斜張橋の架設精度管理

Geometory Control for Cable Stayed Bridges

第４章

田中　洋

第4章　構造同定法

SAMSUNG
삼성 JV

目的

- 精度管理の精度向上
- 不測の事態への対処の準備が可能。コストダウンを実現。
- 無理な作業が減少し安全性が向上する。
- 未架設工事の予測により、工事内容を理解でき時間の節約が可能

SAMSUNG
삼성 JV

構造同定法（1）

- 誤差の入った構造系の静的挙動を組み立て解析（以下FORWARD 解析と呼ぶ）で求める

- FORWARD 解析とは、構造物の完成系状態から荷重を載せない状態（無応力）を求め、その時の格点座標を（製作キャンバー値となる）を初期入力値とする。ケーブル部材は無応力長（ℓ_0）を用いる。

SAMSUNG
삼성 JV

構造同定法（2）

- FORWARD 解析には、FORWARD 解析が出来る構造解析プログラムが必要。

- キャンバー値の座標を初期座標とし、死荷重を載せ、ケーブルの無応力長をはめ込むと、BACKWARD解析で得られた完成系とほとんど一致した完成系が得られる（構造物の座標値と部材力がほぼ同じ値）。

誤差の設定

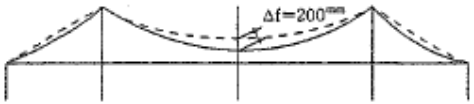
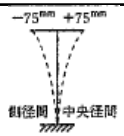
構造物の誤差：設計・製作・架設に起因する
以下の誤差要因がある。

誤差の要因

- 設計
  - 構造解析（架設系も含む）
  - ケーブル剛性
  - 部材剛性
  - 部材の自重・荷重
- 製作
  - 塔の鉛直度
  - 主桁のキャンバー
  - ケーブル長
- 架設
  - 架設・組み立て

SAMSUNG
삼성 JV

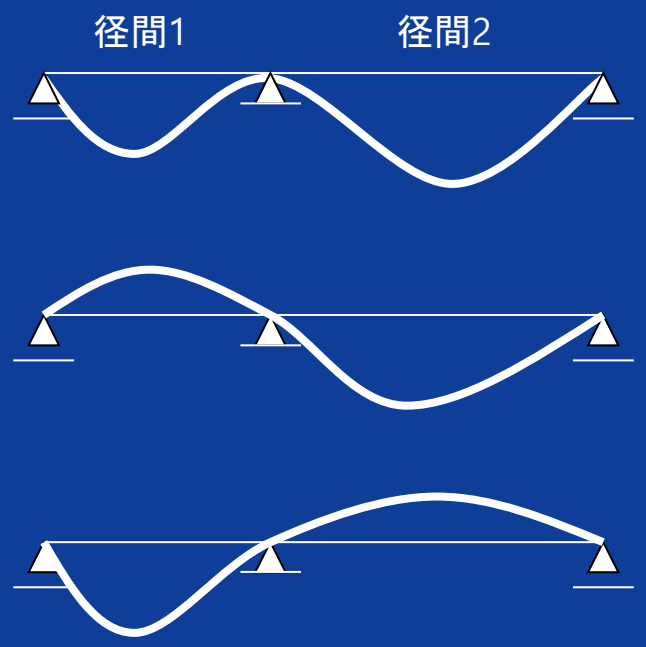
誤差要因の分類

	分類	誤差の要因	誤差量	備　　考	誤差モード
ケーブル関係	解析誤差	弾性係数	±2.5%	仮定値 E=2.0x10^{7}t/m^{2}対してエアースピニング工法時には、平行線ケーブルのEが若干低下すると報告されている。	1
		断面積	± 5%		2
	架設誤差	サグの誤差	Δf=200mm	フリーケーブル時にサグが 200mm小さいと仮定  本四基準によると δce=L/10000=300/10000=0.03	3
ハンガー関係	解析誤差	弾性係数	±2.5%		4
		断面積	± 5%		5
	架設誤差	ハンガー無応力長	±20mm	選ばれたハンガー部材に無応力長 ℓ_0±20mmの誤差を見込む	14
補剛桁関係	解析誤差	弾性係数	±2.5%		6
		断面積	± 5%		7
		剛度	± 5%		8
		死荷重	± 10%	鋼重の ±10%の誤差を見込む	9
		溶接キャンバー誤差		溶接キャンバーの見込み誤差による	省略
主塔誤差	解析誤差	断面積	± 5%		10
		剛度	± 5%		11
	架設誤差	塔の鉛直度	水平方向 ± 75mm	フリースタンディングの状態で 水平方向±75mmの誤差を 見込む  	12
	製作誤差	塔の寸法誤差	鉛直方向 ±20mm	無応力の状態で ±20mmの誤差を 	13

