
大空間構造物「スーパーウイング」工法の開発

Development of Prestressed Steel Truss "Super Wing"

小阪 清(Kiyoshi Kosaka) 武元 弘之(Hiroyuki Takemoto) 橋本 順次(Junnji Hashimoto) 小泉 秀夫(Hideo Koizumi) 藤澤 一善(Kazuyoshi Fujisawa) 山本 昇(Noboru Yamamoto)

要旨：

川崎製鉄と清水建設（株）で共同開発したスーパーウイング工法は、プレストレスト・スチール・トラスを採用しており、またスライド工法と組み合わせることで最大限の効果を発揮するものである。本工法の開発に際し、スパン 100m の実大モデルを建設し、プレストレスト導入時ならびに変動荷重時のプレストレスト・スチール・トラスの力学的性状を求めた。さらに、PC ストランドのリラクセーションを実験的に把握することで、設計方法と理念の合理性を確認した。また、スーパーウイング工法が対象とする大スパン構造用の風圧係数を風洞実験により体系的に研究し、設計上有用な種々のデータを得た。さらに、屋根のスライド機構を実大モデルによるスライド実験により検証し、スライド工法の施工上の有意性を確認した。

Synopsis：

Kawasaki Steel Corp. and Shimizu Corp. have developed a unique long span structural system called "Super Wing", in which prestressed steel truss(PSST) and the sliding construction method are adopted. During the development of Super Wing, a full-scale 100-meter-span model was tested. The structural behavior of the PSST was observed during the prestressing stage and under execution of the sliding method. In addition, the relaxation of prestressing strands as well as the structural behavior of prestressing strands fixation were studied experimentally. The wind pressure coefficient of this long span structure was investigated using a wind tunnel. As a result of these tests, Super Wing has proven to be successful as a structural design concept and construction method.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Development of Prestressed Steel Truss "Super Wing"



小阪 清

Kiyoshi Kosaka
エンジニアリング事業部 建築技術部兼土建技術部 部長



武元 弘之

Hiroyuki Takemoto
エンジニアリング事業部 建築技術部開発設計室 主査(部長)



橋本 順次

Junji Hashimoto
エンジニアリング事業部 建築技術部開発設計室 主査(課長)



小泉 秀夫

Hideo Koizumi
エンジニアリング事業部 建築技術部建築技術室 主査(掛長)



藤澤 一善

Kazuyoshi Fujisawa
エンジニアリング事業部 建築技術部開発設計室



山本 昇

Noboru Yamamoto
エンジニアリング事業部 研究開発センター構造研究室 主任研究員(課長)

要旨

川崎製鉄と清水建設(株)で共同開発したスーパーウイング工法は、プレストレスト・スチール・トラスを採用しており、またスライド工法と組み合わせることで最大限の効果を発揮するものである。本工法の開発に際し、スパン100mの実大モデルを建設し、プレストレス導入時ならびに変動荷重時のプレストレスト・スチール・トラスの力学的性状を求めた。さらに、PCストランドのリラクゼーションを実験的に把握することで、設計方法と理念の合理性を確認した。また、スーパーウイング工法が対象とする大スパン構造物の風圧係数を風洞実験により体系的に研究し、設計上有用な種々のデータを得た。さらに、屋根のスライド機構を実大モデルによるスライド実験により検証し、スライド工法の施工上の有意性を確認した。

Synopsis:

Kawasaki Steel Corp. and Shimizu Corp. have developed a unique long span structural system called "Super Wing", in which prestressed steel truss (PSST) and the sliding construction method are adopted. During the development of Super Wing, a full-scale 100-meter-span model was tested. The structural behavior of the PSST was observed during the prestressing stage and under execution of the sliding method. In addition, the relaxation of prestressing strands as well as the structural behavior of prestressing strands fixation were studied experimentally. The wind pressure coefficient of this long span structure was investigated using a wind tunnel. As a result of these tests, Super Wing has proven to be successful as a structural design concept and construction method.

1 はじめに

近年、後楽園球場や幕張メッセに代表されるように、大スパン構造物が注目を浴びている。快適で質の高いアメニティ空間を創造するために、また多様でダイナミックに変化するニーズに追従できるフレキシビリティのある工場や流通センターを実現するためになど、大スパン構造に対するニーズは強く、各社が競って開発を推進している。

川崎製鉄エンジニアリング事業部においても、千葉製鉄所における雨天岸壁や自由度のある倉庫・生産施設などの各種計画に応えるべく、1985年より清水建設株式会社と大スパン構造物の共同開発に着手した。プレストレスト・スチール・トラスとスライド工法の組み合わせという他に例のないユニークでかつ合理的な工法「スーパーウイング工法」として結実し、実大モデル(Photo 1)による各種実験を通じて、設計・施工法の確立を図った。その成果は、日本発条横浜新工場や瀬戸大橋博覧会における催し物劇場に採用され、好評を博している。

本報告は、スーパーウイング工法の設計・施工面における技術的特徴や有意性について詳述するものである。

2 スーパーウイング工法の特徴

2.1 プレストレスト・スチール・トラス (PSST)

2.1.1 構造原理

スーパーウイング工法の主架構は、鉄骨トラス下弦材にプレストレスを導入したPSSTである。PSSTの構造原理をFig. 1に示す。すなわち、PSSTは、自重のために実線で示すごとく変形するが、下弦材に沿って設置したPCストランドを引張り、下弦材両端で固定することによって下弦材に圧縮力(プレストレス)を導入する結果、鉛直方向変形を抑制するものである。

