

新日本製鐵建築事業部における大空間特殊鋼構造の 開発エンジニアリング

Research and Development Engineering of Space Steel Structures at Building Construction Division of Nippon Steel

原 田 昭 穂⁽¹⁾ 三 村 正 明⁽²⁾
Akiho HARADA Masaaki
MIMURA

抄 録

新日本製鐵建築事業部における鋼構造を基盤とした大空間特殊構造分野での開発エンジニアリングは、建築躯体の開発、鉄骨架構の開発、構造部品の開発、鋼構造の素材の利用技術の開発の四つの階層に分類することが可能である。最近の大空間鋼構造の開発エンジニアリングの中から、建築躯体の開発例として屋根パネルシステム及び複合床パネル、鉄骨架構の開発の例としてNSテンションシステム及びかん合式ジョイントによる単層シェル構造について概要を紹介した。

Abstract

The research and development engineering in the field of space special structures basically using steel material with which Building Construction Division of Nippon Steel is dealing consists of developments of four items, i.e., building components, steel frameworks, steel structural parts, and technology for utilizing steel structural materials. This paper outlines some recent developments of the space steel structures among our activities, which include the roof panel system and the composite floor panel system as an example of the building components, and the NS tension system and the single layer shell structure using a fitted joint system as an example of the steel frameworks.

1. 緒 言

新日本製鐵建築事業部における鋼構造を基盤とした大空間特殊構造分野での開発エンジニアリングは、システム化されたスペースフレームであるNSトラス、角型鋼管を斜め45度に傾けた溶接構造トラスシステムであるYトラス、ボルト接合による単層シェル構造であるSドーム、更には開閉式屋根システム、人工地盤構造システム等がある。これらの技術開発による商品群は、大空間構造分野の市場の中で、新日本製鐵の鋼構造技術としてどのように活用されるかとの観点から、建築躯体の開発、鉄骨架構の開発、構造部品の開発、鋼構造の素材の利用技術の開発の四つの階層に分類することが可能である(表1参照)。

建築躯体の開発とは、開閉式屋根システム、人工地盤構造システム等の開発に代表されるように、鋼構造技術あるいは商品技術をベースとして、鉄骨に取り付く仕上材や設備等も含めた建築躯体トータルなシステムを提案するものである。これは、建築躯体の中で構造材としての鉄骨の特徴をより生かしていくための開発といえる。鉄骨架構の開発とは、NSトラス、Yトラス、Sドームに代表さ

れるように、大空間構造に対応した鋼構造商品の開発であり、それ自体が構造体としてシステム化されたものの開発といえる。構造部品の開発とは、NSトラスの部品である鍛造品あるいは鋳造品等の部品製造技術に代表される建築躯体や鉄骨架構のベースとなる部品レベルでの開発である。最後に鋼構造の素材の利用技術の開発とは、耐火鋼材、TMCP鋼、チタンクラッド鋼、ステンレス鋼構造体等の新素材の活用方法を探ること、あるいは、鋼材の溶接性、衝撃特性、耐食性等の性能に関するエンジニアリングである。

本稿では、最近の大空間鋼構造の開発エンジニアリングの中から、建築躯体の開発例として大空間構造の屋根仕上材と鉄骨構造体

表1 大空間特殊構造分野での階層

大空間特殊構造分野での階層	開発エンジニアリング例
建築躯体の開発	開閉式屋根システム、人工地盤構造システム
鉄骨架構の開発	NSトラス、Yトラス、Sドーム
構造部品の開発	鍛造品あるいは鋳造品等の部品製造技術
鋼構造の素材の利用技術の開発	耐火鋼材、TMCP鋼、チタンクラッド鋼、ステンレス鋼構造体

⁽¹⁾ エンジニアリング事業本部 建築事業部 建築鉄構部
部長代理

⁽²⁾ エンジニアリング事業本部 建築事業部 建築鉄構部 室長

を複合化した屋根パネルシステム及び高層オフィスビルの床システムである複合床パネル、鉄骨架構の開発の例としてテンション構造に対応したNSテンションシステム及び新接合方法であるかん合式ジョイントによる単層シェル構造について概要を紹介する。

