

ていて工場が存続し、PS工法に慣れた現場技術者・作業員がいたという側面を否定できないように思う。しかし、本州四国連絡橋向け、さらには白鳥大橋・安芸灘大橋向けのストランド製造完了を踏まえて、プレファブ・ストランド製作工場のうち長尺・大重量ストランドの海上輸送が可能な臨海部に位置した工場は閉鎖されたので、今後のプロジェクトにおいてはストランド単重や合計数量を考慮のうえ、工場を再開させてPS工法とするか、それともAS工法にするか、という比較と判断が求められることになる。

東京湾口橋などの超長大吊橋の計画においては、現場集束PS工法(ストランドの製造を橋台背面で行うというアイデア)も検討している。これは、明石海峡大橋において、現場での施工性を高め、空隙率の小さなよく締まったケーブルを架設するというPS工法の利点は遺憾なく発揮された¹¹⁹⁾ものの、ストランドの架設期間6カ月に対して製作に3年間も要し、完成したストランドの保管が大変だったこと、ストランド重量が90tfに達して輸送も大作業になったこと(全ては施工前の予測どおりではあるが)、などの反省があるからである。

また今後は、ケーブルの架設法とも関係させて、キャットウォークの合理化の検討も必要である。スパンが長くなればなるほど、キャットウォークの費用・架設工期が増加し、ケーブル工事全体を通しての技術的クリティカルがキャットウォーク・ロープの架設に移ってくる。しかし、一度キャットウォークができてしまうと、架設対象(ストランド、ケーブルバンド、ハンガーロープ)の運搬・支え・落下防止、作業足場・通路などとして、多目的に役立つのも事実である。もしキャットウォーク無しで施工するとなると、ストランド等の架設、何らかのトラブルがあった時の人員接近などのために、かなり複雑な設備を要するものと思われる。

9.4.2 吊橋、斜張橋補剛桁

(1) 吊橋の補剛桁架設

我が国では耐風安定性の問題から吊橋の補剛桁にトラス型式を採用することが多いため、吊橋の架設方法の研究はトラス型式を対象として行われてきた。しかし、明石海峡大橋のスパン長を凌ぐ超長大橋の建設に対しては、経済性の問題から箱桁の採用が有力になっており、今後の検討は箱桁型式補剛桁の架設を対象として研究されるものと思われる。

超長大橋の補剛桁架設を考える場合、まず、架設順序については、動的および静的構造特性、海象・気象条件、補剛桁部材の搬入経路の条件などが考慮されるが、特に耐風安定性の観点から決定されることが多い。現在までの実例から考察すると様々な架設順序が用いられているが、おおよそ次の3種類の架設順序に分類できよう(図9.38)¹²⁰⁾。



(1) 主塔部より中央径間中央あるいは橋台部に向かって架設(関門橋, 南北備讃瀬戸大橋など)



(2) 中央径間中央部と橋台部より主塔部に向かって架設(Humber橋, 大島大橋など)



(3) 中央径間は主塔部より中央部へ側径間は橋台部より主塔部へ向かって架設(明石海峡大橋)

図 9.38: 補剛桁架設順序

ケーブルや斜めハンガーが採用される可能性があることから¹²²⁾、建設実績のない新型式の吊橋および斜張橋などの吊型式橋梁の架設時に適用可能な架設精度管理法の概要を以下に述べる。

(2) 誤差解析

新型式の吊型式橋梁を採用した場合、建設実績がないことから架設管理値の設定が非常に難しい。そこで誤差解析により誤差の入った構造系の静的挙動を組立解析(以下、Forward 解析と呼ぶ)で求める。誤差解析によって誤差の要因別の影響をみることのできる。影響の大きい要因に着目して架設精度管理を行う方法が考えられている¹²³⁾。

まず、第一に、架設系の計算には完成系から荷重除去を行うBackward 解析をして架設系を形成し、その架設系の断面力および完成系からの変位の差を求めておく。そこで、Forward 解析を用いて無応力(無荷重)系の格点座標(完成系より荷重を除去するBackward 解析で得られる)に死荷重を載荷し完成系を求め、先に仮定した完成系と一致することを確認しておく。次に以下で設定される誤差を入力値に導入して、誤差の入った場合の完成系の断面力ならびに座標をForward 解析にて求める。誤差がない(設計計算に使用する)完成系と比較すれば設定した誤差による影響度が判ることになる。同様に他の誤差要因による誤差を入力して同じように影響度を計算する。誤差量の重ね合わせは同時性を確率的に考えて、誤差伝播の法則より最小自乗和(RMS)法を適用する。このようにして変位および断面力の誤差量が定量化できるので、架設前に架設管理値の設定が可能となる。以下、具体例を挙げて説明する。

