

斜張橋의 靜的解析에 관한 研究

Static Analysis of Cable-Stayed Bridges

黃	鶴	周*
Hwang,	Hak	Joo
宋	在	浩**
Song,	Jae	Ho
朱	銑	萬***
Joo,	Sun	Man
金	連	泰****
Kim,	Yun	Tae

Abstract

This paper was mainly concentrated on the structural analysis of the cable-stayed bridges through the linear and nonlinear analysis method.

And also this compares and analyses the characteristics of the two typical system, the radiating and harp arrangement.

As a result, The radiating configuration is stiffer than the harp configuration in many respects Besides, the difference between the linear and nonlinear analysis method is proportional to the sag.

But as the cable of the cable-stayed bridges is tauter, the difference is lesser.

要 旨

本 研究에서는 斜張橋의 構造解析과 아울러 代表的인 radiating 型 및 harp 型 斜張橋를 모델로 線形, 非線形解析方法을 通해 그 特徵과 長短點을 考察하고 또한 實驗을 並行하여 理論值와의 差異點을 檢討하였다.

研究結果 여러 斷面力을 基準으로 radiating 型 사장교가 harp 型에 비해 강성이 대체로 크며, 線形 및 非線形解析方法에 依한 差異는 sag 비가 증가할수록 커지나 cable 이 直線에 가까운 상태 (sag 比 1/100 以下)에서는 두 값이 거의 一致함을 알 수 있다.

1. 序 論

斜張橋는 所定の 場所에 塔을 세운 다음 그 곳 으로부터 主桁上의 적당한 위치에 cable 을 連結

*正會員·延世大學校 工科學 土木工學科 教授

**延世大學校 大學院 博士過程(金鳥 工科學 專任講師)

***延世大學校 大學院 博士過程

****延世大學校 大學院 碩士過程

하여 橋梁에 가해지는 荷重을 主桁, cable, 塔이 각기 分擔하도록 해서 安全을 유지시키는 形態의 橋梁으로 이제까지는 構造解析上 不穩定次數가 높아 解析에 어려움을 겪어오다가 近來에 들어와 computer의 등장 및 cable의 強度增加와 質的 向上에 힘입어 各광을 받게 되었다.

斜張橋는 또한 從來의 橋梁처럼 荷重負擔을 主桁에 의존하지 않고 cable이 그 一部를 負擔하고 있다는 點에서는 懸垂橋와 비슷하나 構造上 舉動面에서는 相違함을 보여 주고 있다^(1,2).

斜張橋는 cable에 따라 應力調整을 할 수 있고 이로 인한 空間活用に 유리하여 經濟的인 設計가 可能하다는 것이 두드러진 長點으로 特히 支間이 150~400 m의 橋梁에서는 가장 권장할만한 橋梁形態로 報告되어 있다^(3,4).

斜張橋의 解析方法에 대해서는 많은 學者에 의해 여러 측면에서 研究되었다. 1967년 Smith는 斜張橋의 舉動을 塔의 回轉 및 彈性變形 그리고 cable의 stretching을 별도로 고려하여 해석하였으며, 다음 해 二面斜張橋에 대한 線形解析理論을 提案하였다^(5,6). 1971년 Tang은 斜張橋에 있어서 非線形에 의한 影響을 解析에서 外部荷重으로 假定하여 reduction method를 開發하였고⁽⁷⁾ 같은 해 Troitsky와 Lazar는 應力法으로의 접근을 시도했다⁽⁸⁾. 반면에 Podolny와 Fleming은 變位法에 의한 解析方法을 도입하고 program 開發에도 착수하였다^(9,10).

以後 1972년에는 post-tension이나 prestress를 가해 斜張橋에 作用하는 荷重의 影響을 줄이는 方法을 Lazar, Troitsky, Douglas가 공동으로 研究하여 load balancing analysis를 完成하였다⁽¹¹⁾. Lazar는 또한 變位法에 의한 解析을 發展시켜 線形, 非線形에 대한 理論을 獨창적으로 전개했다⁽¹²⁾.

이 밖에도 Kajita와 Cheung은 거더의 비틀림을 考慮한 線形解析方法을 有限要素法으로 해결하였으며⁽¹³⁾ 動力學的인 측면에서의 研究도 있었다⁽¹⁴⁾.

日本에서도 이에 대한 研究가 活潑하였는데, 長谷川, 成岡은 傳達行列法을 開發하여 微少變位理論에서 발표하기도 하였으며⁽¹⁵⁾, 斜張橋의 耐風性 및 地震에 따른 影響 등에 관한 論文도 많

았다^(16,17,18).

國內에서는 1962년 本人이 假想일의 原理를 이용한 斜張橋 解析理論을 제시한 바 있다⁽¹⁾.

施工面에서도 現代에 들어와서는 많은 나라에서 그 架設例를 보게 되었고, 우리 나라도 珍島의 연육교와 여수의 突山橋가 現在 建設中인데 斜張橋의 고유한 特性때문에 더욱 그 수요가 증가할 것으로 보인다.

따라서 本 研究에서는 線形 및 非線形解析方法을 통한 斜張橋의 構造解析과 아울러 代表的인 경우를 모델로 選定하여 그 特徵 및 長短點을 比較, 分析하고 實驗을 병행하여 妥當性을 檢討한다.

