

吊橋の設計支援システムと施工管理システム

川田工業(株) 正会員 前田 研一

川田工業(株) 正会員 西土 隆幸

川田工業(株) 内海 靖

(株)システムエンジニアリング 正会員 ○ 斉藤 道生

1. まえがき 現在、本州四国連絡橋Dルートの大長吊橋群の建設が最盛期にあり、さらに、世界最大級の明石海峡大橋も着工されている。そして、このような本格的な長大吊橋時代の到来によって、設計支援システムとしての設計・架設計算プログラム、および、施工管理システムの開発、整備が不可欠となっている。吊橋の設計・架設計算プログラムは、特有の設計条件、非線形問題に対処できることはもちろんのこと、膨大な量の入出力データを効率よく処理できることが必要である。したがって、解析理論、数値計算技法の進歩、および、大型計算機、図化機能などの周辺機器の発達に伴って、設計支援システムの内容はかなり急激に変化している。他方、施工管理システムについては、特有の施工条件、精度および安全管理問題に対処できることはもちろんのこと、架設現場でリアルタイムに処理できることが必要である。したがって、大型計算機とマイコンとのデータ通信、自動計測機器の発達に伴って、システムの内容は同様にかかなり急激に変化している。

本文は、著者らが開発した、現状では最先端のものの一つであると思われ、既に実績もある吊橋の設計支援システムの最新バージョンとその施工管理システムへの応用について、システムの特徴と仮想適用例を中心に報告するものである。^{1)～3)}

2. 設計支援システムの概要と特色

本支援システムは、吊橋の設計に際して図-1、2に示すようなフローにしたがって処理を行う設計計算プログラムを擁している。そして、両者のプログラムは、面内荷重解析用のKASUS/PLANE、面外、ねじり荷重解析用のKASUS/GRID、TORSION、および、立体骨組解析用のKASUS/SPACEとから成り、次のような特徴を有する前、後処理プログラムを含む個々

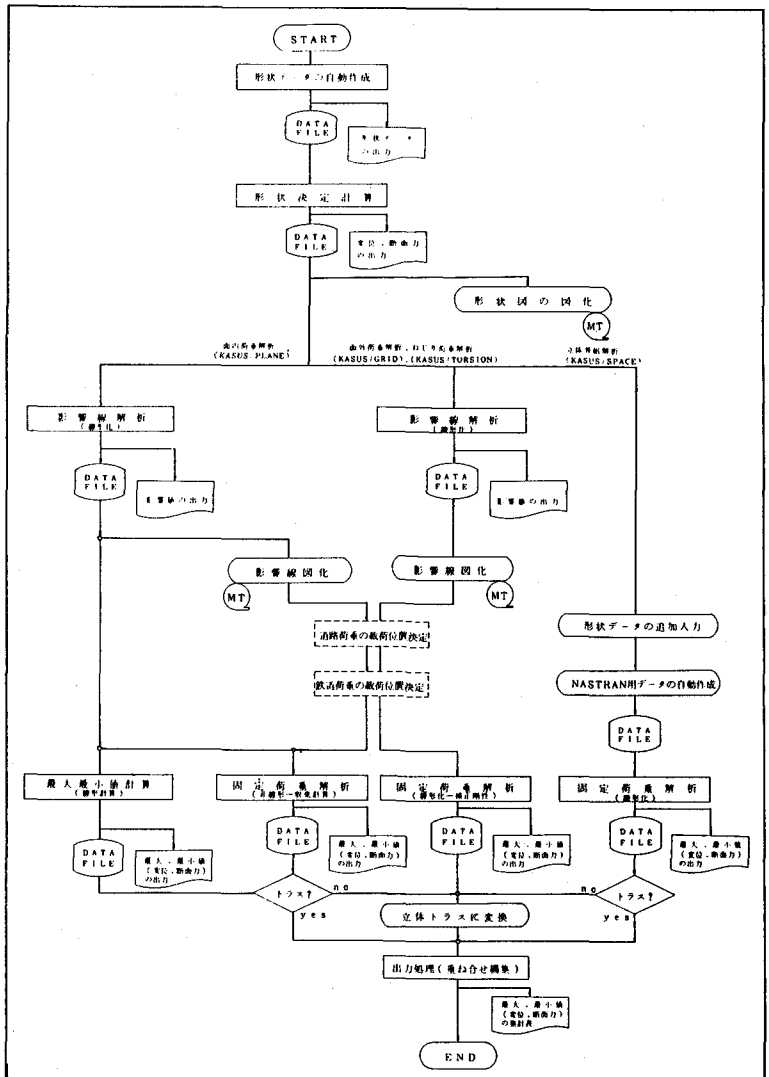


図-1 設計計算プログラムのフロー

形、ハンガー取付け点と補剛桁のせん断中心との偏心、および、主塔と補剛桁の連成挙動などを考慮した解析も可能である。さらに、KASUS/SPACEでは、PLANEにより自動的に受け渡された座標、初期軸力データに立体骨組特有のデータを追加することによって、汎用プログラムNASTRAN用のデータデックが自動的に作成され、魚骨、および、立体トラスモデルを対象に解析が可能である。