2.1.2 PSSTの利点

(1) 鋼材量の低減

Fig. 2に下弦材軸力とプレストレスの関係を模式的に示す。

* 昭和63年7月28日原稿受付

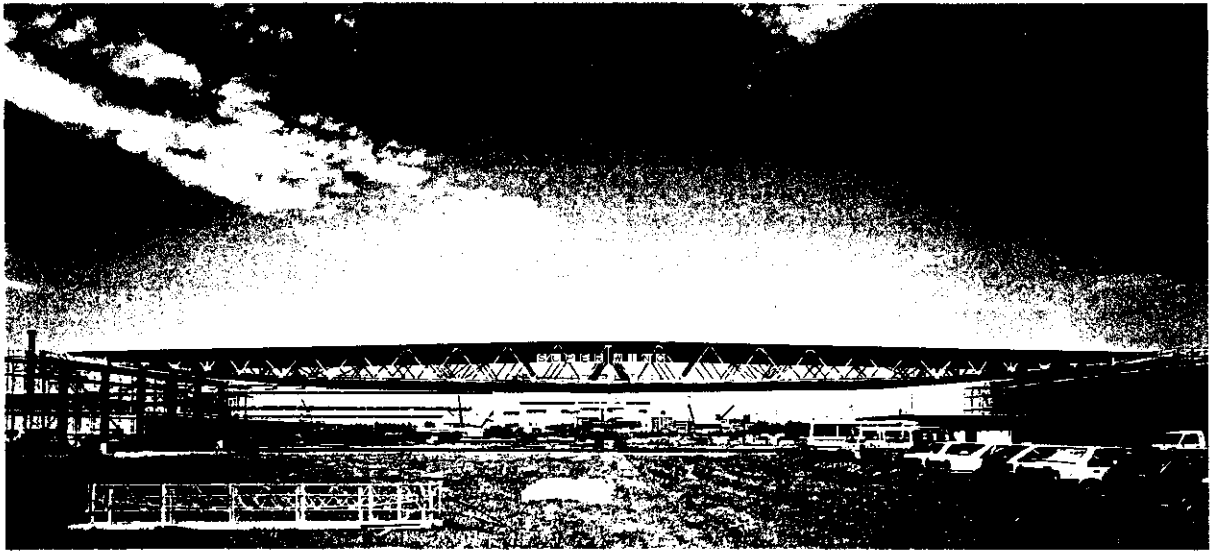


Photo 1 Actual scale model for experiment

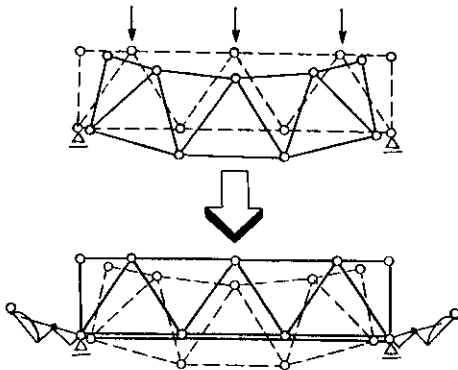


Fig. 1 Structural principle

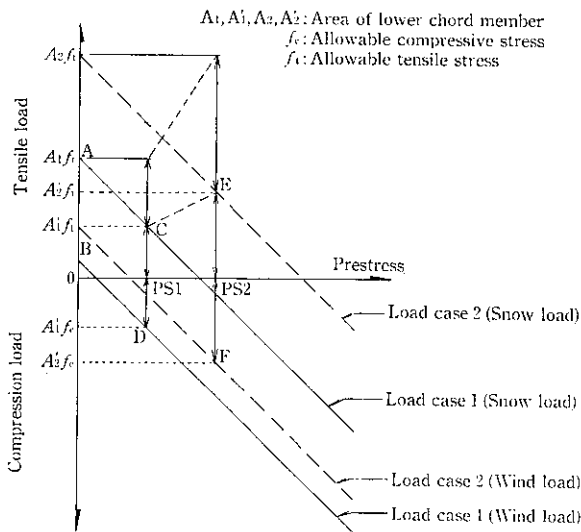


Fig. 2 Axial load of lower chord by prestress

ここで、実線で示す荷重ケース1について考える。まず、通常のトラスでは、下弦材断面は雪荷重時の引張応力により決まる(A点)。一方、PSSTではプレストレスの増大とともに下弦材軸力は図中右方向に移動する。ここで、下弦材の存在応力が雪荷重時には引張許容力以下に(C点)、そして一般的に負圧が

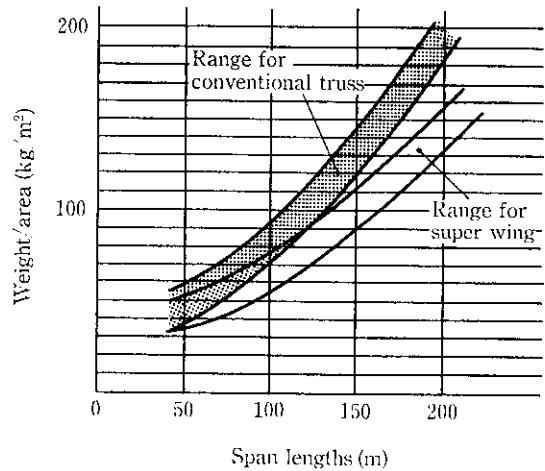


Fig. 3 Typical weight comparison of roof structure

支配的な風荷重時には圧縮許容力以下に(D点)なるよう、プレストレスPS1と下弦材断面A1'を選べば、下弦材断面は最小となり、鋼材量は減少する。

(2) 多雪地域、大スパンでの有利さ

Fig. 2の破線は、たとえば多雪区域や大スパンのように引張応力が卓越する場合を想定したものである。E, Fが前述のC, Dに対応する応力状態であるが、下弦材所要断面はケース1のA1→A1'に比べA2→A2'となり、減少量の割合が大きくなる。すなわち、PSSTでは、多雪地域ほどあるいは大スパンとなるほど、鋼材量の減少率は大きくなる。なお、Fig. 3にスパンと屋根架構に使用する鋼材量の関係を示すが、PSSTはスパン50m以上でその有意性を発揮することがわかる。

(3) フラットな大スパン架構

上述のようにPSSTでは従来工法より鋼材量を低減できる。このことは、トラス成を小さくできること、そして、従来工法では成し得なかったフラットな大スパン架構を可能にする。

(4) 増築が簡単

PSSTは単純なトラスの繰り返しにより基本架構が構築される。このため桁方向の増築がきわめて容易である。さらに、妻

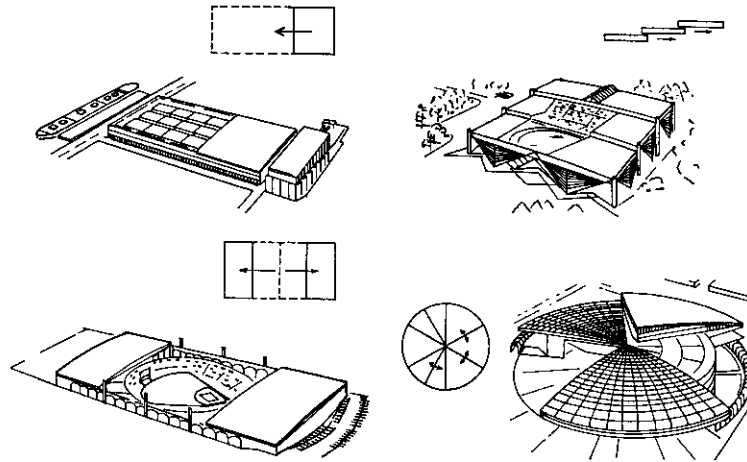


Fig. 4 Open and shut pattern

面には本柱が不要であり、増築後も建屋内に柱が皆無となるため空間の高度利用が可能である。

2.2 屋根の開閉機構

スーパーウイング工法では5章に述べる方法により、施工において梁のスライド機構を採用している。本機構は施工時のみならず、施設運営時にも活用できる。たとえば、屋根に応用した場合、イベントホールや競技場等のスポーツ・文化施設では天候に応じて屋根の開閉をすることにより、採光、換気および眺望を得ることができる。また、工場や倉庫等では設備の更新、資材や製品の搬入・搬出に屋根の開閉機構が利用できる。

屋根の開閉パターンとしては、PSSTがフラットな大スパン架構が基本となることから、Fig. 4に示すように、横引きが基本となるが、イベント会場のような回転方式など種々の方式が可能である。