2. 斜張橋解析에 따른 基本理論

2.1 基本假定

斜張橋의 cable은 그 軸을 따라 單位길이당 무게가 一定하므로 catenary 曲線 形態를 취함과 동시에 自重으로 인한 sag 때문에 cable에 作用하는 張力이 그 軸에 연해서 發生한다. 그러나 本 研究에서는 cable의 形상이 拋物線 形態를 취한다고 보며, cable 張力의 方向 및 크기도 각각 cable 弦(chord)의 方向과 이 方向으로의 分力값을 갖는다고 假定한다.

위 가정의 妥當性 여부에 대해서는 많은 연구가 있었는데 斜張橋의 cable은 보통 水平面과 30°미만의 각을 유지하고 있고, sag 比도 통상 1/30 以下의 값을 갖기 때문에 거의 誤差를 보이지 않는다고 報告하고 있다^(3,9,19~21).

2.2 斜張橋 解析方法

2-2-1. 變位法

變位法에 의한 斜張橋解析은 構造全體를 梁 (beam)와 트러스要素로 分割하여 解析한다. 즉 塔과 거더는 彎(bending)과 軸方向力을 받을 수 있는 要素로 보고, cable은 軸力만을 받는 要素

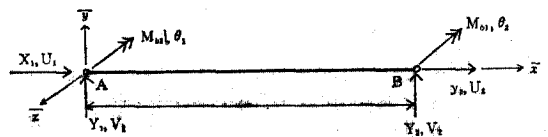


그림 2-1. 軸力 및 彎을 받고 있는 element

로 區分한다.

그림 2-1에서 보듯이 軸力 및 힘을 동시에 받는 部材 AB를 考慮하여 荷重과 對應變位를 그림에 表記한 바와 같다고 할 때 힘-變位關係는 다음 식으로 표시된다^(2,22).

$$\{F\} = [K] \{\bar{\mu}\} \quad (2-1)$$

여기서,

$\{F\}$ = 하중 matrix

$[K]$ = stiffness matrix

$\{\bar{\mu}\}$ = displacement matrix

그러나 위 行列式은 그림 2-1의 \bar{x}, \bar{y} 座標에 限한 것이기 때문에 解析에 있어서는 基準座標로 바뀌어야 한다.

즉 transformation matrix 를 $[T]$ 로 表示하면 座標變換後의 힘-變位關係式은 아래와 같다. ^(2,22)

$$\{F\} = [T]^T [K] [T] \{\mu\} \quad (2-2)$$

여기서,

$\{F\}$ = 座標變換後의 荷重 matrix

$[T]$ = transformation matrix

$[T]^T$ = $[T]$ 의 transpose

$\{\mu\}$ = 座標變換後의 變位 matrix

2. 2. 2. Mixed Method

이 方法은 未知變量에 힘과 變位를 포함시켜 힘, 變位를 동시에 求한다.

그림 2-2에서와 같이 支點 A, B, C는 單純支持되어 있고 cable은 點 F에서, 塔은 點 B에서 각각 pin 結合되어있는 斜張橋를 考慮하여 點 D, E에서의 cable 張力과 點 B의 反力을 과잉력으로 잡고, B點에서 거더의 처짐은 零이며, D, E點에서의 거더처짐은 이 點들에서의 cable 처짐과 같다는 條件하에 適合方程式을 세우면 다음과 같다^(3,5,6).

$$\left. \begin{aligned} \delta'_d - f_{da}X_d - f_{db}X_b - f_{de}X_e &= \Delta d \\ \delta'_b - f_{bd}X_d - f_{bb}X_b - f_{be}X_e &= \Delta b \\ \delta'_e - f_{ed}X_d - f_{eb}X_b - f_{ee}X_e &= \Delta e \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

여기서,

X_d, X_e = D, E點에서 cable 張力의 垂直成分

X_b = B點의 垂直反力

$\delta'_d, \delta'_b, \delta'_e$ = 通用荷重으로 인한 D, B, E點의 처짐

$\Delta d, \Delta b, \Delta e$ = D, B, E點에서의 predeterm-

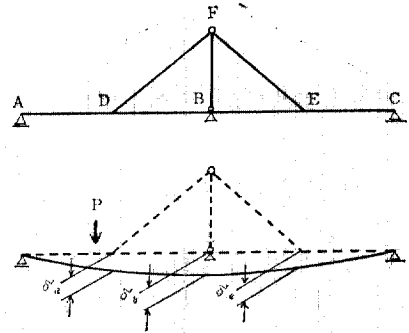


그림 2-2. 과잉력을 제거한 정정구조물의 처짐

ined 垂直처짐

f_{db} = 單純보 AC에서 뒤의 첨자(B點)에 수직단위하중이 作用할 때 앞의 첨자(D點)에서의 처짐에 대한 유연도계수

이다.

그러나 위 適合方程式은 그림 2-2의 斜張橋가 點 D, E에서 彈性支持되어 있으므로 塔의 傾斜 및 cable의 stretch, 塔의 軸方向 shortening 등이 별도로 고려되어야 한다.