SAMSUNG
삼성 JV

誤差モードとは？

誤差モード：
誤差を含む完成系と誤差のない完成系との
座標と断面力の差の形状を誤差モードと呼ぶ。



(a) 計測されたキャンバーの誤差モード

=

(b) 径間2が重量が増加した誤差モード

+

(c) 径間1が剛度が減少した誤差モード

誤差量の誤差モードによる展開例((a)=(b)+（c）)

SAMSUNG
삼성 JV

（1）誤差Zは、誤差モード $\{F_i\}$ に誤差寄与率 $\{\alpha_i\}$ を掛け算した総和で近似。

（2）誤差寄与率ベクトル $\{\alpha_i\}$ は、架設途中で計測されたデータをもとに構造同定（SI）の手法を用いて決定。

（3）構造同定の方法は、最小自乗法によって定式化。

架設時に計測される計測値と設計値との差を誤差量としてZで表す。具体的にはZはキャンバーおよび断面力の誤差を成分とするベクトルであり、多くの誤差要因の線形重ね合わせと見なす。

$$Z = \sum_{i=0}^{N} \alpha i \cdot Fi$$

（F_i ：誤差モード）

SAMSUNG
삼성 JV

マトリックス表示をすれば,

$$Z = F \cdot \alpha$$

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{12} & \cdots & f_{2N} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ f_{M1} & f_{M2} & \cdots & f_{MN} \end{bmatrix}, \qquad \alpha = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{Bmatrix}$$

M：計測項目数(断面力および変位など)

N：誤差要因数

F：誤差影響マトリックス(F_iを列ベクトルとするマトリックス)

α：誤差寄与率ベクトル

SAMSUNG
삼성 JV

R:　構造物の断面力および変位の計測値

R0:　誤差の無い構造系での計測値

Z　:　各種の誤差

仮に誤差要因を完全に抽出して展開できれば次式となる。

$$R=R_0+Z$$

実際には上式は近似的にしか成立しない。

よって、両辺の差の自乗和を最小とする条件を求める。

$$\phi=(R_0+Z-R)^2 \quad \Rightarrow \quad \text{最小化}$$

SAMSUNG
삼성 JV

目的関数 ϕ を次式で最小化。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \alpha} = 0 \qquad (1)$$

R_0-R=r とおけば,

$$\phi = (Z + r)^2 = (F \cdot \alpha)^2 + 2 \cdot r \cdot (F \cdot \alpha) + r^2 \qquad (2)$$

SAMSUNG
삼성 JV

式(2)を式(1)に代入すれば、次式から各誤差要因の寄与率 α が求まる。

$$\alpha = -(F^t \cdot F)^{-1} \cdot F^t \cdot r$$

無次元化ならびに各計測値の精度の重みを考慮するため，誤差要因の寄与率に重み ρ を導入して、

$$\alpha = -(F \cdot \rho \cdot F)^{-1} \cdot F^t \cdot \rho \cdot r$$

ただし，ρ は対角マトリックスである。

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 & & 0 \\ & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots \\ 0 & & \rho_N \end{bmatrix}$$

SAMSUNG
삼성 JV

（1）重み ρ の適当な値を求めるには、試行錯誤の作業が必要

（2）複雑なプロセスがないファジィ線形回帰分析を応用した方法も開発（シム調整法と類似の方法だが割愛）

現実には、誤差寄与率ベクトル$\{\alpha i\}$は、架設系によって変化し、予め仮定した誤差要因以外でも誤差が生じる可能性があるため慎重に吟味して適用する必要有り。

