

斜張橋プログラムの紹介と計算例

高橋 義勝¹⁾ 佐々木 実²⁾
成田司喜夫³⁾

まえがき

当社斜張橋プログラムNOLANは、完成系プログラムと架設計算プログラムを有し、前者は微小変形理論により、後者は有限変形理論により解析してある。これにより、完成系すなわち死荷重釣合状態を求め、それを先行系として架設計算を行うことが出来る。

ここでは、完成系、架設計算の計算手法について述べ、岩黒島橋斜張橋を架設計算例として報告する。

1. 対象構造物

プログラムNOLANでの処理の対象構造物は、各架設段階及び完成時の斜張橋を前提としており、面内荷重を受ける平面骨組構造物として、つぎの3種類の構成部材を有するものとする。

1) 曲げ軸力部材

主塔、主桁など、軸方向力と曲げモーメント及びせん断力が作用する部材。

2) 軸力部材

主構、リンクなど軸方向力のみが作用する部材。

3) 柔ケーブル部材

斜ケーブルなど引張力のみ抵抗する部材であり、重力場下ではその自重のためカタナリー形状をなす。

2. 解析理論

1) 完成系プログラムは微小変形理論を用いる。

2) 架設計算プログラムは、微小変形理論的には不安定架構となるような架設時の極端な大変形にも十分に対処できるように、有限変形理論を用いた。

3) 斜ケーブルはサグの影響を無視することができず、カタナリー形状をした柔ケーブル部材として解析する。

3. 完成系の計算手法

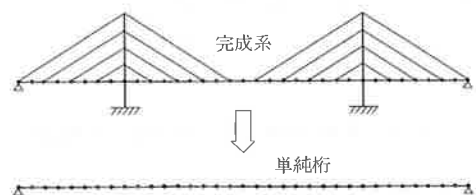
一般に、斜張橋は、無応力状態の完成系に設計荷重を作用させて断面力を求め、断面性能を決定するという通常の橋梁形式とは異なり、その架設方法、プレストレス導入方法などが完成系の形状および断面設計に直接的な影響を与えること、さらに斜ケーブルの本数とその張り方、主塔の構造形式などを含めての最適化を考えた場合、極めて設計の自由度の高い橋梁形式であると言うことができる。

もちろん、これらの全ての条件を考慮しての最適設計プログラムの作成は、至難であるが、少なくとも中間段階での人手の介入によって試行錯誤的に最適解へ近づけることが可能となる。

(1) 主桁静定基本形の設定：①

主桁以外のすべての部材を撤去する。なお、両端以外に支点拘束があれば、すべて解除する。

また、全節点の座標値は、完成形状の位置に一致させておく。



図一 主桁静定基本系図

1) 工事計画部架設計画課課長 2) 駒井建設工事(株)大阪支店工務部工事課
3) 駒井建設工事(株)大阪支店工務部工事課

(2) 死荷重と不静定荷重の設定：⑧

完成系の桁断面力は単純桁に作用する死荷重と、取付けられているケーブル、タワーリンクなどからの不静定力を作用させることにより求めることができる。

この不静定力の大きさは、後の活荷重による断面力が加わった合計断面力の最大値の分布を考えて、経済的な主桁の断面設計が可能となるよう、かなり高い自由度で選定することができる。

1) 死荷重 (既知)