2.3 PSSTの設計上の留意点

PSSTは鉄骨トラス構造とプレストレス導入という従来技術の複合技術であり、設計上、通常のお考え方と大差ないが、以下にいくつかの留意点を述べる。

(1) プレストレスによる部材応力への影響

プレストレス導入により下弦材にはプレストレスと等しい圧縮応力が生じるが、上弦材、ラチス材への付加応力は無視し得る程度である。

(2) 導入プレストレス

導入プレストレスの大きさは2.1.2の(1)に説明した方法で決定する。導入プレストレスは、導入後の荷重変動によるトラス下弦材の伸縮により増減するが、この程度は導入応力の数%程度と小さいため、この影響は無視する。つまり、プレストレスは一定の外力と考える。

(3) PCストランドのリラクセーション

PCストランドの緊張応力の設定に際しては、リラクセーションの影響を考慮する必要がある。すなわち、設計に際しては、プレストレス導入直後の架構の力学的挙動の検討に加え、リラクセーション後(予測最終状態)の検討も行い、構造安全性を確認せねばならない。なお、リラクセーション特性については次章で詳述する。

3 構造実験

前章で示した設計上の仮定ならびにPCストランド定着部補強法を検討するために各種構造実験を行った。

3.1 プレストレス導入時のPSSTの力学的挙動

3.1.1 実大モデル架構

供試架構の伏図ならびに軸組図をFig. 5に示す。本モデルにはPCストランド定着部を左右2箇所ずつ設けており、下弦材中央部では引張応力が大きいため、トラス端部で100t、中央部で140tのプレストレスを導入した。PCストランドは下弦材H形鋼フランジ間にウェブをはさんで2本設置した。なお、使用PCストランドは、12.7mmφ×7本の多重より線($P_n=126.0t$, $P_y=110.4t$)で、防錆のためのポリエチレンコーティングを施したものを使用した。

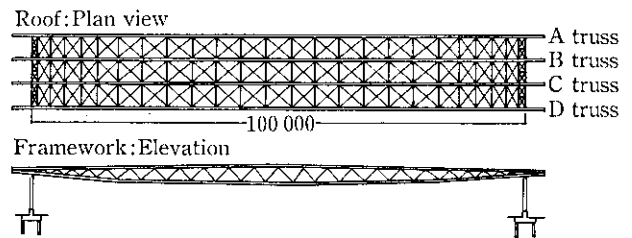


Fig. 5 Actual scale model for experiment

3.1.2 プレストレス導入手順

実大モデルは計算上、鉛直荷重によりスパン中央部で43cmたわみ、プレストレス導入により27cm復帰する。そこで、残り16cmをむくり量としてトラスを工場加工した。プレストレス導入手順はFig. 6に示すように、現寸形状にて建方をし、設計形状までジャッキダウンする。この状態でプレストレスを導入するため、理論的にはプレストレス導入にともないジャッキ反力は減り、完了時にはジャッキ反力は0となる。

3.1.3 プレストレス導入時の部材応力

プレストレス導入時の各トラス上下弦材中央部の軸力変化をFig. 7に示す。まず、初期状態では、ジャッキダウンにより上弦材には圧縮50t、下弦材には引張50tの軸力が作用する。その後、プレストレスの増加にしたがい、軸力は線形に変化し、約40~50tのプレストレスにおいて屈曲点を生じる。この屈曲点以降、上弦材軸

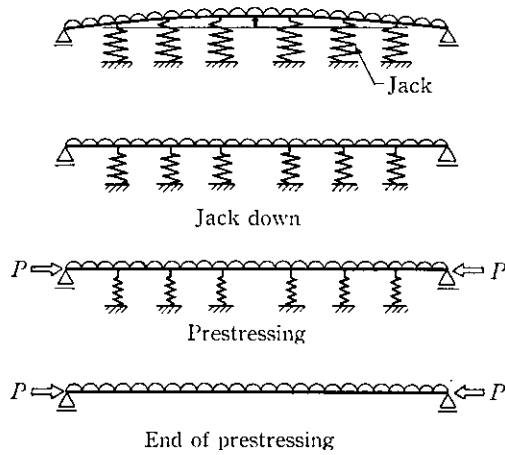


Fig. 6 Procedure of prestressing

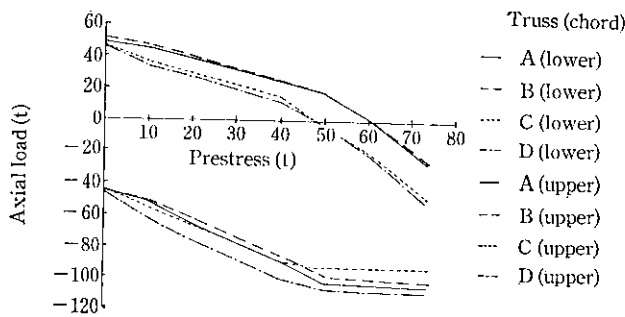


Fig. 7 Axial load of chord member in prestressing

力は自重によって生じる軸力からほとんど変化せず、下弦材にのみプレストレスに比例した圧縮軸力が導入されていく。つまり、PSSTにおいては、プレストレスは下弦材にのみ導入され、他の部材には影響を及ぼさないことがわかる。なお、図の屈曲点は、トラスがジャッキより離脱したことを示すものである。

さて、設計上、トラスの浮き上がりは起こらないはずであったが、これは実際の鉛直荷重が、A, Bトラスで設計値の80%, C, Dトラスで70%程度であったためであり、各々トラス中央で7.0 cm, 4.6 cmの浮き上がりを生じた。

3.2 加力実験

上述の実大モデルにおいて、Bトラススパン中央に2tピッチで10tまでの集中荷重を載荷し、付加荷重下のPSSTの挙動を調査した。Fig. 8に加力時のストランドおよび下弦材スパン中央部軸力を示す。

3.2.1 付加荷重によるストランド軸力の変化

付加荷重によりストランドに導入される軸力は図のようにトラス軸力の10%程度であり非常に小さく、降伏や破断を生ずるようなものではない。このことから、設計に際して、雪荷重や風荷重等の変動荷重に対してPCストランドの軸力変化を考慮する必要はなく、一定の外力と考えてさしつかえない。

3.2.2 トラスの立体効果

10t加力時のBトラス下弦材に付加される軸力は計算上62.5tである。しかし、実際には、Fig. 8のようにBトラスへの荷重は他のトラスへ分配されている。これは、適当に配置された小梁や斜めブレースにより、架構が立体的に挙動するためである。

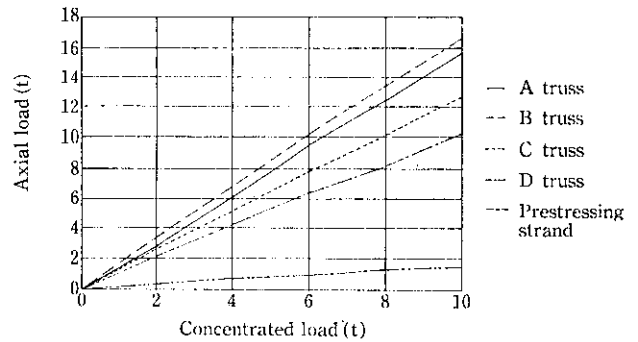


Fig. 8 Axial load of lower chord member in concentrated loading

3.3 PCストランドのリラクセーション

PCストランドのリラクセーションはPSSTの設計信頼性にかかわる大きな問題であり、リラクセーション特性を定量的に把握することが設計上の重要な課題である。そこで、PCストランドと定着具を組み合わせた軸力導入ユニットのリラクセーション実験を実施した。