2. 屋根パネルシステム

大空間構造の屋根は、トラスに代表される鉄骨構造体と、母屋等の二次部材を含む屋根仕上材に分類される。大スパン架構の大規模化や屋根形状の多様化により、屋根仕上材自体が、下地鉄骨の上に屋根をふく在来工法では対応しきれなくなっており、鉄骨構造体の特性を生かした合理的な屋根システム、あるいは屋根仕上材自体を構造的に構成する必要がある。本屋根パネルの開発では、屋根仕上材をパネル化し、構造体の座屈に対する補剛効果をもたせることや、パネルのせん断剛性を積極的に活用する、いわゆる“ストレススキン構造”により合理的な屋根システムを開発することを目的とする。

実例として“サンドーム福井(設計監修：福井大学教授 岡崎 甚幸、法政大学教授 川口 衛、設計監理：福井県建築設計監理協会)(写真1参照)”で採用された屋根パネルシステムを紹介する。この直径約115mの円形の多目的ホールの屋根構造形式は、ドームの外周部に鋼管によるテンションリングを配し、内周部にも鋼管によるコンプレッションリングを配し、その間にトラスを架け接合している(図1参照)。このトラス構造は、下弦に格子状に鋼管トラスを

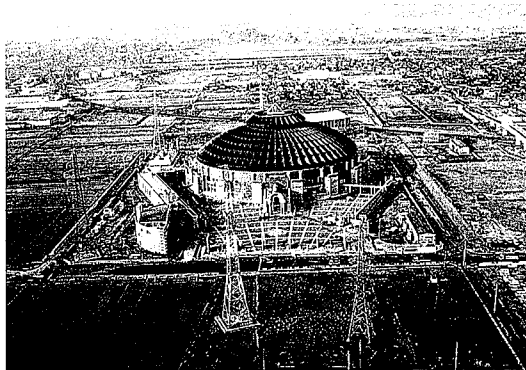


写真1 サンドーム福井外観

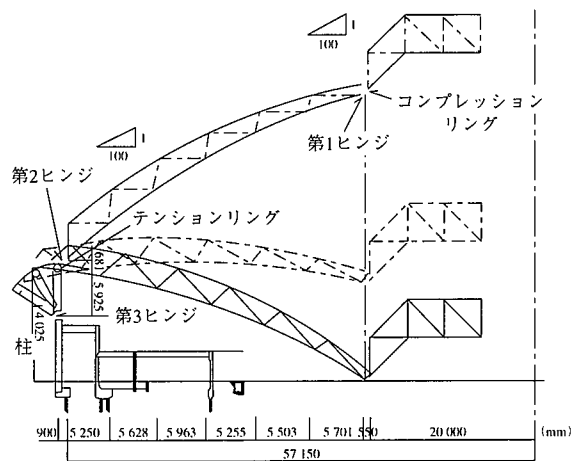


図1 サンドーム福井屋根構造

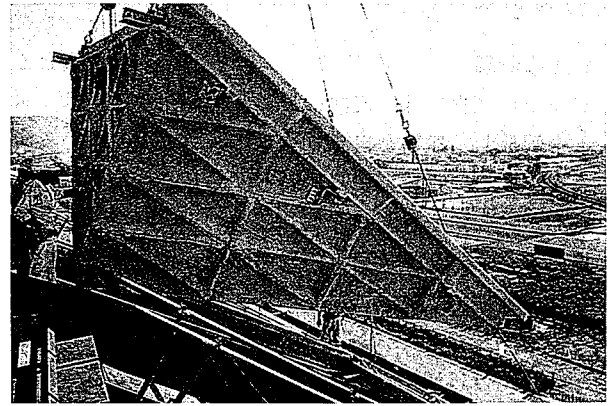


写真2 サンドーム福井屋根パネル

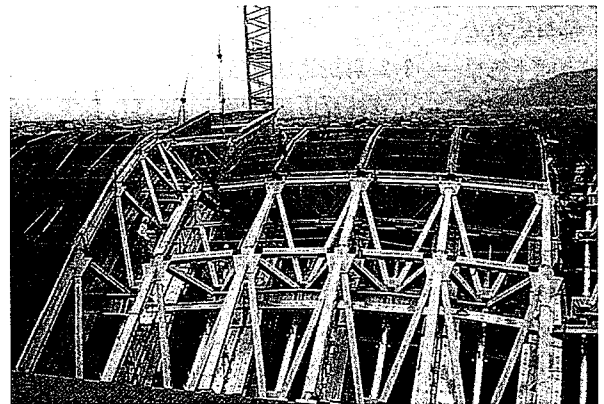


写真3 サンドーム福井屋根パネル