格間分布死荷重

格点集中死荷重

2) 不静定荷重

垂直荷重：仮定される垂直格点荷重

水平荷重：仮定された垂直荷重を用いてカタナリーケーブルの計算により求めることができる。

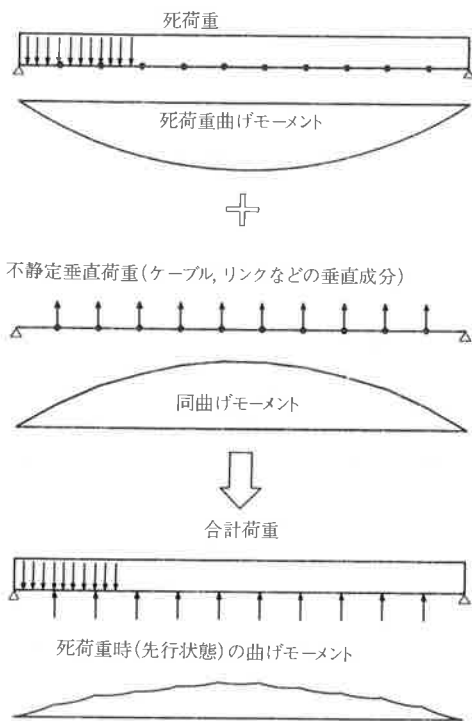


図-2 単純桁の曲げモーメント図

(3) 主桁の断面力の算出：③

3の2の不静定荷重及び死荷重による主桁の断面力を求める。

これは、完成系すなわち死荷重釣合状態における主桁の先行部材力となるものである。

(4) 塔静定基本系と断面力の算出：④

塔の静定基本系を設定すれば、先のケーブル垂直力および水平力、中間支点反力および塔自重より、塔に関する完成系の先行部材力を計算することができる。

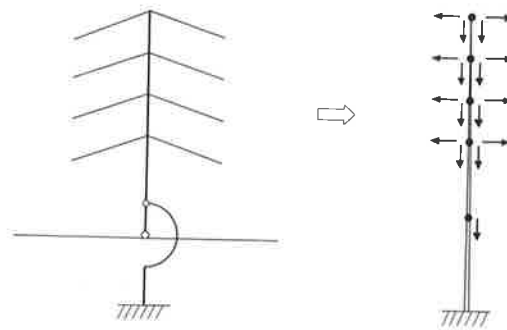


図-3 塔静定基本系図

(5) 完成系としての先行釣合状態の確定：⑤

全格節点の座標値は、完成形状としての位置を与え、主桁に関する先行部材力はC、ケーブルに関する諸元はB、塔に関する先行部材力はDを用い、先行荷重として死荷重を与えれば完成系の釣合状態が得られる。

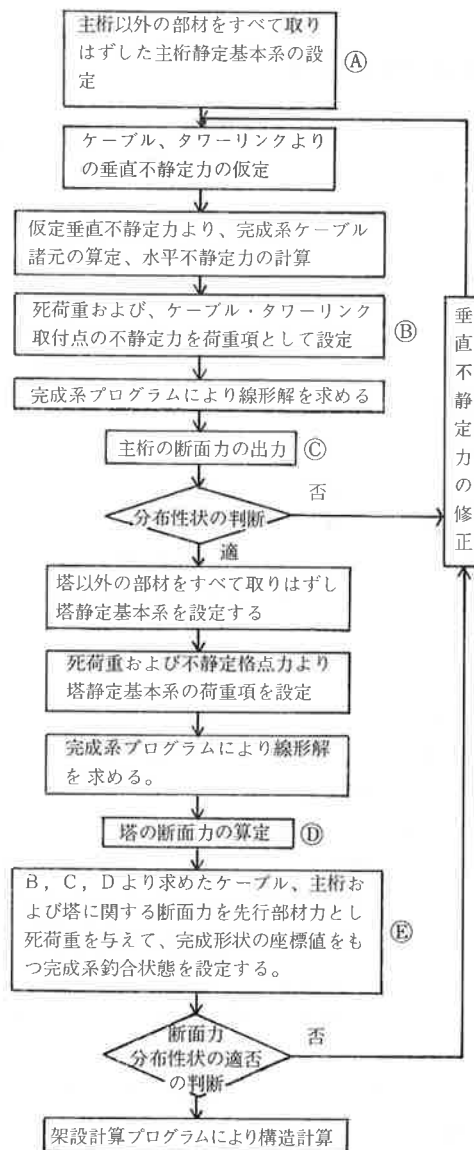
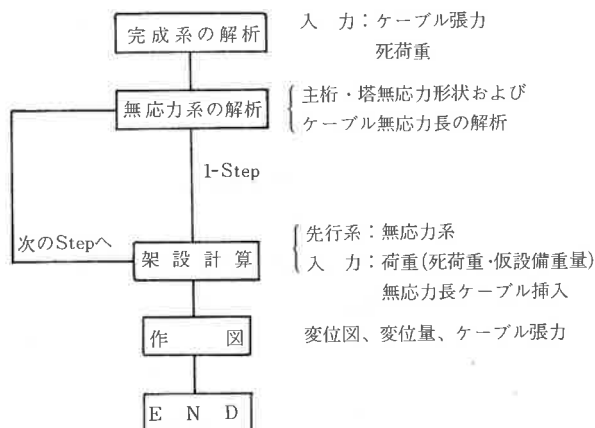