(6) 架設計算 解体計算によって、各架設ステップに対する架設計算を行うことができ、解析方法などは上述の固定荷重解析の場合と全く同様である。すなわち、KASUS/PLANEでは、各架設ステップの計算を行え、架設系において考慮される支点、ヒンジ等の追加、除去、節点、部材の除去なども容易であり、変位、断面力の計算結果を図化することが可能である。また、補剛桁、主塔の無応力形状、主ケーブル、ハンガーの無応力長、および、荷重、断面諸量等のデータを直接に変化させることによって、種々の要因による誤差解析も容易に行える。さらに、KASUS/TORSION, GRID、および、SPACEでは、PLANEでの架設計算結果から自動的に受け渡された各架設ステップの平衡状態での座標、主ケーブル、ハンガー張力等のデータにより自動修正される形状データを基に架設計算を行え、支点、ヒンジの追加、除去、節点、部材の除去、および、荷重、断面諸量等の変更が同様に容易に可能である。

(7) 出力処理(重ね合せ、編集) 上述の(4)、(5)、(6)で計算された変位、断面力、および、反力等は、まず、解析モデルが梁モデルの場合には、補剛トラスのパネルタイプを事前に入力しておくことによって、必要に応じて立体トラスの各部材のものに断面力が自動変換される。その後、重ね合せ、編集を経て集計され、最終的な集計表が、そのまま設計計算書に組込めるように日本語で漢字出力される。この集計表は、現状では、架設時断面力表(各着目部材の種類ごとに各架設ステップの断面力の集計と最大・最小断面力の抽出を行う)、荷重組合せ別変位、断面力、反力表(各荷重組合せ別に各着目部材の変位、断面力、反力の集計と最大・最小値の抽出を行う)、および、部材別最大・最小断面力、設計断面力表(各着目部材別に各荷重組合せの最大・最小断面力の抽出を行い、各荷重組合せに対し割増し係数を考慮することもできる)の3タイプに大別される。なお、この他、鉄道橋設計における疲労時断面力の集計表なども用意されている。

3. 施工管理システムへの応用

本現場管理システムは、マイコン制御による計測システムと、インテリジェント端末としてデマンド機能およびリモートバッチ機能による大型電算機のオンライン使用の解析システムとが一体化されたものであり、図-3に示すような要領で吊橋の施工管理を実施することを想定して開発したものである。ただし、その構築は対象とする個々のものの規模、環境などによって左右され、ここでは、図-4に示すような一案について主要な特徴を以下に紹介するが、他の構築システムの場合にも当然、容易に適応できる。^{8)~11)}

(1) 主ケーブル温度測定と応答解析

主ケーブルの内部平均温度の推定は、新たに開発したFEMによる非正常温度応答解析プログラムによって行われる。この解析法によれば測定は、表面温度の測定(1断面4点、48hr以上)のみでよく、熱電対およびタイマー機能付きの自動静歪計による方法を想定している。ただし、事前に複数回のキャリブレーション測定における主ケーブルのサグの変化量との相関から、断面の熱拡散率を算定しておく必要がある。

(2) 各管理項目の管理値の計算方法

各施工管理項目の管理値は大型電算機のオンライン使用によって設計支援システムにおける

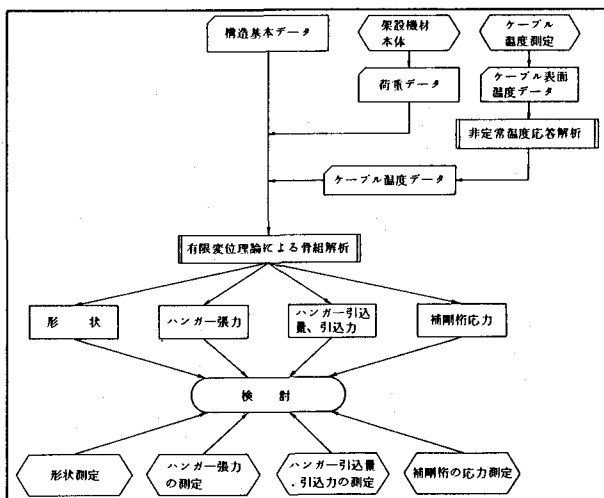


図-3 施工管理要領

架設計算プログラムを応用して計算され、各架設ステップの管理時における架設部材状況、仮設機材の位置、重量等の確定情報をリアルタイムで処理できる。すなわち、本システムでは、変更を生じたデータのみを転送すれば、あらかじめ準備された構造基本データ、荷重データが自動的に修正され、有限変位理論による非線形骨組解析を実行できるようになっている。また、求められた計算結果については、必要最小限のものがデータ転送されディスクに収納されるようになっている。なお、ハンガーの引込力、引込量の管理値の計算は、間接引込工法、および、多点同時引込みの直接引込工法のどちらの場合にも対処できる。

