

“関門橋”補剛桁架設時における吊橋の静学的挙動

日本道路公団 大橋昭光 ㈱宮地鉄工所 小塚義夫 後藤茂夫 ○和田忠治

1 まえがき

近年、吊橋の面内変形応力解析には、Melan の微分方程式を基調とする撓度理論（いわゆる膜理論）に代って吊材間隔や、ケーブルの挙動を正當に評価しようとする吊材離散理論が数多く発表されてきた。しかし、これ等は変形後の釣合いを考慮するが、その適合条件式は必ずしも厳密なものではなく、荷重漸増法によって繰返し計算させるものが多かった。

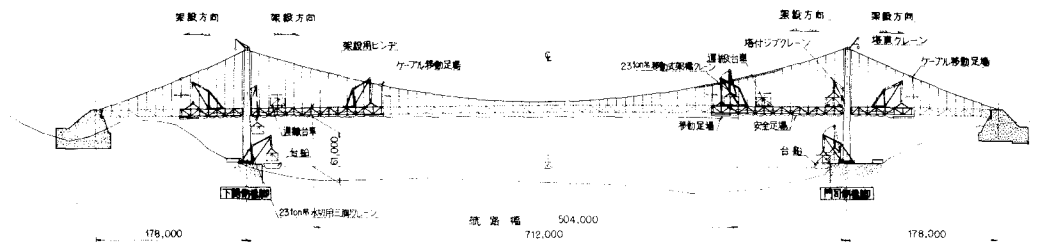
活荷重をにう完成吊橋の解析にはこの方法でもよいが、架設途上の様な大変形を呈する場合にはより厳密な解析方法が要求される。大変形理論は、厳密な適合条件式と部材力式より材端力式を作るもので、有限変形とは呼べないような大変形に対する解析理論である。

昭和48年11月開通予定の関門橋は、中央径間712mの吊橋であり、大変形理論により、架設計画された我国で最初の長大吊橋である。

本文では、関門橋補剛桁架設時における静学的な挙動についての解析結果および実測結果を示し、これらの総合的な比較により、解析上の力学モデルの妥当性について論ずる。さらに、本橋において得られた経験より、今後における吊橋の設計や、架設計画の立案時において留意すべき二、三の点を指摘する。

2 逐次剛結工法

図-1 補剛桁架設要領図



従来、諸外国で行なわれてきた長大吊橋補剛桁の一般的な架設工法は、2～3格間の小ブロックを吊材へ取付け、接合可能な個所だけ接合し、その後、架設が進行し接合可能な時点でその継手を剛結する方法が多くとられてきた。しかしながら、この方法は我国の様に架設時期に台風や突風が避けられない自然条件の厳しい場所では、接合部分は風などの外力に対して非常に不安定な状態にあり、耐風安定性に不安がある。従って我国の様な自然条件下での長大吊橋架設を考えると、部材ブロックを吊材へ取付ける前に既架設の補剛桁へ剛結し、その後吊材を引込むという逐次剛結工法による補剛桁架設が有利となる。本橋の場合は、逐次剛結工法を基本とし、架設時応力による断面補強量の低減を図るため、中央径間7パネル目に架設用ヒンジを設けて補剛桁の架設を行った。

3 解析理論の概要

一般に架設時における吊橋は微小変形理論的に不安定であり、弾性的非線型挙動を示す。このため解析理論は十分厳密でなければならない。本橋の架設計算に適用した解析理論は、基本的には非線型有限変形法による大変形理論^{(3), (4)}であり、吊橋の各種の架設状態の解析ができる。

3-1 解析理論上の仮定

- 1) 大変形挙動の影響は、主ケーブルのみと考える。
- 2) 主ケーブルは可撓性であるとし、接点間では直線をなすものとする。
- 3) 吊材の傾斜の影響は無視する。したがって補剛桁の水平変位は構造解析上不要となる。
- 4) 中間主塔などの処理は、換算バネ定数を用いる。