1) 誤差の設定

誤差の要因は、主として設計・製作・架設に起因するものが挙げられる(図9.39)¹²⁴⁾。過去の工事例を参考にして、此花大橋の場合は誤差要因とその誤差量の設定を表9.7のように行っている。

2) 誤差モード

誤差の要因別に誤差の入った完成系を求め誤差のない完成系との差(座標と断面力)を求める。座標のずれ(差)は、誤差モードとよぶ変形状態として求まるが、簡単な例を図9.40に示す。

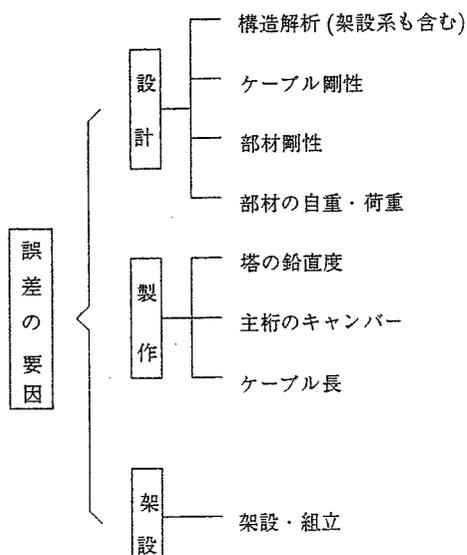


図 9.39: 誤差の要因

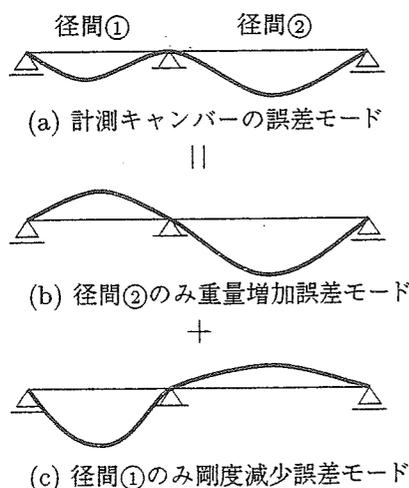
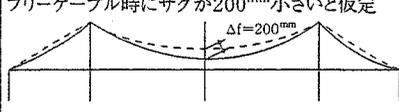
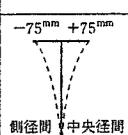


図 9.40: 誤差量の誤差モードによる展開例 ((a) = (b) + (c))

3) 誤差系の計算

前例のない橋梁型式のシム調整に必要なシム厚は、上記の誤差モードの重ね合わせによって予測できる。例えば、此花大橋では必要なシム厚の予測を表9.7の①～⑬の誤差が重なった場合、中央径間の1/4点付近の張力変動が大きくなるが、シム厚は50mm以下となることを事前に明らかになった。この結果にもとづいてハンガー定着部の詳細構造設計を行いシムプレートを準備したが¹²⁵⁾、実際工事でもほぼ解析どおりの結果が得られ誤差解析の有効性が確認された。

表 9.7: 誤差の分類

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 $E=2.0 \times 10^7 \text{ t/m}^2$ に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	$\Delta f=200 \text{ mm}$	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 $\delta_{ca}=L/10000=300/10000=0.03$	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 $l_0 \pm 20 \text{ mm}$ の誤差を見込む	⑬
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。	略
主塔関係	解析誤差	断面積	±5%		⑩
		剛 度	±5%		⑪
	架設誤差	塔の建方誤差	水平方向 ±75mm	 フリースタANDINGの状態では水平方向に±75mmの誤差を見込む。	⑫
	製作誤差	塔の寸法誤差	鉛直方向 ±20mm	無応力状態で±20mmの誤差を見込む。	⑬

(3) 構造同定 (System Identification)

設計時に用いる誤差量は、過去のデータに基づいた各誤差要因にそれらの強度を仮定し得たものである。架設が始まると誤差量が実際に生じてくる。構造同定の手法により誤差要因別の定量化が可能になるのでその手法を以下に述べる。