3.3.1 実験方法

試験体をFig. 9に示す。使用PCストランドは8.1mmφ×7本の

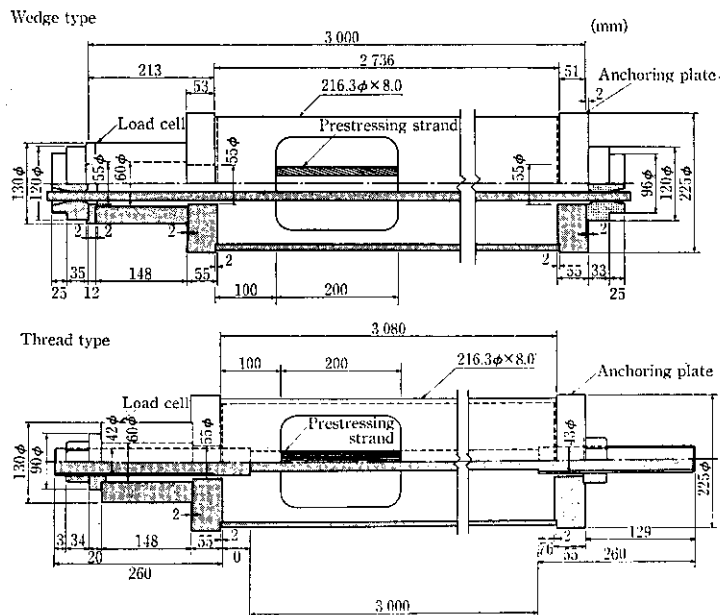


Fig. 9 Test specimen for relaxation test

Table 1 Mechanical properties of prestressing strand

| Strand | Diameter (mm) | JIS specified breaking load (t) | Breaking load (t) | 0.2% Proof load (t) | Elongation (%) | Relaxation (%) *1 | Young's modulus (t/cm ²) |
|------------|---------------|---------------------------------|-------------------|---------------------|----------------|-------------------|--------------------------------------|
| 15.2 mmφ×1 | 15.31 | 23.1 | 25.9 | 23.7 | 5.6 | 0.41 | 1970 |
| 8.1 mmφ×7 | 24.60 | 51.0 | 57.4 | 53.0 | 4.8 | 0.43*2 | 1970 |

*1 Value of mono-strand after 10 h

*2 Value of mono-strand (φ8.1)

Table 2 Test specimens for relaxation test

| Method of anchor | Test specimen | P _t (t) | P _t /P _u (%) | P _t /P _u * (%) | Prestretching |
|------------------|---------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| Wedge | K 6 | 31.1 | 60 | 67 | — |
| | K 7 | 36.3 | 70 | 79 | — |
| | KP 7 | 36.3 | 70 | 79 | 0 |
| | K 8 | 41.4 | 80 | 90 | — |
| Thread | S 5 | 28.7 | 50 | 56 | — |
| | S 6 | 34.4 | 60 | 67 | — |
| | SP 6 | 34.4 | 60 | 67 | 0 |
| | S 7 | 40.2 | 70 | 79 | — |
| | SP 7 | 40.2 | 70 </td <td>79</td> <td>0</td> | 79 | 0 |
| | S 8 | 45.9 | 80 | 90 | — |

P_t: Targeted prestress

P_u: Breaking load

P_u*: Specified breaking load (JIS)

多重より線とSWPR 7Aの15.2mmφであり、ともにホット・ストレッチング処理してリラクゼーションを小さくしたローリラクゼーションPCストランドである。Table 1にそれぞれの機械的性質を示す。

PCストランドの定着方法は、くさび定着とストランド端部に冷間圧着により取り付けられたマンションとナットにより定着するねじ定着を採用し、前者には15.2mmφのストランドを2本、後者には8.1mmφ×7本の多重より線を使用した。なお、試験長はともに3mとなるように設定した。

導入プレストレスはTable 1に示す引張荷重(P_u)の50~80%の範囲とした。とくに、60%、70%のものについては、導入プレストレスの10%増しの状態で5分間保持した後、目標のプレストレスで定着する方法(プレストレッチ)も行った(Table 2)。なお、試験体名の最初の英字は定着方法を、また、英字Pはプレストレッチを行うものを、そして、数字は導入プレストレスを表すものとする。

3.3.2 実験結果

Fig. 10にストランド軸力の経時変化を、Fig. 11に滑り、抜け出し、クリープ等により生じたと考えられる定着具の変形量を、Fig. 12に定着完了後1000hのリラクゼーション率を示す。

両定着方法とも、導入プレストレスが大きいくほど、リラクゼーションは増大するが、引張荷重の70%までなら1000h経過時でも3%以下である。プレストレッチを行っていない試験体では、ねじ定着の方がリラクゼーションが大きい。これは、Fig. 11に示すとおり、導入完了後の定着具の変形によるが、この変形が導入後初期の間に収束してしまうこと、現実的なストランド長さに対してはこの変形が無視し得るほど小さいこと、そして、プレストレッチを行うことで変形は生じないことから、定着具の変形は実用上問題ないと言える。