3-2 解析理論の概要

図-2の簡単なモデルについて説明する。

(a)は、主ケーブルおよび吊材の初期状態

(b)は、無応力状態の補剛桁形状（製作そりのまま）とする。いま、ある架設段階、たとえば、 $j \sim k$ 節点間の補剛桁が吊材に取付けられ、その間の桁が節点で剛接された状態と等価な状態を(a)，(b)を用いて作り出すことにすれば、

- i) まず、(b)の $j \sim k$ 区間以外の全節点をすべてヒンジとする。
- ii) つぎに、この桁を(a)の吊材下端（所定の補剛桁取付位置）の対応点に取付ける
- iii) $j \sim k$ 節点に所定の補剛桁自重および架設機材などの架設荷重を作用させる。

という操作をすることになる。

もちろん、(a)の吊材下端の示す形状は、(b)の補剛桁形状とは、喰いちがいがあるため、 $j \sim k$ 区間の節点の取付けに際しては、若干の応力が導入されることになる。また、つぎの架設段階へ移行する前段として、これにつぎの架設ブロックが無補剛のまま吊り下げられた状態が考えられるがこの場合には、前記の状態に、当該節点をヒンジのままとし、単に新たな自重のみを追加すればよいことになる。

以上の様に考えた場合、構造系(a)と(b)は共通の不静定力、 $Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ (図-3)を介して一体化される。こうして、図-1の(a)と(b)は、それぞれの初期形状の差による相対喰いちがいを0とするような変形を生ずる。

4 解析モデル

構造物を設計する場合、まず最初に目的構造物に対する解析モデルを設定し、各部材の応力や、変形状態を求め、概略の断面等を決定する。これに製作上の制約条件や、架設工法上の条件などを加味

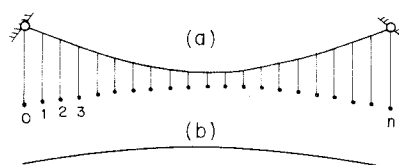


図-2

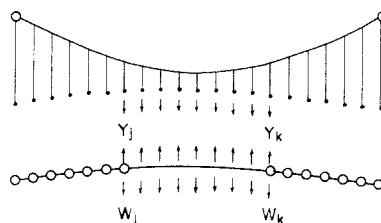


図-3

設計，製作を完了した部材は，現地において組立・架設されるが，各架設段階における実測構造物の挙動を実測し，解析結果との比較を行うことにより，架設精度を把握することができる。

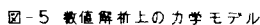


モデル B とは同一であることが望ましいが、一般には異なることが多い。とくに吊橋の様に、基礎、主塔、ケーブル、補剛桁といった各構造物の複合構造物では、前の工種の最終状態が、次の工種の入力情報となり、解析モデル A と解析モデル B とでは若干の相違は避けられない。

i) 主ケーブル長は、主ケーブル架設完了時におけるサグの測定結果より算出した値を使用する。

iii) スプレーサドルは傾斜ローラー,

iv) 各架設段階における荷重は精算実荷重を入力する。ただし、キャットウォークの重量は、すべて主ケーブルへの節点荷重として扱う。



VI) 主ケーブルのヤング率等は，表 - 1 に示す仮定値を入力する。

そのものは、無応力に近い状態でソケットを定着する方法を採用した。このため、解析上のモデルも、実際構造物の構造系と等価な構造系となるよう、架設先端部における吊材断面積を処理する。

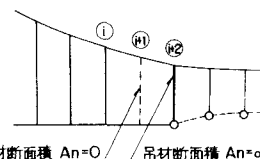
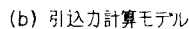
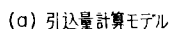


