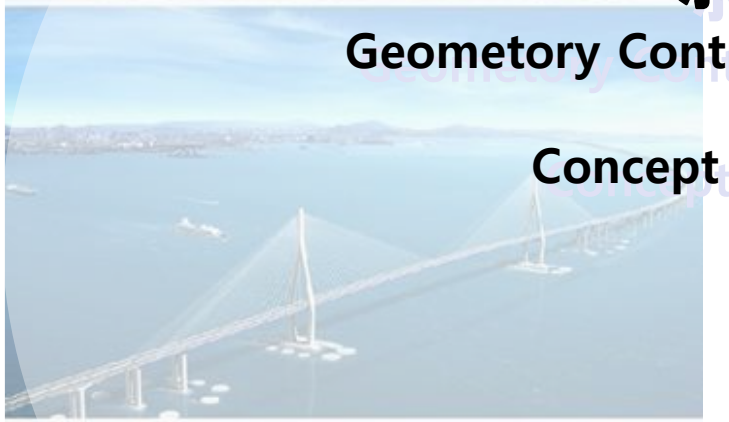


長大橋の架設精度管理と斜張つり橋の概念

Geometory Control for Long Span Suspended Cable Bridges And Concept of Cable Stayed Suspension Bridges

Samsung C & T

Dr.Hiroshi TANAKA

田中　洋

成均館大学大学院

2010年5月20日

目次

第1章　架設精度管理の概念

第2章　架設系の計算法

(Backward解析法とForward解析)

第3章　ケーブル張力調整法

第4章　誤差要因の解析＆構造同定法

第5章　斜張つり橋の概念

第1章　架設精度管理の概念

架設精度管理とは?

造物の形状とケーブル張力が、設計で仮定された値に近い管理目標値以内に納まるようにケーブル張力をコントロールして調整管理する作業

1) 構造解析誤差

2) 製作誤差

3) 架設誤差

構造同定法を通じて定量化して性格に解析をモデル化することにより架設精度の管理水準を高める。

世界の斜張橋

ノルマンディー 大橋

多々羅大橋

ミオー高架橋

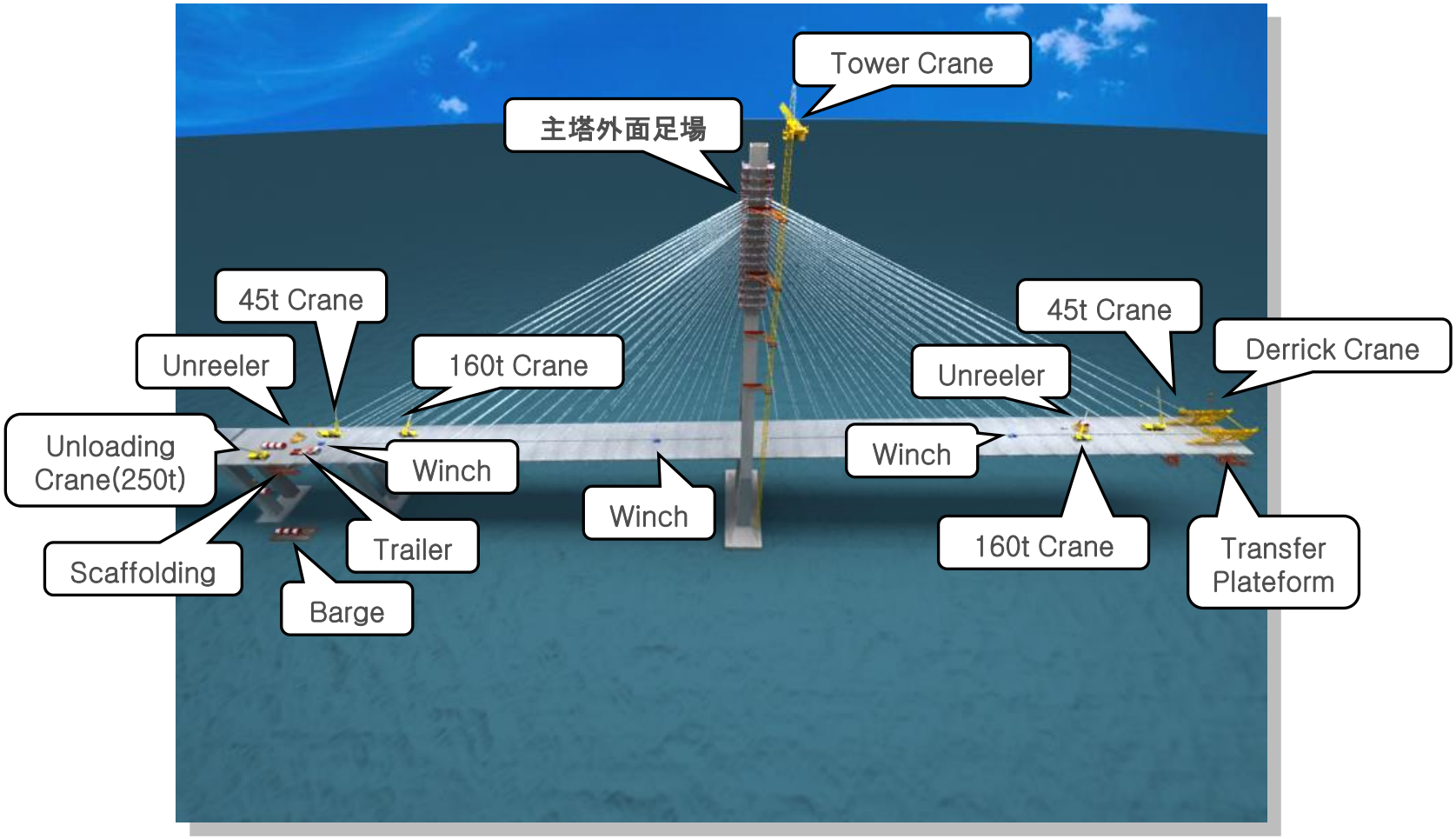
リオン・アンテリオン橋

仁川大橋

架設精度管理の主目的

- 主要管理対象は桁の形状
- 許容値以内でケーブル張力を調整
- 形状とケーブル張力の調整バランスが架設時に弾力的に対応する。

現場作業


Tower Crane
主塔外面足場
45t Crane
Unreeler
160t Crane
Unloading Crane(250t)
Winch
Scaffolding
Trailer
Barge
Winch
45t Crane
Derrick Crane
Unreeler
Winch
160t Crane
Transfer Plateform

シム調整作業

Cableに緊張力を導入して Bearing Plateと
Design Shim Plateを設置する段階

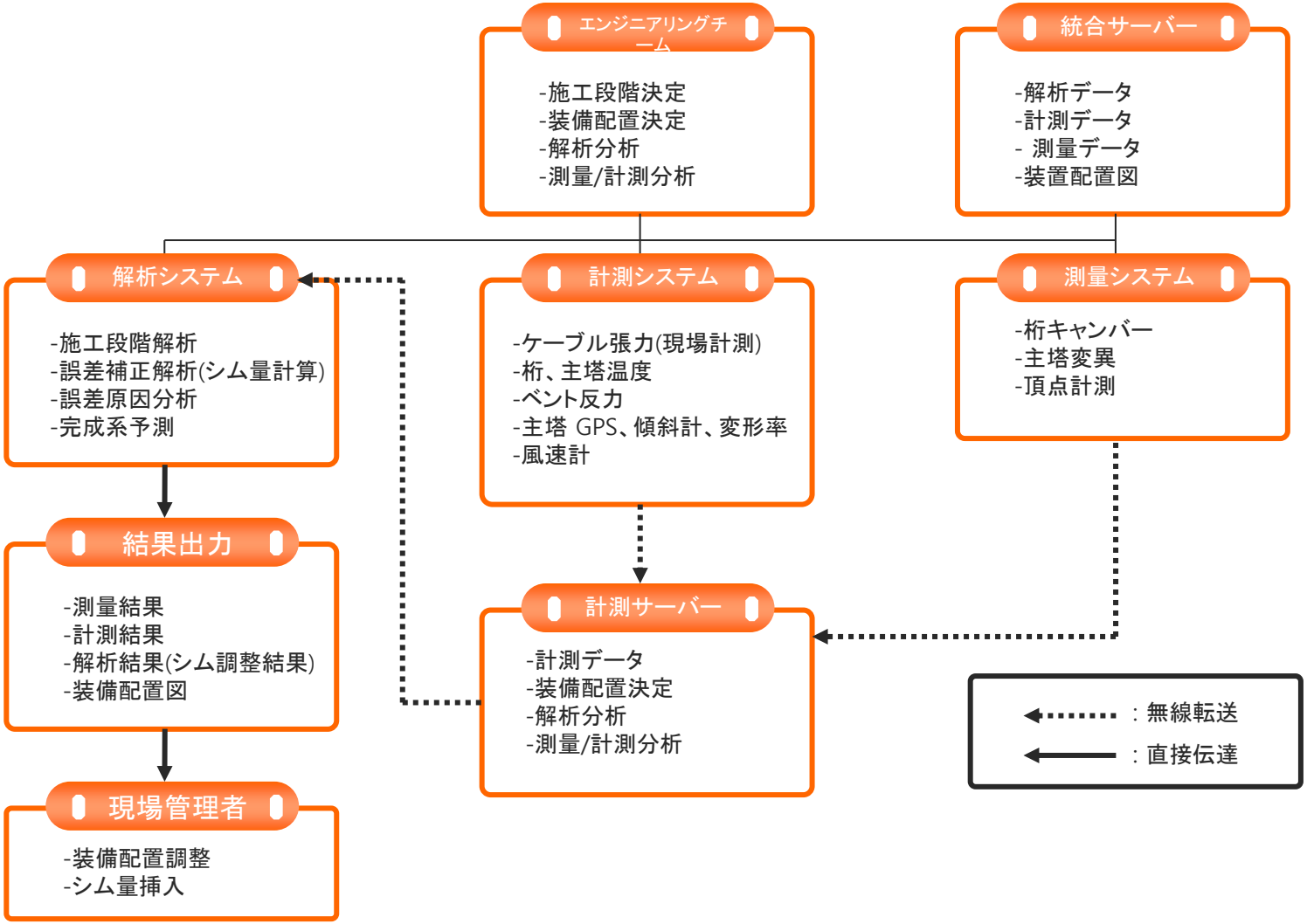
Center Span

Side Span

架設管理目標値の例

		多々羅大橋	ストーンカッター大橋	名港中央大橋	名港東大橋
橋梁緒元	支間長	890m	1088m	590m	410m
	主塔	220m	306m	195m	150m
架設誤差	塔	±(25+0.25+(L50) [±235mm]	[±200mm]	±L/2000 [±295mm]	±L/2000 [±205mm]
	主塔	H/200 [±110mm]	±H/2000 [±153mm]	±H/1500 [±130mm]	±H/1500 [±100mm]
	張力誤差	±5%以内	±10%以内		

架設精度管理システムの例



架設精度管理の必要なシステム

- 架設解析（Forward法と Backward法)
- ケーブル張力調整法
- 構造同定法

第2章　架設系の計算法

(Backward解析法とForward解析)

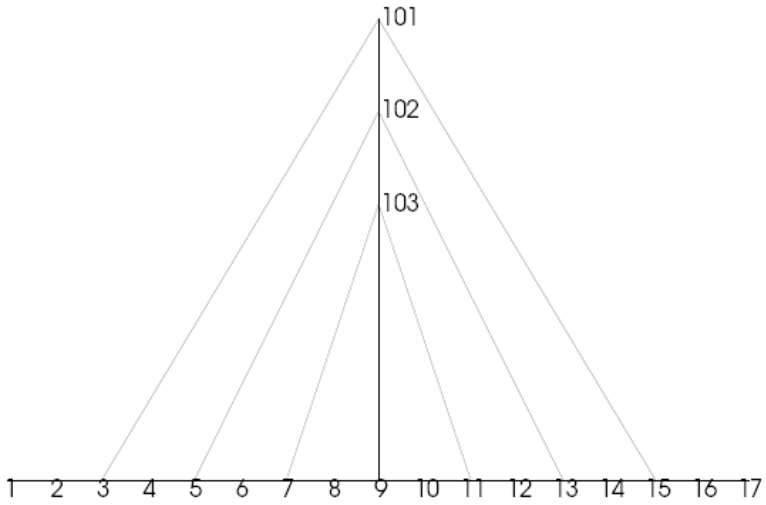
Forward解析に対して

Forward**解析による完成系の作成法**

- 簡単な 2径間 1主塔モデル使用
- モデルは分かりやすくするように現実性は無視し、例題として扱い
- 桁の剛度とケーブル部材は最適の数値ではない。

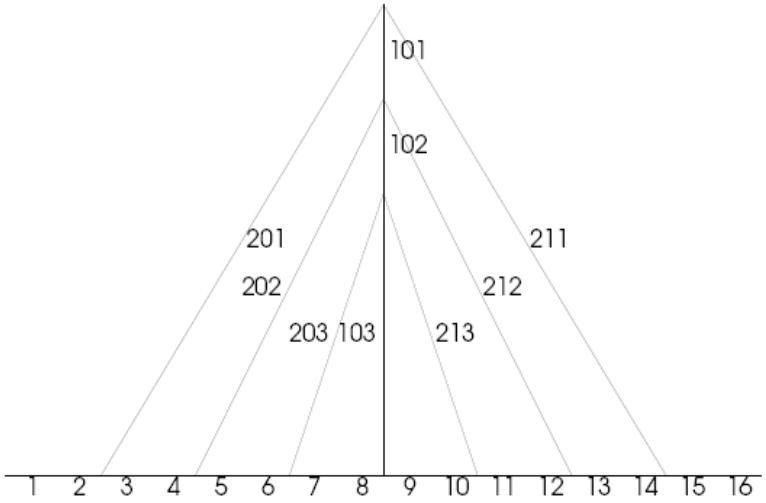
格点番号

FW-BW CHECK JOINT No.