따라서 위 事項을 고려하여 適合方程式을 다시 세우면 식(2-3)의 우변은 다음과 같이 된다^(3,5,6).

$$\left. \begin{aligned} \Delta d &= \phi BD + C_d X_d + (X_d + X_e) f_T \\ \Delta b &= 0 \\ \Delta e &= -\phi BE + C_e X_e + (X_d + X_e) f_T \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

단, ϕ = 塔의 傾斜角

f_T = 塔의 單位 shortening

C_d, C_e = D, E點에서 垂直方向으로의 單位 cable 張力에 따른 수직처짐

이다.

그러나 위식은 새로운 未知變量 ϕ 를 포함하기 때문에 塔의 頂部(F點)에서의 모멘트와가 零이라는 條件式을 추가로 고려하여 식(2-3)과 (2-4)를 정리하면 matrix 형태로 다음과 같이 된다^(3,5,6).

$$\begin{pmatrix} (f_{da} + C_d + f_T), & (f_{db}), & (f_{de} + f_T), & BD \\ (f_{bd}), & (f_{bb}), & (f_{be}), & 0 \\ (f_{ed} + f_T), & (f_{eb}), & (f_{ee} + C_e + f_T), & -BE \\ BD, & 0, & -BE, & 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_d \\ X_b \\ X_c \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_d' \\ \delta_b' \\ \delta_c' \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2-5)$$

2.3 cable의 非線形性을 考慮한 理論

2.3.1. 線形理論

線形理論은 變形量이 미소하다는 가정하에 荷重이 가해졌을 때 各 部材에 생기는 部材力을 構造物이 荷重을 받기 前의 狀態, 즉 초기의 幾何的인 條件에 의해 決定하는 理論으로, 사장교해석시 斷面力에 대한 影響線을 얻는데 사용된다.

2.3.2. 非線形理論

이 이론은 사장교를 構成하고 있는 各 部材의 非線形性을 考慮하는 理論으로, 各 節點에서의 平衡方程式을 構造物이 荷重을 받아 變形을 일으킨 後의 幾何的인 狀態에 따라 決定하는 方法이다.

斜張橋는 거더와 塔 그리고 cable로 이루어져 있기 때문에 이 세 곳에서의 非線形性이 고려되어야 하나 거더나 塔의 경우는 영향이 적어 무시되고 sag에 따른 cable의 非線形擧動은 構造全體에 미치는 影響이 커서 Ernst, Gimseng^(3,9,23) 등 여러 사람이 cable의 비선형성에 관한 연구를 발표하였다.

2.3.3. 等價 cable 彈性係數

cable의 非線形性을 彈性係數를 조정하여 해결하는 理論은 많이 있었으나 Ernst 方法^(3,9,23)을 토대로 소개하면 다음과 같다.

cable은 荷重을 받을 때 sag의 減少로 弦의 길이가 증가할 뿐 아니라 동시에 彈性變形을 받아 應力(σ)과 變形率(ϵ) 사이에 일정한 比例關係가 成立하지 않게 되므로 Ernst는 새로운 彈性係數(E_{eq})를 결정하여 cable을 sag가 없는 直線部材로 대체할 수 있다고 보아 다음 두 식을 제안하였다^(3,9,23).

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{1}{12} \frac{(wL)^2 AE}{T_0^3}} \quad (2-6)$$

$$E_{eq} = \frac{E}{1 + \frac{(wL)^2 (T_r + T_0) AE}{24 T_0^3 T_r^2}} \quad (2-7)$$

여기서,

E_{eq} = 等價 cable 彈性係數

E = 재료의 彈性係數

T_0 = 초기 cable 張力

T_r = 하중증가에 따른 최종 cable 張力

A, L, w = cable의 단면적, 길이, 단위길이당 무게

단, (2-6)식은 荷重增減이 없는 境遇의 彈性係數調整式이고, (2-7)식은 하중변화가 있을 경우의 수정식이다.

2.4 Computer program

本 研究에서 使用된 프로그램은 變位法理論에 기초를 두고 線形 및 非線形解析方法을 통해 開發된 것⁽⁹⁾으로 간단히 다음과 같은 過程을 따른다.

첫째, 필요한 data를 구한다. 단 非線形解析의 境遇는 對象構造物의 초기 geometry와 cable

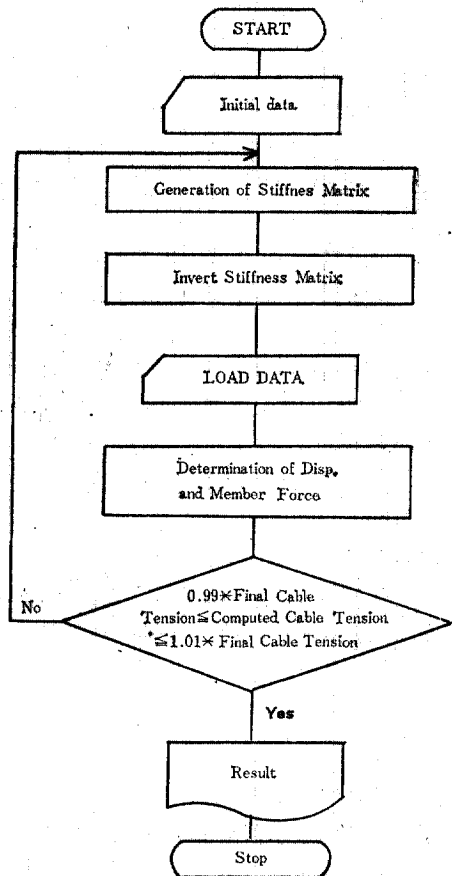


그림 2-3. Flow chart

自重에 따라 식(2-6)의 Ernst 이론^(3,9,23)에 기초한 等價 cable 彈性係數와 cable 張力を 求한다.