図-7 計算モデル

主ケーブルの断面積	$A_c = 0.28014 \text{ m}^2$
のヤング率	$E_c = 2.0 \times 10^7 \text{ 1/m}^2$
主塔の鉄骨断面二次モーメント	$I_o = 4.466 \text{ m}^4$
吊材の断面積	$A_h = 14.789 \text{ cm}^2 \times 4$
のヤング率	$E_h = 1.45 \times 10^7 \text{ 1/m}^2$
補剛桁のヤング率	$E = 2.1 \times 10^7 \text{ 1/m}^2$
(中央支間) 補剛桁の断面二次モーメント	$I_1 = 1.505 \text{ m}^4$
(側支間) 補剛桁の断面二次モーメント	$I_2 = 1.299 \text{ m}^4$

すなわち、図-6において $i \sim i+2$ を架設中の格間とすると、引込量を求める場合には、 $i+1$ 、 $i+2$ 点のいずれの吊材も無負荷の状態であるので、図-7 (a) に示すように、 $i+1$ 、 $i+2$ 点の吊材断面積を 0 とする。吊材定着時には、 $i+1$ 、 $i+2$ 点のいずれの吊材も無負荷であるが、引込装置には大きな張力が働く。しかし、この張力によっては、 $i+2$ 点の吊材には弾性伸びが生じない。したがって、図-7 (b) に示すように、 $i+2$ 点の吊材として十分大きな断面積を入力する。

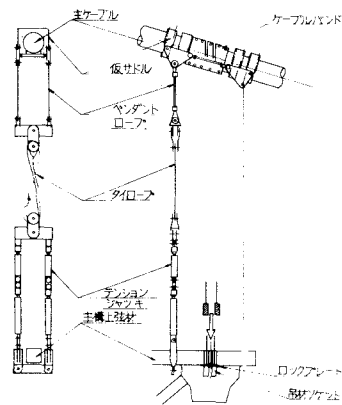


図-8 吊材引込装置

5 挙動の実測と解析結果

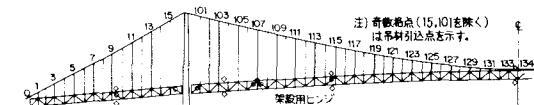
補剛桁の架設期間中、表-2に示す項目について静力学的な挙動の実測を行った。

吊橋の形状および補剛桁の応力については、図-9に示す架設状態を選び、全12回の測定を行った。また、吊材の引込量および引込力については、各引込点毎に測定を行った。

図10～図18にこれらの実測結果と解析結果との比較を示す。

表-2 測定項目と測定器具

測定項目	測定器具	測定時期	備 考
吊材引込量	吊材コンパス	日中架設時	
吊材引込力	油圧ジャッキ	〃	Cap 500kg、油圧40MPa、最大出力15°×20°/分
ケーブルサドルの移動量	レベル、巻尺、深度計	架設中	中央部、端部
桁の鉛直変位	レベル	〃	桁端および吊材引込点
桁の水平変位	吊材コンパス	〃	主桁と補剛桁の水平ヨリ
主桁の水平変位	スラッシュ	〃	
スラッシュサドルの移動量	コンパス	〃	スラッシュサドル移動面に沿ったヨリ
架設用ケーブルの張力	吊材コンパス	〃	
ケーブルの表面温度	接触式温度計	〃	ケーブル上10ヶ所、4ヶ所
曲げモーメント	コンタクト式ストレインゲージ	〃	上吊材13ヶ所×12点、下吊材13ヶ所×12点
せん断力	〃	〃	斜材12ヶ所×10点



吊材名	U4	U1	U2	U3
材料名	L4	L1	L2	L3
材料名	S6	S1	S2	S4

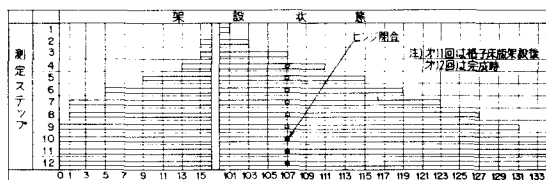


図-9 測定ステップと架設状態

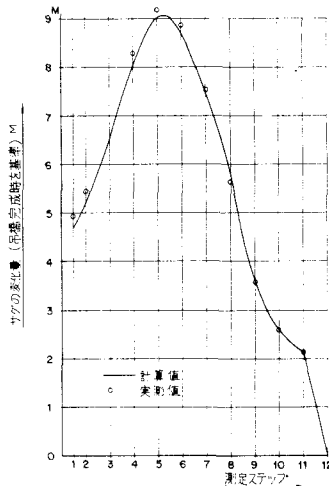


図-10 架設時におけるサグの変化(ケーブル中央1/2点)