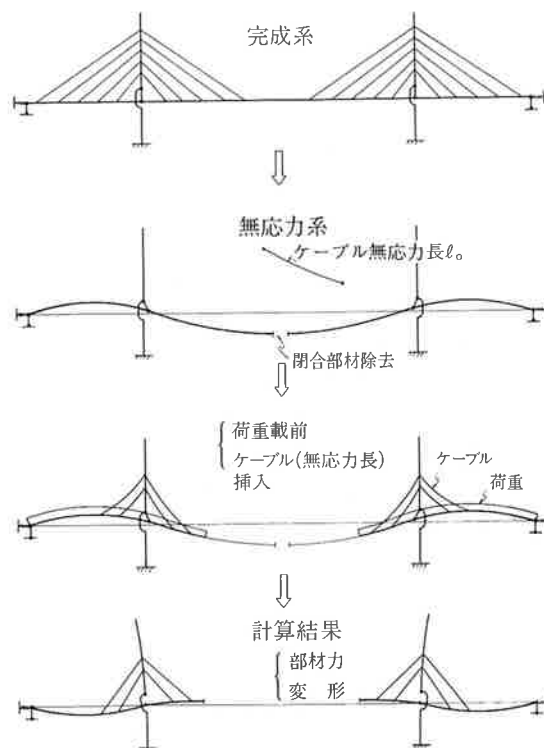
図-4 完成系計算手法のフローチャート

4. 架設計算の手法

架設計算のフローチャートを図一5、手法を図一6に示す。



図一5 架設計算フローチャート



図一6 計算手法図

5. 岩黒島橋架設計算

岩黒島橋の橋体形状と架設工法は“岩黒島橋単材架設工事報告”の図一3架設工法図を参照されたい。

(1) 完成系の解析

完成系解析の入力であるケーブル張力と死荷重は、岩黒島橋上部工製作（その1）の設計部会の完成系データから求めた。なお、部材力と変位の計算結果は設計部会の計算結果と一致した。

(2) 無応力系の解析

完成系の死荷重とケーブルを除去し、かつ閉合部材を除去することによって、張出骨組の無応力系が計算される。図一10無応力系の変位図、変位量参照。

(3) 計算条件

1) 中間ベントの高さ (1P~2P)

中間ベントの高さは主構の製作キャンバー線に対して250mm高くする。

2) 中間ベントの解放時期

ベントの構造から、ジャッキ容量は2000t (500tジャッキ4台)に限られる。ベントは、その反力が1800t以下となる架設段階で解放するものとする。

3) 斜ベントの高さ

斜ベントの高さは主構の製作キャンバー線と同一とする。

4) 12パネルブロックの架設 (3P~4P)

既設の6パネルブロックとは吊切りジョイントを基本とするが、緊急時には主構のジョイントをせずにゲルバー状態となることも考えられ、そのケースについても計算する。

5) 側径間第1段ケーブルの架設時期

部材水切りのため、主塔の側径間側に塔付ジブクレーンを設ける。そのジブクレーンと第1段ケーブル (No. 611, 634) が干渉するため、側径間第1段ケーブルの架設は塔付ジブクレーンの撤去後とする。

6) 中央径間の架設順序

主構の張出架設→側径間ケーブル架設→中央径間ケーブル架設のサイクルを基本とするが、ケーブルの張力が超過するなど、場合によっては順序を変更する。

7) ケーブルの引込み

引込用ジャッキの能力は500tとして、最大引込張力は450tを目標とする。

ジャッキは1塔当たり1台を配置して、2ストランド同時の引込みは考えない。

(4) 中間ベントの解放時期

中間ベントの解放は、図一12、図一13に示すごとく、Step28からStep29の段階で行う。その時のベント反力は片主構1730tであり、ジャッキ容量2000t (500t×4台) で中間ベントの解放が可能である。

(5) 斜ベントの解放方法

斜ベントの受点をジャッキ操作によりベント反力を解放することは、受点のスペース、構造から容易でない。そこで、図一7に示すように斜ベントベースを500mm水平移動することによって、ベント反力を解放することができる。