(3) 各管理項目の実測値の測定方法 主ケーブルのサグ、補剛桁の縦断線形、および、主塔の倒れ量などの形状測定は、レーザー式変位計（発振器、受光器）の読取り値をマイコンに手入力することを想定している。また、引込み済みの既設ハンガーの張力の測定は、加速度計の記録をAD変換ボードを介して自動入力し、マイコン内でFFT処理することにより振動法によって、および、補剛桁の応力測定は、ひずみゲージによる自動静歪計の記録をGPIBボードを介して自動入力し、応力値に変換することによって、それぞれ行うことを想定している。そして、これらの形状、張力、および、応力の実測値は、測定時の主ケーブルの内部平均温度の算定値と各管理項目の温度に対する影響計算値から、設計標準温度状態での諸値に自動換算されるようになっている。さらに、引込み中のハンガーの引込量、および、引込力の測定は、ロータリーエンコーダの記録を専用ボードを介して、および、直接圧力変換器による自動静歪計の記録をGPIBボードを介して、それぞれマイコンに自動入力し換算することを想定している。

(4) 主ケーブル温度、施工管理結果の図化 主ケーブル温度、施工管理結果は、X-Yプロッタ、および、マイコン画面のハードコピーによって図化され、竣工図書用の図表を架設現場においてリアルタイムで作成できる。すなわち、現状では、主ケーブル温度については、外気温、ケーブル表面温度、内部平均温度の時間履歴図、および、ケーブル断面の要素分割図、温度分布図などが描画できるようになっている。他方、施工管理結果については、形状、ハンガー張力、補剛桁応力の管理値と実測値との比較図表、閉合時における形状管理図、FFT処理のスペクトル図、および、ハンガー引込み終了時での引込量、引込力の同様の比較図表、引込み中におけるジャッキのオペレーション用画面（作業中は随時ディスクに収納）などが描画できるようになっている。

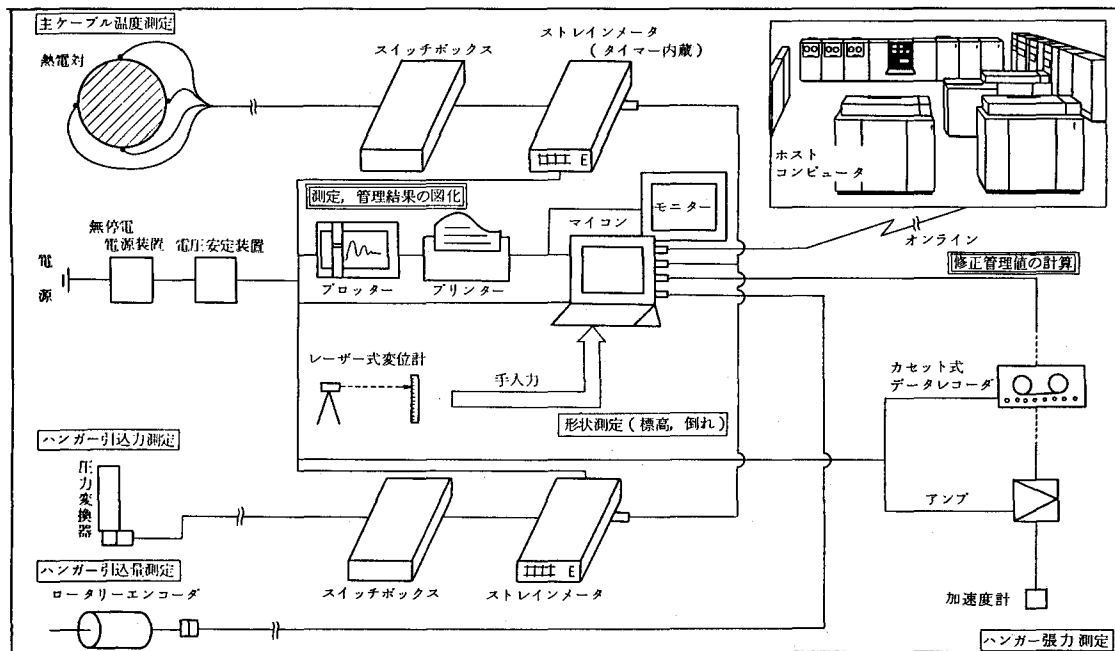


図-4 施工管理システム構築の一案

4. システムの使用実績 本システムが最初に長大吊橋に適用されたのは、本四連絡橋最初の吊橋で、完成時東洋一であった因島大橋（支間割 $250+770+250$ m、3 径間 2 ヒンジ吊橋、1983 完成）であり、構成プログラム群のシステム化がほぼ完了した直後の旧バージョンが設計照査、および、現場施工管理に使用されている。その後、本四 D ルートの 3 吊橋の建設の本格化に伴って、各共同企業体から外注の形で依頼される計算業務にも使用され、JV の御指導もあって、前、後処理プログラムがより整備されたものが現在の最新バージョンである。特に、D ルート最大スパンを誇る南備讃瀬戸大橋（支間割 $264+1100+264$ m、3 径間連続道路鉄道併用吊橋、1988 完成予定）では、さらに、現場施工管理への適用も予定されている。