さて、クサビ定着であるK8試験体ではS8に比べリラクセー

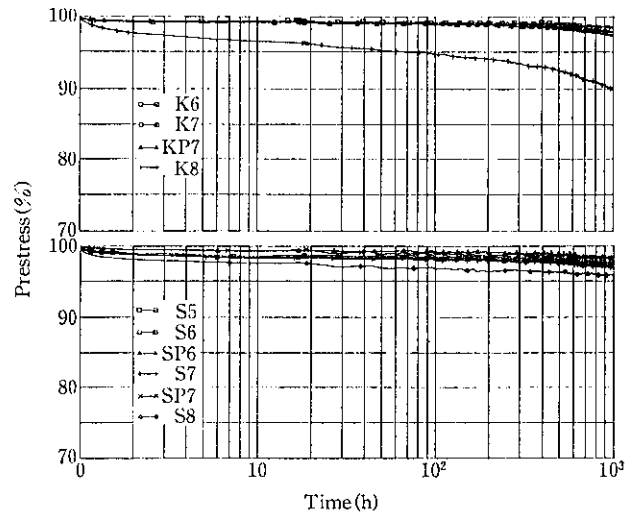


Fig. 10 Reduction in prestress

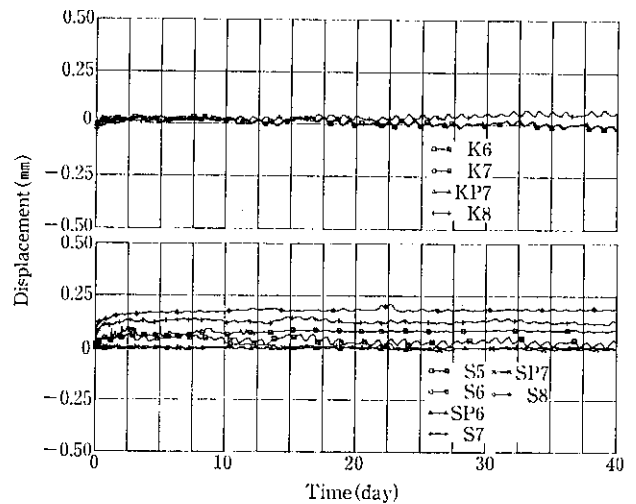


Fig. 11 Displacement of anchorage

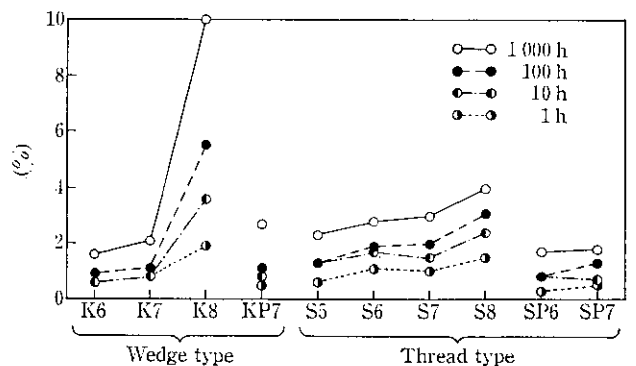


Fig. 12 Reduction in prestress

Table 3 Estimate of relaxation

| Test specimen | a_0 | a_1 | a_2 | Residual square sum | Standard deviation | Estimate (%) | |
|---------------|-------|--------|-------|---------------------|--------------------|--------------|----------|
| | | | | | | 30 years | 50 years |
| K 6 | 0.669 | -0.228 | 0.140 | 0.112 | 0.066 | 3.54 | 3.83 |
| K 7 | 0.825 | -0.270 | 0.193 | 0.295 | 0.105 | 5.02 | 5.44 |
| KP7 | 0.729 | -0.394 | 0.278 | 0.542 | 0.142 | 6.76 | 7.36 |
| K 8 | 2.23 | 0.479 | 0.567 | 2.49 | 0.304 | 21.5 | 23.0 |
| S 5 | 0.971 | 0.158 | 0.069 | 0.575 | 0.146 | 3.84 | 4.04 |
| S 6 | 1.19 | 0.149 | 0.085 | 0.516 | 0.138 | 4.50 | 4.75 |
| SP6 | 0.444 | -0.058 | 0.120 | 0.289 | 0.105 | 3.64 | 3.92 |
| S 7 | 1.17 | 0.234 | 0.094 | 0.398 | 0.124 | 5.19 | 5.47 |
| SP7 | 0.317 | 0.224 | 0.069 | 0.136 | 0.072 | 3.55 | 3.77 |
| S 8 | 1.63 | 0.743 | 0.017 | 0.182 | 0.084 | 6.17 | 6.37 |

ションが大きい。これはK8の2本のストランド間での導入力のバラツキにより、1本には目標値をかなり超えた力が導入されたためであるが、実際の施工ではストランド長さが長いためばらつき量も小さいと思われる。以上より、本実験範囲では定着方法、ストランドの違いによるリラクゼーションの差異はないと言える。

3.3.3 リラクゼーション最終値の推定

前述の実験結果よりPCストランドのリラクゼーション最終値を推定する。リラクゼーション値を推定する方法としては今まで数多く報告されているが¹⁾、ここでは次式によりリラクゼーション曲線を近似するものとする。

$$R = a_0 + a_1 \log t + a_2 \log t^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、R: リラクゼーション値 (%)

t: 時間

a_0, a_1, a_2 : 推定値

推定結果をTable 3に示す。本表より、両定着方法とも導入プレストレスが引張荷重の70%以下であると、リラクゼーション値は5%前後以内である。

3.4 PCストランド定着部加力実験

PCストランドの定着部における応力の流れを確認し、合理的補強法を検討するための資料を得る目的で加力実験を行った。

3.4.1 実験方法

試験体にはH形鋼(H-250×250×9×14)(SM50A)を用い、補

強形式、定着板の板厚によって合計6タイプの試験体について実験した。補強形式は、フランジプレートに同厚のプレートを溶接して幅を広げたAタイプと、フランジ間をカバープレートで覆って日の字形断面にしたBタイプの2種類である。Fig. 13に補強形式を示し、Table 4に試験体の区別を示す。

試験体への加力は、PCストランドを油圧ジャッキにより緊張することによって行い、Fig. 14に示す位置の歪を測定した。

Table 4 Test specimens for load tests of anchoring parts of prestressing strands

| Test specimen | Reinforcement type | Anchor plate thich. (mm) |
|---------------|--------------------|--------------------------|
| No. 1 | A | 75 |
| No. 2 | A | 70 |
| No. 3 | A | 60 |
| No. 4 | B | 50 |
| No. 5 | B | 40 |
| No. 6 | B | 30 |