部材番号

FW-BW CHECK MEMBER No.



荷重

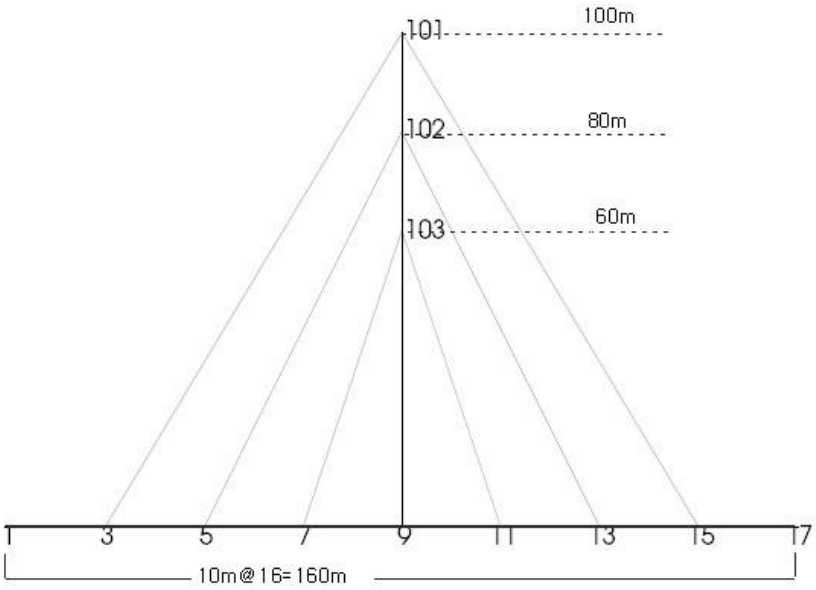
- 死荷重(DC)
  - ・桁　：　部材 No.1~No.16　　150KN/m (分布荷重)
  - ・塔　：　部材 No.101~No.103　70KN/m (分布荷重)

- プレストレース(PS)
  - ・ケーブル　:部材 No.201, No.211　1800KN
    - 部材 No.202, No.212　700KN
    - 部材 No.203, No.213　600KN

- 死荷重(DW)
  - ・桁　：　部材No.1~No.16　　100KN/m

完成系座標

格点番号	完成時 ①	
	X(m)	Y(m)
1	0.0000	0.0000
2	10.0000	0.0000
3	20.0000	0.0000
4	30.0000	0.0000
5	40.0000	0.0000
6	50.0000	0.0000
7	60.0000	0.0000
8	70.0000	0.0000
9	80.0000	0.0000
10	90.0000	0.0000
11	100.0000	0.0000
12	110.0000	0.0000
13	120.0000	0.0000
14	130.0000	0.0000
15	140.0000	0.0000
16	150.0000	0.0000
17	160.0000	0.0000
101	80.0000	−100.0000
102	80.0000	−80.0000
103	80.0000	−60.0000



部材データ

部材	断面積(m^2)	剛度(m^4)	ヤング係数 KN/m^2
桁	0.500	1.000	2.0×10^8
塔	1.000	2.00	2.0×10^8
ケーブル	0.010	0.000	1.95×10^8

完成系の計算

以上の入力データと使用、完成系計算

① 前死荷重(DC)の計算

② PS計算

③ 後死荷重(DW)の計算

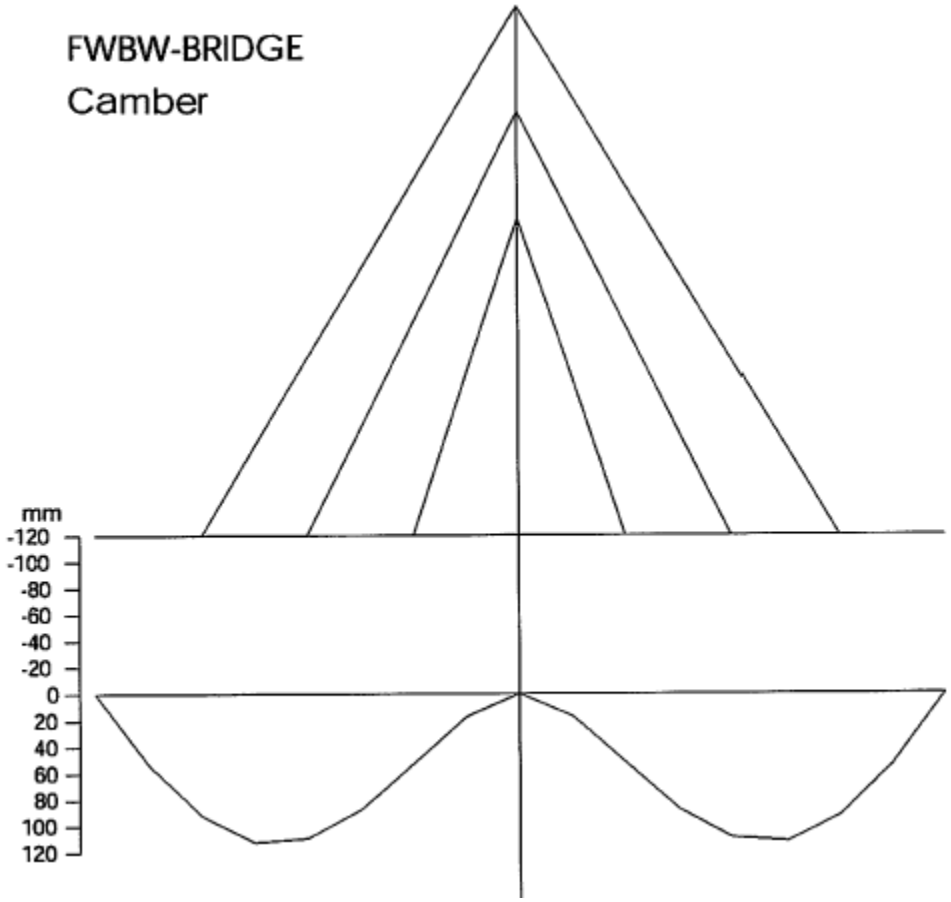
完成系の作成 (微少変形法)

Backward解析に夜完成系

完成系= ①+ ②+ ③

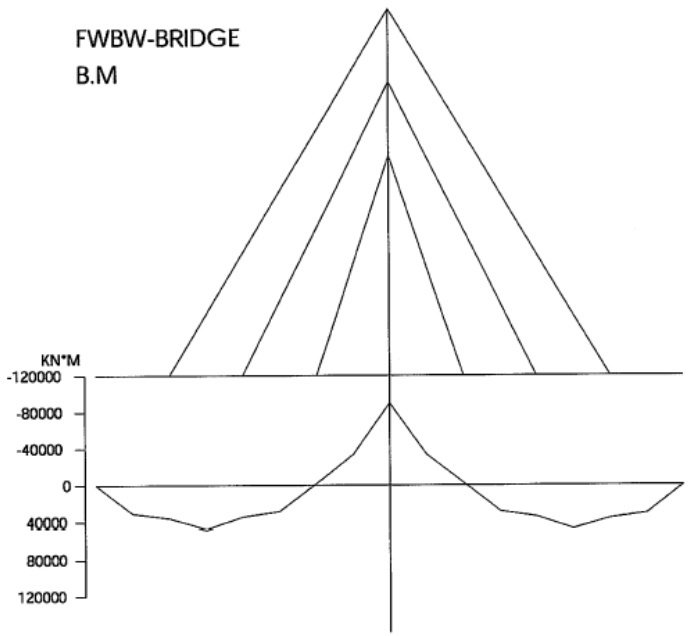
完成系のたわみの計算結果

格点番号	DC ①		PS ②		DW ③		①＋②＋③	
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
1	0.0007	0.0000	0.0007	0.0000	0.0005	0.0000	0.0019	0.0000
2	0.0007	0.0470	0.0007	−0.0247	0.0005	0.0311	0.0019	0.0534
3	0.0007	0.0818	0.0007	−0.0434	0.0005	0.0541	0.0019	0.0925
4	0.0007	0.0983	0.0006	−0.0511	0.0005	0.0650	0.0018	0.1122
5	0.0006	0.0947	0.0005	−0.0482	0.0004	0.0626	0.0016	0.1092
6	0.0005	0.0747	0.0004	−0.0368	0.0003	0.0494	0.0012	0.0873
7	0.0003	0.0442	0.0003	−0.0212	0.0002	0.0292	0.0009	0.0522
8	0.0002	0.0143	0.0001	−0.0066	0.0001	0.0095	0.0004	0.0172
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	−0.0002	0.0143	−0.0001	−0.0066	−0.0001	0.0095	−0.0004	0.0172
11	−0.0003	0.0442	−0.0003	−0.0212	−0.0002	0.0292	−0.0009	0.0522
12	−0.0005	0.0747	−0.0004	−0.0368	−0.0003	0.0494	−0.0012	0.0873
13	−0.0006	0.0947	−0.0005	−0.0482	−0.0004	0.0626	−0.0016	0.1092
14	−0.0007	0.0983	−0.0006	−0.0511	−0.0005	0.0650	−0.0018	0.1122
15	−0.0007	0.0818	−0.0007	−0.0434	−0.0005	0.0541	−0.0019	0.0925
16	−0.0007	0.0470	−0.0007	−0.0247	−0.0005	0.0311	−0.0019	0.0534
17	−0.0007	0.0000	−0.0007	0.0000	−0.0005	0.0000	−0.0019	0.0000
101	0.0000	0.0046	0.0000	0.0024	0.0000	0.0019	0.0000	0.0090
102	0.0000	0.0044	0.0000	0.0021	0.0000	0.0018	0.0000	0.0083
103	0.0000	0.0037	0.0000	0.0016	0.0000	0.0015	0.0000	0.0068


FWBW-BRIDGE
Camber
mm
-120
-100
-80
-60
-40
-20
0
20
40
60
80
100
120

完成系の桁曲げモーメントと軸力

	DC ①		PS ②		DW ③		①+②+③	
格点番号	M(kNm)	N(KN)	M(kNm)	N(KN)	M(kNm)	N(KN)	M(kNm)	N(KN)
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	25653.75	0.00	-12213.10	0.00	17004.13	0.00	30444.78	0.00
3	36307.51	-566.29	-24426.21	-926.09	24008.27	-382.59	35889.57	-1874.97
4	41399.43	-566.29	-21204.44	-926.09	27388.95	-382.59	47583.94	-1874.97
5	31491.36	-1351.78	-17982.67	-1239.14	20769.63	-910.88	34278.32	-3501.80
6	22292.99	-1351.78	-8499.92	-1239.14	14716.03	-910.88	28509.10	-3501.80
7	-1905.38	-1725.83	982.84	-1428.88	-1337.58	-1166.46	-2260.12	-4321.17
8	-29881.98	-1725.83	16157.70	-1428.88	-19723.74	-1166.46	-33448.02	-4321.17
9	-72858.59	-1725.83	31332.56	-1428.88	-48109.89	-1166.46	-89635.92	-4321.17
10	-29881.98	-1725.83	16157.70	-1428.88	-19723.74	-1166.46	-33448.02	-4321.17
11	-1905.38	-1351.78	982.84	-1239.14	-1337.58	-910.88	-2260.12	-3501.80
12	22292.99	-1351.78	-8499.92	-1239.14	14716.03	-910.88	28509.10	-3501.80
13	31491.36	-566.29	-17982.67	-926.09	20769.63	-382.59	34278.32	-1874.97
14	41399.43	-566.29	-21204.44	-926.09	27388.95	-382.59	47583.94	-1874.97
15	36307.51	0.00	-24426.21	0.00	24008.27	0.00	35889.57	0.00
16	25653.75	0.00	-12213.10	0.00	17004.13	0.00	30444.78	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



完成系の桁反力

	DC ①		PS ②		DW ③		TOTAL	
格点番号	RX(KN)	RY(KN)	RX(KN)	RY(KN)	RX(KN)	RY(KN)	RX(KN)	RY(KN)
1	0.00	-3315.38	0.00	1221.31	0.00	-2200.41	0.00	-4294.48
9	0.00	-24369.25	0.00	-2442.62	0.00	-11599.17	0.00	-38411.04
17	0.00	-3315.38	0.00	1221.31	0.00	-2200.41	0.00	-4294.48
TOTAL	0.00	-3100.00	0.00	0.00	0.00	-1600.00	0.00	-4700.00

完成系の計算

ケーブル無応力長(Lo)の計算

DL = Lo x N/(ExA) ①

Lo+DL=L ②

DLを消去して ④で求める。

$Lo(A + \frac{N}{EA})=L$ ③

$\therefore Lo=L/(1 + \frac{N}{EA})$ ④

ケーブル番号	完成時 L L(m)	完成時 N N(KN)	無応力長LO L0(m)	伸び DL DL(m)	チェック L0+DL(m)
201	116.619	3644.300	116.40146	0.21754	116.61900
202	89.4427	3637.680	89.27616	0.16654	89.44270
203	63.2456	2591.100	63.16167	0.08393	63.24560
211	116.619	3644.300	116.40146	0.21754	116.61900
212	89.4427	3637.680	89.27616	0.16654	89.44270
213	63.2456	2591.100	63.16167	0.08393	63.24560