実際に架設現場で現れる誤差 $\{Z_i\}$ は、誤差モード $\{F_i\}$ に誤差寄与率 $\{\alpha_i\}$ をかけ算した総和で近似できると考えられる。誤差寄与率ベクトル $\{\alpha_i\}$ は、架設途中の計測で得られたデータをもとに構造同定 (SI) の手法を用いて決定できる。構造同定の方法は、種々開発されているが、ここでは最小自乗法による方法の定式化を示す¹²⁶⁾。

ここでは、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的重ね合わせとみなす。

$$Z = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot F_i \quad (F_i: \text{誤差モード}) \quad (9.75)$$

マトリックス表示をすれば、

$$Z = F \cdot \alpha \quad (9.76)$$

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1N} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2N} \\ \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ f_{M1} & f_{M2} & \cdots & f_{MN} \end{bmatrix}, \quad \alpha = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_N \end{Bmatrix}$$

M : 計測項目数(断面力および変位など)

N : 誤差要因の数

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

構造物の断面力および変位の計測値を R 、誤差のない構造系での計測値を R_0 とすると、仮に誤差要因を完全に抽出して展開すれば次式となる。

$$R = R_0 + Z \quad (9.77)$$

しかし、実際は式 (9.77) は近似的にしか成立しないので、式 (9.77) の両辺の差の自乗和を最小とする条件を求める。

$$\phi = (R_0 + Z - R)^2 \rightarrow \text{最小化} \quad (9.78)$$

すなわち、目的関数 ϕ の最小条件により次式 (9.79) となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \alpha} = 0 \quad (9.79)$$

$R_0 - R = r$ とおけば、

$$\phi = (Z + r)^2 = (F \cdot \alpha)^2 + 2 \cdot r \cdot (F \cdot \alpha) + r^2 \quad (9.80)$$

式 (9.80) を式 (9.79) に代入すれば、次式から各誤差要因の寄与率 α が求まる。

$$\alpha = -(F^t \cdot F)^{-1} \cdot F^t \cdot r \quad (9.81)$$

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 を導入すれば、

$$\alpha = -(F \cdot \rho \cdot F)^{-1} \cdot F^t \cdot \rho \cdot r \quad (9.82)$$

ただし、 ρ は対角マトリックスである。

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \rho_N \end{bmatrix} \quad (9.83)$$

実際の計算において、この重み ρ の適当な値を求めるには、試行錯誤の作業が必要になり、吊型式橋梁の形式・規模が異なると、変化するのでその都度決め直す必要がある。なお、重みの決定までの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されている¹²⁶⁾。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がある。

(4) 完成系の予測

誤差要因が同定できれば、Forward 解析により架設途中で完成系の予測が可能となる¹²⁶⁾。未架設の工程でも同じ誤差寄与ベクトル $\{\alpha_i\}$ が発生すると仮定し、完成系を予測する。架設途中における完成系の予測を図 9.41 に示す。適用にあたっては、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弾力的な運用が必要になる。例えば、誤差寄与ベクトル $\{\tilde{\alpha}_i\}$ に幅を設けておくのが望ましいが、こうすれば、完成系の予測も幅を持つ。ここに、 \sim は値に幅を有するファジィ量を