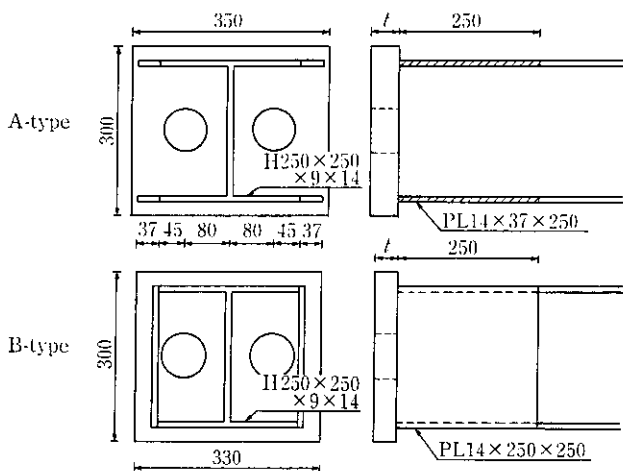


Fig. 13 Form of anchor plate

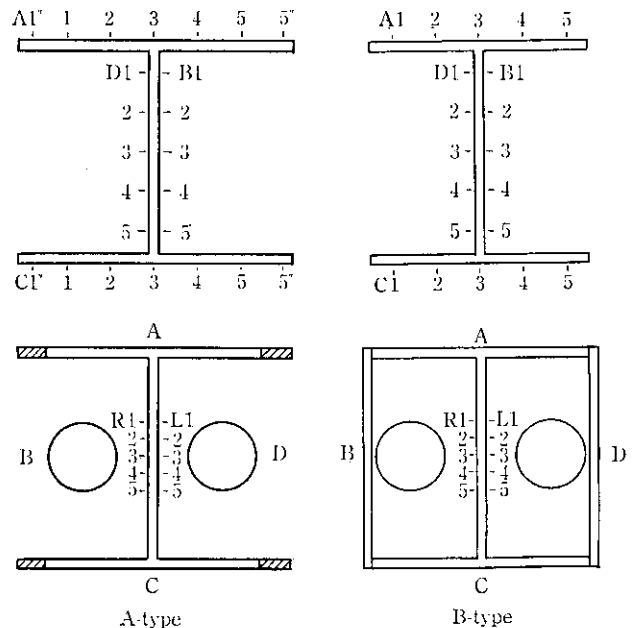


Fig. 14 Position of strain gauge

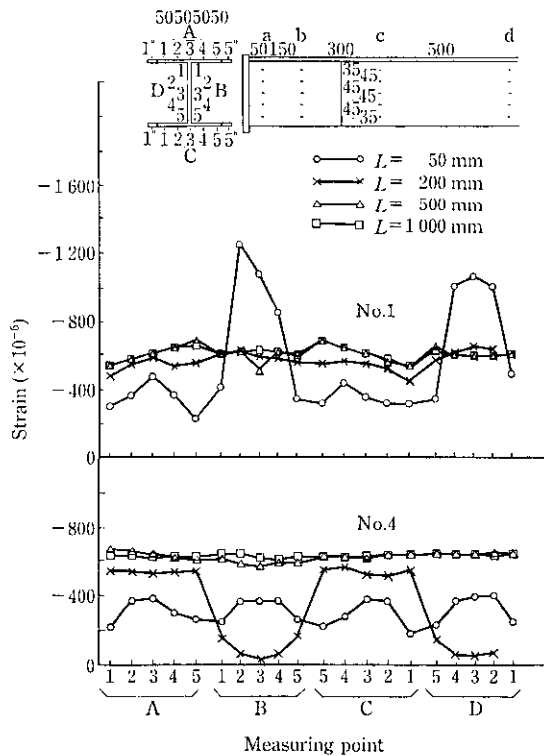


Fig. 15 Axial strain distribution

3.4.2 実験結果

Fig. 15 に試験体 No. 1 および No. 4 の周方向歪分布を示す。A タイプの試験体では定着板から 50mm の位置でのウェブ歪分布が大きく、降伏点近くまで達している。また、定着板への応力の流れも小さく、補強法としては有効とは言えない。

B タイプの試験体では 50mm の位置の歪が補強のない部分の歪レベルよりも小さくなっており、補強が有効に働いている。

4 風洞実験による耐風性の検討

耐風設計は通常建築基準法および同施行令に基づいて行われているが、法に規定されている風圧係数は一様風を対象とした解析や実験的研究を基に設定されたものであり、風の乱れや建物の規模の影響などがあまいである。今回風洞実験を中心にして、スーパーウイング工法が対象とする大スパン構造物の設計風圧係数の算定を試みた。

スーパーウイング屋根面の耐風設計用の風圧係数を得るために、次の諸点に留意した。

- (1) 地域性（海岸地域と市街地）と風圧係数の関係
- (2) 建物の規模（軒高、奥行、幅）と風圧係数の関係
- (3) 最大風圧係数と風方向の関係

4.1 実験方法

風洞実験方法は次のとおりである。

(1) 風洞装置

清水建設株式会社技術研究所の耐風実験用風洞（幅 2.6m × 高さ 2.4m × 長さ 15.0m）を使用した。

(2) 風洞気流

実験に用いた風洞気流は、海岸地帯のプロファイル指数 $\alpha = 1/6.2$ 、市街地では $\alpha = 1/4.0$ 、境界層厚 $Z_0 = 50\text{cm}$ の乱流境界

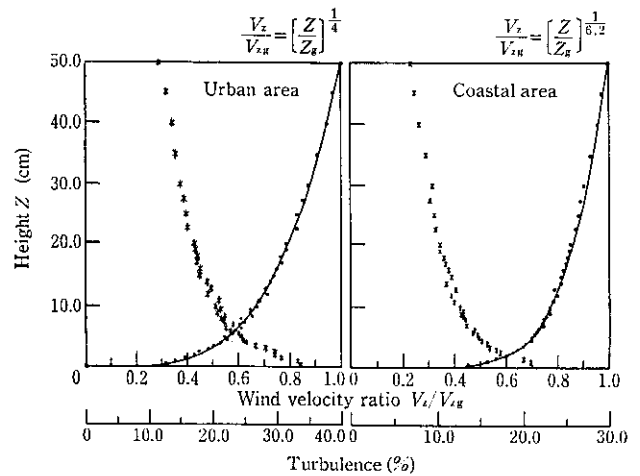


Fig. 16 Air flow in wind tunnel

Table 5 Dimension of model (cm)

| | No. | Measuring point | Roof | | | Roof slope |
|--------------|----------|-----------------|-------|-------|---------|------------|
| | | | Width | Depth | Height | |
| Coastal area | Model- 1 | Roof surface | 50 | 5 | 5 | 0 |
| | Model- 2 | | 50 | 15 | 5 | 0 |
| | Model- 3 | | 50 | 25 | 5 | 0 |
| | Model- 4 | | 50 | 35 | 5 | 0 |
| | Model- 5 | | 50 | 45 | 5 | 0 |
| | Model- 6 | | 50 | 50 | 5 | 0 |
| | Model- 7 | | 50 | 60 | 5 | 0 |
| | Model- 8 | | 50 | 75 | 5 | 0 |
| | Model- 9 | Roof surface | 50 | 25 | 7.5 | 0 |
| | Model-10 | | 50 | 35 | 7.5 | 0 |
| | Model-11 | | 50 | 50 | 7.5 | 0 |
| | Model-12 | | 50 | 25 | 10 | 0 |
| | Model-13 | | 50 | 35 | 10 | 0 |
| | Model-14 | | 50 | 50 | 10 | 0 |
| Urban area | Model-15 | Roof surface | 50 | 25 | 5-5.5 | 1/50 |
| | Model-16 | | 50 | 25 | 7.5-8 | 1/50 |
| | Model-17 | | 50 | 25 | 10-10.5 | 1/50 |
| | Model-18 | Wall surface | 50 | 25 | 5 | 0 |
| | Model-19 | | 50 | 25 | 10 | 0 |

層流である (Fig. 16)。

(3) 風圧模型

高さ $h = 5\text{cm}$ 、幅 $b = 50\text{cm}$ 、奥行 $d = 25\text{cm}$ を基本にした。海岸地帯を想定した気流に対しては、高さ h と奥行 d を変化した基本形状模型 17 体と、幅 $b = 50\text{cm}$ 、奥行 $d = 25\text{cm}$ 、屋根勾配 1/50 とし高さを変化した屋根勾配型模型 2 体の計 19 体、市街地を想定した気流に対しては基本形状模型 6 体と屋根勾配型模型 1 体の計 7 体について実施した。これらの詳細を Table 5 に示す。

(4) 風圧測定

風圧計からの出力をサンプリング間隔 $t=0.015$ s, サンプリング個数 $N=2048$ 個, 評価時間 $T=30.74$ s で A/D 変換した。本実験で求められた風圧力は, 模型上方の自由流中に設置したピトー管の静圧を基準静圧とし, 差圧として測定した。

(5) 実験風向

模型の幅に対して直角方向を風向角 0° とし, 反時計周りに 22.5° 間隔で, 正方形の場合 45° まで, その他の形状では風向角 90° まで測定した。

4.2 データの整理方法

平均風圧係数 P_{p0} を次式のように定義した。

$$P_{p0} = P_M / q_r \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, P_M : 平均風圧力 ($P - P_s$)

P : 測定点の風圧力

P_s : 風洞内静圧

q_r : 基準速度圧 ($1/2 \rho U_R^2$)

ρ : 空気密度

U_R : 軒高さでの風速

また, 作用面を外側に引く方向に作用する風圧力を負圧, その逆に作用面を内側に押す方向に作用する風圧力を正圧と定義する。

4.3 実験結果および考察

海岸地帯と市街地を想定した風洞実験により得られた風向きに平行な模型中央における風圧係数を Fig. 17, 18, 19, 20 および 21 に示す。

Fig. 17 は, 幅 50 cm × 奥行 25 cm × 高さ 10 cm の模型の海岸地帯と市街地の平均風圧分布で, Fig. 18 は平面形状が同じで高さが 5 cm と 10 cm の模型の平均風圧分布である。Fig. 19 ~ Fig. 21 は最大風圧係数を示しており, Fig. 19 は軒高さ $h=5$ cm 一定とした場合の奥行寸法の影響, Fig. 20 は奥行寸法を $d=50$ cm 一定とした場合の幅寸法の影響, また Fig. 21 は風向角の変化の影響をそれぞれ示している。以上の結果より, 次のことがわかる。

(1) 風圧係数の絶対値は市街地の方が海岸地域より大きい (Fig.