SAMSUNG
삼성 JV

誤差を含む完成系の予測

（1）誤差要因が同定できれば、FORWARD 解析に よって架設途中で完成の予測が可能。

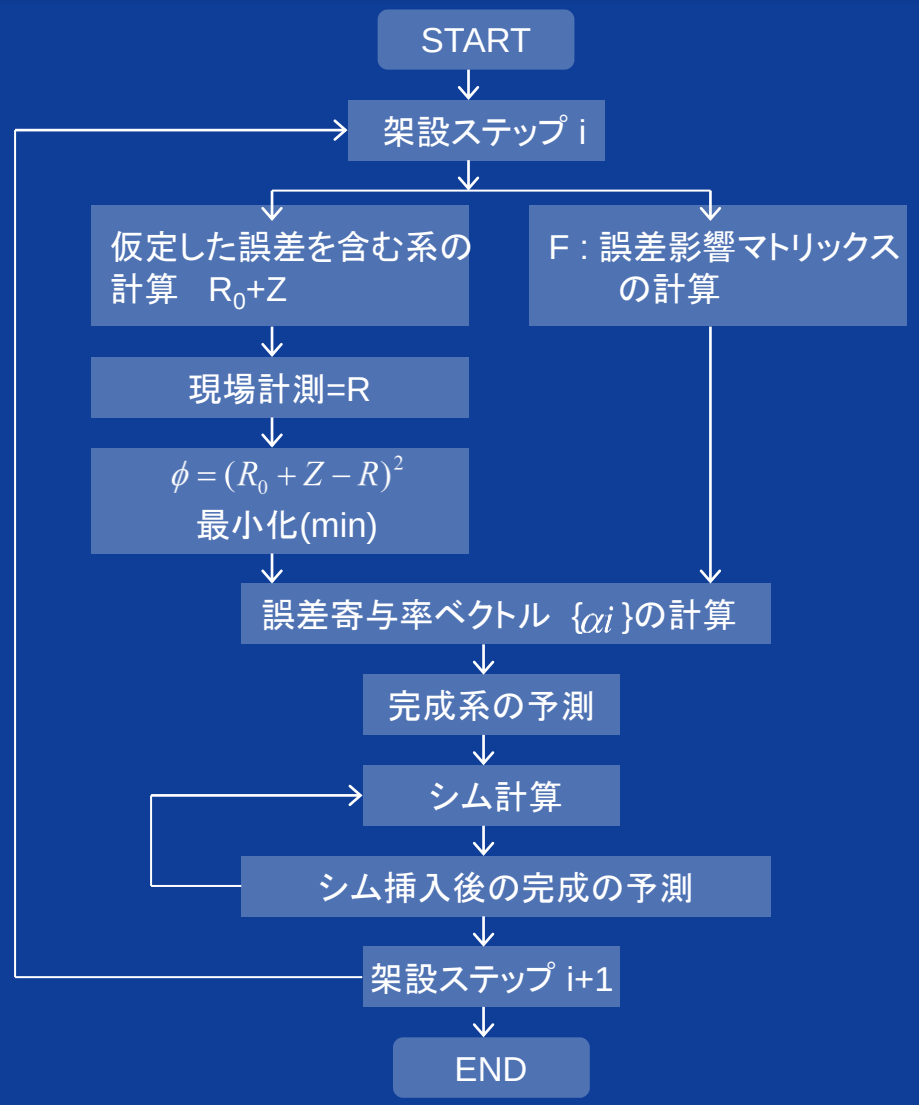
（2）架設途中の工程でも同じ誤差寄与率ベクトル$\{\alpha i\}$が発生すると仮定し完成系を予測。

（3）適用に当たっては、誤差寄与率ベクトル$\{\alpha i\}$の変化が小さければ各ステップで毎回変化させる必要はないが、値に幅を設けるなりして弾力的な運用が必要。