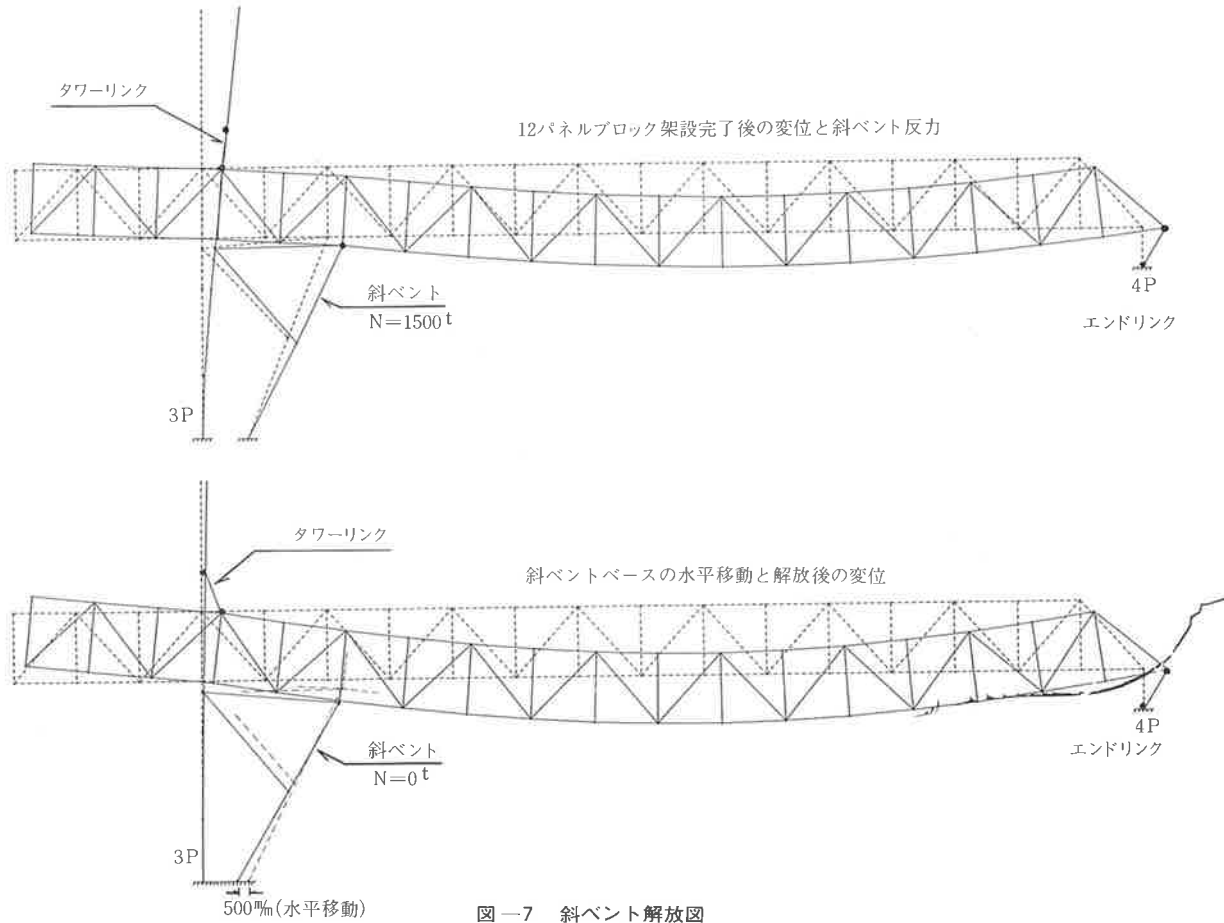
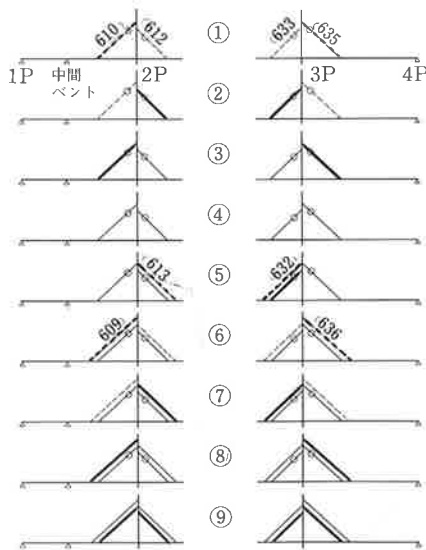


図-7 斜ベント解放図



ケーブル	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	評価
609						350①	380①	632	583	
610	355①	454①	624	733	884	659	735	579	780	T=1.05
612	485①	623	778	923	591	687	490	545	789	
613					457①	507①	795	850	775	引込力 t=457>t _a
632					422①	470①	741	796	729	
633	412①	536	700	839	541	634	454	508	740	(注) □ 引込ケーブル ① 1ストランド
635	387①	475①	648	744	887	672	746	597	788	
636						333①	360①	602	557	

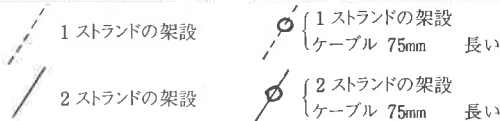


図-8 1段、2段ケーブルの架設順序図

(6) 1段、2段ケーブルの架設順序

ケーブルの1段、2段目の架設段階では数ケースの架設順序が考えられたが、どのケースもケーブル張力の超過および引込力が過大となった。

この解決策として、1段目ケーブルを75mm長く製作して、この段階でのケーブル張力を小さくすれば2段目までのケーブル架設が可能となる。計算結果では架設可能な順序は2ケースあるが、ここではその内の1ケースの順序図、その時のケーブル張力を図-8に示す。

(7) 閉合

吊橋の閉合では、トラベラー・クレーン等の架設機械を後退させることにより自然閉合に近い系を計算によって求め、閉合時のせん断力と軸力を少なくした実績がある。

当斜張橋の閉合についても、図-14の変位図から、3P側のトラベラー・クレーン、移動防護工を後退させることによってせん断力と軸力を少なくすることが可能である。図-9に2案の閉合系のせん断力と軸力を示す。