둘째, 위의 초기 data를 가지고 식(2-2)을 利用하여 stiffness matrix를 構成하고 荷重條件에 따라 처짐 및 各 部材의 部材力 등 필요한 結果值를 얻는다. 線形解析의 경우는 이 값을 최종 값으로 過程을 마친다.

셋째, 위 단계에서 구해진 cable 張力과 초기의 cable 張力을 比較하여 그 差異가 所定의 許容範圍內(本 研究에서는 計算된 값의 $\pm 1\%$ 를 그 許容範圍로 한다)에 들어오는지 調査한다.

넷째, 그 값이 許容範圍에 들어오지 않으면 역시 Ernst 이론^(3,9,23)에 근거한 식(2-7)에 따라 等價 cable 彈性係數를 調整하고, 둘째 과정으로 돌아가 허용범위에 들어올 때까지 반복한다.

이상의 過程에 대한 flow chart를 그림 2-3에 도시한다.

3. 斜張橋의 모델選定과 特徵比較

本章에서는 以上에서 敘述한 解析方法과 pro-

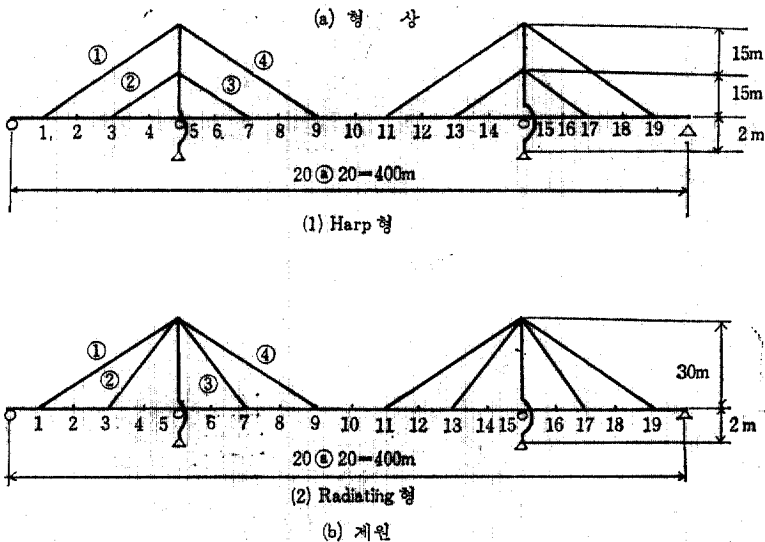
gram을 토대로 그림 3-1과 같은 계원을 갖고 있는 모델을 대상으로 線形解析을 通해서 兩型의 영향선을 比較, 現象을 檢討하고 非線形解析에 있어서는 중첩의 원리가 適用되지 않으므로 거더의 全區間에 3t/m의 等分布荷重을 載荷하고, sag를 變化시켜 가면서 線形解析으로 얻은 結果와 그 差異點을 力學的으로 考察한다.

3.1 cable 張力

의측지간의 荷重載荷시에는 harp型에서는 그림 3-2에서 볼 수 있듯이 塔을 中心으로 內측 cable ②③에 주로 하중이 傳達되는 반면 radiating型에서는 cable ②④가 대체로 힘을 받는다.

다음 中央支間에 荷重을 載荷시켰을 때는 harp型의 경우는 의측 cable ①④의 하중부담이 두드러지며 모든 cable에서 張力이 발생하고 radiating型은 cable ①③④에 비슷하게 荷重分配가 이루어지나, cable ②에는 壓縮力이 생기기도 한다.

線形 및 非線形解析에 의한 cable 張力の 차이는 그림 3-3 및 표 3-1에서 보듯이 sag比가 작



구분	Cable①	Cable②	Cable③	Cable④	거더	탑
단면적 (m ²)	0.01388	0.00832	0.00896	0.01224	0.14796	0.08826
단면 2차모멘트 (m ⁴)	×	×	×	×	0.202406	0.019730
단성계수 (kg/cm ²)	1.6×10 ⁸				2.1×10 ⁸	