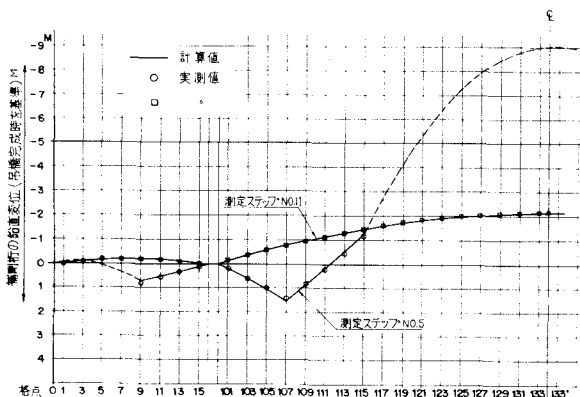


図-11 架設時における補剛桁の鉛直変位

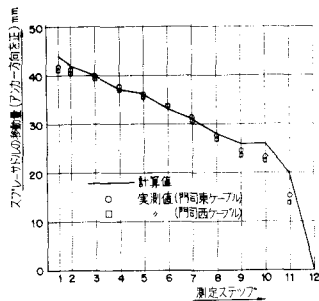


図-12 架設時におけるスプレッダルの移動量

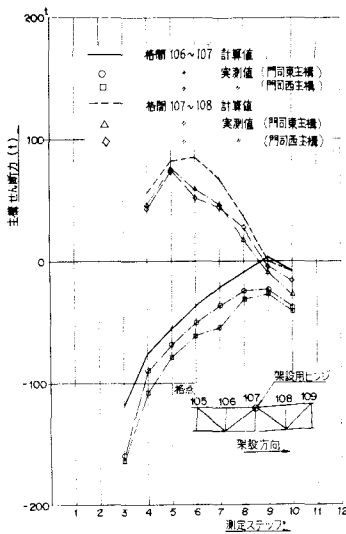


図-15 架設時における主構せん断力(架設用ヒンジ点)

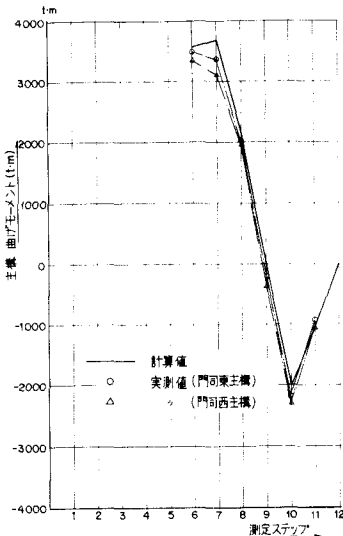


図-16 架設時における主構曲げモーメント(中央径間1/4点)