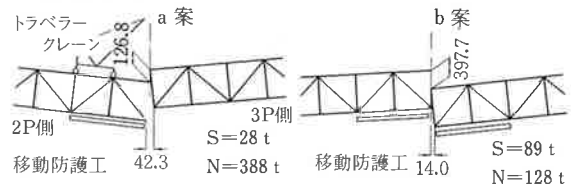
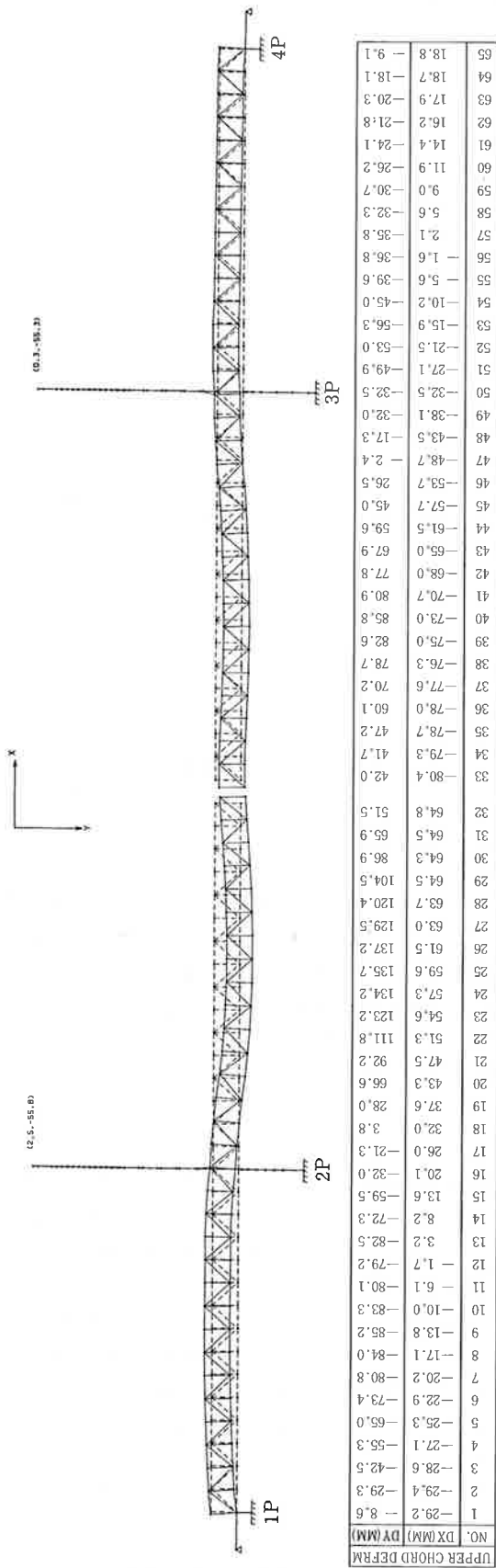