$E = 1.95 \times 10^8$ KN/m²

A = 0.01m²

Forward完成系の計算

桁及び塔の初期入力座標

格点番号	完成時 ①		曲げ ②		製作座標 ③＝①−②	
	X(m)	Y(m)	DX(m)	DY(m)	X0(m)	Y0(m)
1	0.0000	0.0000	0.0019	0.0000	−0.0019	0.0000
2	10.0000	0.0000	0.0019	0.0534	9.9981	−0.0534
3	20.0000	0.0000	0.0019	0.0925	19.9981	−0.0925
4	30.0000	0.0000	0.0018	0.1122	29.9982	−0.1122
5	40.0000	0.0000	0.0016	0.1092	39.9984	−0.1092
6	50.0000	0.0000	0.0012	0.0873	49.9988	−0.0873
7	60.0000	0.0000	0.0009	0.0522	59.9991	−0.0522
8	70.0000	0.0000	0.0004	0.0172	69.9996	−0.0172
9	80.0000	0.0000	0.0000	0.0000	80.0000	0.0000
10	90.0000	0.0000	−0.0004	0.0172	90.0004	−0.0172
11	100.0000	0.0000	−0.0009	0.0522	100.0009	−0.0522
12	110.0000	0.0000	−0.0012	0.0873	110.0012	−0.0873
13	120.0000	0.0000	−0.0016	0.1092	120.0016	−0.1092
14	130.0000	0.0000	−0.0018	0.1122	130.0018	−0.1122
15	140.0000	0.0000	−0.0019	0.0925	140.0019	−0.0925
16	150.0000	0.0000	−0.0019	0.0534	150.0019	−0.0534
17	160.0000	0.0000	−0.0019	0.0000	160.0019	0.0000
101	80.0000	−100.0000	0.0000	0.0090	80.0000	−100.0090
102	80.0000	−80.0000	0.0000	0.0083	80.0000	−80.0083
103	80.0000	−60.0000	0.0000	0.0068	80.0000	−60.0068

Forward解析による完成系の作成法

- 桁と塔の製作座標を初期座標として適用
- 桁と塔及びケーブルの死荷重の負荷
- ケーブルの無応力をケーブル部材として扱い

Backward解析との比較

完成系変位(BW-FW比較)

格点番号	BW　曲げ		FW　曲げ		差　BW－FW	
	DX(m)	DY(m)	DX(m)	DY(m)	DX(m)	DY(m)
1	0.0019	0.0000	0.0011	0.0000	0.0008	0.0000
2	0.0019	0.0534	0.0014	0.0533	0.0005	0.0001
3	0.0019	0.0925	0.0016	0.0924	0.0003	0.0001
4	0.0018	0.1122	0.0014	0.1120	0.0004	0.0002
5	0.0016	0.1092	0.0012	0.1090	0.0004	0.0002
6	0.0012	0.0873	0.0009	0.0871	0.0003	0.0002
7	0.0009	0.0522	0.0007	0.0521	0.0002	0.0001
8	0.0004	0.0172	0.0004	0.0172	0.0000	0.0000
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	−0.0004	0.0172	−0.0004	0.0172	0.0000	0.0000
11	−0.0009	0.0522	−0.0007	0.0521	−0.0002	0.0001
12	−0.0012	0.0873	−0.0009	0.0871	−0.0003	0.0002
13	−0.0016	0.1092	−0.0012	0.1090	−0.0004	0.0002
14	−0.0018	0.1122	−0.0014	0.1120	−0.0004	0.0002
15	−0.0019	0.0925	−0.0016	0.0924	−0.0003	0.0001
16	−0.0019	0.0534	−0.0014	0.0533	−0.0005	0.0001
17	−0.0019	0.0000	−0.0011	0.0000	−0.0008	0.0000
101	0.0000	0.0090	0.0000	0.0090	0.0000	0.0000
102	0.0000	0.0083	0.0000	0.0083	0.0000	0.0000
103	0.0000	0.0068	0.0000	0.0068	0.0000	0.0000

Backward解析との比較

完成系モーメント(BW-FW比較)

格点番号	BW	FW	差 BW－FW	
	MI(KN*m)	MI(KN*m)	DMI(KN*m)	%
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	30444.78	30426.73	18.05	0.06
3	35889.57	35853.19	36.38	0.10
4	47583.94	47494.99	88.95	0.19
5	34278.32	34178.62	99.70	0.29
6	28509.10	28444.20	64.90	0.23
7	−2260.12	−2245.63	−14.49	0.64
8	−33448.02	−33354.34	−93.68	0.28
9	−89635.92	−89541.92	−94.00	0.10
10	−33448.02	−33354.34	−93.68	0.28
11	−2260.12	−2245.63	−14.49	0.64
12	28509.10	28444.20	64.90	0.23
13	34278.32	34178.61	99.71	0.29
14	47583.94	47494.99	88.95	0.19
15	35889.57	35853.19	36.38	0.10
16	30444.78	30426.73	18.05	0.06
17	0.00	0.00	0.00	0.00

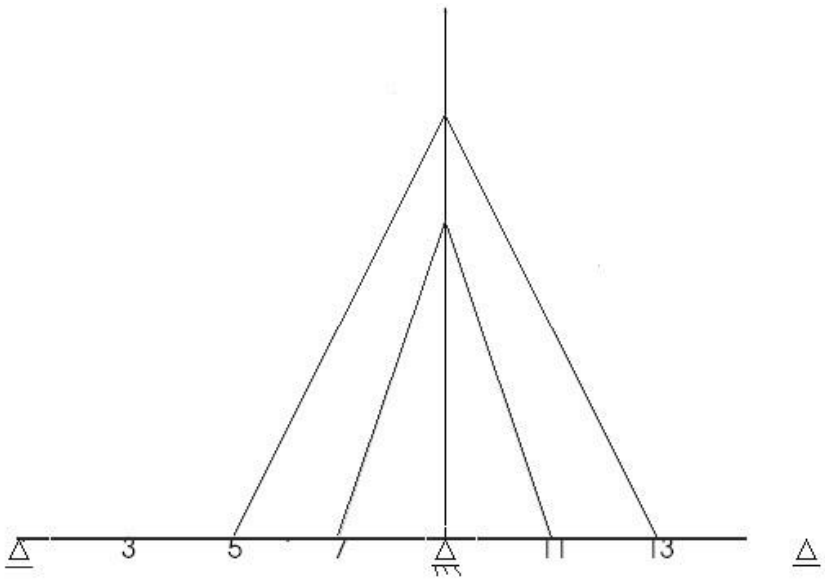
完成系軸力(BW-FW比較)

格点番号	BW	FW	差 BW－FW	
	NI(KN)	NI(KN)	NI(KN)	%
201	3644.30	3645.47	−1.17	0.00
202	3637.68	3635.85	1.83	0.05
203	2591.10	2588.49	2.61	0.10
211	3644.30	3645.47	−1.17	−0.03
212	3637.68	3635.85	1.83	0.05
213	2591.10	2588.49	2.61	0.10

架設系の比較

架設系は部材 No.14~16を除去

ケーブル部材 No.201と 211はまだ架設していない状態



架設系変形後の座標

格点番号	BW　曲げ		FW　曲げ		差　BW－FW	
	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)	X(m)	Y(m)
1	−0.0012	0.0000	−0.0019	0.0000	0.0007	0.0000
2	9.9988	−0.0033	9.9984	−0.0034	0.0004	0.0001
3	19.9988	−0.0062	19.9985	−0.0063	0.0003	0.0001
4	29.9989	−0.0103	29.9986	−0.0103	0.0003	0.0000
5	39.9991	−0.0119	39.9988	−0.0118	0.0003	−0.0001
6	49.9993	−0.0092	49.9992	−0.0092	0.0001	0.0000
7	59.9995	−0.0028	59.9994	−0.0028	0.0001	0.0000
8	69.9998	0.0028	69.9997	0.0028	0.0001	0.0000
9	80.0000	0.0000	80.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10	90.0002	−0.0185	90.0002	−0.0186	0.0000	0.0001
11	100.0004	−0.0431	100.0005	−0.0432	−0.0001	0.0001
12	110.0007	−0.0620	110.0007	−0.0621	0.0000	0.0001
13	120.0009	−0.0659	120.0010	−0.0662	−0.0001	0.0003
14	130.0010	−0.0497	130.0012	−0.0501	−0.0002	0.0004
15						
16						
17						
101	79.9233	−100.0038	79.9229	−100.0038	0.0004	0.0000
102	79.9360	−80.0032	79.9357	−80.0032	0.0003	0.0000
103	79.9491	−60.0025	79.9489	−60.0025	0.0002	0.0000

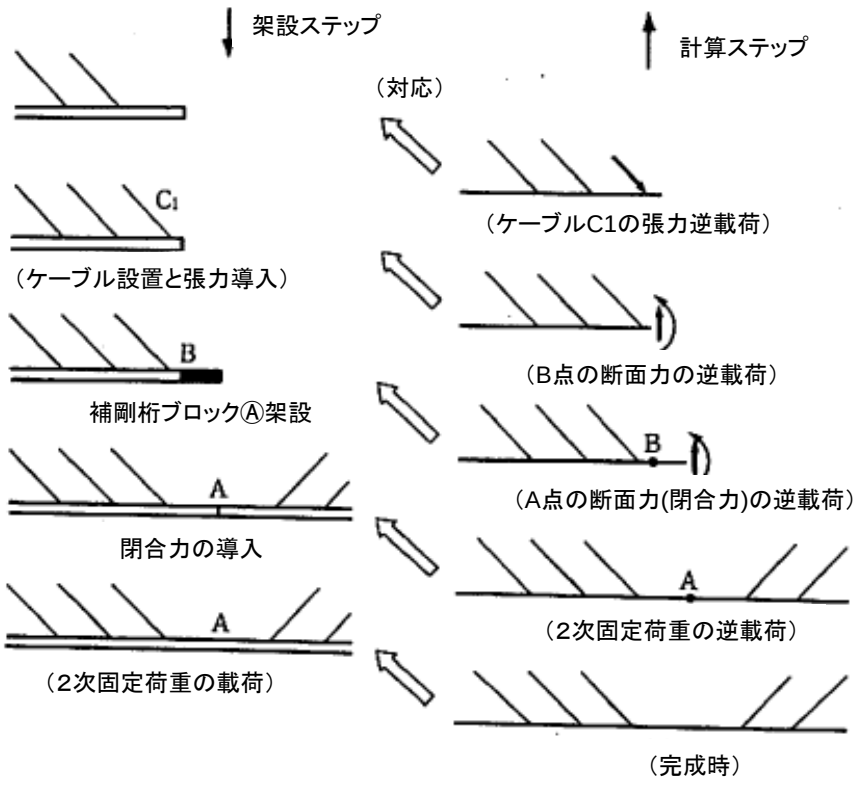
架設系桁曲げモーメント

格点番号	BW	FW	差 BW−FW	
	MI(KN*m)	MI(KN*m)	DMI(KN*m)	%
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	29062.50	29063.00	−0.50	0.00
3	43125.00	43125.84	−0.84	0.00
4	42187.50	42188.52	−1.02	0.00
5	26250.00	26250.65	−0.65	0.00
6	20418.78	20421.95	−3.17	−0.02
7	−412.45	−391.16	−21.29	5.16
8	−16644.51	−16603.46	−41.05	0.25
9	−47876.57	−47850.91	−25.66	0.05
10	−21541.21	−21497.49	−43.72	0.20
11	−13692.83	−13666.58	−26.25	0.19
12	−3096.41	−3091.78	−4.63	0.15
13	−7500.00	−7500.30	0.30	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00

架設系ケーブル軸力

格点番号	BW	FW	差 BW−FW	
	NI(KN)	NI(KN)	NI(KN)	%
202	2806.97	2804.99	1.98	0.07
203	2065.93	2063.97	1.96	0.09
212	3007.91	3006.00	1.91	0.06
213	1870.81	1868.43	2.38	0.13

Backward法


架設ステップ
計算ステップ
（対応）
C1
（ケーブル設置と張力導入）
B
補剛桁ブロックⒶ架設
A
閉合力の導入
A
（2次固定荷重の載荷）
（ケーブルC1の張力逆載荷）
（B点の断面力の逆載荷）
B
（A点の断面力(閉合力)の逆載荷）
A
（2次固定荷重の逆載荷）
（完成時）

誤差系の作成法

- Forward解析法の長所：
  誤差を含む系を簡単に作成可能

(EX)

シム調整をする架設系では前死荷重(DC)が桁に載荷されている。

後死荷重(DW)はケーブルが設置され、張力調整を完了した後に載荷

ケーブル調整と行う時点で前死荷重が10%増加したと
想定して誤差計を計算。

誤差系の入力方法

前死荷重(DC)W=150KN/mを

W=150 x 1.1=165KN/mに変更して入力

誤差系の張力変動

ケーブル張力 6~8% 張力増加

桁負担分 2~4% → ケーブル負担が大きい

誤差なしと誤差(DC10%増加)ありのケーブル張力比較

部材番号	誤差（なし）	誤差（DC10%UP）	差	
	NI(KN)	NI(KN)	NI(KN)	%
202	2804.99	3041.37	236.38	8.43
203	2063.97	2210.39	146.42	7.09
212	3006.00	3262.48	256.48	8.53
213	1868.43	1995.3	126.87	6.79