例えば、誤差寄与率ベクトル$\{\tilde{\alpha} i\}$に幅を設けると、完成系の予測も幅を持つ。記号～は、幅があることを示す。

SAMSUNG
삼성 JV

架設途中の完成系の予測方法



SAMSUNG
삼성 JV

誤差を含む完成系の予測

（1）予測の幅を導入すると、ベストまたはワーストシナリオに基づくきめ細かい架設精度管理が可能。

（2）各架設ステップで許容できる架設誤差が明らかになり必要以上の精度管理を防ぐ。

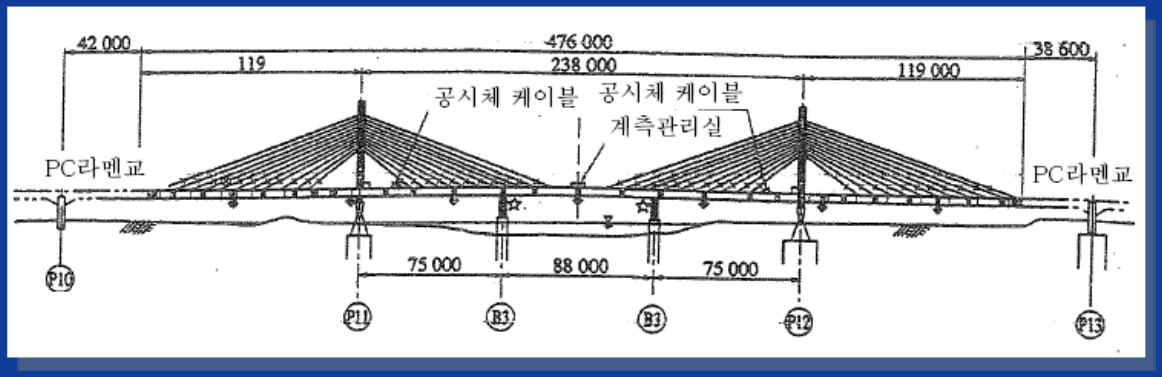
（3）本方法は、建設経験の無い吊形式橋梁の架設を行う場合、予想もしない状況が生じることを防止し、安全性と経済性に優れた架設精度管理を可能とする。

例えば、菅原城北大橋（橋長 476mの 3径間連続鋼斜張橋）は前例の無い構造形式の架設工事であった。本方法の適用で無事完成し、本手法の有効性が示された。

SAMSUNG
삼성 JV

菅原城北大橋

架設系



完成系

SAMSUNG
삼성 JV

数値計算例

モデルと構造諸元

3径間の斜張橋(Fig-1)で Table-1に構造諸元とTable-2に死荷重を示している。

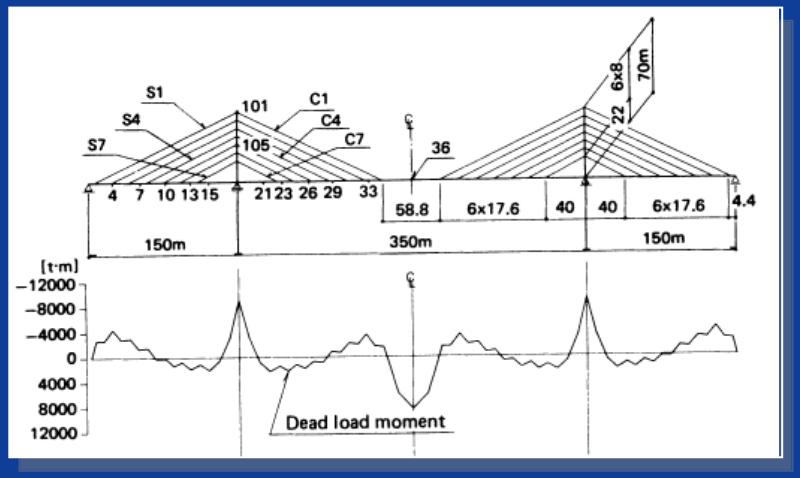


Fig.1 Bridge Model and Moment Diagram of "Final Step"

	Cross sectional area A [m²]	Moment of inertia I [m⁴]	Young's modulus E [t/m²]
Girder	1.20	2.50	2.1×10^7
Tower	0.80	1.50	2.1×10^7
Cable	0.03∿0.05	-	2.0×10^7