図-9 閉合系のせん断力と軸力



図一10 無応力系の変位図、変位量



図一11 STEP-17の変位図、変位量、ケーブル張力とサグ量

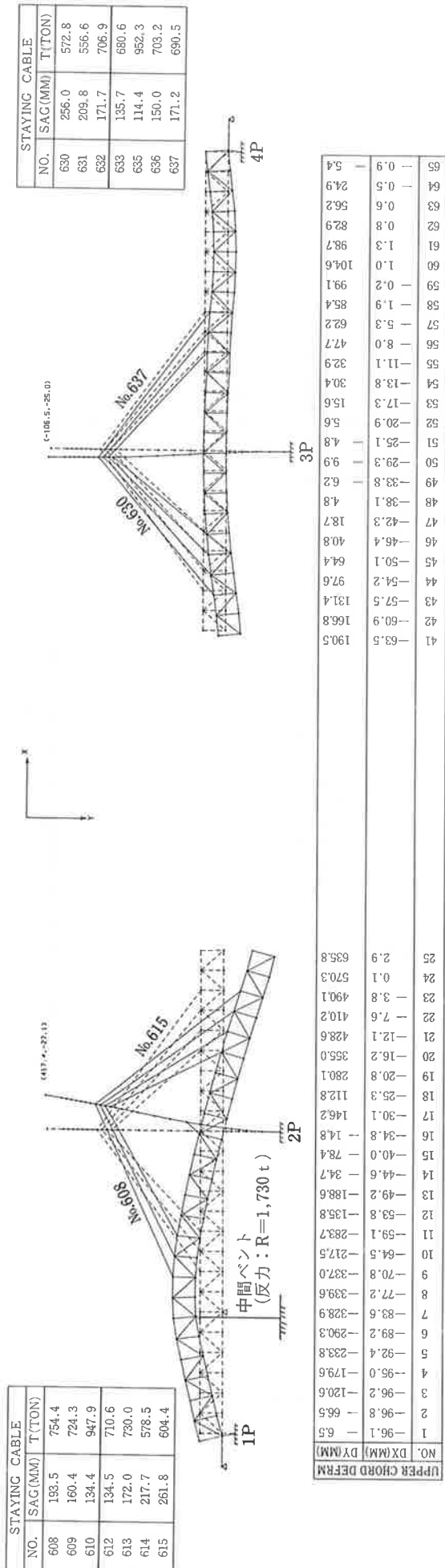


図-12 STEP-28の変位図、変位量、ケーブル張力とサグ量

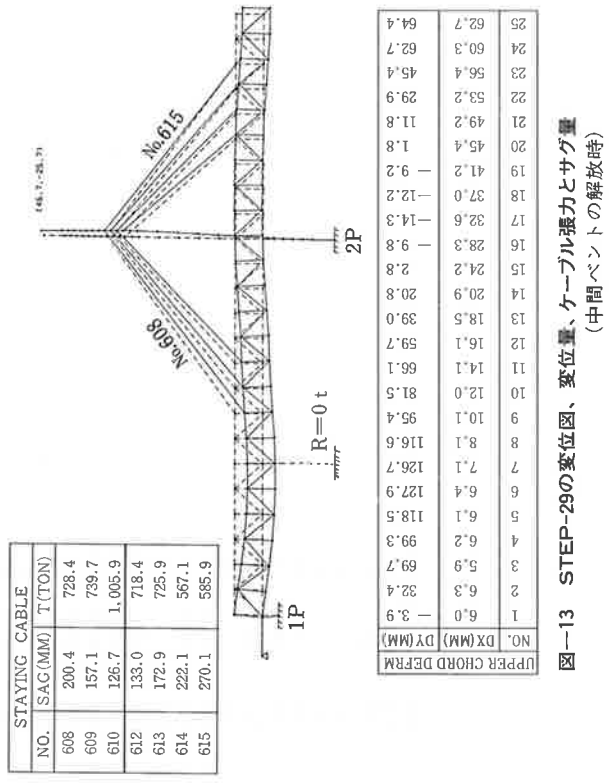
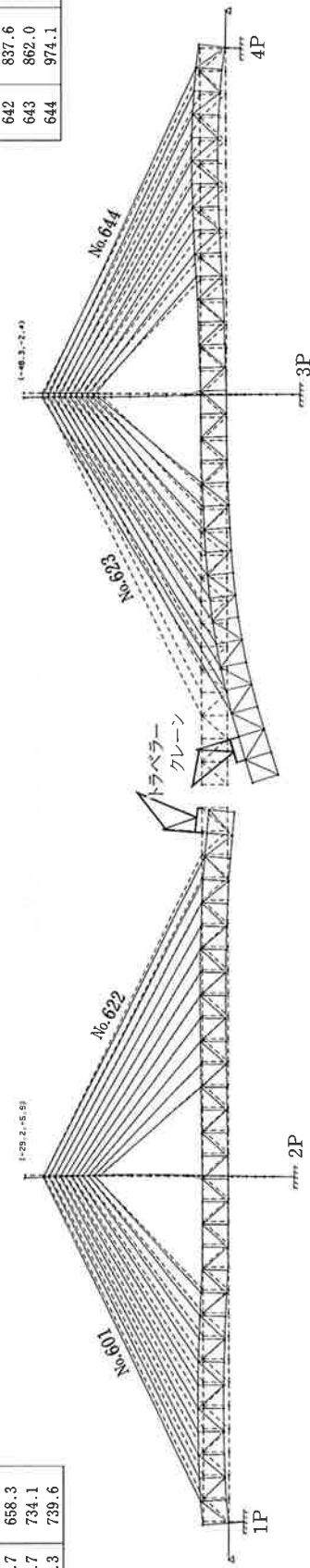


図-13 STEP-29の変位図、変位量、ケーブル張力とサグ量 (中間ベントの解放時)

STAYING CABLE		
No.	SAG(MM)	T(TON)
623	847.8	879.6
624	761.8	857.0
625	756.1	750.0
626	693.3	648.9
627	598.1	638.8
628	507.4	431.7
629	438.9	412.3
630	370.2	395.9
631	303.7	365.2
632	240.3	505.9
633	188.5	490.9
635	160.2	680.1
636	217.5	485.5
637	263.0	469.0
638	354.1	462.2
639	429.3	461.9
640	546.6	656.9
641	655.7	647.3
642	837.6	734.4
643	862.0	822.0
644	974.1	831.4

STAYING CABLE		
No.	SAG(MM)	T(TON)
601	1,144.1	720.3
602	994.4	725.2
603	946.7	661.4
604	702.1	615.2
605	600.1	611.1
606	466.2	468.0
607	379.1	475.0
608	293.4	498.0
609	227.4	511.3
610	176.5	722.5
612	175.0	546.7
613	231.7	542.6
614	310.4	406.5
615	378.0	419.4
616	467.4	418.1
617	553.5	427.8
618	649.9	577.8
619	739.8	597.9
620	847.7	658.3
621	875.7	734.1
622	993.3	739.6