그림 3-1. 사장교 모델

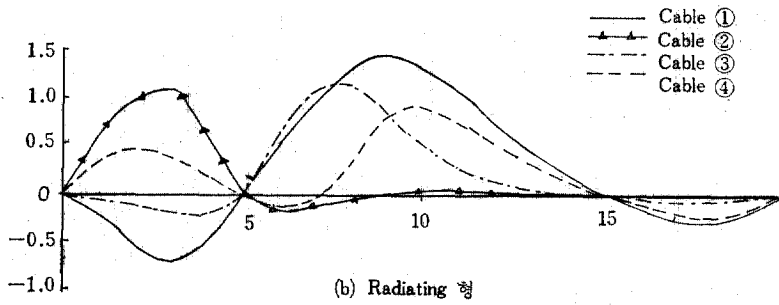
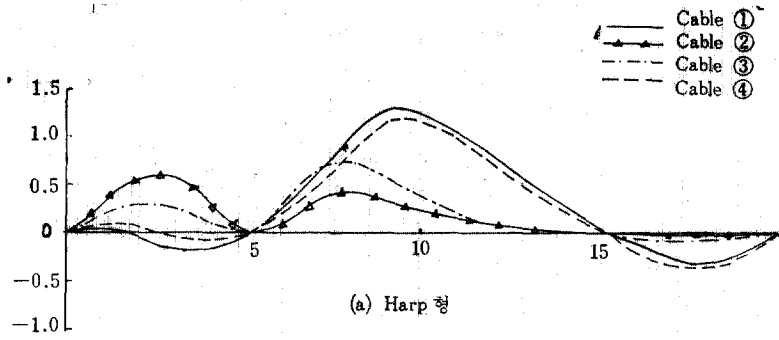
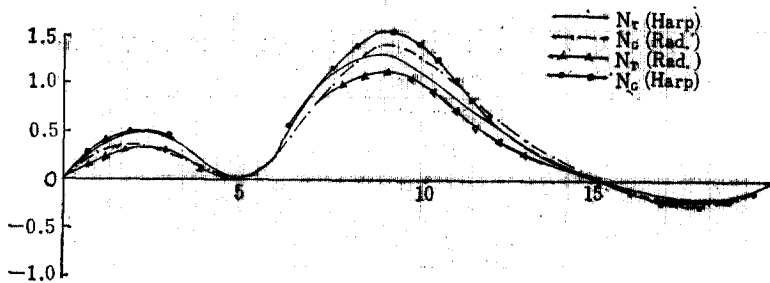
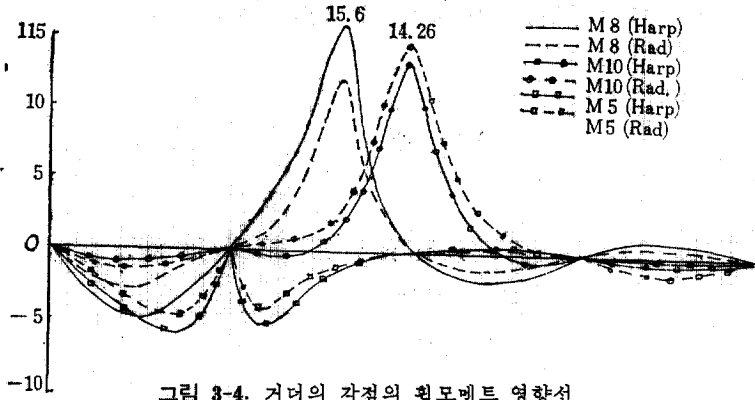
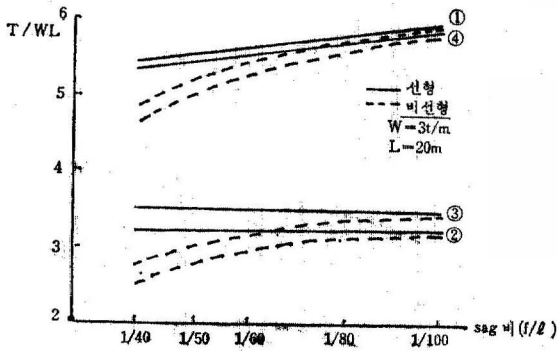
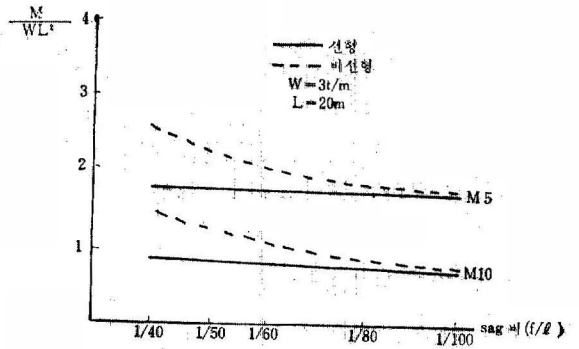


그림 3-2. Cable장력의 영향선

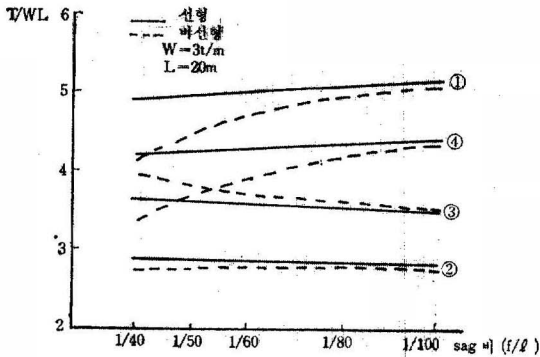




(a) Harp 형



(a) Harp 형



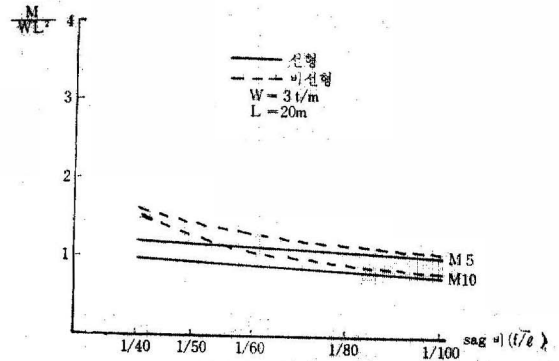
(b) Radiating 형

그림 3-3. Cable 장력 비교

아질수록 비슷한 값에 수렴하고, 크기는 線形解析으로 얻은 값이 非線形解析으로 구한 값보다 radiating 型에서 cable ③의 경우를 제외하고는 모두 크게 나타난다.