誤差なしと誤差ありの塔&桁Level(m)比較

部材番号	誤差なし（目標値）	誤差あり（計測値）
	塔＆桁のLEVEL（m）	塔＆桁のLEVEL（m）
101	79.9137	79.9234
3	−0.0051	0.0030
5	−0.0107	−0.0021
7	−0.0018	0.0016
11	−0.0464	−0.0401
13	−0.0722	−0.0550

第3章　ケーブル張力調整法

最適シム量決定問題の定式化

シム量調整のためのプログラムは論文(古田・田中他著)
「設計者の満足度を考慮したファージケーブル調整法 」

See

JSCE No.598 I-44 pp.381~390 1998.7

シム量調整のための入力

未知数のシム量 {X}と張力変化 {⊿T}の関係：

{⊿T} = [S] {X}　　[1]

[S]：単位シム量[10mm]による張力変化の影響マトリックス

現場計測の張力誤差とシム調整を行った後の張力関係

{Fe}：　現場での計測張力誤差

{Fo}　：　シム量{X}による調整後の誤差

{Fo} = {Fe} + {⊿T} = {Fe}　+ [S] {X}　　[2]

最適化問題

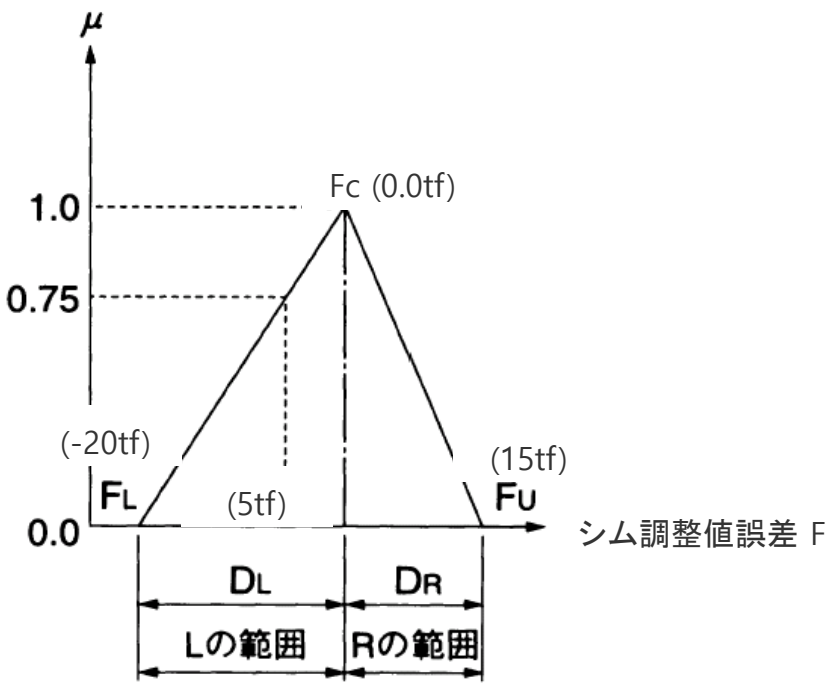
シム調整後の誤差をできるだけ最小化する

$$\{F_L\} \leqq \{Fo\} \leqq \{F_U\} \quad [3]$$

$\{F_L\}$： シム調整値の誤差下限値
$\{F_U\}$： シム調整値の誤差上限値

$$\{F_L\} \leqq \{Fe\} + [S]\{X\} \leqq \{F_U\} \quad [4]$$
$$\{F_L\}-\{Fe\} \leqq [S]\{X\} \leqq \{F_U\}-\{Fe\} \quad [5]$$

「満足度： μ 」の概念導入



Fcシムの調整値の誤差重心値：

通常 Fc “0” [= 0 kN]

シム調整値の誤差下限値：-20KN
シム調整値の誤差上限値：15KN

決定した調整値誤差が -5KNと仮定すると
満足度 μは次式で定義

μ = 1 - (-5kN)/(-20kN)= 0.75
調整誤差値：0KNの場合
μ = 1 - (0kN)/(-20kN)= 1.0

調整誤差値：-20kNの場合
μ = 1 - (20kN)/(-20kN)= 0.0

目的関数の設定

- 最適化基準 ： 架設時に調整するケーブルはペア

  → 各々の満足度を最大にする。

- Min-Max原理として満足度の最小値を最大にする。

$$\mu(X) = \max \{ \min(\mu 1(X) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot, \mu_M(X) \}$$

M：ケーブル張力と桁レベルなどの調査項目

ケーブル張力調整の例題

誤差系の作成法で作成した架設系を例題に採用

部材番号

部材番号	誤差（なし）	誤差（DC10%UP）	差	
	NI(KN)	NI(KN)	NI(KN)	%
202	2804.99	3041.37	236.38	8.43
203	2063.97	2210.39	146.42	7.09
212	3006.00	3262.48	256.48	8.53
213	1868.43	1995.3	126.87	6.79

	誤差なし（目標値）	誤差あり（計測値）
부재번호	塔＆桁のLEVEL（m）	塔＆桁のLEVEL（m）
101	79.9137	79.9234
3	−0.0051	0.0030
5	−0.0107	−0.0021
7	−0.0018	0.0016
11	−0.0464	−0.0401
13	−0.0722	−0.0550

SHIM_NFZ *FWBW03_STEP-6

ME=202	R1=3041.3700	RO=2804.9900	R=236.3800	DR=-173.9473	R+DR=62.4327	SHIM =-23.28MM)	0.3757
ME=203	R1=2210.3900	RO=2063.9700	R=146.4200	DR=-83.9873	R+DR=62.4327	SHIM =-7.85(MM)	0.3757
ME=212	R1=3262.4800	RO=3006.0000	R=256.4800	DR=-194.0473	R+DR=62.4327	SHIM =-30.49(MM)	0.3757
ME=213	R1=1995.3000	RO=1868.4300	R=126.8700	DR=-94.7682	R+DR=-32.1018	SHIM =-10.82(MM)	0.6790
JX=101	R1=79.9234	RO=79.9137	R=0.0097	DR=0.0527	R+DR=0.0624	0.3757	
JY=3	R1=0.0030	RO=-0.0051	R=0.0081	DR=-0.0022	R+DR=0.0059	0.9411	
JY=5	R1=-0.0021	RO=-0.0107	R=0.0086	DR=-0.0044	R+DR=0.0042	0.9582	
JY=7	R1=0.0016	RO=-0.0018	R=-0.0034	DR=-0.0056	R+DR=-0.0022	0.9781	
JY=11	R1=-0.0401	RO=-0.0464	R=0.0063	DR=0.0188	R+DR=-0.0251	0.7486	
JY=13	R1=-0.0550	RO=-0.0722	R=0.0172	DR=0.0452	R+DR=0.0624	0.3757	

入力フォーマット

プログラム名：SHIM NFZ20

タイトル名：*SHIM NFZ *FWBW03_STEP-6

影響値が保存されたファイル名：FWBW-NV02_INF.TAP

	計測値	目標値	許容 下限値	許容 上限値	中央 値	シム 下限値	シム 上限値	シム 中央値
M202	3041.37	2084.99	-100.0	100.0	0.0	-150	150	0.0
M203	2210.39	2063.97	-100.0	100.0	0.0	-150	150	0.0
M212	3262.48	3006.00	-100.0	100.0	0.0	-150	150	0.0
M213	1995.30	1868.43	-100.0	100.0	0.0	-150	150	0.0
X101	79.9234	79.9137	-0.100	0.100	0.0	-150	150	0.0
Y3	0.0030	-0.0051	-0.100	0.100	0.0	-150	150	0.0
Y5	-0.0021	-0.0107	-0.100	0.100	0.0	-150	150	0.0
Y7	0.0016	0.0018	-0.100	0.100	0.0	-150	150	0.0
Y11	-0.0401	0.0646	-0.100	0.100	0.0	-150	150	0.0
Y13	-0.0550	-0.0722	-0.100	0.100	0.0	-150	150	0.0

* Mは부재, Xは X座標(橋軸方向), Yは Y座標(レベル)を示す

出力フォーマット

- シム調整値

ケーブル No.202は 23.28mmのシムを抜く

ケーブル No.203は 8.5mmのシムを抜く

ケーブル No.212は 30.49mmのシムを抜く

ケーブル No.213は 10.82mmのシムを抜く

実際シムは定数値なので 23, 8, 30, 10mmのシムを抜く

シム調整語の桁キャンバー改善

桁 位置	調整前誤差 A[m]	調整後誤差 B[m]	差 A - B[m]	満足度 [μ]
3	0.0081	0.0059	0.0022	0.9411
5	0.0086	0.0042	0.0044	0.9582
7	0.0034	-0.0022	0.0056	0.9781
11	0.0063	0.0251	-0.0188	0.7486
13	0.0172	0.0624	-0.0452	0.3757

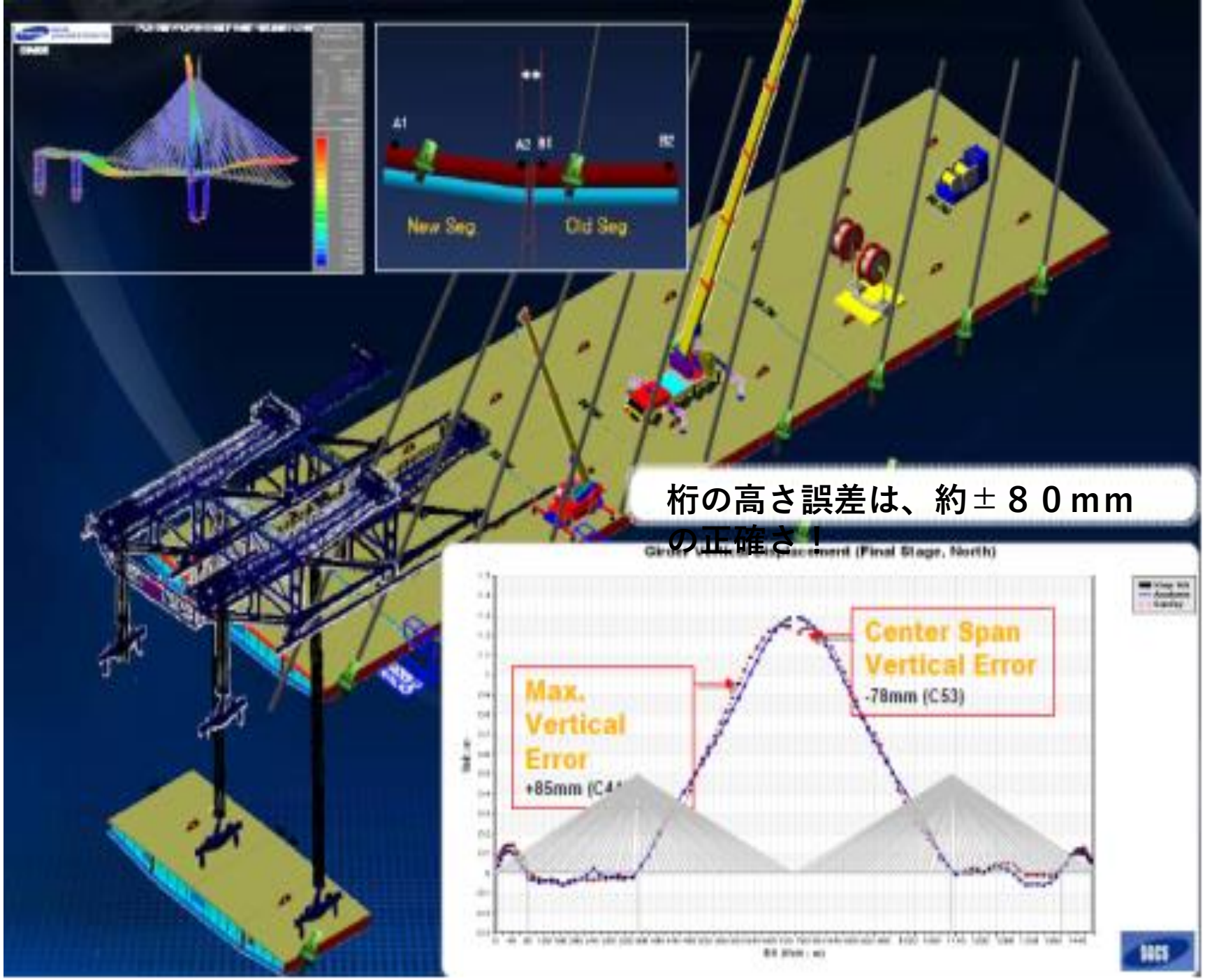
シム調整後のケーブル張力

ケーブル張力改善

ケーブル番号	調整前誤差 A[KN]	調整後誤差 B[KN]	差 A-B[KN]	満足度 [μ]
202	236.38	62.4327	173.9473	0.3757
203	146.42	62.4327	83.9873	0.3757
212	256.48	62.4327	194.0473	0.3757
213	126.87	32.1018	94.7682	0.6790

長大橋の架設形状管理（仁川大橋）

- 中央径間の張り出し、各STEPごとにシム調整実施（深夜）
- 計算スキームは、ファジィ満足度理論を発展させた三星理論
- EXCELで計算


A1
A2
B1
B2
New Seg
Old Seg
桁の高さ誤差は、約±８０ｍｍ
の正確さ！
Center Span
Vertical Error
-78mm (C53)
Max.
Vertical
Error
+85mm

ファジィ満足度理論の発展法

$$\underset{\Delta L_0}{\mathrm{Min}}\,\Pi = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{nm}\left(\frac{u_i^c - u_i^A(\mathrm{L}_0+\Delta\mathrm{L}_0)}{\alpha_i\cdot(u_{i\max}-u_{i\min})}\right)^2 + \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{nc}\left(\frac{T_j^c - T_j^A(\mathrm{L}_0+\Delta\mathrm{L}_0)}{\beta_j\cdot(T_{j\max}-T_{j\min})}\right)^2$$