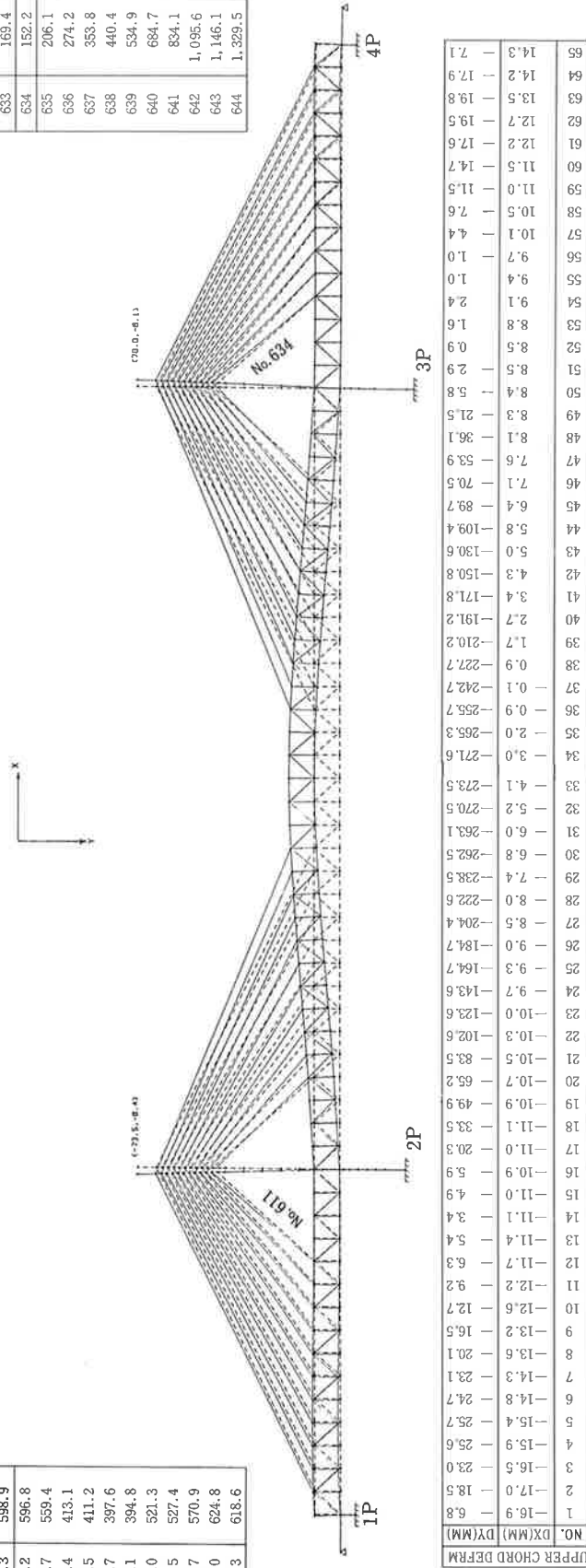


NO.	DX(MM)	DY(MM)
1	-35.4	-7.3
2	-35.6	-29.3
3	-35.0	-42.5
4	-34.3	-52.1
5	-33.6	-56.5
6	-32.9	-57.8
7	-31.2	-58.8
8	-31.5	-50.7
9	-30.0	-42.5
10	-30.6	-32.4
11	-30.6	-20.7
12	-30.6	-8.8
13	-30.6	-7.6
14	-30.5	-6.4
15	-30.4	-5.7
16	-30.2	-4.2
17	-29.0	-9.2
18	-29.7	-12.1
19	-28.3	-15.1
20	-28.8	-16.2
21	-28.3	-18.3
22	-27.0	-21.5
23	-26.4	-24.0
24	-26.	-24.8
25	-25.9	-23.6
26	-24.1	-20.1
27	-23.4	-13.2
28	-22.5	-3.2
29	-21.5	12.1
30	-20.5	30.5
31	-19.4	54.5
32	-32.4	76.1
33	23.4	550.6
34	23.9	474.0
35	23.0	400.5
36	24.4	326.7
37	25.9	263.9
38	26.8	207.1
39	27.7	161.5
40	28.7	122.0
41	29.7	92.1
42	30.6	67.1
43	31.6	48.7
44	31.3	33.9
45	32.0	23.9
46	32.5	13.9
47	32.0	6.3
48	32.4	1.0
49	32.8	-2.1
50	32.8	-3.0
51	32.9	-10.7
52	32.7	-17.6
53	32.5	-24.0
54	31.3	-30.9
55	31.1	-46.5
56	31.6	-60.7
57	31.2	-73.3
58	32.5	-82.7
59	33.9	-88.2
60	34.7	-89.8
61	36.6	-85.7
62	37.8	-77.0
63	37.1	-61.1
64	38.9	-40.7
65	39.2	-9.2