Table 1 Design Dimension

	W [t/m]
Girder	15.00
Tower	10.00
Cable	0.19∿0.31
Pavement,etc.	8.00

Table 2 Dead Loads

SAMSUNG 삼성 JV

架設方法

キャンチレバー（張り出し）工法を用いた。
“Step A”は、下図の架設ステップである。

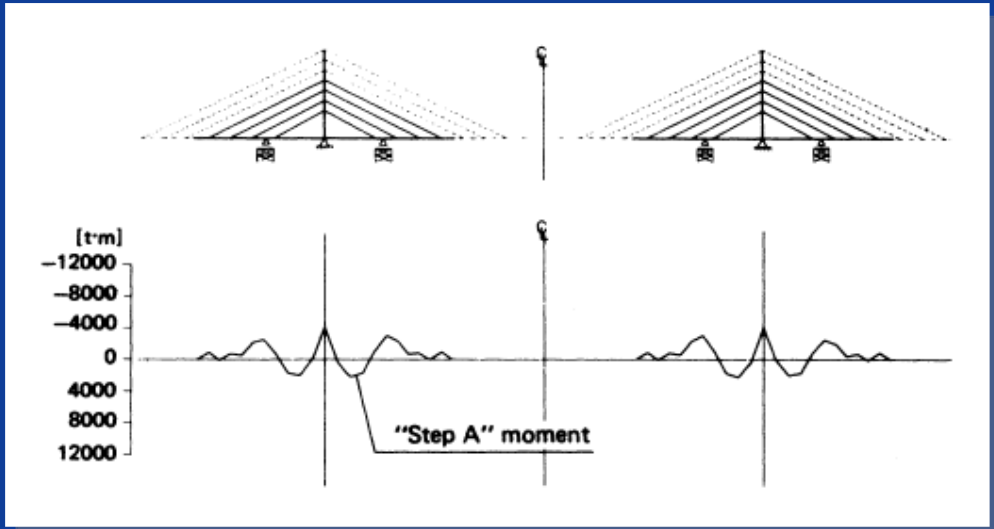


Fig.2 Construction phase “Step A” and Moment Diagram

SAMSUNG
삼성 JV

誤差要因

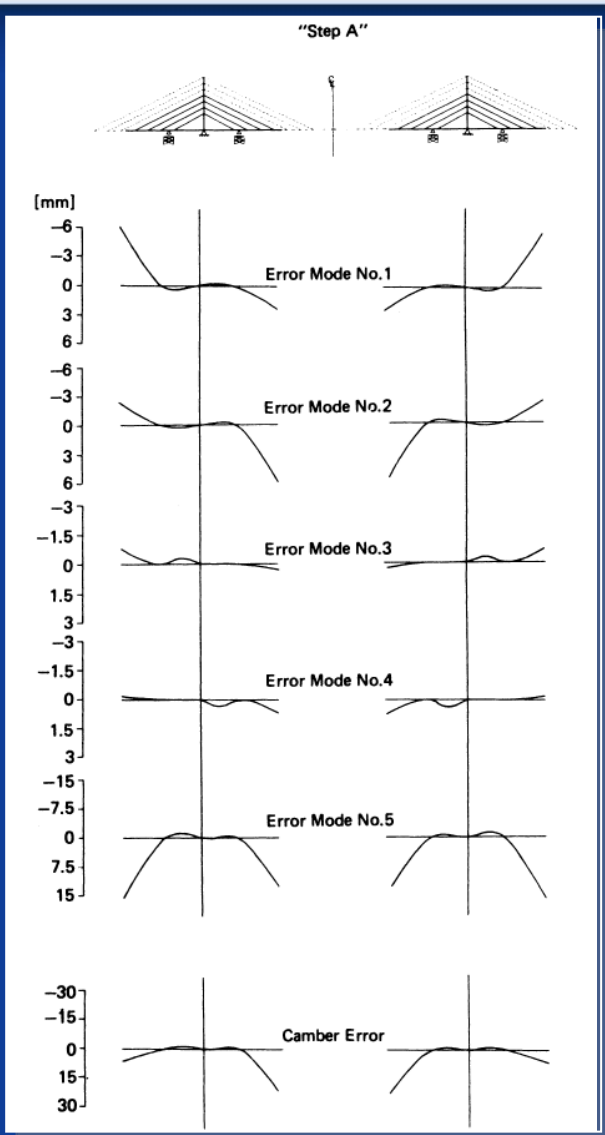
Step A では、下記の5つの誤差要因が含まれていると仮定した。
各々の要因で次ページに示す誤差モードが生じる。

