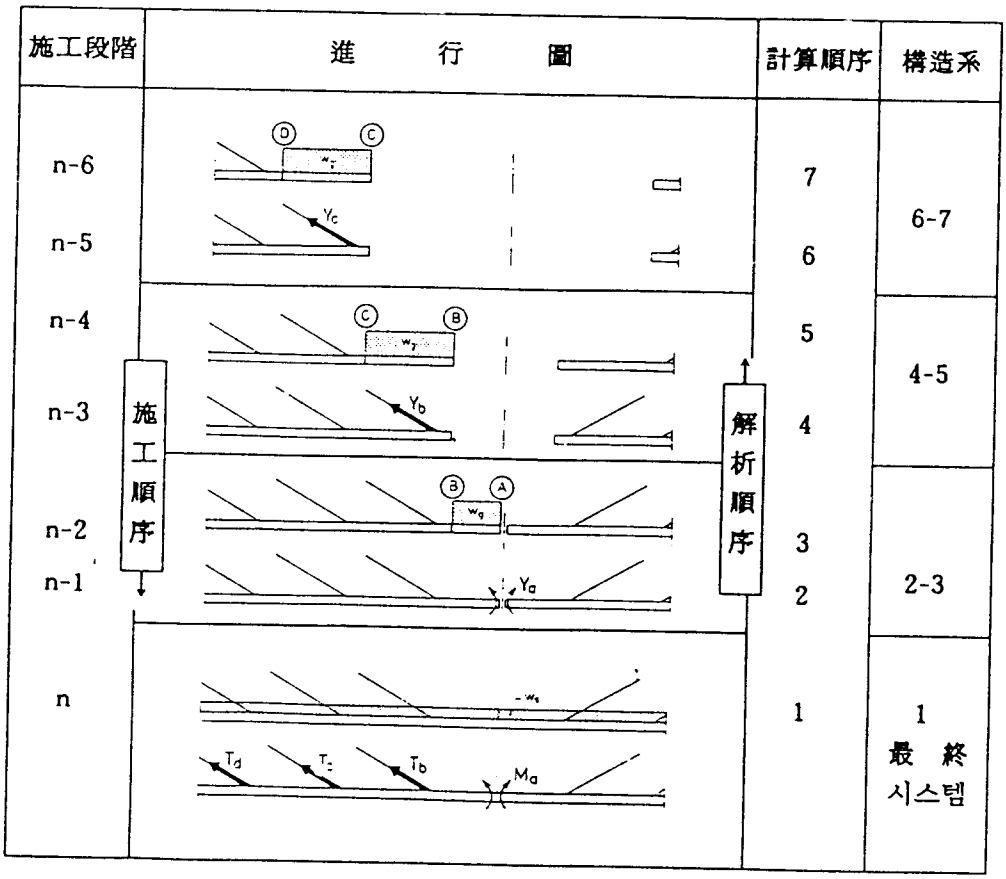


그림1. 해석 순서

4. 動力學的 安定性

4.1 模寫運用(simulation) 技法

바람과 같은 動的荷重下에서의 斜張橋의 거동을 규명하기 위하여는 三次元風洞實驗을 실시하는 방법과 컴퓨터프로그램을 이용한 模寫運用技法을 사용할 수 있다. 前者의 경우에는 비용과 노력이 많이 들지만 실제적인 거동을 볼 수 있다는 장점때문에 흔히 사용되고 있다. 그러나 極限限界狀態(ultimate limit state)下에서 교량의 거동을 규명하기에는 다음과 같은 문제점이 있다. 風洞實驗은 縮小模型實驗을 수행하는 데 이때 규명하고자 하는 動的性質에 따라 다른 縮小率(scale factor)을 사용해야 하는 번거로움이 있고 變形이나 부재력 등을 정확히 결정하는데에도 문제가 있다. 또한 風洞實驗은 使用荷重狀態에서 변형을 측정하여 極限狀態에서의 부재력을 線形外挿法(linear extrapolation)으로 구하게 된다. 따라서 風洞實驗만으로는 極限限界狀態에서의 교량의 安定性을 명확히 규명하는 데 문제점이 있으며 後者와 같은 模寫運用技法의 개발이 필요하다. 이러한 기법을 사용하기 위해서는 바람과 구조물의 相互聯關性(interaction)을 정확히 표현하고 風荷重을 공간과 시간에 따라 確率論的으로 再現시킬 수 있는 소프트웨어의 개발이 필요하다. 실제 風荷重狀態를 충분히 再現시킬 수 있는 소프트웨어가 개발된다면 極限限界狀態에서 斜張橋의 부재력을 명확히 규명할 수 있을 것이다.