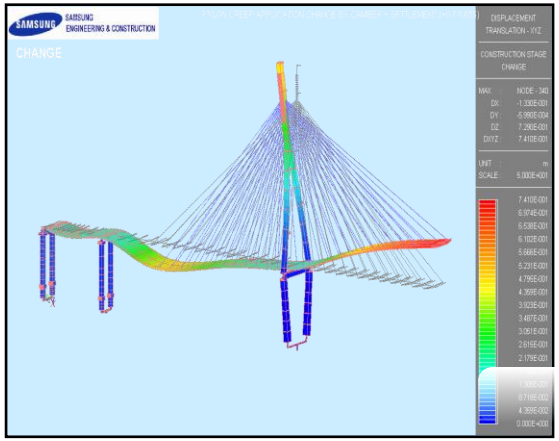
$$\text{subject to } u_{i\,\min} \le u_i \le u_{i\,\max}$$

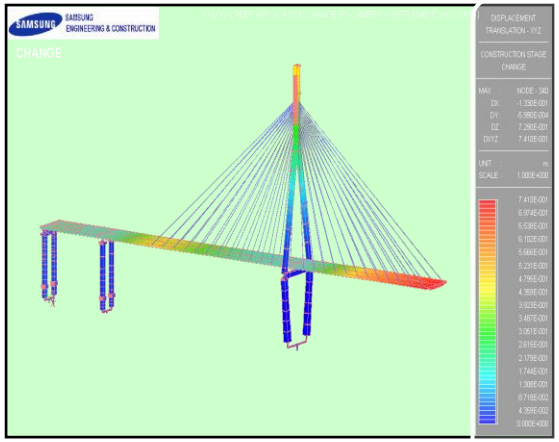
$$\text{subject to } T_{\min} \le T^A(\mathrm{L}_0+\Delta\mathrm{L}_0) \le T_{\max} \qquad (1)$$

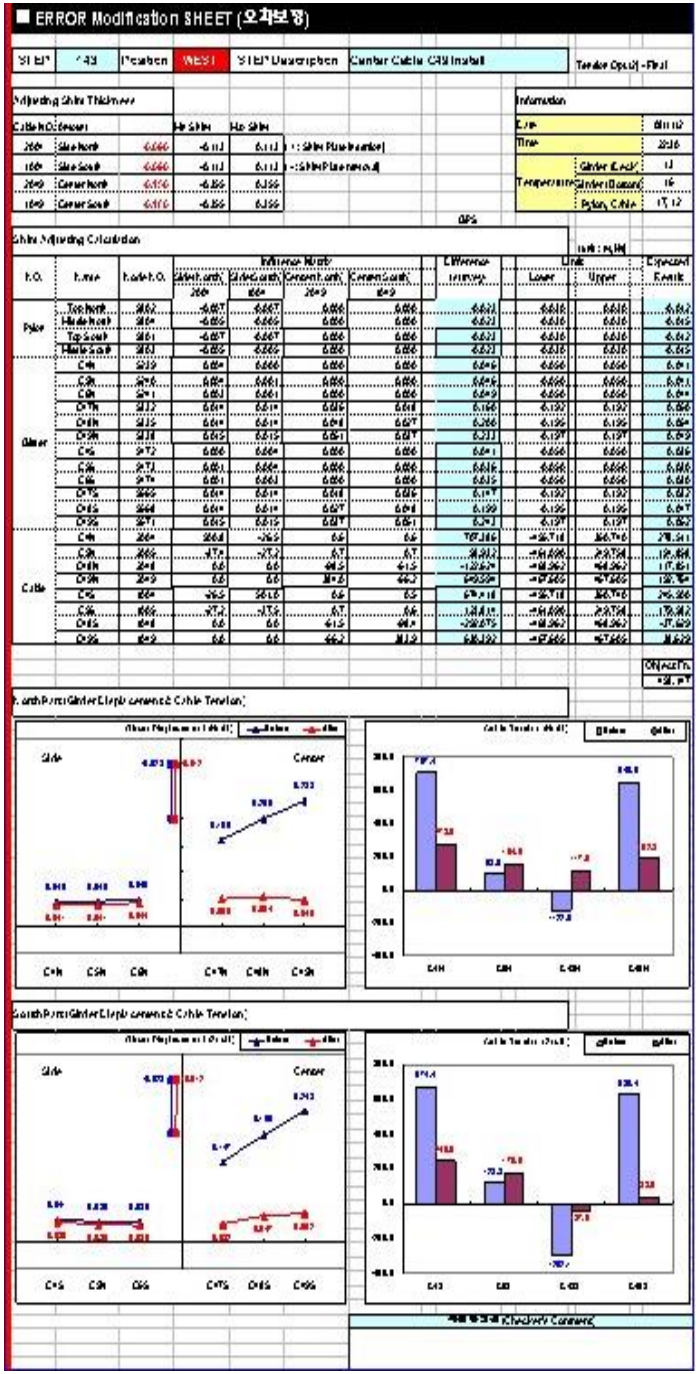
$$\text{subject to } \Delta\mathrm{L}_{0\min} \le \Delta\mathrm{L}_0 \le \Delta\mathrm{L}_{0\max}$$

ここで、u_i^c は目標形状を、u_i^A は実際構造物の変位を示し、$u_{i\max}$ 、$u_{i\min}$ は各々構造物変位誤差の上限値と下限値を示す。T_i^c, T_i^A は目標張力及び実際構造物のケーブル張力を、$T_{\max}$ と $T_{\min}$ は各々ケーブル張力に対する管理限界値の上限値及び下限値である。L_0 はケーブルの無応力長、ΔL_0 はケーブル長さ調整量を示し、nm 及び nc は変位測定点の個数と測定ケーブルの個数である。式(1)は非線型式で、非線型拘束条件を持つ最適化問題になり、最適ΔL_0 を求めるために加重値係数α_i, β_i を調整する。

誤差補正原理

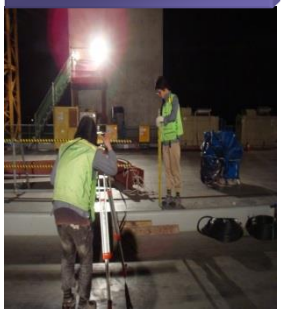






張力調整手順

測量



張力測定

結果分析

再緊張

シム量挿入

調整完了

桁閉合
（GIRDER_CLOSING）

形状管理精度結果

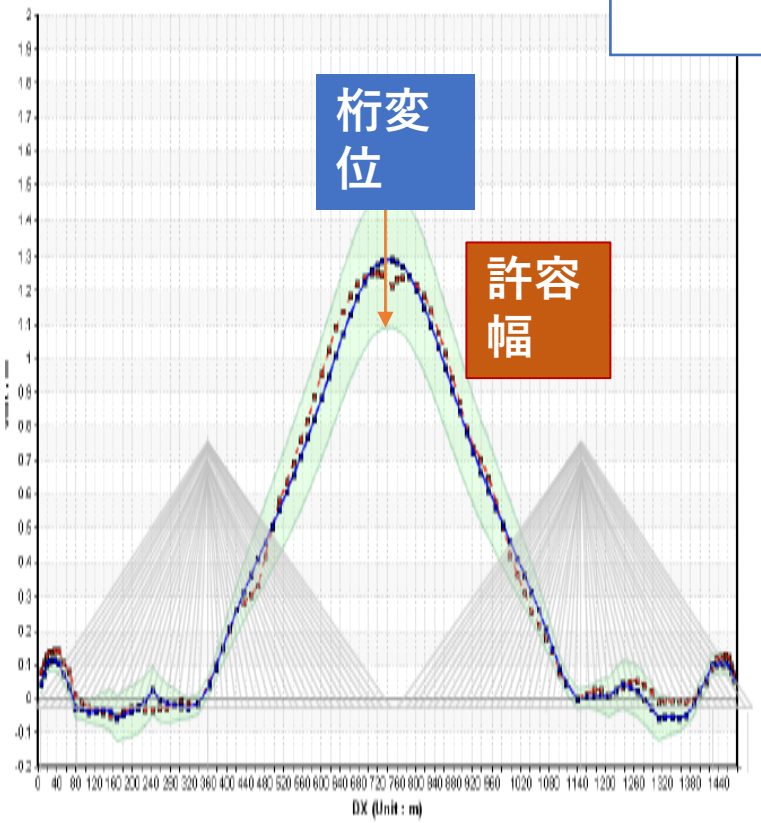


Fig. 7. Final Girder Geometry after Closing (Web in Northern Section)

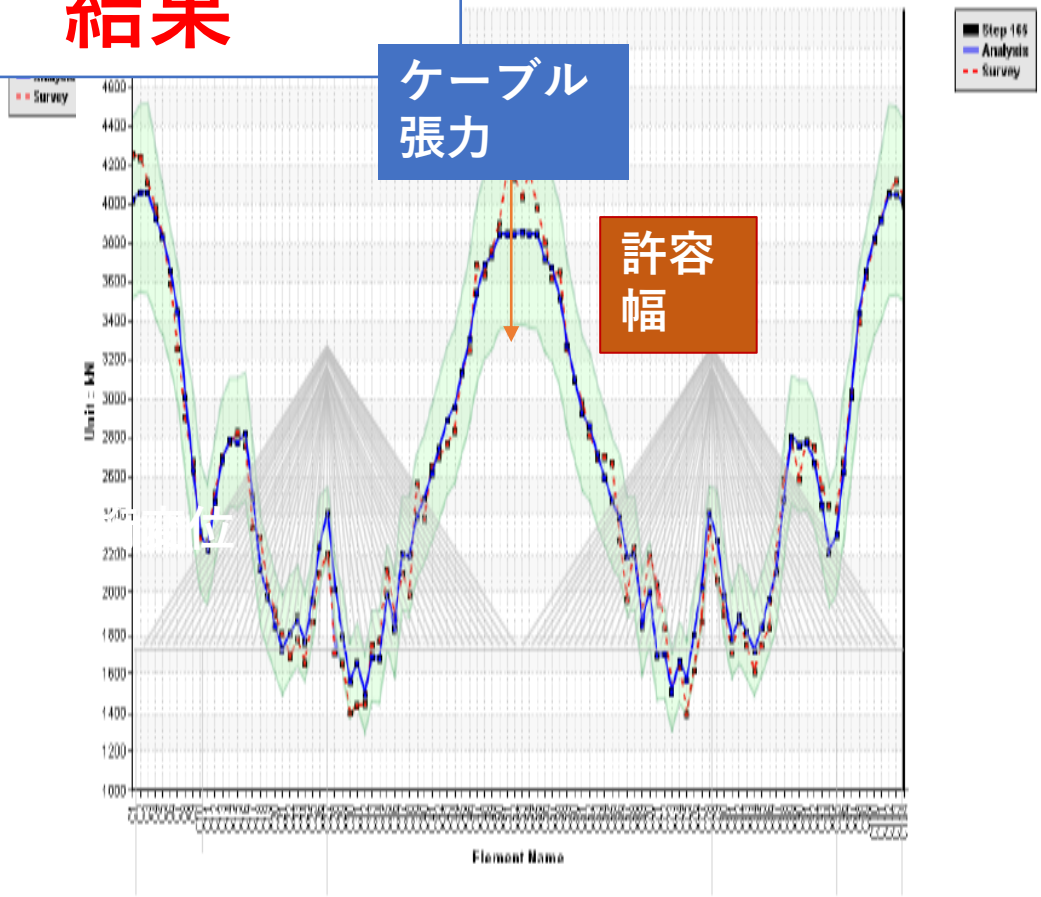
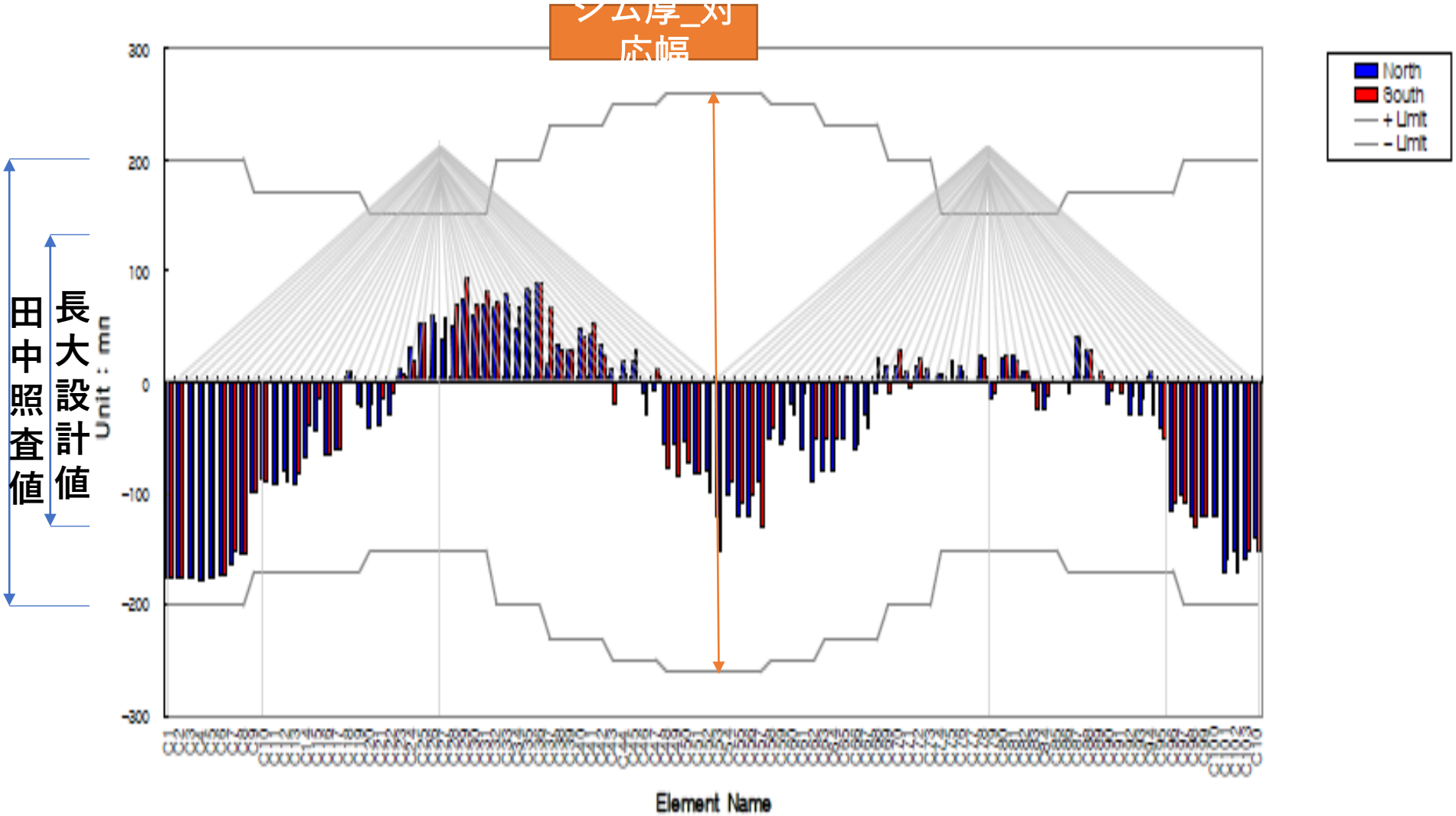