Table 3 Assumed errors when using error system

Error mode No.	Error factor	Contents	Design value
1	Dead load of girder	Girder weight 2% decrease in each side span	W=14.7 t/m
2	Dead load of girder	Girder weight 2% increase in center span	W=15.3 t/m
3	Girder section stiffness	Moment of inertia 5% increase in each side span	$I=2.625\ m^4$
4	Girder section stiffness	Moment of inertia 5% decrease in center span	$I=2.375\ m^4$
5	Cable Young's modulus	Young's modulus 10% decrease in all cables	$E=1.8\times10^7\ t/m^2$

SAMSUNG
삼성 JV

誤差モード 図



Fid.3 Configuration of Error Mode and Camber Error

SAMSUNG
삼성 JV

誤差寄与率の推定結果

Table 4 Estimation of a values by SI method

Error mode No.	Input value of α	Estimation by SI method
1	1.00(W=14.7t/m)	1.00(W=14.7t/m)
2	1.00(W=15.3t/m)	1.12(W=15.336t/m)
3	1.00(I=2.625m^4)	0.92(I=2.615m^4)
4	1.00(I=2.375m^4)	0.98(I=2.378m^4)
5	1.00(E=1.8×10^{7}t/m^2)	1.01(E=1.798×10^{7}t/m^2)

SAMSUNG
삼성 JV

Step A と 完成系のケーブル張力の比較

Table 5 Cable tension comparison at “Step A” and final step
(Abbreviation…SI Method (SI.M), Conventional Method (C.M))

unit (ton)

Cable No.	Cable tension of "Step A"						Cable tension of final step						
	Without error model (1)	With error model (2)	After tension adjustment (3)		Residual (3)-(1)		Without error model (4)	Before tension adjustment (5)		After tension adjustment (6)		Residual (6)-(4)	
			SI.M	C.M	SI.M	C.M		SI.M	C.M	SI.M	C.M	SI.M	C.M
S1							1855.8	1887.3	1880.1	1885.8	1896.4	30.0	40.6
S2							1445.9	1433.6	1463.7	1471.7	1472.8	25.8	26.9
S3							989.8	914.5	978.9	1010.4	1002.3	20.6	12.5
S4	995.8	978.3	990.1	995.7	-5.7	-0.1	992.2	1132.3	1057.9	1006.8	1005.6	14.6	13.4
S5	768.5	746.4	796.5	767.5	28.0	-1.0	818.0	872.0	831.2	827.5	814.3	9.5	-3.7
S6	759.5	728.4	809.6	757.2	50.1	-2.3	875.4	889.6	858.8	880.4	856.9	5.0	-18.5
S7	685.0	649.0	744.6	682.4	59.6	-2.6	832.4	823.6	801.3	834.6	807.9	2.2	-24.8
C1							1855.8	1863.8	1872.4	1875.2	1872.6	19.4	16.8
C2							1445.9	1481.0	1467.5	1465.5	1464.4	19.6	18.5
C3							989.8	1047.1	1010.7	1007.7	1007.6	17.9	17.8
C4	1005.3	996.2	1019.2	1005.8	13.9	0.5	992.2	947.1	993.0	1007.2	1010.8	15.0	18.6
C5	766.5	748.3	788.3	766.1	21.8	-0.4	818.0	817.5	825.7	830.1	826.8	12.1	8.8
C6	754.7	722.1	781.6	754.1	26.9	-0.6	875.4	891.5	890.2	884.1	884.7	8.7	9.3
C7	678.0	638.3	705.5	677.3	27.5	-0.7	832.4	852.3	848.7	836.3	841.2	3.9	8.8