5. 設計支援システムの仮想適用例

本設計支援システムの最新バージョンを長大吊橋の設計計算に適用した仮想適用例として、図-5 に示すような中央径間長 1,000 m の 3 径間連続・道路鉄道併用吊橋を対象とした図化結果の一部を図-6 ~ 15 に示す。ここに、図-6 は、形状決定結果を、一方、図-7 は、立体トラスモデルの形状図を、それぞれ示したものである。また、図-8, 9 は、ある着目部材の影響線図、最大最小値計算の集計表を示したものであり、図-9, 10 は、各架設系における補剛桁変位図、ハンガー張力図を示したものである。さらに、図-11, 12、および、図-13, 14 は、それぞれ、架設時の断面力集計表、荷重組合せ別断面力集計表、および、設計断面力集計表、疲労時断面力集計表を示したものである。これらの図は成果品として設計計算書にそのまま使用でき、データ作成、解析から編集まで一貫処理できることなども考えれば、本システムは使用性および経済性の極めて高い吊橋の設計支援システムであるといえる。

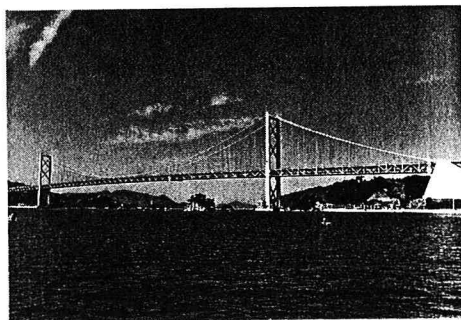


写真-1 因島大橋

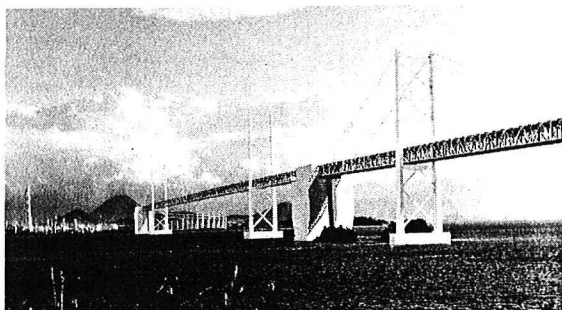


写真-2 南備讃瀬戸大橋

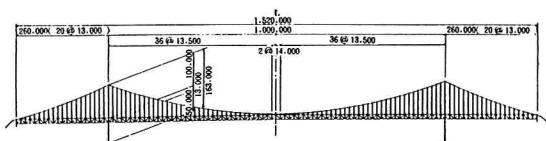


図-5 一般図

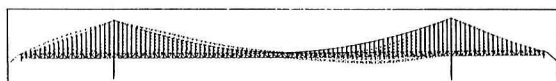


図-6 形状決定

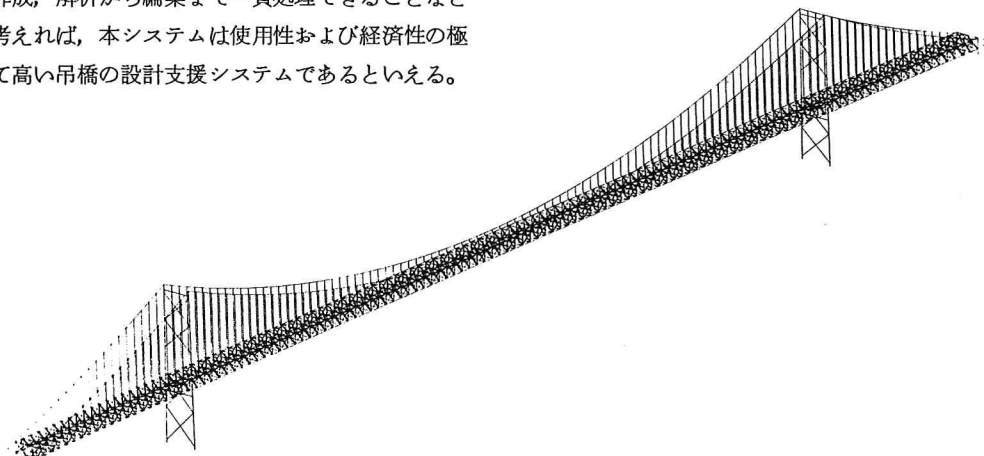


図-7 立体トラスモデルの形状図

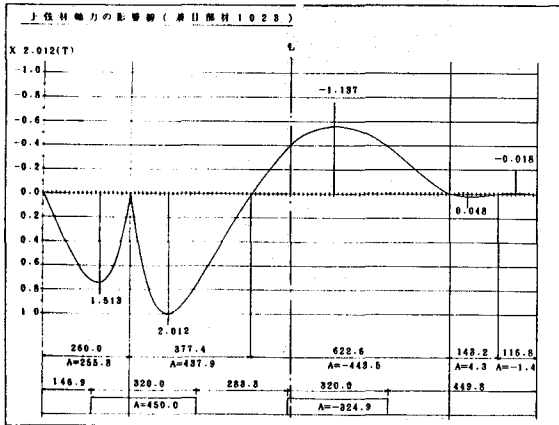


図-8 影響線図

主橋 上鉄材軸力 (単位: t)