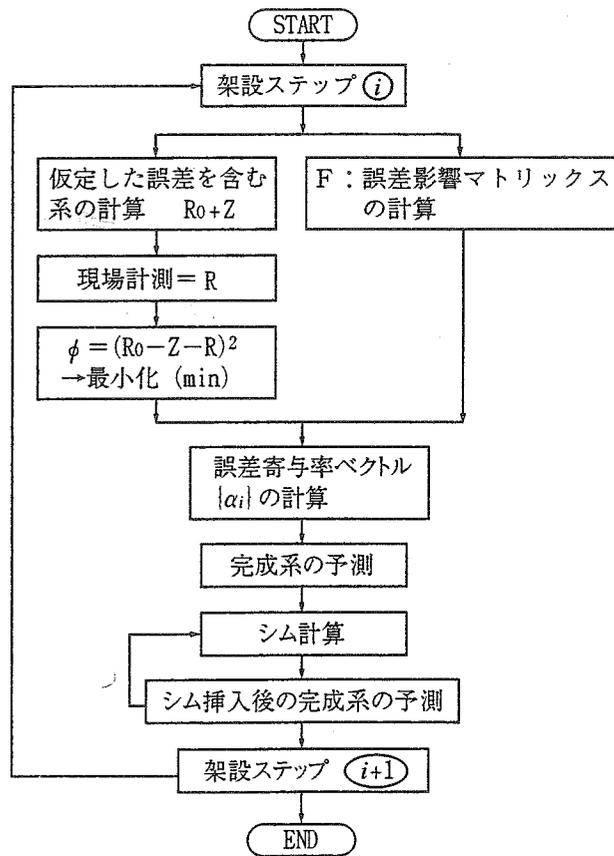


図 9.41: 架設途中の完成系の予測

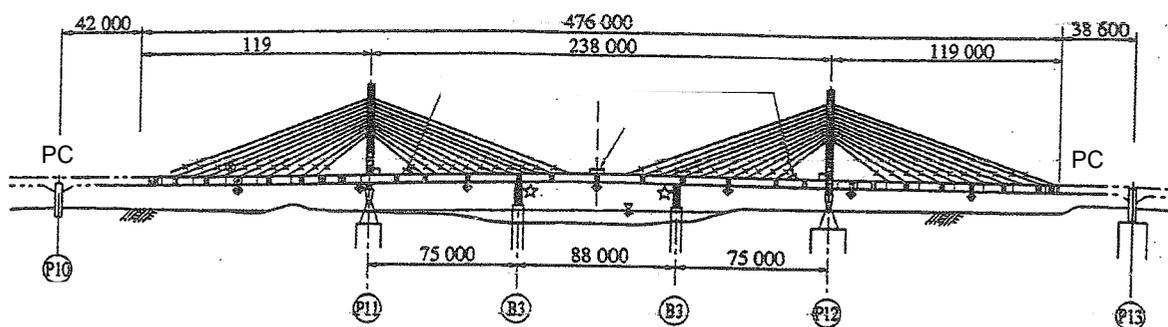


図 9.42: 菅原城北大橋 (架設系)

示している¹²⁶⁾。この場合、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となる。すなわち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こともできる。以上の方法は、建設経験のな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、菅原城北大橋は図 9.42 に示す橋長 476 の 3 径間連続鋼斜張橋であるが、側径間を単材架設で張り出しながら架設し、クリープが未完了の PC ラーメン橋と空中で接合させヒンジ部を設けるといった前例のない構造形式を有していた。本手法の適用によって架設は順調に推移し、本手法の有効性が示された¹²⁶⁾。

(5) シム計算法

ケーブル張力を変更するためにケーブル定着部にシムプレートを挿入または除去することをシム調整として述べたが、シムプレート板厚(シム量)を決定するシム計算法について述べていないのでここで簡単に触れよう¹²⁴⁾。

さて、シム量の算定法はケーブルの単位長さの変化によって生じるケーブル張力や桁形状の変化の影響値を予め計算しておき、これらを利用し最適化手法を適用してシム量を決定する。多くの手法が開発され実用に供しているが以下の代表例がある。

川崎橋¹²⁷⁾では、シム量を目的関数に選び調整終了後に許容できる残留張力誤差を設定した繰り返し計算により決定している。同様な手法は合掌大橋¹²⁸⁾など多くの架設に採用に対して適当な無次元化操作を施し、各パラメータ間に重み係数を考慮できる目的関数を用い、シム量だけでなく形状についても同時に管理が可能な方法を用いた。横浜ベイブリッジ¹³⁰⁾では、現場における調整作業を少なくするために、ケーブル張力の調整箇所数を最小にする目的関数を設定した解法を開発して用いた。生口橋¹³¹⁾では、ファジィ線形回帰分析により設計者の意図するケーブル張力およびキャンバー値などを希望調整値として制約条件に含め、重み決定のプロセスなしに容易にシム量を決定する方法(ファジィシム調整法)¹³²⁾を用いた。

(6) 計測技術および新素材

以上の工事によるシム調整は全て温度変化の影響が入らないよう橋体温度が一定となる夜間に行われていた。安全と労働条件の改善を意図して中島新橋では塔・桁の橋体温度を同時刻に正確に計測することの可能な光ファイバーによる温度計測システムを導入した¹³³⁾。こうして、橋体温度の計測精度を向上させ温度補正を正