Fig. 8. Final Cable Tension Distribution after Closing (Cable in Northern Section)

Ref) DK.Im H.Tanaka JK.Yoo HS.Kim CH.Kim MG. Yoon: Development and Application of Integrated Geometry Control System in Incheon Bridge pp.134-141
Proceeding of International Commemorative Symposium for the Incheon Bridge ; 23th September,2009 Songdo ConvensiA, Incheon, Korea



Ref) DK.Im H.Tanaka JK.Yoo HS.Kim CH.Kim MG. Yoon: Development and Application of Integrated Geometry Control System in Incheon Bridge pp.134-141
Proceeding of International Commemorative Symposium for the Incheon Bridge ; 23th September,2009 Songdo ConvensiA, Incheon, Korea

平成22年度　田中賞　（作品部門）

第4章　誤差要因分析 & 満足同定法

目的

- 精度管理の精度を高める
- 事前に誤差による影響把握ができるので
  予測が不可能が事態に対する準備が出来る → 費用逓減
- 無理な作業の減り → 安定性向上
- 予め事態を予測して行動可能 → 時間節約

誤差解析の方法(1)

誤差を含む構造系の静的挙動を
Forward 解析で求める

Forward 解析とは?

完成状態で Backward 計算を行い
荷重を考慮しない状態(無応力)を求め、
この時の格点座標(製作キャンバー)を入力値として利用
ケーブル部材は無応力長(ℓ_0)を利用

誤差解析の方法(2)

- Forward 解析がプログラムに必要
- キャンバー値の座標を出発値として死荷重を載せ、ケーブルを入力すると Backward 解析の完成系とほとんど一致する形状を得られる
  → 部材物の座標値と部材力がほとんど同一する。

誤差の設定

構造物の誤差は設計、製作、架設に起因

誤差の原因

設計

構造解析
(架設系も含み)
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
ケーブルの長さ

架設

架設
組立

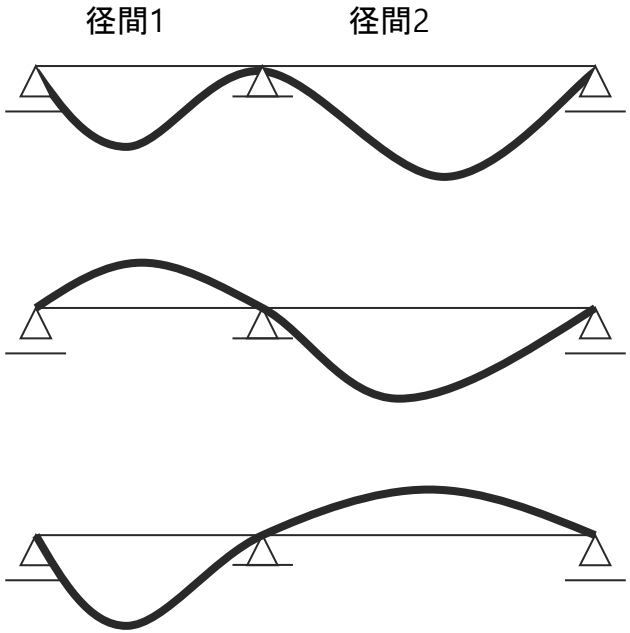
誤差要因の例

	分類	誤差の原因	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%	仮定地 E=2.0x10^{7}t/m^{2}に対してAS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	サグ誤差	Δf=200mm	プレケーブル時にサぐが 200mm小さいと仮定 本州基準によると 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	選定されたハンガー部材に無応力長ℓ_0±20mmの誤差を予想	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%の誤差予想	9
		溶接キャンバー誤差		溶接キャンバーに予想誤差による	省略
主塔関係	解析誤差	断面積	± 5%		10
		剛度	± 5%		11
	架設誤差	塔の鉛直誤差	水平方向 ± 75mm	プレスタンディング状態で 水平方向に ±75mm の誤差を予想	12
	製作誤差	塔の数値誤差	鉛直方向 ± 20mm	無応力状態で ±20mmの誤差を 予想	13

誤差モードとは?

① Forward 解析で誤差を要因別に入れた完成系を求める。

② 誤差がない完成系との座標と断面力の差を求める。



(a) 計測キャンバーの誤差モード

II

(b) 径間2だけ重量増加誤差モード

+

(c) 径間1だけ剛度現象モード

* 誤差労の誤差モードによる展開の例 (a)=(b)+(c)

誤差解析の方法

- 実際架設現場で発生する誤差{ Z_i}は誤差モード { F_i}に誤差寄与率{α_i}をかけた総合に近似

- 誤差寄与率ベクトル{ α_i}が架設途中計測で得たデータをもとにして構造同定(SI)の手法を使用して決定
  → 最小自乗法
- 架設時に計測される計測値と設計値 → 誤差量 Z

- Zがキャンバー及び断面力の誤差を成分にするベクトル、多くの誤差要因の線形的重複

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

(F_i ：誤差モード)

誤差解析の方法

$$Z = F \cdot \alpha$$

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

M：計測項目数(断面力及び変位など)

N：誤差要因の数

F：誤差影響マトリックス(F_i を熱方向ベクトルとするマトリックス)

α：誤差寄与率ベクトル

誤差解析の方法

誤差要因の抽出及び展開

構造物断面力及び変位計測値 R

誤差のない構造での計測値　R_0

$$R=R_0+Z$$

両辺の差の自乗化を最小化する条件計算

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

誤差解析の方法

目的関数 ϕ の最小条件

$$\frac{\partial \phi}{\partial \alpha} = 0 \qquad [1]$$

R_0-R=r とすると、

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

誤差解析の方法

式(2)を式(1)に代入 → 次式で各誤差要因の寄与率 α を求める

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

無次元化及び計測値の精度を考慮するために、誤差要因の寄与率に ρ を導入

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

ただ、ρ は対角マトリックス

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

誤差解析の方法

- 実際計算では施行錯誤必要
- 吊橋橋梁の形式及び規模が変化によって修正必要
- ρ 決定のためのファジィ線形回帰分析を応用した方法開発
- 現実的には誤差寄与率ベクトル　$\{\alpha_i\}$は架設系によって変化
- 予め仮定した誤差要因以外にも誤差が生じる可能性が存在

誤差を含む完成系予測(1)

誤差要因を同定できるなら Forware 解析で架設途中
完成系予測可能

未架設工程でも誤差寄与ベクトル{ α_i }が発生すると仮定

誤差寄与率ベクトル { α_i }の変化が小さい時、毎回変化させる必要はない。
→ 弾力的な運用が必要

誤差寄与ベクトル{$\tilde{\alpha}i$}に幅を置くと完成系の予測も幅を持つことになる。
→ ~は数値に幅を持つファジィ量

誤差を含む完成系予測 (2)

最高&最悪のシナリオを基にした精密な架設精度管理が可能

→ 各架設ステップで許容できる架設誤差が明確になる。

→ 必要以上の精度管理の防止

→ 経験が足りない吊橋橋梁を架設する場合、予想できなかった状況発生防止

→ 安定性と経済性に優れる架設精度管理が可能

(EX)

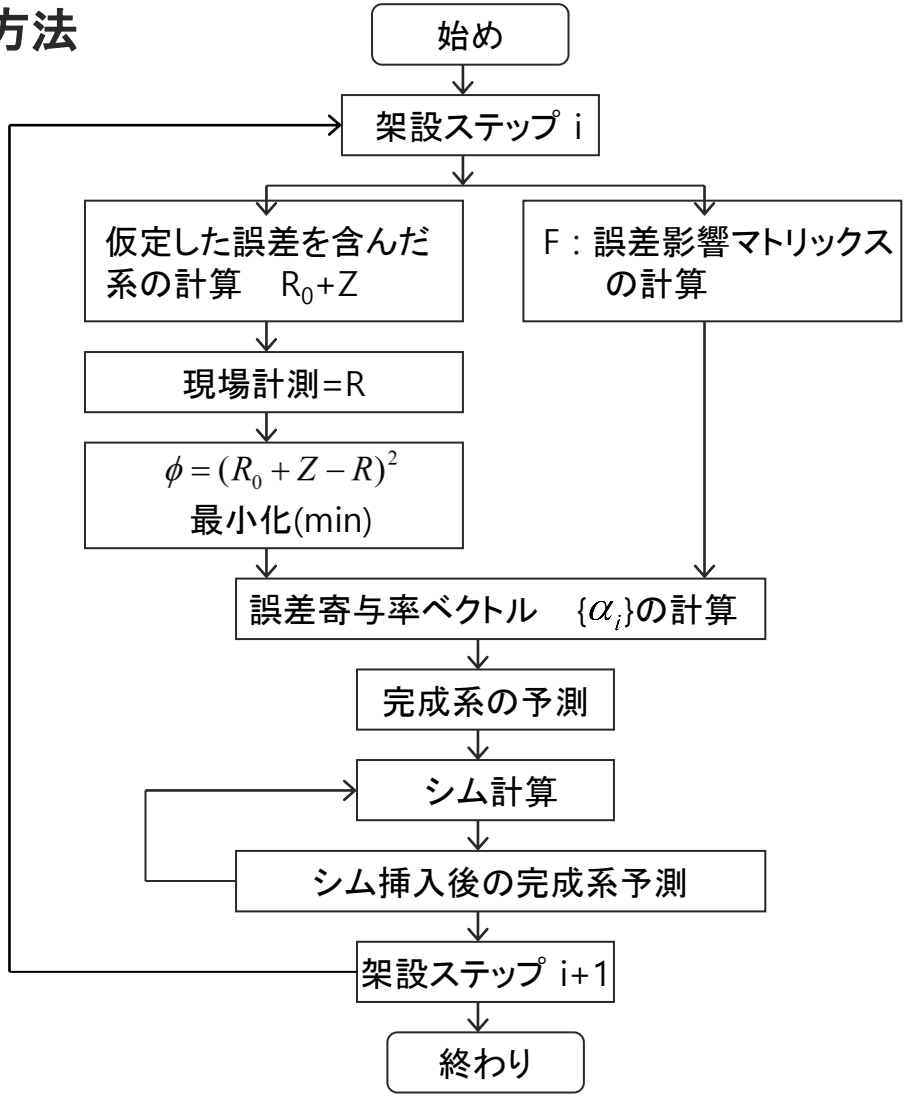
菅原城北大橋

橋長 476mの 3径間連続鋼斜張橋

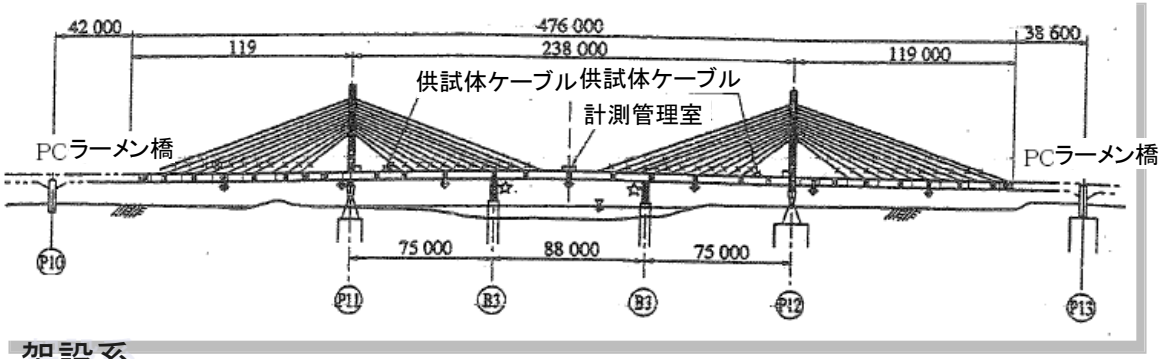
側径間を端材架設で張り出し架設

クリープが未完了した PCラーメン橋と空中で接合されてヒンジ部構成

架設途中の完成系予測方法



菅原城北大橋



架設系

完成系

数値計算の例

モデルと構造諸元
Fig-1　3径間の斜張橋，Table-1：構造諸元，Table-2：死荷重

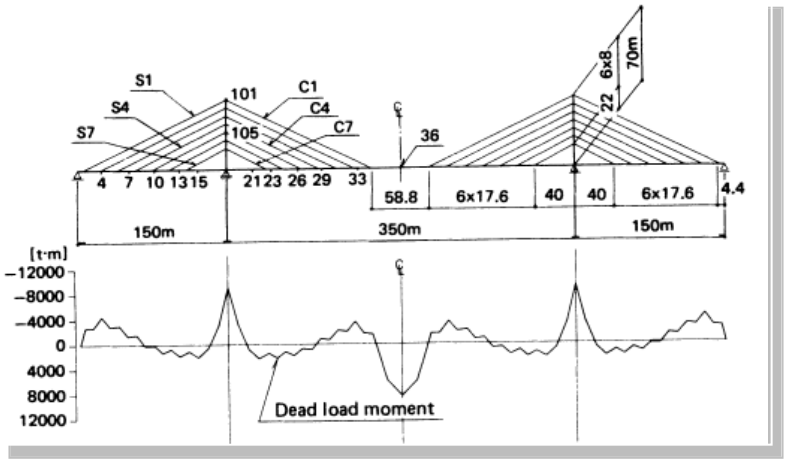


Fig.1　Bridge Model and Moment Diagram of “Final Step”