配し、上弦材及び斜材はH型钢を用いている。斜材は、垂直と水平に交互に配置され、この斜材と上弦材に沿った空間にちょうど“ちり取り”のような屋根パネルがセットされる(写真2, 3参照)。このパネルは、4枚の鋼板で構成され、垂直、水平のそれぞれの鋼板に左右から斜めの板が取り付け、上弦材の交点4箇所と下弦材の交点1箇所で構造骨組と結合される。屋根パネルは、設計荷重として積雪 600kg/m^2 (長期荷重)が想定され、パネル自体がそれに耐える剛性を持ち、その積雪荷重を四つの支点到に伝達しなければならない。この屋根パネルのエンジニアリングをまとめると以下になる。

- (1) 鋼板は、耐候性鋼板(厚さ 3.2mm)とし、4枚の鋼板はすべて溶接により接合した。これは、鋼板の接合をボルトとシールによる場合、鋼板の精度のばらつきや、温度変化による膨張収縮等によりシールが切れ、漏水の危険性があることによる。
- (2) パネルの補強材を、写真3のようにパネルと相似形な三角形を構成するように配置した。これによりパネルと補強材が一体となって形状効果が発生し、積雪荷重に対して有効に働くことが期待できる。
- (3) 屋根パネルは、三角錐を形成し、剛性の高い構造体とみなせる。従って、トラス材の上弦材及び斜材を補剛する座屈止めとなっている。

もう一つの実例として、“ビーコンプラザ・グローバルタワー(設計：磯崎 新アトリエ、川口 衛構造設計事務所)(写真4参照)”の壁パネルを紹介する。このパネルは、表面の仕上材としてチタンクラッド鋼を採用した。チタンクラッド鋼は、厚さ 0.2mm の純チタン

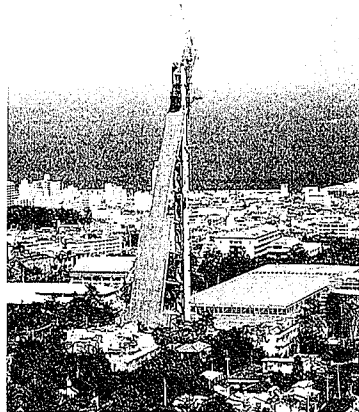


写真4 ビーコンプラザ・グローバルタワー外観

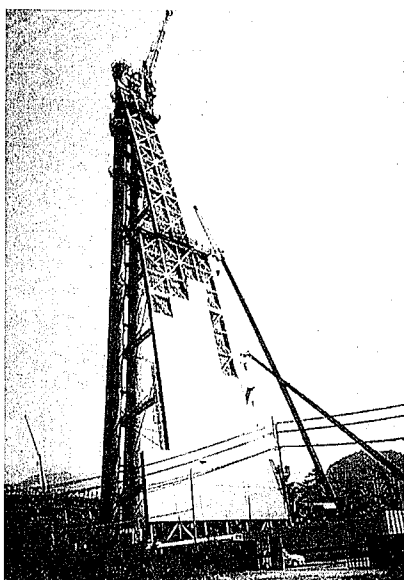


写真5 ビーコンプラザ・グローバルタワー壁パネル

と厚さ2.0mmの鋼板を銅を媒体としてろう接したもので、表面のチタンの耐食性と裏面の鋼板の剛性を組み合わせた複合材料である(写真5参照)。これまで、土木分野で橋脚に用いられていたこの素材をパネル化し、建築の意匠材として初めて採用した。