3.2 거더의 휨 모멘트

거더에 作用하는 휨모멘트는 移動荷重을 재하



(b) Radiating 형

그림 3-5. 거더의 휨모멘트 비교

시켰을 때는 最大모멘트가 그림 3-4의 영향선 비교에서 볼 수 있듯이 radiating 型은 中央點(10點)에서 최대값(14.26)을 갖는 반면 harp 型은 中央支間의 내외측 cable 中央(8點)에서 最大(15.6)가 된다. 크기는 中央點을 제외하고 모든 點에서 harp 型이 큰 값을 갖는다.

全區間에 等分布荷重을 재하시켰을 때는 그림

표 3-1. Sag 비 및 해석방법에 따른 단면력비교

Type	sag 비	단면력		T_1 (ton)		M_5 (t-m)		M_{10} (t-m)		N_c (ton)		N_r (ton)		ω_{10} (cm)					
		선형	비선형	선형	비선형	선형	비선형	선형	비선형	선형	비선형	선형	비선형	선형	비선형				
		차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)	차이 (%)						
Harp	1/40	324	290	12	2114	3063	45	1034	1731	67	486	409	19	369	309	19	75.5	128.4	70
	1/100	340	336	1	1949	2074	6	823	904	9	497	486	2	375	369	2	61.5	67.8	10
Radiating	1/40	294	250	18	1316	1942	48	1200	1920	60	414	371	16	428	399	7	66.2	112.2	69
	1/100	310	305	2	1233	1308	6	974	1055	8	426	421	1	433	429	1	52.9	58.2	10

3-5 및 표 3-1 에서와 같이 兩型 모두 中間支點 (5點)에서 모멘트가 最大가 되는데 harp 型이 radiating 型에 비해 월등히 큰 모멘트가 발생한다. 또한 線形 및 非線形解析에 의한 모멘트値는 cable 張力과 달리 非線形解析의 경우가 큰 값을 보이거나 sag 가 줄어들면서 差異가 줄어드는 현상은 張力의 경우와 같다.

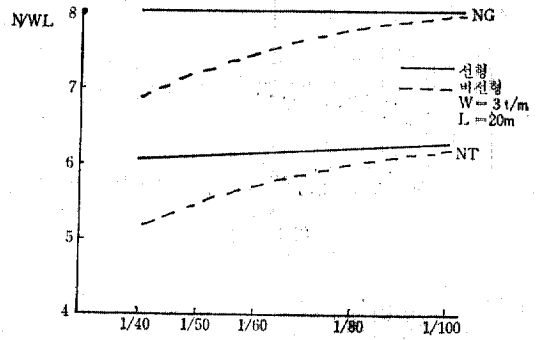
3.3 거더 및 탑의 軸方向力

軸方向力은 그림 3-6에서 볼 때 거더는 中間支點에서, 탑은 塔低部에서 각각 最大가 되며 거더의 軸力(N_g)은 harp 型이 radiating 型에 비해 크고 탑의 軸力(N_T)은 radiating 型에서 보다 크게 나타난다. 이 현상은 等分布荷重載荷時에도 동일하다. 또한 線形 및 非線形解析의 差異는 다른 斷面力 比較에서와 같이 sag 比가 적어질수록 같은 값에 접근함을 알 수 있는데 그림 3-7 및 표 3-1이 그 현상을 보여주고 있다.

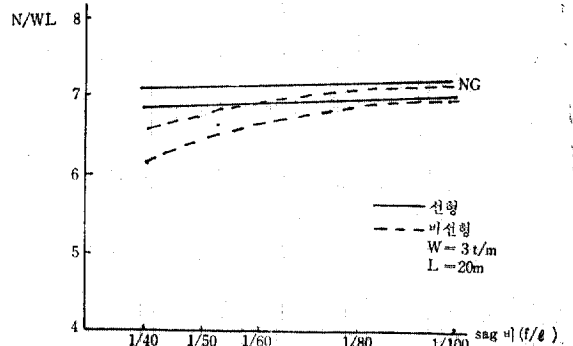
3.4 거더의 처짐

처짐의 크기는 中央點(10點)에서 最大가 되며 harp 型이 큰 값을 갖는다.

線形 및 非線形解析에 의한 差異는 그림 3-9 및 표 3-1에서 보듯이 역시 sag 比가 줄어들수록 현저히 작아져 다른 境遇와 마찬가지로 크기는 非線形解析으로 얻은 값이 線形解析으로 求한 값보다 크게 나타난다.