4.2 限界風速(critical wind velocity)

많은 斜張橋들의 空氣力學的 安定性에 대한 연구결과들은 교량의 고유치해석 결과에 의한 휨진동수와 비틂진동수가 명확히 다른 경우에는 動的으로 不安定해질 수 없다는 것을 보여주고 있다. 따라서 이러한 不安定性을 판단할 수 있는 정량적인 수단으로서 斜張橋의 限界風速을 산정하여 가설지점의 設計風速에 安全係數를 도입한 수치와 비교함으로서 動的安定性을 검토하고 있다. 현재 設計에서 보편적으로 사용되고 있는 限界風速(V_{cr})의 算定方法은 다음과 같다.

$V_{cr}=V_{cr,FP}\cdot\eta$

$V_{cr,FP}$: 평판의 限界速度

$=\omega_B\cdot b\cdot F(\gamma/b,\ \mu,\ \varepsilon=\omega_T/\omega_B,\ J)$

ω_B : 휨固有振動數(bending natural frequency)

b : 橋幅의 1/2

μ : 질량계수($=m/\pi\rho 6^2$)

m : 單位質量

g : 重力加速度(9.8 m/sec)

ρ : 空氣密度(1.25×10^{-3})

ε : 휨/비틂 振動數比

ω_B : 비틂振動數(torsional natural frequency)

η : 固有値解析에 의해서 결정되는 係數

4.3 케이블 振動의 安定性

振幅이 크고 頻度가 심한 진동은 케이블의 疲勞破壞의 원인이 된다. 케이블 진동의 원인으로는 構造體(主塔, 補強桁)와 케이블의 고유진동수가 바람직하지 못한 相關性에 있는 경우에 발생되는 것으로 알려져 있다. 구조체와 케이블의 진동은 定着部(anchor point)를 통해서 전달된다. 일반적으로 케이블의 不安定性은 구조체와 케이블의 고유진도수 비가 2倍일 때 발생하는 것으로 알려져 있다. 또 다른 要因으로는 진동에 따라 발생하는 負減衰要素(negative damping factor)가 不安定性의 原因으로 알려져 있다. 구조체와 케이블의 고유진동수가 同一하거나 近接할 경우에는 구조적인 安定性에는 문제가 없지만 심한소리(dominant beating)가 발생된다.

5. 結言

斜張橋는 施工性과 經濟性에 있어서도 타교량형식에 비하여 優越하다고 알려져 있으나 關聯技術의 習得이 어렵고 잘 알려져 있지 않은 短點이 있다. 그러나 독일이나 일본같은 기술선진국에 있어서는 이미 모든 관련기술이 보편화 되어 橋梁計劃時에 相對的 優越性이 인정되는 경우에는 과감히 채용되어 多數가 完工되거나 建設中에 있다. 우리나라에서도 하루빨리 관련기술을 연구하고 自立化하여 適材適所에 활용해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. N.J. Gimsing, "Cable Supported Bridges", John Wiley & Sons, 1983
2. "瀨戶大橋工事誌", 日本海洋架橋調査會, 1988.
3. Kovacs, I., "On the Vibration and Damping of Cables", Die Bautechnik, 1982, 10.