3. 複合床パネル

高層オフィスの床構造は通常、鉄骨の大梁及び小梁の上にデッキプレートを敷き、その上にコンクリートを打設する工法が一般的である。しかしオフィス空間の有効性を高めるために15mを超える大スパン架構とすることが多く、鉄骨梁の梁成が大きくなり、無駄なスペースが生じる。また、デッキプレートの敷込み、鉄骨梁の耐火被覆、コンクリートの打設等現場作業が多い特徴を有する。複合床パネルは、鋼板とコンクリートのそれぞれの特徴を生かして複合化することにより床構造の梁成を低減し、その結果オフィスの階高が低減され、同じ高さのビルに対して階数を増やすことが可能となる。これによりオフィスの建設コストの低減を目的としている。また、一般工法に対して、床構造の工場生産率を高めることにより、現場作業の省力化及び工期短縮をも目的としている。

複合床パネルの構成は、図2に示すように、フランジプレート(厚さ1.6mm)とウェブプレート(厚さ2.8mm)を溶接により組立てた鋼板ボックスの下面にPC鋼線を配し、このPC鋼線と鋼板を同時に緊張させ下面にコンクリートを打設し、コンクリートにプレストレスを導入する。ここまでを工場製作とし、現場に搬入し床面にセットした後、上部コンクリートを打設する(図3参照)。最終的に上下鋼板を介してコンクリート版が取りつく合成構造となり、断面性能の高い部材となる。また鋼板からコンクリートへのプレストレス導入はコッターと称する鋼板の突起を介して行われ、このコッターは完成後、鋼板とコンクリートとのせん断力伝達機構となる。床構造としての耐火性能は、コンクリート版によって確保される。耐火試験の結果、コンクリートの爆裂も発生せず、2時間耐火の規定を満足することが確認されている(写真6参照)。更に鋼板によるプレストレス力の伝達効率の確認実験、せん断力伝達機構のせん断耐力実験、更に複合パネルの曲げ繰返し実験等を行い、性能の確認を行った(写真7参照)。

この複合床パネルの占める構造体のゾーンに空調ダクト、照明や排煙等の設備を組み込むことにより、階高の低減が達成される。図4の例に示すように、複合床パネル版相互の間隔をあけることにより、その中間部を設備ゾーンとして活用する。

4. NSテンションシステム

多目的ホールやスポーツ施設等の屋根構法として、ロープやロッド(鋼棒)をテンション部材(引張材)として用いる張弦梁構造、サスペンション(吊り)構造やケーブルドーム構造(図5参照)、あるいは