(a) Harp 型



(b) Radiating 型

그림 3-7. 거더 (5點) 및 탑의 軸력比較

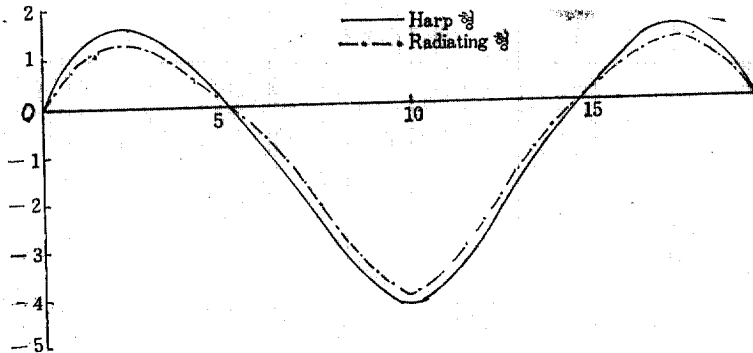
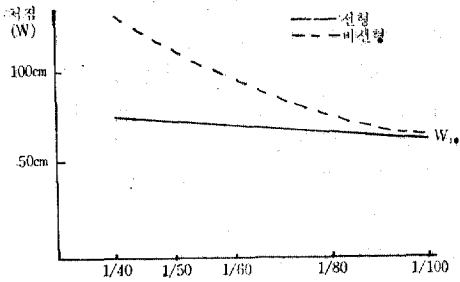
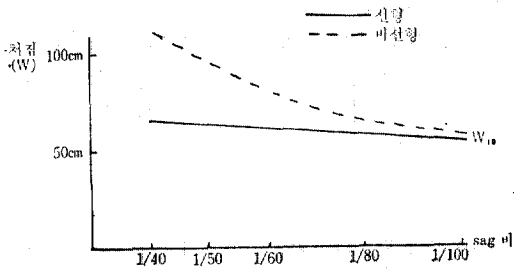


그림 3-8. 거더 (5點)의 수직처짐의 영향선



(a) Harp 형



(b) Radiating 형

그림 3-9. 중앙점(10點)의 수직처짐 비교

그림 4-1의 模型에서 거더 및 塔은 각각 1cm^2 및 4cm^2 의 4가황동봉($E=0.56 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$)을 사용했고 cable은 直徑 1mm의 피아노선($E=2.0 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$)을 사용했다.

거더의 變形率測定은 직시식 정적변형률 측정기(모델 UCAM-5A)를 이용했고, 거더의 처짐은 dial gauge(1/100mm까지 측정가능)를 사용 측정하였다.

實驗方法是 模型에 대해 荷重 2kg을 1點과 15點 또 3點과 13點에 각각 對稱으로 載荷하고 번호에 ○표를 한 곳에 strain gauge를 붙여 변형율을 측정하였다.

實驗結果는 그림 4-2에서 보는 바와 같이 理論値와 實驗値가 대체로 잘 一致하여 理論의 妥當性을 示唆하고 있으며 서술하지 않은 radiating型에서도 같은 結果를 얻었다.

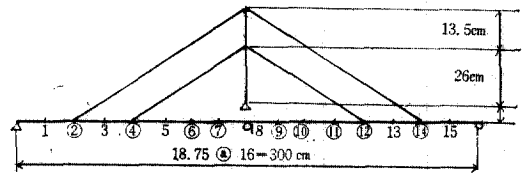


그림 4-1. 모 형

4. 模型實驗

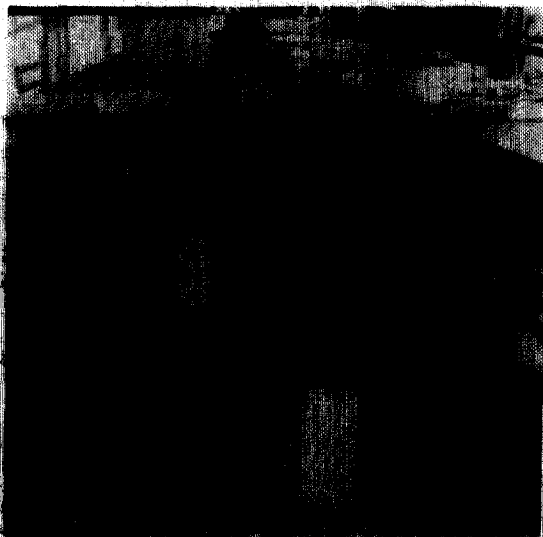
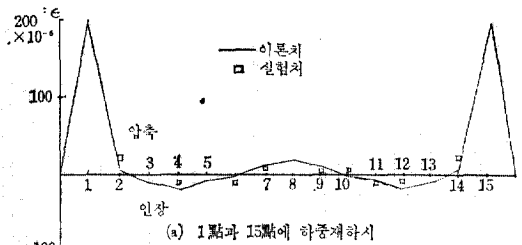
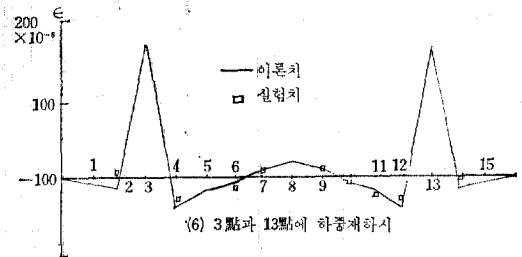


사진 實驗光景



(a) 1點과 15點에 하중계하시



(b) 3點과 13點에 하중계하시

그림 4-2. 거더의 변형율(Harp 형)

5. 結 論

本 研究는 斜張橋의 靜的 解析에 關한 研究로 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 斜張橋의 構造解析에 있어서 線形 및 非線形 解析方法에 따른 解析結果의 差異는 sag比가 증가할수록 큰 격차를 보여주나 반대로 sag比가 1/100 以下의 작은 값에서는 두 方法에 의한 結果值가 거의 一定한 값에 수렴하여 사장교의 構造解析時 sag比가 1/100 以下에서는 선형 또는 비선형 解析方法中 어느 方法에 의해서도 같은 解析結果를 얻을 수 있다.