図一14 STEP-50の変位図、変位量、ケーブル張力とサグ量
(閉合前の架設ステップ)

STAYING CABLE		
NO.	SAG(MM)	T(TON)
601	1,335.8	618.0
602	1,150.9	627.5
603	1,092.5	574.0
604	807.4	535.6
605	688.2	533.5
606	539.2	405.0
607	443.8	406.2
608	348.5	419.7
609	277.3	419.8
610	221.3	576.6
611	152.3	598.9
612	160.2	596.8
613	220.7	559.4
614	305.4	413.1
615	385.5	411.2
616	491.7	397.6
617	500.1	394.8
618	721.0	521.3
619	839.5	527.4
620	978.7	570.9
621	1,030.0	624.8
622	1,189.3	618.6

STAYING CABLE		
NO.	SAG(MM)	T(TON)
623	1,191.6	527.4
624	1,034.3	632.6
625	992.0	572.9
626	887.6	507.8
627	728.7	526.1
628	595.4	358.3
629	490.0	369.5
630	394.1	373.0
631	305.0	383.4
632	229.8	528.8
633	169.4	545.9
634	152.2	545.8
635	206.1	529.3
636	274.2	386.4
637	353.8	375.6
638	440.4	372.1
639	534.9	371.2
640	684.7	626.8
641	834.1	609.8
642	1,095.6	552.8
643	1,146.1	619.8
644	1,329.5	610.8



NO.	DX(MM)	DY(MM)
65	-7.1	14.3
64	-17.9	14.2
63	-19.8	13.5
62	-19.5	12.7
61	-17.6	12.2
60	-14.7	11.5
59	-11.5	11.0
58	-7.6	10.5
57	-4.4	10.1
56	-1.0	9.7
55	1.0	9.4
54	2.4	9.1
53	1.6	8.8
52	0.9	8.5
51	2.9	8.5
50	5.8	8.4
49	21.5	8.3
48	36.1	8.1
47	53.9	7.6
46	70.5	7.1
45	89.7	6.4
44	109.4	5.8
43	130.6	5.0
42	150.8	4.3
41	171.8	3.4
40	191.2	2.7
39	210.2	1.7
38	227.7	0.9
37	242.7	-0.1
36	253.7	-0.9
35	263.3	-2.0
34	271.6	-3.0
33	273.5	-4.1
32	270.5	-5.2
31	263.1	-6.0
30	262.5	-6.8
29	238.5	-7.4
28	222.6	-8.0
27	204.4	-8.5
26	184.7	-9.0
25	164.7	-9.3
24	143.6	-9.7
23	123.6	-10.0
22	102.6	-10.3
21	83.5	-10.5
20	65.2	-10.7
19	49.9	-10.9
18	33.5	-11.1
17	20.3	-11.0
16	5.9	-10.9
15	4.9	-11.0
14	3.4	-11.1
13	5.4	-11.4
12	6.3	-11.7
11	9.2	-12.2
10	12.7	-12.6
9	16.5	-13.2
8	20.1	-13.6
7	23.1	-14.3
6	24.7	-14.8
5	25.7	-15.4
4	25.6	-15.9
3	23.0	-16.5
2	18.5	-17.0
1	6.8	-16.9

図-15 STEP-52の変位図、変位置、ケーブル張力とサグ量
 (閉合完了、トラベラークレーン撤去、ケーブルNo.611・No.634架設)
 (注) 後死荷重として舗装、新幹線2軌道がある。

あとがき

プログラム NOLAN による岩黒島橋の完成系の計算結果によれば部材力と変位量（製作キャンバー）は設計部会のそれと一致した。架設計算についても、当斜張橋は架設時の変位量が非常に少ないことから、微小変形理論によって部材力を算出し、当プログラムと比較した結果、その差が最大1.5%と少なく、当プログラムの信頼性を確認した。

プログラム NOLAN による架設計算には非常な労力と時間をかけ、最終まとめの架設STEP数は52であるが、最終まとめに至るまでには400ケースにおよぶ計算を行った。そして、架設計算の成果品として本四公団へ提出できたことは、我々にとって喜びにたえない。

今後、中央径間の架設に伴い、ケーブル張力と変位が測定されるが、プログラム NOLAN による計算値と比較していきたい。

参考文献

- 1) 岩黒島橋JV：岩黒島橋設計計算書
- 2) 後藤：柔ケーブル材の接線剛性方程式について
土木学会論文報告集 No.270 1978.2