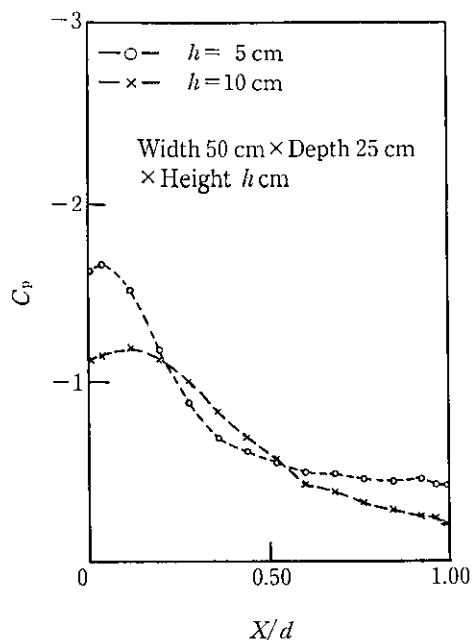


Fig. 18 Wind pressure coefficient on different building height in coastal area

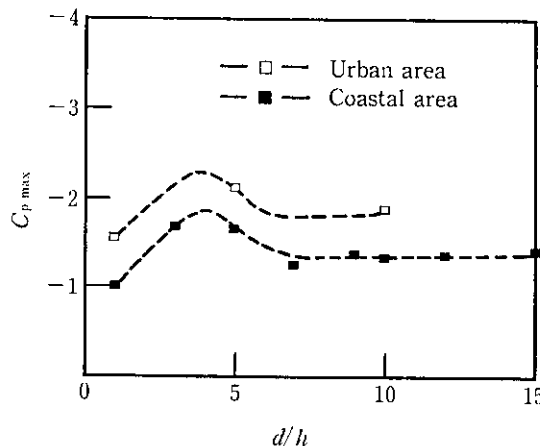


Fig. 19 Maximum wind pressure coefficient on building of different depth

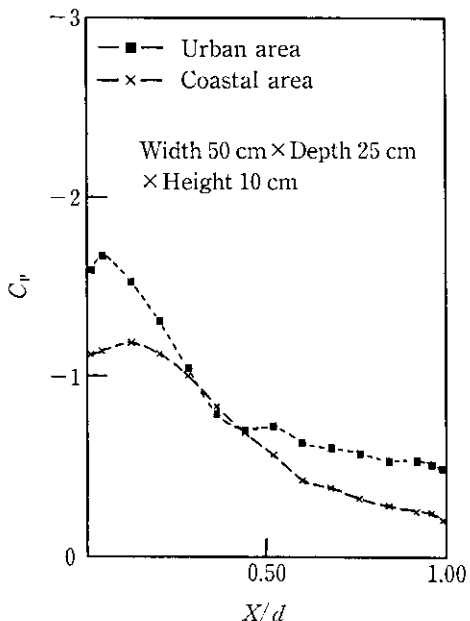


Fig. 17 Wind pressure coefficient in coastal and urban area

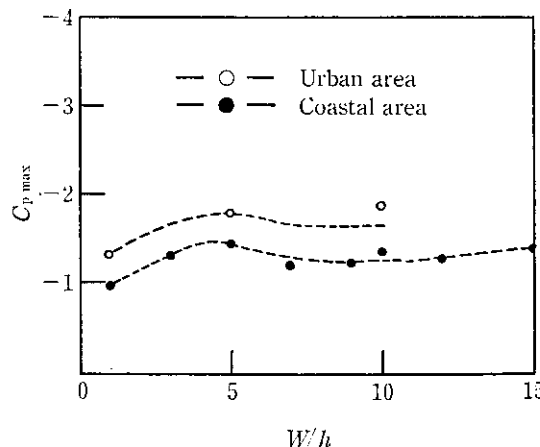


Fig. 20 Maximum wind pressure coefficient on building of different width

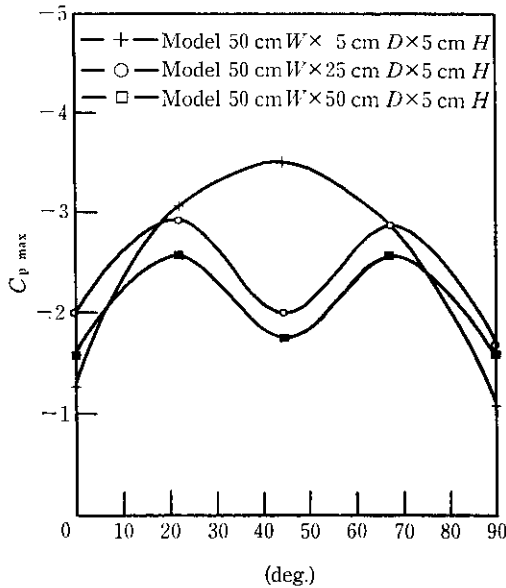


Fig. 21 Wind pressure coefficient at different wind direction in coastal area

17)。

- (2) 風圧分布は風上端部で剝離した気流の風下への状態に変化する。
- (3) 軒高の低い建物ほど風圧係数の絶対値が風上側で大きい (Fig. 18)。
- (4) 奥行き方向の風圧係数分布は、 d/h の増加とともに大きくなり、 $d/h=4$ で最大値を示すが、その後減少に転じ、 $d/h=6$ 以上ではほぼ一定値を示す (Fig. 19)。
- (5) 模型両端部の影響が $W/h=4$ までおよび $W/h>5$ 以上になると剝離流の性状がほぼ2次元的となるため、風上端部に生ずる最大風圧係数はほぼ一定となる (Fig. 20)。
- (6) 最大風圧係数を示す風方向は、幅 50 cm x 奥行き 5 cm x 高さ 5 cm の模型の場合 45°、その他の模型では 22.5° か 67.5° である (Fig. 21)。

風圧係数の絶対値は、風上端部で最大となり、風下にいくにしたがって急速に減少する。これは風上端部で剝離した気流が再付着することによって生ずる剝離渦のためと考えられる。剝離渦に影響を与える因子として、建物の形状以外では自然風の特徴である気流の乱れの強さがあり、気流の乱れの増加は剝離剪断層を厚くし、剝離流の再付着を促進すると同時に、剝離渦を風上側に前進させるた