	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

架設方法

張り出し方法使用
“Step A”は下記の架設ステップ

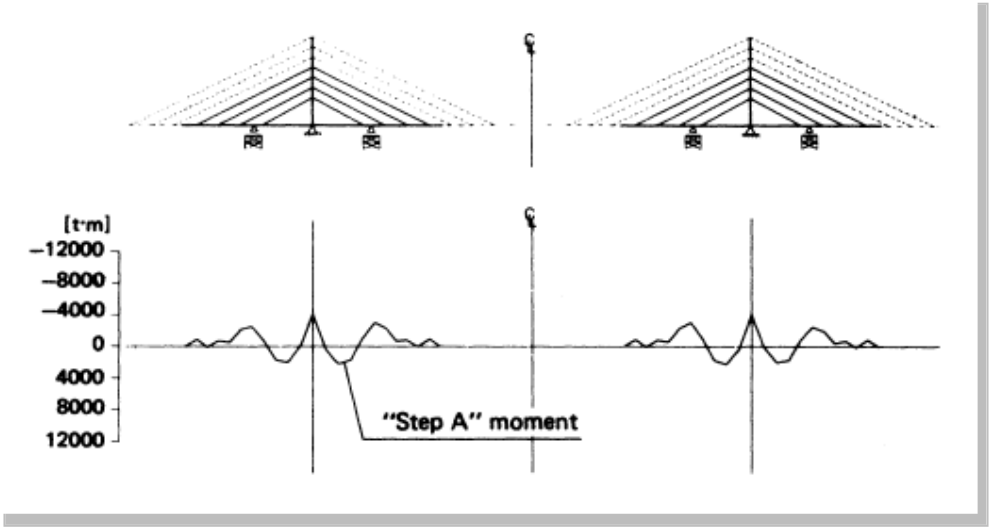


Fig.2　Construction phase “Step A” and Moment Diagram

誤差要因

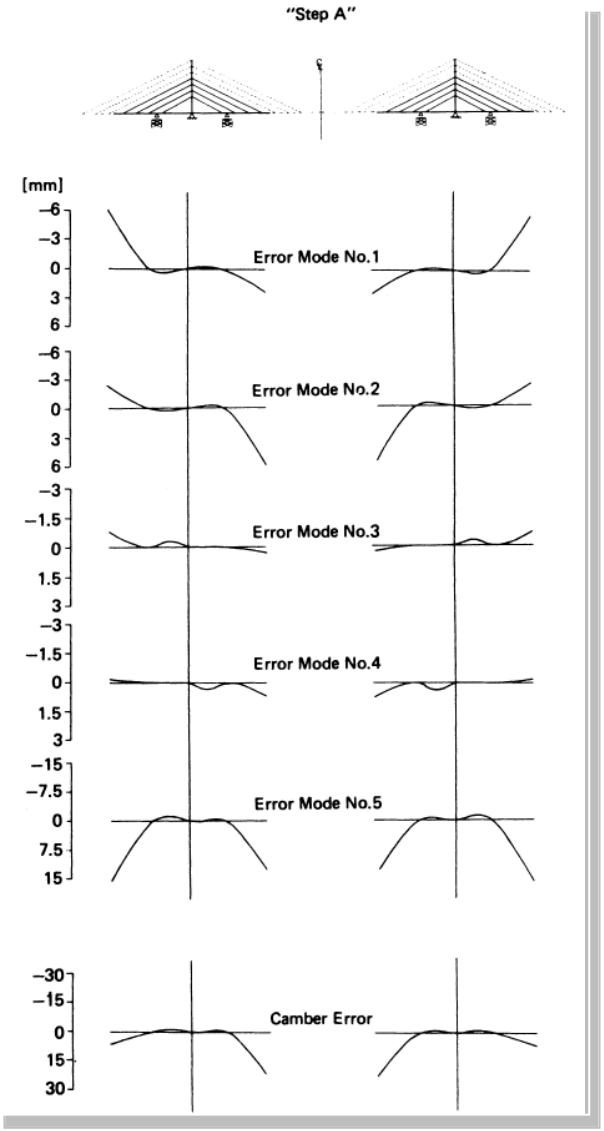
StepAで下記のような5個の誤差要因が含められていると仮定

各々の要因によって誤差モード発生

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	$E=1.8\times10^7\ t/m^2$

誤差モード



Fid.3　Configuration of Error Mode and Camber Error

誤差寄与率の推定結果

Table 4 Estimation of a value 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)

StepAと完成系のケーブル張力比較

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

シム調整量の比較

完成系を予測しない一般的な方法
(Conventional Method)と完成系を予測するSI法のシム量の差

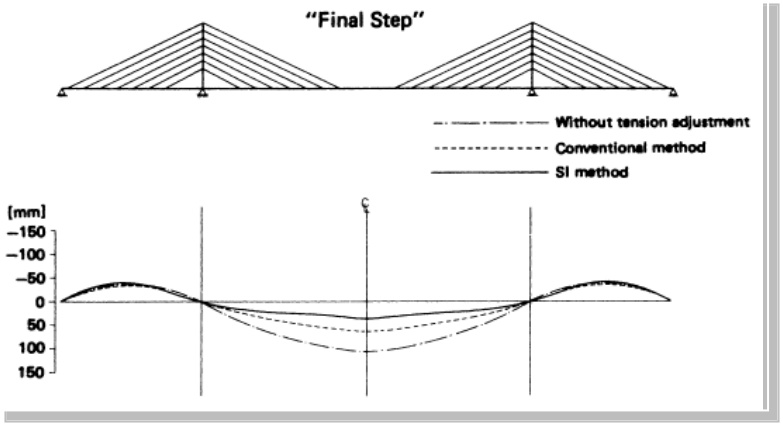
Table 6 comparison of shim plate thickness

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	

完成系の形状比較

Fig.4 Camber error comparion in the final step



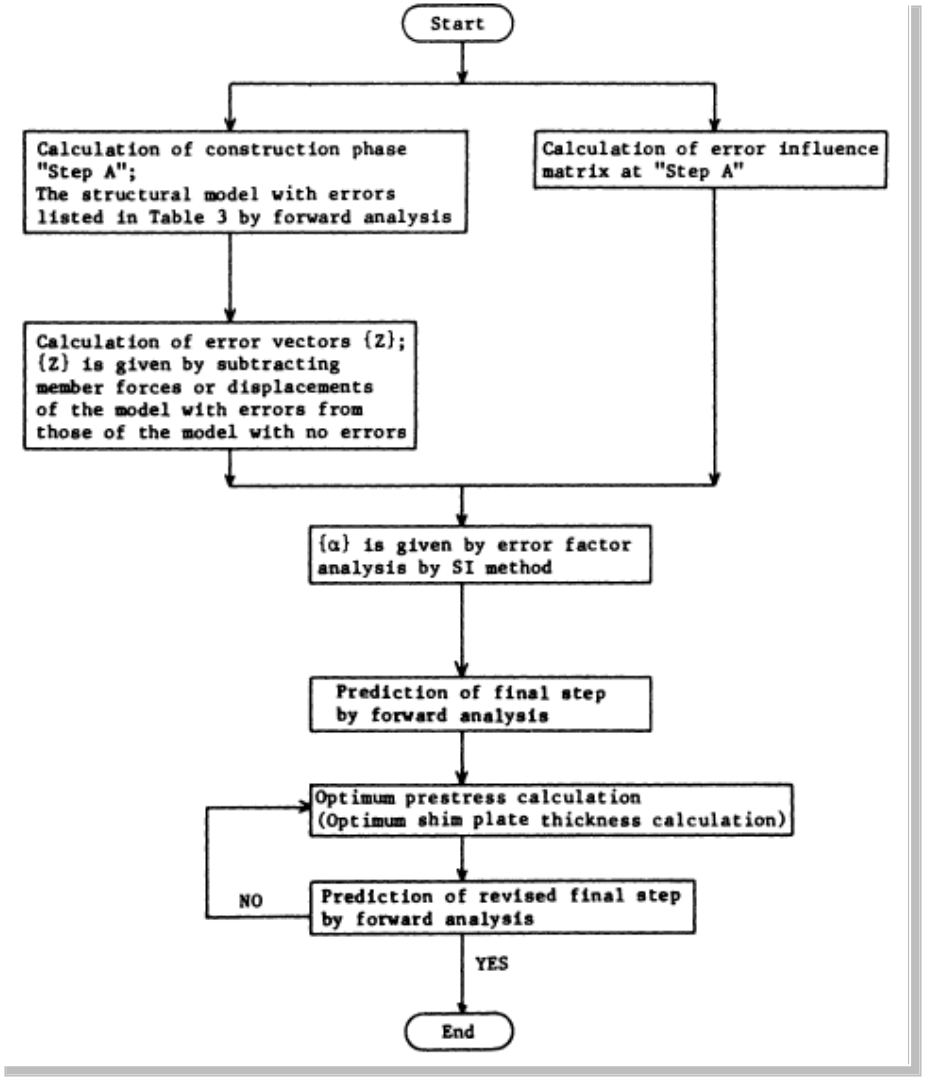
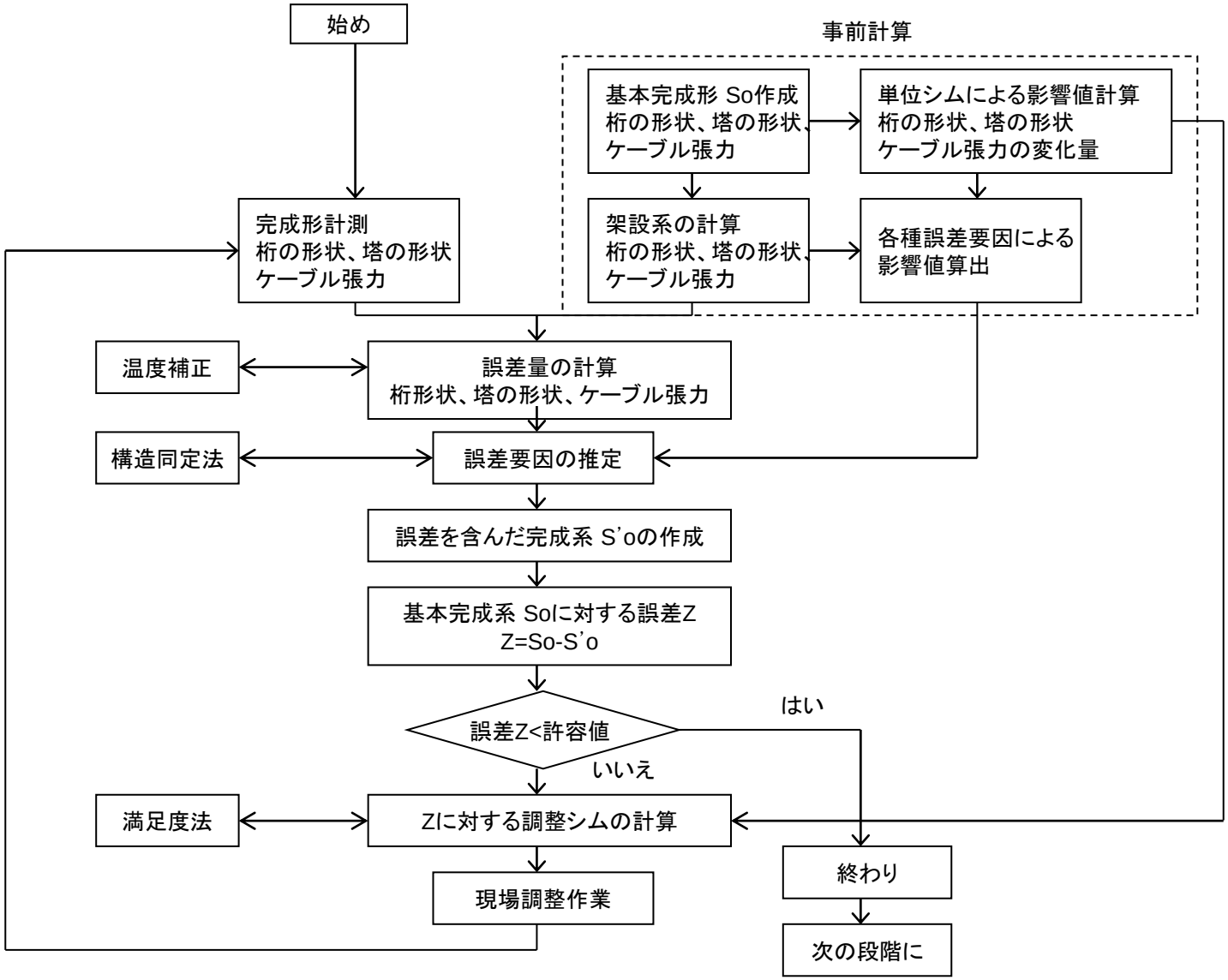