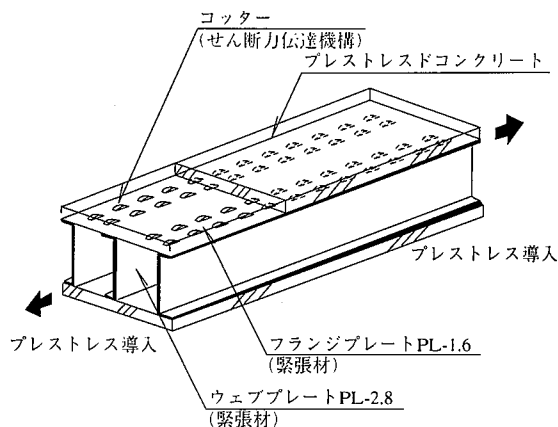


図2 複合床パネル構造概念図

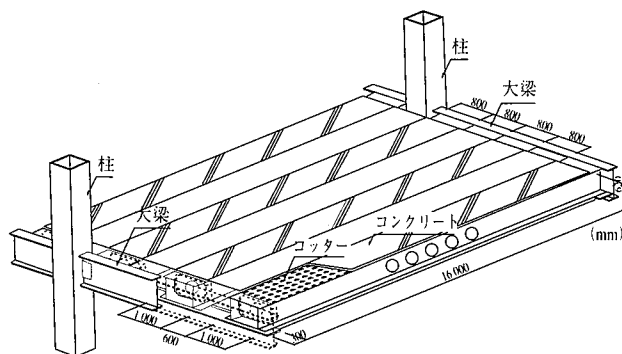


図3 複合床パネル取り付け図

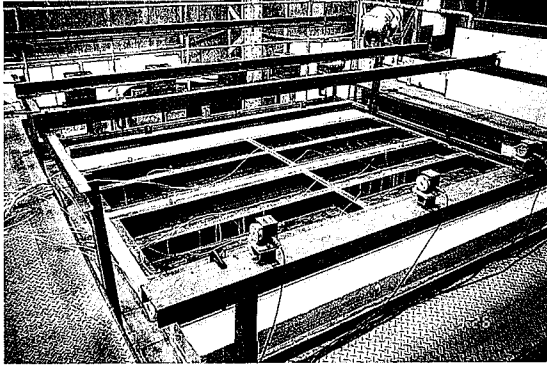


写真6 複合床パネル耐火試験

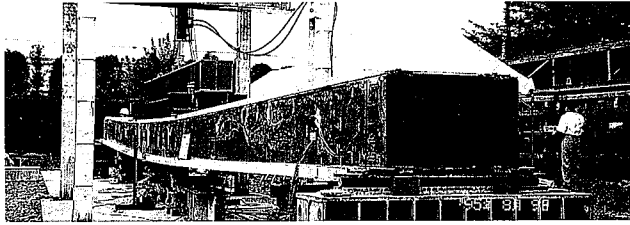


写真7 複合床パネル曲げ繰り返し試験

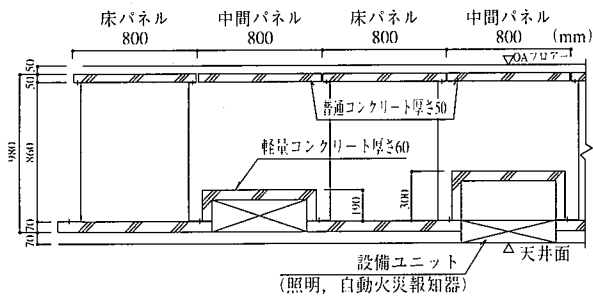


図4 複合床パネル設備図

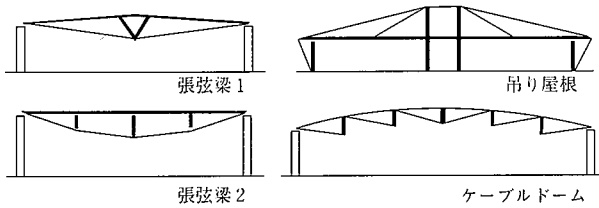


図5 テンション構造

サッシュレスのガラスファサードの支持構造としてテンション材を用いる構法がある。これらの構法は、軽快で開放的な空間を創出する構法として近年頻繁に採用されるようになった。

このような構造に用いるテンション部材は、大別すると、鋼線により合わせたストランドロープ、スパイラルロープや橋梁用に開発されたPWS(パラレルワイヤストランド)等のロープ系、テンションロッドや高張力鋼を用いたPC鋼棒等のロッド系、鋼管やフラットバー(鋼板)に分類できる。このうちロープ系のテンション材は、変形に対する追従性も高く使いやすい利点はあるものの、ワイヤの定着に特殊な方法が必要であり、また塗装仕上げが難しく、有機系の被覆を施すか、亜鉛めっきあるいは、ステンレス鋼線を用いるしかなく高価な部材となる。鋼棒系のテンション材は各種の塗装仕上げ