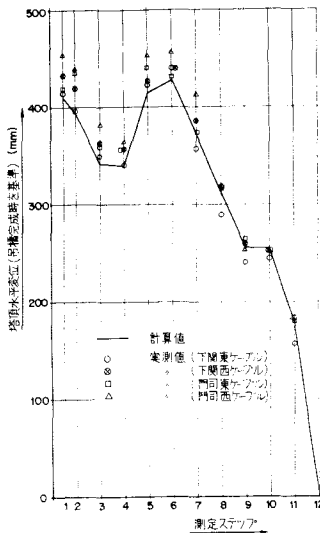


図-13 架設時における塔頂水平変位

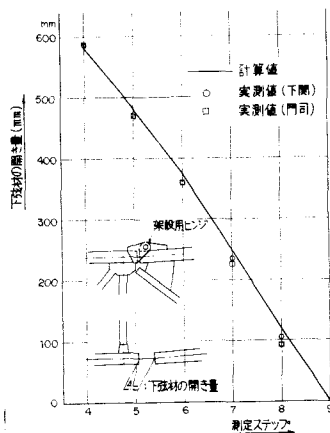


図-14 架設用ヒンジ部主構下弦材の開き量

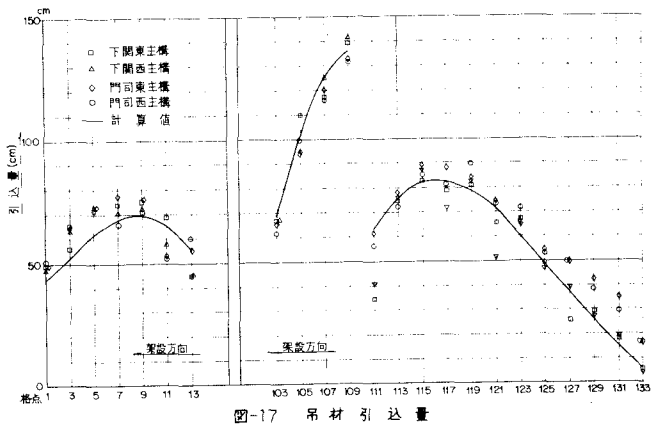


図-17 吊材引込量

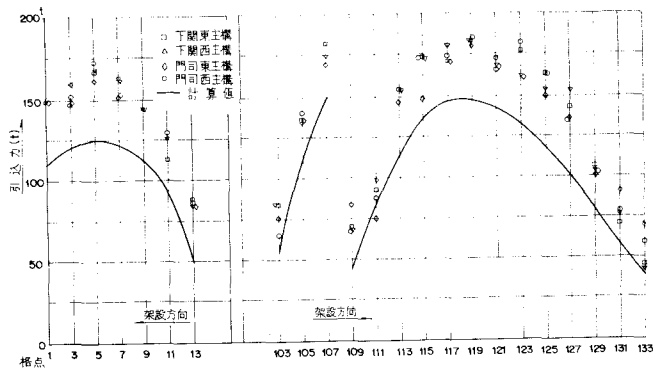


図-18 吊材引込力

6 結果に対する考察と解析モデルの評価

6-1 吊橋の形状

架設途上における吊橋の静力学的な変形挙動に関する解析値と実測値は、図-10～図-14に示した様に全体としては十分な精度が得られている。測定ステップの前半でケーブルサグ(図-10)や、塔頂水平変位(図-13)に解析値と実測値の間に差がみられるが、これは、主として解析モデルと、実際構造物との構造系の違いによる。すなわち、解析上はキャットウォークの重量はすべて主ケーブルに載荷した、図-19(a)の力学モデルを仮定したが、実際構造物では、キャットウォークケーブルに張力が入った、図-19(b)の様な構造系となっていたことによる。

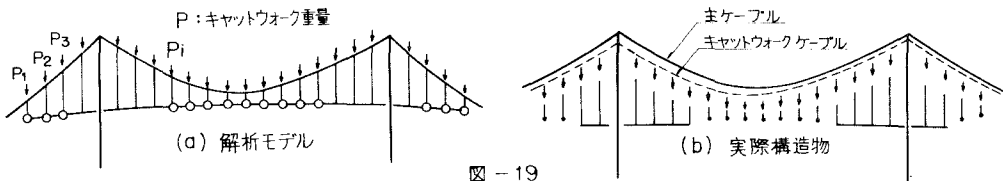


図-19

補剛桁の架設作業と並行して、キャットウォークの重量を主ケーブルへと盛替えた結果、測定ステップの後半では、解析モデルと、実際構造物との構造系が一致し、その解析結果や実測結果も非常によく一致するようになっていく。架設用ヒンジの開き量や、架設用ヒンジ点における鉛直変位には、多少の誤差があるが、これは、解析上は主ケーブルを可撓性と考えているが、実際のケーブルは、その剛性のため、完全な折れ点とはならないことによる。このような局所的な問題をのぞけば、架設途上における吊橋の静力学的挙動は、構造系や、荷重条件が明確である場合には、かなりの精度で解析できることが分る。