Fig.5 Cable tension adjustment procedure using the SI method

斜張橋架設精度管理


始め
事前計算
基本完成形 So作成
桁の形状、塔の形状、
ケーブル張力
単位シムによる影響値計算
桁の形状、塔の形状
ケーブル張力の変化量
完成形計測
桁の形状、塔の形状
ケーブル張力
架設系の計算
桁の形状、塔の形状、
ケーブル張力
各種誤差要因による
影響値算出
温度補正
誤差量の計算
桁形状、塔の形状、ケーブル張力
構造同定法
誤差要因の推定
誤差を含んだ完成系 S'oの作成
基本完成系 Soに対する誤差Z
Z=So-S'o
誤差Z<許容値
はい
いいえ
満足度法
Zに対する調整シムの計算
終わり
現場調整作業
次の段階に

結論

誤差の要因を調査して定量化が架設途中でできる時

→ 完成系予測可能及び適切なシム調整可能

設計で仮定した完成形状に近接可能

→ 部材力の過応力防止

仁川大橋でも本方法を考慮・改良した新手法開発

→ 架設精度向上

第5章　斜張つり橋の概念

- 斜張橋とつり橋を組み合わせた構造を取り入れた斜張つり橋が超長大に提案されているので列挙する

・この型式は以外に歴史は斜張橋より古い

・架設など考えると、両型式の機械が必要で合理的とはいえない

・しかし、工夫すれば使える可能性がある

Dischinger (1938)

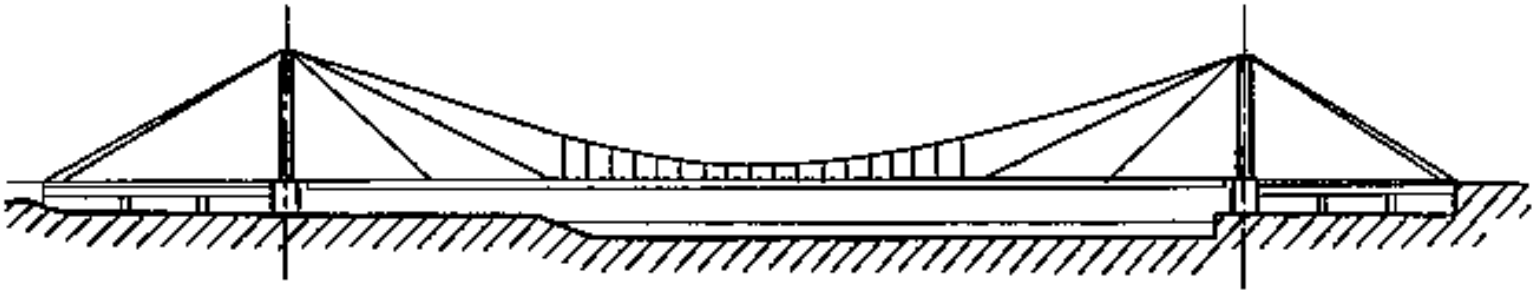
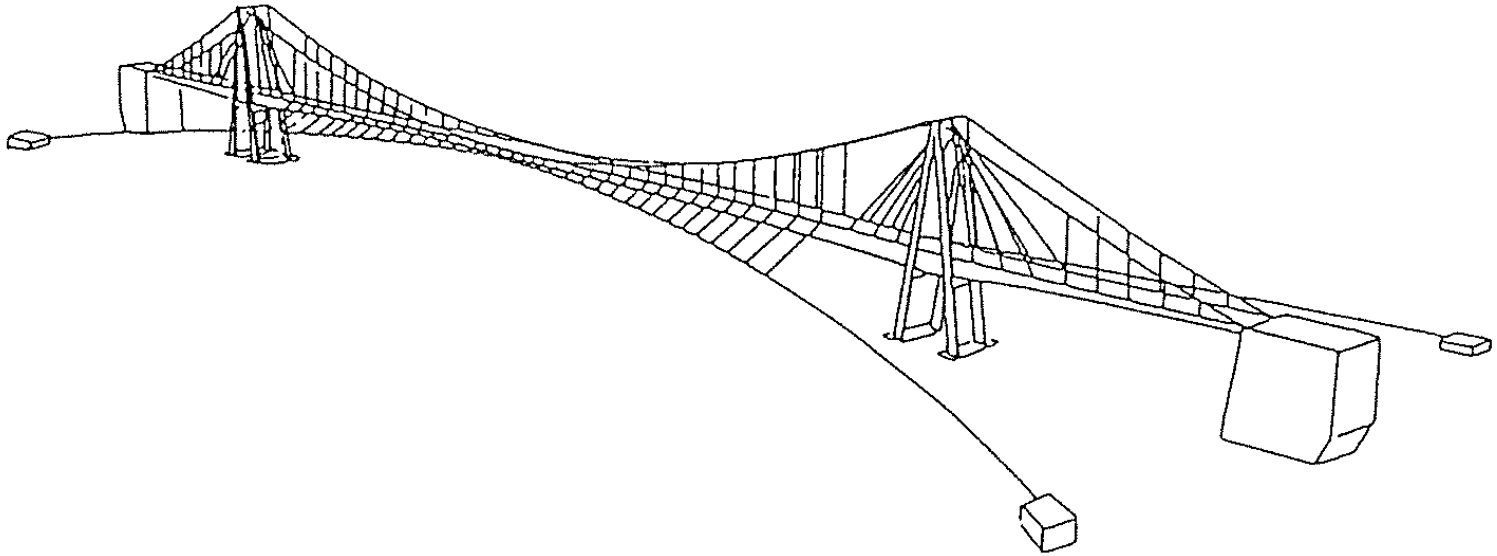


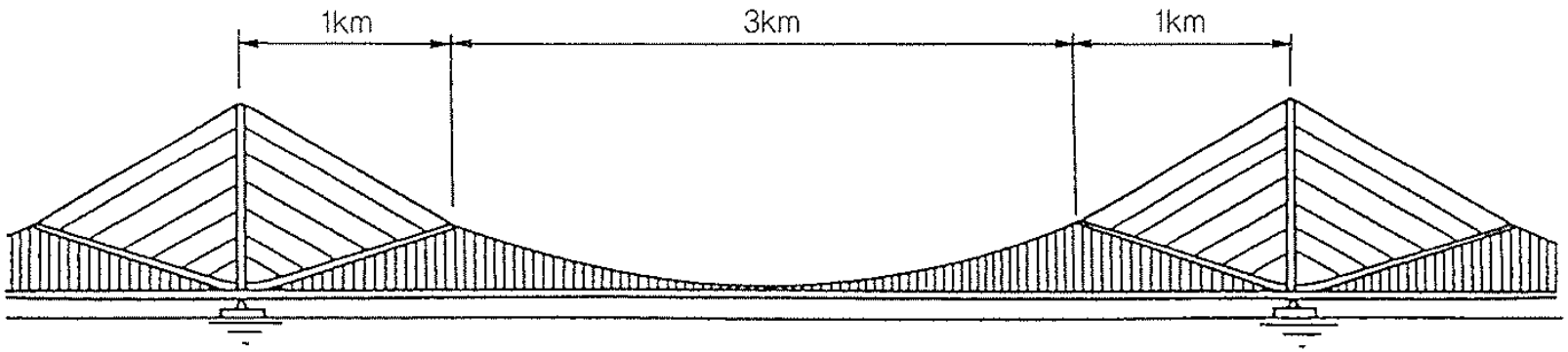
図 1.1.9　Dischinger の斜張吊橋案（1938 年）

斜張つり橋(T.Y.LIN)



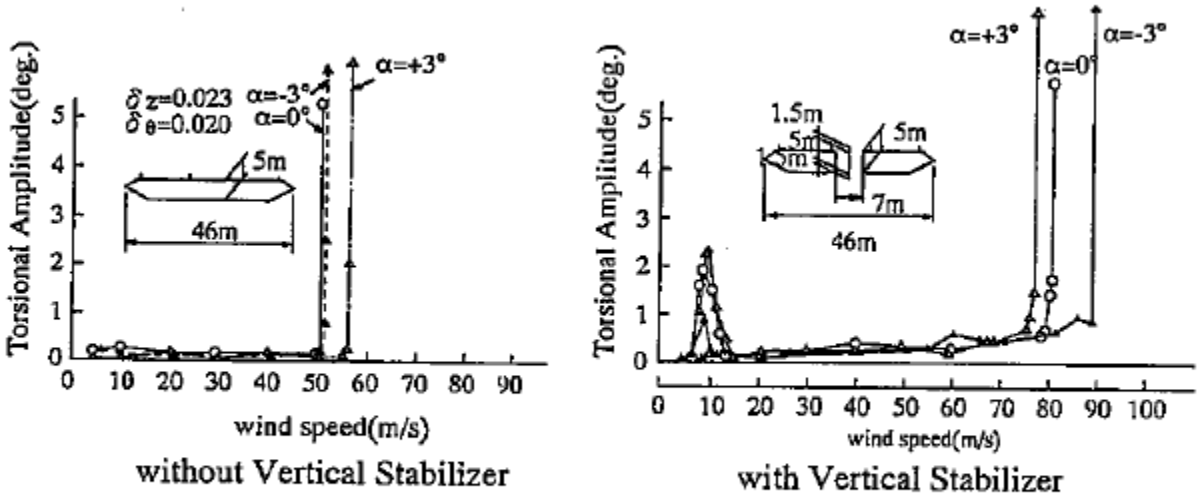
ストームケーブルによる耐風案

スパン5千mの斜張つり橋(T.Y.LIN)



T.Y.LINによるジブラルタル海峡に架ける5千メートル案

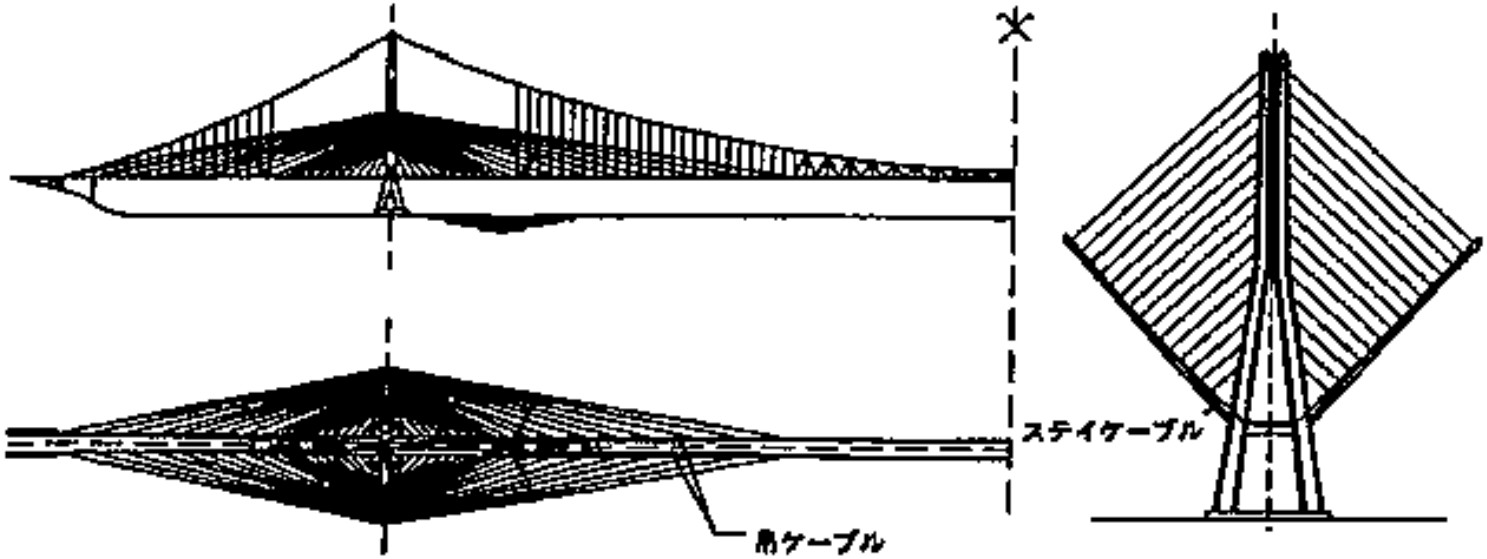
Vertical Stabilizerの有効性



(b) Section H

Fig.5 Dynamic response of tapered box girder

Menn & Billingtonの吊型式橋梁



図―9　Menn、Billingtonの吊形式橋梁

ありがとうございました。