SAMSUNG
삼성 JV

シム調整量の比較

完成系の予測をしない通常の方法(Conventional Method)と構造同定法（SI法）のシム調整量比較。

Table 6 comparison of shim plate thickness

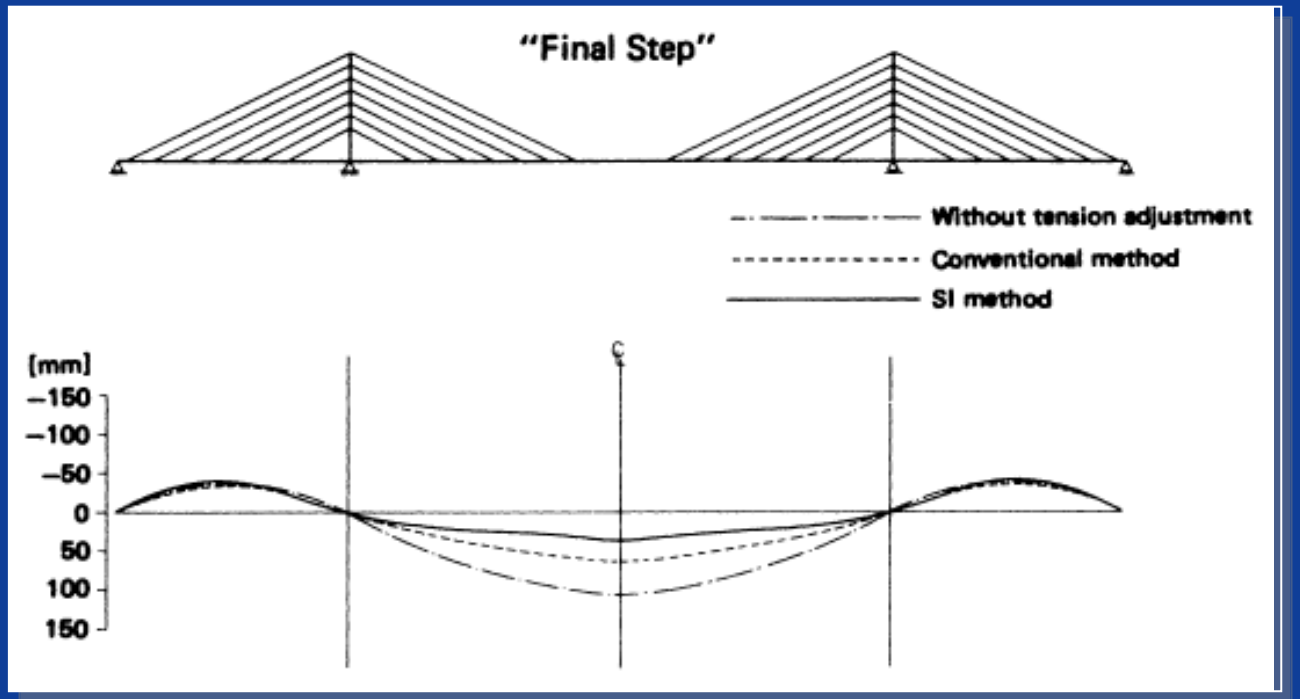
Unit[mm]

Cable No.	Conventional method		SI method	
	Step A	Final Step	Step A	Final Step
S1		35.8		67.9
S2		25.1		57.1
S3		18.9		50.3
S4	17.0		44.0	
S5	13.0		37.7	
S6	8.8		28.9	
S7	5.1		18.4	
C1		-16.6		-37.3
C2		-11.5		-30.2
C3		-6.6		-23.3
C4	-3.1		-18.0	
C5	-1.5		-12.9	
C6	-0.1		-9.1	
C7	0.4		-5.7	