縦断完成系

断面点	No. 目	ブラス 最大値			マイナス最大値		
		L (m)	LZ (m)	LS (m)	L (m)	LZ (m)	LS (m)
1010	1044.1	-1553.1	449.4	594.7	-599.6	-949.8	-1003.3
1014	1248.5	-1349.1	442.9	805.6	-774.2	-471.8	-877.3
1022	3389.7	-2270.7	1293.3	2096.5	-1915.8	-816.7	-1303.1
1031	727.3	-965.6	328.5	398.8	-389.6	-349.6	-815.9
1035	899.2	-1351.4	376.8	528.4	-498.8	-471.8	-832.5
1039	995.4	-1498.7	378.0	615.5	-582.6	-517.5	-929.0
1043	982.8	-1495.3	355.8	629.0	-599.6	-517.1	-928.6
1049	864.1	-1384.3	299.7	564.4	-544.9	-483.4	-901.1
1055	703.4	-1290.3	245.2	438.2	-436.0	-389.4	-834.1
1061	549.8	-1255.3	250.3	279.9	-290.3	-445.2	-808.1
1066	704.4	-1293.2	244.4	439.8	-437.5	-389.4	-835.7
1072	850.4	-1390.1	297.3	561.1	-543.7	-485.4	-904.7
1078	966.6	-1501.8	347.9	618.7	-589.8	-519.3	-942.5
1082	971.6	-1502.2	369.8	601.8	-569.6	-518.8	-931.1
1086	879.6	-1350.4	361.3	516.3	-487.6	-471.7	-878.8
1090	724.7	-1261.1	327.2	397.5	-388.7	-358.6	-812.5
1099	3412.3	-2248.2	1305.9	2104.5	-1923.4	-796.0	-1422.2
1107	1245.9	-1355.3	441.5	804.4	-773.1	-473.1	-833.1
1111	1024.5	-1339.2	439.9	584.6	-545.3	-531.3	-953.9

L (m) ---- 自軸心
LZ (m) ---- 区間端
LS (m) ---- 鋼桁端

図-9 最大最小値集計表

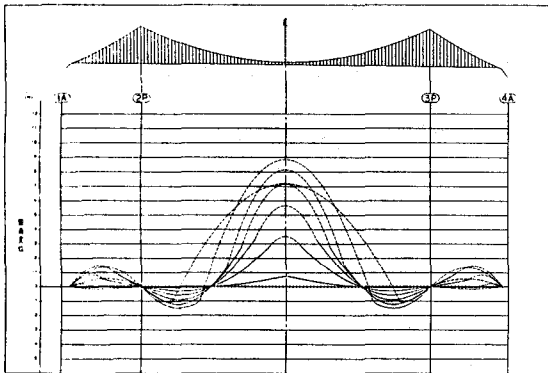


図-10 架設系の補剛桁変位図

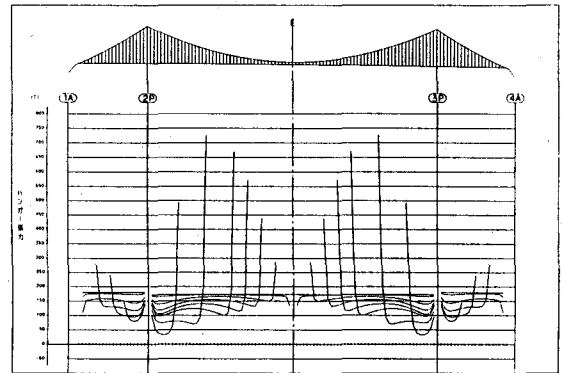


図-11 架設系のハンガー張力図

上鉄材 軸力

断面点	121	122	123	124	125	126	127	128
(+) 最大値	670.9	220.0	689.2	194.0	672.7	191.8	683.9	350.9
(-) 最大値	-2824.4	-2478.9	-2184.9	-1906.0	-1583.2	-1235.2	-746.1	-666.3
STEP1-1	---	---	---	---	---	---	---	---
STEP1-2	---	---	---	---	---	---	---	---
STEP1-3	---	---	---	---	---	---	---	---
STEP1-4	---	---	---	---	---	---	---	---
STEP2-1	202.4	---	---	---	---	---	---	---
STEP2-2	194.8	---	---	---	---	---	---	---
STEP2-3	193.6	---	---	---	---	---	---	---
STEP2-4	184.8	---	---	---	---	---	---	---
STEP2-5	183.2	---	---	---	---	---	---	---
STEP3-1	185.1	---	---	---	---	---	---	---
STEP3-2	187.0	---	---	---	---	---	---	---
STEP3-3	186.5	---	---	---	---	---	---	---
STEP3-4	186.0	---	---	---	---	---	---	---
STEP3-5	180.9	-1.6	---	---	---	---	---	---
STEP3-6	311.5	-1.7	---	---	---	---	---	---
STEP3-7	44.1	-1.8	---	---	---	---	---	---
STEP4-1	4.6	-2.0	---	---	---	---	---	---
STEP4-2	596.5	195.3	198.1	---	---	---	---	---
STEP4-3	561.9	195.0	198.0	---	---	---	---	---
STEP4-4	185.1	-28.8	200.5	---	---	---	---	---
STEP4-5	-114.9	-202.5	194.9	---	---	---	---	---
STEP4-6	483.9	220.0	689.2	-1.3	---	---	---	---
STEP4-7	417.0	201.4	688.3	-1.4	---	---	---	---
STEP4-8	366.2	187.3	687.5	-1.5	---	---	---	---
STEP4-9	-37.6	-108.6	332.5	-1.8	---	---	---	---
STEP4-10	-350.7	-343.8	48.0	-1.9	---	---	---	---
STEP5-1	208.1	175.3	625.6	194.0	196.3	---	---	---
STEP5-2	128.8	139.1	602.3	193.7	196.2	---	---	---
STEP5-3	87.5	112.7	584.3	193.5	196.1	---	---	---
STEP5-4	-286.5	-238.4	190.3	---	---	---	---	---
STEP5-5	-595.4	-514.4	-126.6	-246.2	195.2	---	---	---
STEP5-6	-99.2	-3.7	435.5	155.8	672.7	-1.3	---	---
STEP5-7	-217.1	-71.9	374.5	136.7	671.7	-1.3	---	---
STEP5-8	-316.9	-123.3	331.6	123.2	671.1	-1.4	---	---
STEP5-9	-817.7	-620.3	-226.8	-304.7	153.1	-1.7	---	---
STEP5-10	-1187.7	-984.8	-637.2	-816.8	-223.2	-1.9	---	---
STEP5-11	-764.9	-494.7	-100.7	-147.0	317.1	191.8	194.1	---
STEP5-12	-866.8	-578.2	-179.8	-186.2	287.5	191.5	191.0	---
STEP5-13	-955.9	-637.9	-237.6	-216.8	265.5	191.2	191.9	---
STEP5-14	-1301.4	-1016.7	-652.5	-390.4	-168.1	-131.1	206.8	---