(2) 그림 3-1의 harp型 및 radiating型 斜張橋를 對象으로 두 型의 斷面力을 表 3-1을 토대로 比較해 보면,

첫째, cable의 張力은 최대張력이 發生하는 cable ①을 기준으로 볼 때 radiating型에서의 張力값이 harp型에 비해 약 10~16%정도 적게 나타나며,

둘째, 거더에 作用하는 휨모멘트는 역시 최대값을 갖는 中間支點(M5)의 경우를 볼 때 radiating型이 harp型에 비해 약 60%정도의 모멘트 감소를 가져온다.

셋째, 軸方向力을 比較해 볼 경우는 거더에 作用하는 軸力은 radiating型이 harp型보다 10~16%정도 적게 나타나나 塔에 作用하는 軸力은 반대로 harp型이 radiating型보다 15~30%정도 적은 값을 갖는다.

넷째, 처짐은 최대처짐이 發生하는 中央點(10點)에서 볼 때 radiating型에서의 처짐이 harp型에서의 처짐값보다 15%정도 적은 값을 보여 주고 있다.

이와 같이 塔에 作用하는 軸力을 제외하고는 radiating 斜張橋가 harp型에 비해 強性이 큰 構造임을 보여주므로 構造의인 측면에서 radiating 斜張橋가 보다 유리한 形態임을 알 수 있다.

謝 辭

本 研究를 하는데 研究費를 支給해 준 韓國科學財團의 여러분에게 感謝드리며 模型製作을 위해 協助해주신 延世大學校 工科大學 工作室 諸位에게 심심한 謝意를 표한다.

參 考 文 獻

1. 黃鶴周, "2徑間斜鋼索橋에 關한 研究" 대한토목학회지, 제10권 1호(62.8) pp.92~106.
2. 小西一郎, "鋼橋設計編 I" 日本丸善株式會社, 1976, pp.893~1022.
3. Podolny, W., Jr. and Scalzi, J.B., "construction and design of Cable-Stayed Bridges", John Wiley & Sons, Inc. 1976.
4. 山本, 關田, 八谷, "斜張橋의 構造解析" 三菱重工技報2(1965), pp.221~226.
5. Smith, B.S., "A Linear Method of Analysis for Double-plane Cable-Stayed Girder Bridges", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, January 1968.
6. Smith, B.S., "The Single plane Cable-stayed Girder Bridges: A Method of Analysis Suitable for Computer Use", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, May 1967, pp.183~193.
7. Tang, M.C., "Analysis of Cable-Stayed Girder Bridges", *Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, No. ST5, May 1971, Proc. paper, 8116.*
8. Troitsky, M.S. and Lazar, B.E., "Model Analysis and Design of Cable-Stayed Bridges," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, March 1971, paper 7375.
9. Podolny, W., Jr., "Static Analysis of Cable-Stayed Bridges," *ph. D. thesis, University of pittsburgh*, 1971.
10. Podolny, W., Jr. and Fleming, J.F., "Cable-Stayed Bridges-Single plane Static Analysis," *Highway Focus, Vol. 5, No. 2, August 1973, U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration; Washington, D.C.*
11. Lazar, B.E., Troitsky, M.S. and Douglass, M. Mc C., "Load Balancing Analysis of Cable-stayed Bridges," *Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 98, No. ST8, August 1972, Proc. Paper 9122.*
12. Lazar, B.E., "Stiffness Analysis of Cable-Stayed Bridges," *Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 98, No. ST 7, July 1972, Proc. Paper 9036.*
13. Kajita, T. and Cheung, Y.K., "Finite Element

- Analysis of Cable-Stayed Bridges,* IABSE, Pub. 33-II, 1973.
14. Podolny, W., Jr., "*Cable-Stayed Bridges and Wind Effects,*" Federal Highway Administration Washington, D.C.
 15. 長谷川, 成岡, "變形を考慮した斜張橋の解析" 土木學會論文報告集, 第169號(1969.9), pp.57~61.
 16. 大久保, 榎波 "斜張橋の耐風性について" 道路, 336 (1969.2), pp.28~35.
 17. 北原 "斜張橋の耐風性に関する研究" 住友重機械技報, 20, 58(1972.10), pp.1~8.
 18. 渡邊, 宮本, 新山, "斜張橋の地震應答解析" 橋梁と基礎, 5-7(1971.7), pp.14~19.
 19. Carpenter, S.T., "*Structural Mechanics*" John Wiley & Sons, Inc. 1960.
 20. Shaw, F.S., "Some Notes on Cable Suspension Roof Structures," *Journal, The Institution of Engineers, Australia,* Vol. 36.
 21. Francis, A.J., "Single Cables Subjected to Loads", *Civil Engineering Transactions, The Institution of Engineers, Australia, Vol. CE7,* 1965.
 22. Martin, H.C., "*Introduction To Matrix Methods of Structural Analysis,*" McG Raw-Hill Inc. 1966.
 23. Baron, F. and Lien, S.Y., "Analytical Studies of a Cable Stayed Girder Bridge," *Computer & Structures, Vol. 3,* Pergamon Press, New York, 1973.

(接受: 1983.10.19)