SAMSUNG 삼성 JV

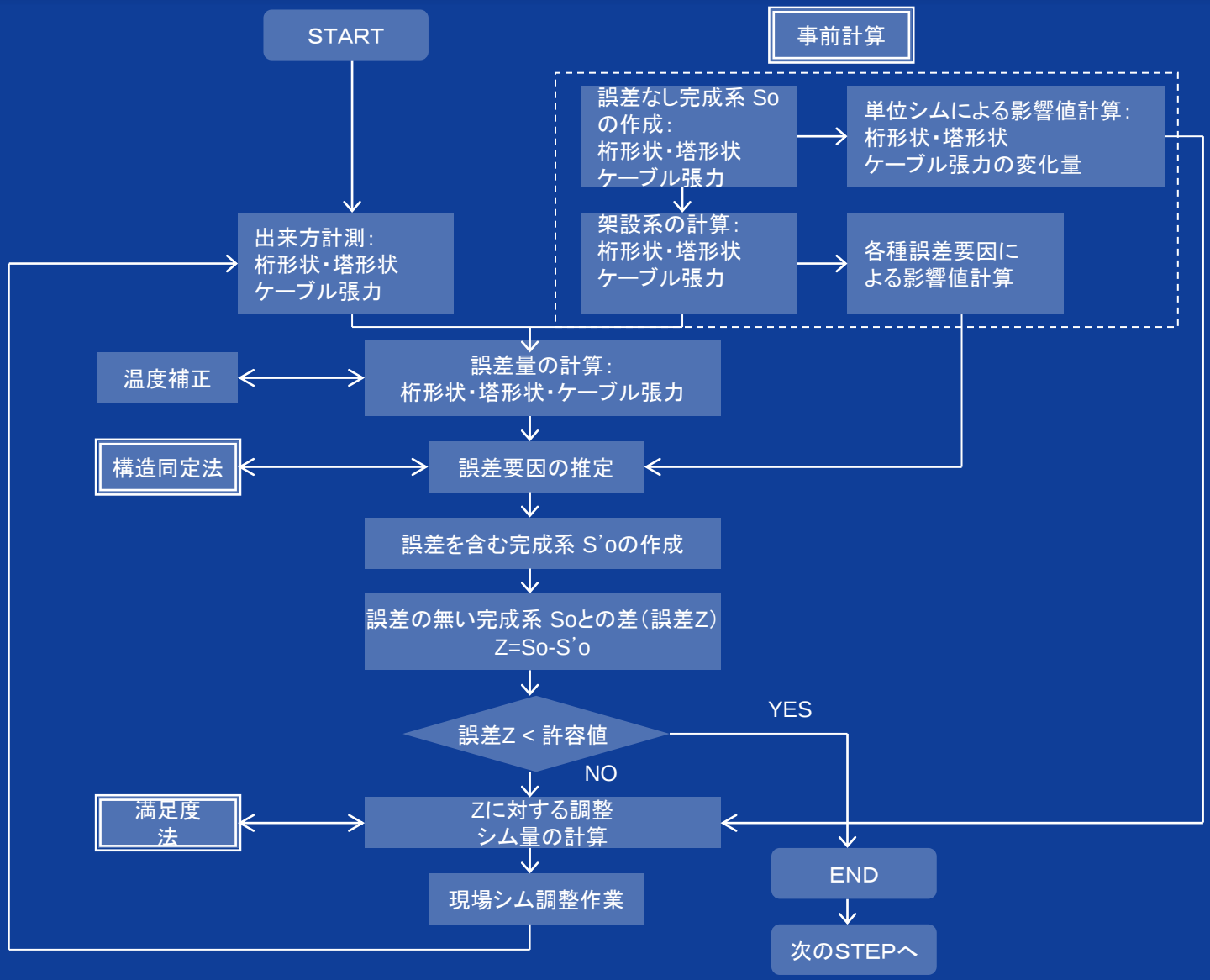
完成系の形状比較

Fig.4 Camber error comparisons in the final step



SAMSUNG
삼성 JV

本法の斜張橋架設精度管理



SAMSUNG
삼성 JV

結　論

- 誤差の要因を調査して、未架設工事の定量化が架設途中で可能となれば、完成系の予測が可能となり、適切なシム調整が可能。
- 完成形状が設計で仮定した形状に近づくと、完成形状は、優美なものとなり、部材力も過応力とならない。
- 仁川大橋でも、本方法を参考に改良した新手法を開発して架設精度の向上に注力中。

SAMSUNG
삼성 JV

SAMSUNG
삼성 JV

한국도로공사

건설교통부
ex 한국도로공사