図-12 架設時断面力集計表

配筋の集計

断面点	121	122	123	124	125	126	127	128
121	121	122	123	124	125	126	127	128
122	122	123	124	125	126	127	128	129
123	123	124	125	126	127	128	129	130
124	124	125	126	127	128	129	130	131
125	125	126	127	128	129	130	131	132
126	126	127	128	129	130	131	132	133
127	127	128	129	130	131	132	133	134
128	128	129	130	131	132	133	134	135
129	129	130	131	132	133	134	135	136
130	130	131	132	133	134	135	136	137
131	131	132	133	134	135	136	137	138
132	132	133	134	135	136	137	138	139
133	133	134	135	136	137	138	139	140
134	134	135	136	137	138	139	140	141
135	135	136	137	138	139	140	141	142
136	136	137	138	139	140	141	142	143
137	137	138	139	140	141	142	143	144
138	138	139	140	141	142	143	144	145
139	139	140	141	142	143	144	145	146
140	140	141	142	143	144	145	146	147
141	141	142	143	144	145	146	147	148
142	142	143	144	145	146	147	148	149
143	143	144	145	146	147	148	149	150
144	144	145	146	147	148	149	150	151
145	145	146	147	148	149	150	151	152
146	146	147	148	149	150	151	152	153
147	147	148	149	150	151	152	153	154
148	148	149	150	151	152	153	154	155
149	149	150	151	152	153	154	155	156
150	150	151	152	153	154	155	156	157
151	151	152	153	154	155	156	157	158
152	152	153	154	155	156	157	158	159
153	153	154	155	156	157	158	159	160
154	154	155	156	157	158	159	160	161
155	155	156	157	158	159	160	161	162
156	156	157	158	159	160	161	162	163
157	157	158	159	160	161	162	163	164
158	158	159	160	161	162	163	164	165
159	159	160	161	162	163	164	165	166
160	160	161	162	163	164	165	166	167
161	161	162	163	164	165	166	167	168
162	162	163	164	165	166	167	168	169
163	163	164	165	166	167	168	169	170
164	164	165	166	167	168	169	170	171
165	165	166	167	168	169	170	171	172
166	166	167	168	169	170	171	172	173
167	167	168	169	170	171	172	173	174
168	168	169	170	171	172	173	174	175
169	169	170	171	172	173	174	175	176
170	170	171	172	173	174	175	176	177
171	171	172	173	174	175	176	177	178
172	172	173	174	175	176	177	178	179
173	173	174	175	176	177	178	179	180
174	174	175	176	177	178	179	180	181
175	175	176	177	178	179	180	181	182
176	176	177	178	179	180	181	182	183
177	177	178	179	180	181	182	183	184
178	178	179	180	181	182	183	184	185
179	179	180	181	182	183	184	185	186
180	180	181	182	183	184	185	186	187
181	181	182	183	184	185	186	187	188
182	182	183	184	185	186	187	188	189
183	183	184	185	186	187	188	189	190
184	184	185	186	187	188	189	190	191
185	185	186	187	188	189	190	191	192
186	186	187	188	189	190	191	192	193
187	187	188	189	190	191	192	193	194
188	188	189	190	191	192	193	194	195
189	189	190	191	192	193	194	195	196
190	190	191	192	193	194	195	196	197
191	191	192	193	194	195	196	197	198
192	192	193	194	195	196	197	198	199
193	193	194	195	196	197	198	199	200
194	194	195	196	197	198	199	200	201
195	195	196	197	198	199	200	201	202
196	196	197	198	199	200	201	202	203
197	197	198	199	200	201	202	203	204
198	198	199	200	201	202	203	204	205
199	199	200	201	202	203	204	205	206
200	200	201	202	203	204	205	206	207
201	201	202	203	204	205	206	207	208
202	202	203	204	205	206	207	208	209
203	203	204	205	206	207	208	209	210
204	204	205	206	207	208	209	210	211
205	205	206	207	208	209	210	211	2