6-2 補剛桁の応力

架設時における補剛桁の応力は、コンタクト式ストレインメーターにより測定した部材の歪を軸力に換算し、それをさらに、せん断力や、曲げモーメントに換算して、解析値との比較を行っている。図-15は、架設用ヒンジ点の前後パネルにおけるせん断力、図-16は、中央径間1/4点における曲げモーメントの履歴を示したものである。いずれも測定値の精度を考えると、解析値と実測値はよく一致しており、吊橋完成時に補剛桁が無応力であるという本橋の設計思想に対して、架設誤差などによる残留応力が殆んどないことが確認される。

6-3 吊材の引込

図-17は吊材引込量に関する結果であり、解析値と実測値はよく一致している。

図-18は吊材引込力に関する結果である。吊橋の形状、補剛桁の応力、および吊材引込量に関しては解析値と実測値がよく合っているにもかかわらず、吊材引込力については、解析値と実測値との間にかなりの差がみられる。吊材引込力の測定は架設作業中に行っており、その測定精度は、他に比べて低い、一部で電気抵抗線歪計との併用により、その測定誤差が、せいぜい10t～15t程度であることを確かめている。また、図-18における解析値と実測値の差が、解析上の入力データ、たとえば、補剛桁の剛性や、荷重状態の誤差といった原因によるものではないことも確かめている。したがって、解析上のモデルや、理論上の仮定に原因があると考えられる。ここで、吊材引込を主ケーブルの折れ

角との関係において調べてみる。

図-20 は、吊材引込力の解析結果より、主ケーブルの折れ角度をプロットしたものである。横軸は吊材引込点を、縦軸には、引込点や、架設用ヒンジ点におけるケーブルの折れ角度をとっている。図-21 は、格点 115 におけるケーブル折れ角の変化を示したもので、吊材引込時に大きな折れ角の変化をしていることが分る。

一方、実際構造物では、主ケーブルは格点毎にケーブルバンドで締付けられており、曲げ変形に対して拘束を受けている。また素線間の摩擦が大きく、ケーブルは局部的にはかなりの剛性を有している。しかも吊材引込作業は比較的短時間（30分～60分）で完了したため、この急激な外力の変化（図-22）に対して変形が十分ともなわず、最終釣合状態への移行にはある程度の時間を要したものと考えられる。

このように考えると、吊材定着時には、前回の引込点ではケーブルの折れ角が残留し、一方、引込点では、解析値より小さな折れ角を示すことになる。このため、吊材定着時には、解析値より大きな引込力を要したと考えられる。

すなわち、吊材引込作業の様に、急激な外力の変化が主ケーブルに作用する場合には、静力学的な解析では、厳密にその挙動を把握することが困難であり、さらに、主ケーブルの折れ角が大きい場合には、主ケーブルを可撓性と仮定することには多少の誤差を伴う。

7 あとがき

関門橋補剛桁架設途上における吊橋の静力学的挙動について、実測値と解析値の両者を比較し、架設途上の様に大変形を呈する場合にも、大変形理論による解析により十分な精度が得られることを示した。しかし、構造系が不明確な場合や、荷重状態が把握できないような場合には、実際構造物と等価な力学モデルの設定が不可能であり、解析精度や、架設精度を論ずることができなくなる。