め、強い負圧を風上面に発生させたと考えられる。したがって、海岸地域より市街地域の方が、また軒高相当の気流の乱れの強さが大きい軒高の低い建物の方が風圧係数が大きいと考えられる。また、奥行方向の分布は奥行方向の大きさによって剝離流の再付着現象が変化することにかかわっていると考えられる。

本実験により、従来明確ではなかった風の乱れの強さや建物規模の風圧係数に与える影響などが明らかになったが、より合理的に風圧係数を設定していくためには、外圧と連動する内圧係数を、現在の設計法のように外圧係数と独立したものとすることはなく、外圧係数と連動する係数として考慮していく必要がある。

5 施工方法

5.1 スライド工法

従来、大スパン構造物の鉄骨建方や仕上工事のために、建家全面に仮設足場を設け工事を行うのが通例であるが、スーパーウイングの施工法としてスライド工法が最適であり、今回実大モデル実験にこれを適用した。本工法は次のような特徴がある。

(1) 工期短縮

トラス建方、仕上工事などの建築工事と、機械基礎工事および設備工事とのオーバーラップが可能であるため、全体工程を 20% 以上短縮することができる。

(2) 仮設工事削減

トラスを一体組し、順次スライドさせ屋根全体を施工していくので、一体組と同時に仕上工事を行えば、必要な仮設足場は一体組に要するスペースに限定できるため、在来工法と比べ大幅な仮設工事費の削減が可能である。

(3) 安全な施工

高所作業が屋根面全体に及ぶのではなく、トラス一体組のスペースに限定されるため、十二分に安全を配慮した施工が可能である。

5.1.1 施工手順

スライド工法によるスーパーウイングの施工手順を、実大モデル (スパン 100 m x 幅 15 m) を用いた施工実験の結果に即して、次に示す (Fig. 22)。

- (1) トラス面組一ステップ1: 加工された鉄骨部材を搬入後、地上に設置した高さ 600 mm の架台上にて平面に地組する。
- (2) トラスボックス組一ステップ2: 面組された平面トラスとトラス間の繋ぎ材とを、地上に設置された上部がオープンなボックス上の架台にて正確に地組する。

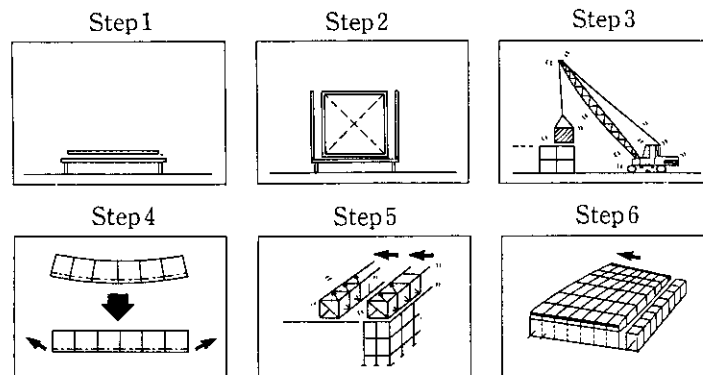


Fig. 22 Sliding method

- (3) トラス一体組一ステップ3: 軒高さに設置した構台上に、ボックス組されたトラスを正確な位置に建て込み、一体のボックス状トラスとして接合する。正確な位置をだすために、構台上にはジャッキを据え付けレベル調整を行う。
- (4) PC緊張工事一ステップ4: 一体のトラスとして接合後、屋根仕上位置を正確にだすために、あらかじめ計算されたPC緊張による浮き上がり量などを考慮し、トラスを所定位置までジャッキダウンする。続いてPCケーブルを通線しジャッキにてプレストレスを導入する。なお、PCケーブルの緊張には油圧センサーやロードセルにて緊張力の管理を行う。
- (5) スライド工事一ステップ5: 次のトラスの一体組および一体組されたトラス間の繋ぎ材の建方に必要な距離だけ、柱軸組上をジャッキにてトラスをスライドさせる。次のトラスの緊張後トラス間の繋ぎ材の建方を行い、所定位置までさらにスライドさせる。
- (6) ステップ5までの作業を順次繰り返すことにより、屋根面全体の鉄骨を組み立てていく、並行して、屋根折板などの仕上工事を行う。施工試験では長尺屋根折板を葺くために、ロール成形機を軒レベルに設置し、また成形後の折板が円滑に流せるように、タイトフレーム上に簡便なロールをセットする等の工夫により、長さ100mの屋根の一枚葺に成功した。

5.2.2 スライド機構

屋根のスライドは、トラス端部に取り付けたワイヤーを油圧ジャッキで引張り、柱軸組上に配置したルール上を滑動させることにより行う。

トラス両端の移動量を超えるとフィードバック機構が働き、常に一定範囲に保てるよう制御される。施工実験では限界値を10mmとしたところ、トラスのスライドは円滑に行うことができた。

また、スライドを円滑に行うため、トラス脚部をテフロン加工し、柱軸ルール上には鏡面仕上げを行ったステンレス鋼板を敷き、すべり摩擦力を軽減した。摩擦係数はステンレス鋼板の表面状態や表面活性剤の使用の有無によって異なるが、今回の施工実験では平均的に0.05~0.06であった。

スーパーウイングの施工方法としては、スライド工法の他にリフトアップ工法やリフトアップ工法とスライド工法との組み合わせ工法が可能で、現場の状況に応じて工法を選択することが必要である。リフトアップ工法については川崎製鉄として既に確立された技術を有しており、今回の施工実験によるスライド工法の確立と合わせて、大スパン構造物を対象としたほとんどの工法への対処が可能となった。

6 結 言

当社と清水建設株式会社で共同開発した大空間構造を可能とするスーパーウイング工法の力学的特性、施工性を調べるために行った実大モデルによる載荷実験、施工実験、リラクセーション実験、PCストランド定着部の加力実験、風洞実験について報告した。結果は以下のとおりである。

- (1) 初期導入プレストレスがPCストランドの引張荷重の70%以下であれば、リラクセーションは5%程度であり、設計に際してはこのリラクセーションを考慮する必要がある。
- (2) H形鋼のPCストランド定着部補強は日の字形が有効である。
- (3) プレストレスの導入、屋根面のスライド工法などの施工法を確立した。また、屋根面の施工法にはスライド工法の他、リフトアップ工法などの応用も考えられる。
- (4) 風洞実験により、大スパン構造物の風圧分布が明らかとなった。なお、設計に際しては、内圧係数も考慮する必要があり、今後の課題である。

以上のように、スーパーウイング工法については、設計面、施工面とも確立された。さらに、実施例も2件実現しており、今後、本工法の普及に努めると共に、応用開発を推進していきたい。

本工法の開発に際しては、大阪大学五十嵐定義教授ならびに京都大学防災研究所桂順治教授には特に有益なる御指導を賜った。また、清水建設株式会社には開発のパートナーとして御協力頂いた。以上の関係諸氏に記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木計夫: 「PC鋼材のリラクセーションがプレストレス損失におよぼす影響に関する検討」, プレストレストコンクリート, 20 (1978) 6, 22-32