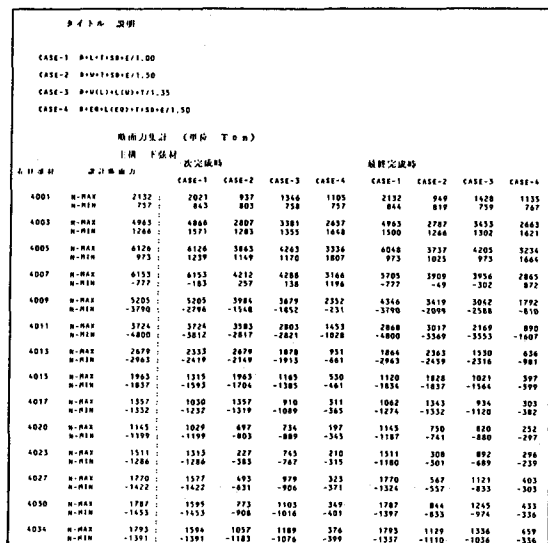


図-14 設計断面力集計表

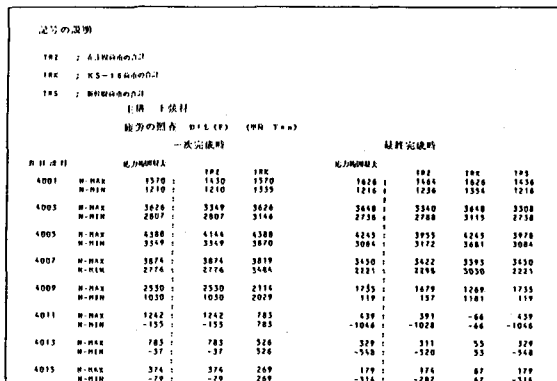


図-15 疲労断面力集計表

6. 施工管理システムの仮想適用例

本現場管理システムの最新バージョンを長大吊橋の施工管理に適用した仮想適用例として、同様に図化結果の一部を図-16~22に示す。ここに、図-16, 17は、想定したある架設ステップにおける主ケーブルの内部平均温度の推定に関するFEM要素分割図、温度分布図(等温線図)を示したものであり、図-18, 19は、補剛桁形状の管理値と実測値の比較図、閉合時での形状管理図を、それぞれ示したものである。また、図-20, および、図-21, 22は、それぞれ、ハンガー張力測定でのFFT処理のスペクトル図、および、ハンガー引込中、ジャッキ盛替中でのオペレーション用画面を示したものである。したがって、これらの図からは、本システムの適用によって、精度および安全管理に関する竣工図書にそのまま使用できる成果品が施工現場でリアルタイムに得られることがわかり、システム操作の容易さなども考えれば、使用性および経済性の極めて高い吊橋の施工管理システムになり得るものであるといえる。