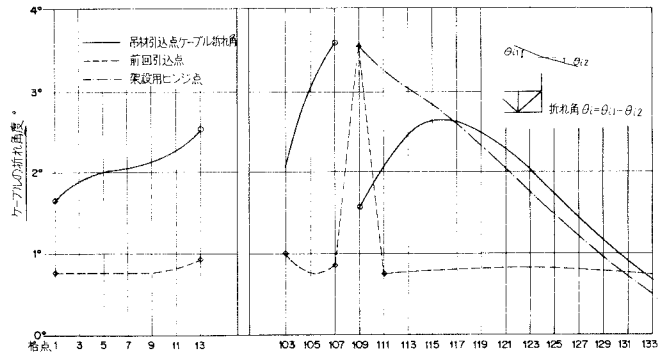


図-20 主ケーブルの折れ角度

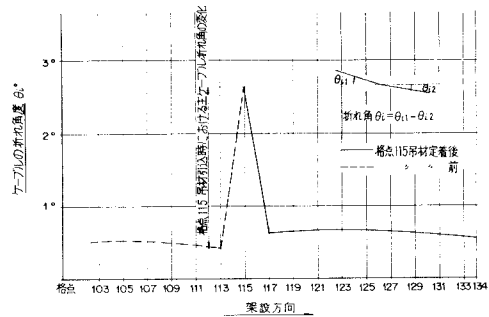


図-21 格点115における主ケーブル折れ角度の変化

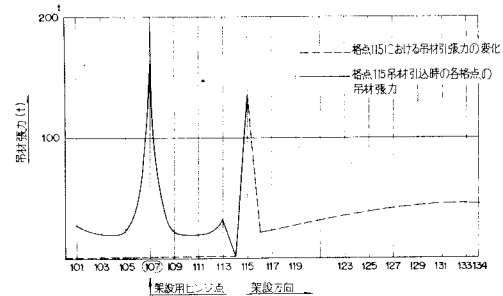


図-22 格点115 吊材張力の変化、および格点115吊材引込時における各格点の吊材張力

さらに、主ケーブルの局所的な剛性の影響が問題となるような場合や、吊材引込の様に主ケーブルに作用する外力の変化が急激である場合などには、実験などにより検討することが望まれる。

以下に、今後における吊橋の解析や、架設計画立案時において留意すべき点を示す。

1) 逐次剛結工法について

逐次剛結工法では、この工法を特徴づける、吊材の引込作業を必要とするが、引込装置の能力には十分な安全度をもたせ、主ケーブルの局所的な曲げ剛性による張力増や、吊材ソケット定着作業のための上げ越しによる張力増などを十分見込んでおく必要がある。

2) キャットウォークの取扱いについて

キャットウォークは、次のような理由により、補剛桁架設時には、主ケーブルに完全に荷重が盛替えられている、図-19(a)の様な構造モデルとなる様に設計することが望ましい。

i) 構造系が明解である為、キャットウォークによる影響が正確に算定できる。

ii) 主ケーブルとキャットウォークの変形挙動が同じになるので、キャットウォークと主ケーブルや吊材との接触を防ぐことができる。

3) 主ケーブル上の架設機材について

平行線ケーブル上に架設機材を走行させる場合には、十分な配慮が必要である。とくに、主ケーブル張力の小さい時には、主ケーブルの断面形状がわずかな外力で変形することを考えて、主ケーブルの防護や、走行架設機材の装置を設計する必要がある。

参考文献

- 1) 大橋昭光 : 長大橋梁の諸問題 上部構造の架設
(土木学会関西支部講習会テキスト 昭和48年3月)
- 2) 篠原洋司 : 関門橋補剛桁工事の概要
(土木施工 昭和46年5月号)
- 3) 後藤・和田・前田 : 吊橋架設時における不安定架構の大変形解析
(土木学会第26回年次学術講演会集 第1部 P563)
- 4) 後藤・大西・大槻・新村 : 非線型有限変形法(大変形法)によるトラスの
大変形解析とその応用プログラム
(土木学会論文集 194 1971年7月)
- 5) 後藤・新村・和田 : 多径間吊橋の一特性
(土木学会第27回年次学術講演会集 第1部 P771)
- 6) 関門橋補剛桁工事共同企業体編 : 関門橋補剛桁工事報告書 架設
(昭和48年3月)