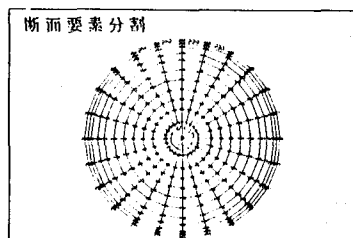


図-16 主ケーブル要素分割図

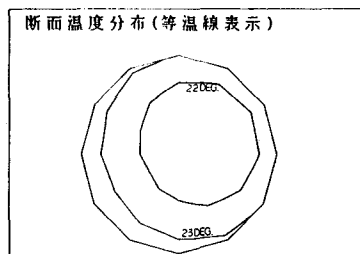


図-17 主ケーブル温度分布図

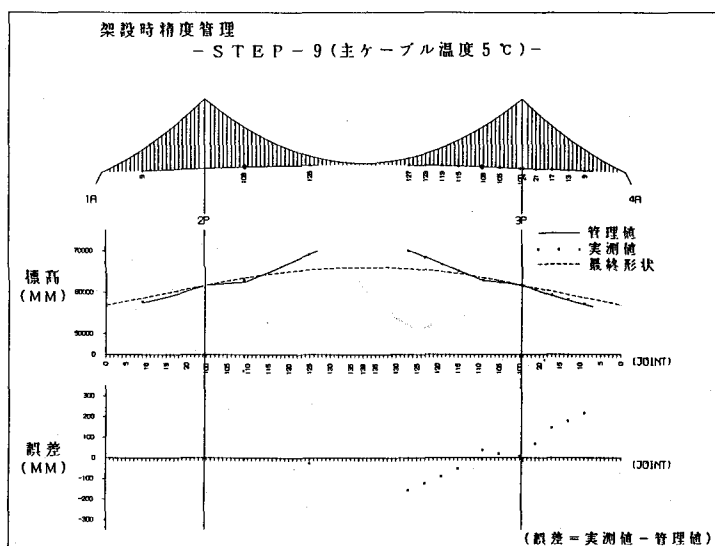


図-18 補剛桁形状の管理値と実測値の比較図

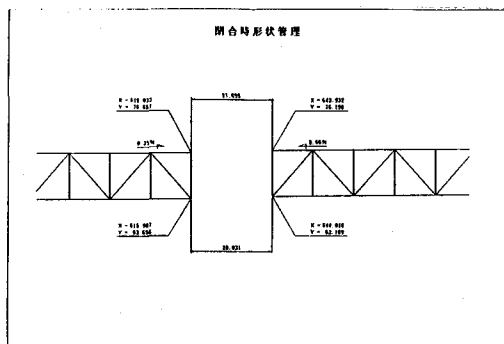


図-19 閉合時の形状管理図

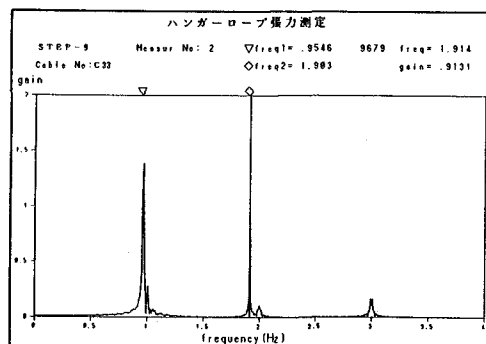


図-20 ハンガー張力測定のスペクトル図

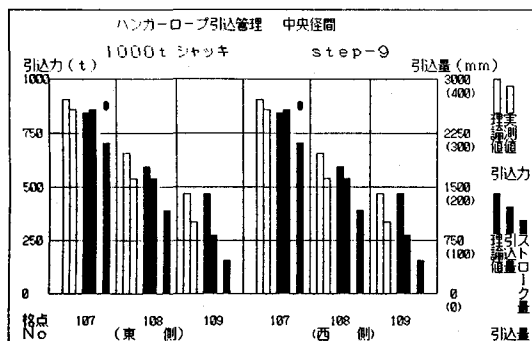


図-21 引込中のハンガー引込管理図

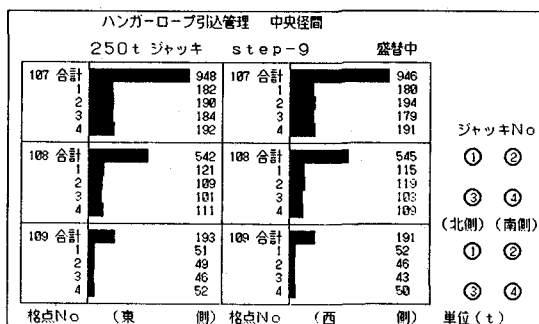


図-22 盛替中のハンガー引込管理図

7. あとがき

以上、現状での最新バージョンについて報告した。このようなシステムは、これからもハイ・テク時代の進展につれて大きく変遷していくものと思われ、例えば、施工管理システムにおける形状測定の自動化などは既に実用段階にあり各所で導入が検討されている。今後、さらに新たなバージョンを完成した際に、再度報告する機会が与えられれば幸いである。最後に、本システムの開発にあたって常に適切な御指導と御助言を頂いた、法政大学工学部・大地羊三教授に対し、ここに心より謝意を表する。

【参考文献】 1) 野村・中崎・内海・前田：ケーブル橋梁構造（吊橋・斜張橋）の設計，架設計算プログラム“KASUS”，橋梁，vol.18，№12，1982，vol.19，№1，1983． 2) 野村・中崎・内海・前田：ケーブル橋梁構造（吊橋・斜張橋）の設計，架設計算プログラムシステム，川田技報，vol.3，1983． 3) 野村・中崎・内海・前田・斉藤：吊橋・斜張橋の設計，架設計算プログラムシステム-KASUS-，橋梁，vol.21，№5，1985～（9回連載）． 4) 前田・林・前田：主ケーブルの2次応力を考慮した吊橋の有限変位解析，土木学会論文報告集，№315，1981． 5) 三品・野村・中崎・前田：主ケーブルの2次応力による長大吊橋の架設誤差問題と解析法，橋梁と基礎，vol.15，№11，1981． 6) 三品・野村・中崎・前田：吊橋主ケーブルの2次応力による補剛桁架設誤差問題と解析法，川田技報，vol.3，1983． 7) 野村・中崎・内海・木村：塔の3連成ばねを考慮した吊橋面外解析，川田技報，vol.4，1985． 8) 大地・前田・藤井：有限要素法による吊橋主ケーブル温度応答解析法，第13回JSSCマトリクス解析法研究発表論文集，1979． 9) 三品・中崎・前田・藤井：主ケーブル温度推定誤差による長大吊橋の架設誤差問題と解析法，橋梁と基礎，vol.13，№9，1979． 10) 三品・中崎・前田：吊橋の主ケーブル温度推定誤差による補剛桁架設誤差問題と解析法，川田技報，vol.2，1981． 11) 前田・作田・西土・町田・富沢・内海：ケーブル構造物の施工管理システム，川田技報，vol.5，1986．