が可能で、周辺の鉄骨と仕上げを合わせることもできる。しかし大変形に対する追従性の悪さ、すなわち端部が移動、回転すると多大な曲げ応力を発生してしまう点から接合方法が難しい。

NSテンションシステムは、ロープや鋼棒の接合方法として回転追従機能を持つジョイント有し、かつ、初期張力(プレストレス)の導入機構や長さ調節機構を装備したものを開発し、これをシステムとして標準化したものである。

ジョイント方式として、意匠性に優れ、コンパクトな形状となる三つのタイプをモデルジョイントとした。図6は、ソケット型と呼ばれるもので、鋼棒またはワイヤ端部鋼棒に球面加工したナットをはめ、その上から球座のついたソケットをはめ、ボルトまたはNSトラス用のボルトでノード類に接合する。NSトラスとの組み合わせに最も適したタイプである。図7は、埋込み型と呼ばれ、無垢のジョイントの内に球面ナットを埋め込み、球座のついた蓋をねじ込んでしまうもので、加工度は高いが最もすっきりした外観となる。図8

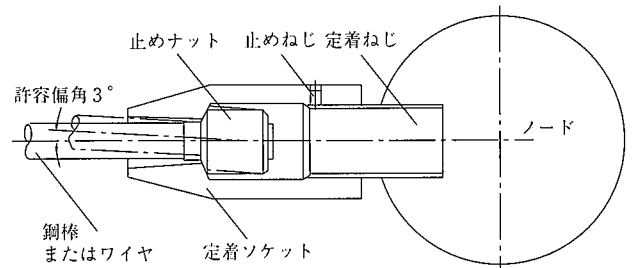


図6 NSテンションシステム(ソケットタイプ)

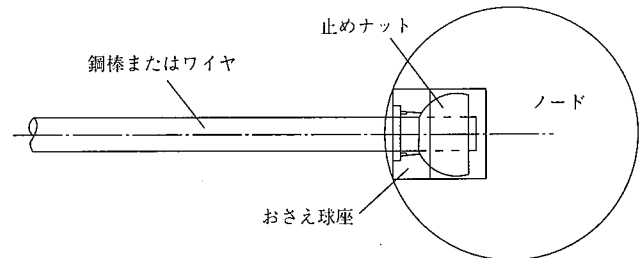


図7 NSテンションシステム(埋込みタイプ)

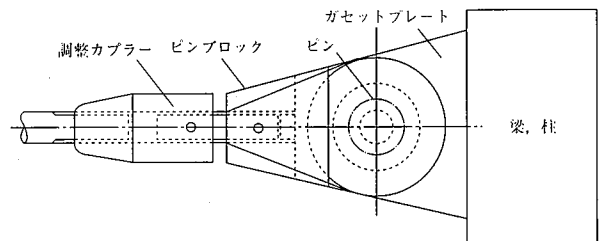


図8 NSテンションシステム(ピンタイプ)

は、ピンジョイントと呼ばれているものに長さ調節カブラーを組み合わせ、プレストレス導入機構を加えたものであり、ガセットプレートを紹介して一般の柱、梁部材との接合に利用できる。

回転自由度はソケット型、埋込み型で両方向 $2 \sim 3^\circ$ 、ピンジョイント型で一方向に 90° 以上である。長さ調節は、それぞれソケット、球座蓋、カブラーの回転により行い、プレストレス導入はオイルジャッキ等の外部加力により鋼棒を中へ送り込み、長さ調節機構で締込んだ後に外力を開放させることにより行える。

このNSテンションシステムを利用した構造システムとして、張弦梁構造やサスペンション(吊り)構造あるいはケーブルドーム構造等のテンションルーフシステム及びサッシュレスのガラスファサードに用いるテンショングレーディングシステムがあり、その実施例を紹介する。

テンションルーフシステムの例として、“アイケイビル(設計：(株)日建設計)(写真8参照)”のアトリウム屋根(スパン25m)の張弦梁構造を挙げる。屋根面を建物モジュールに合わせたH形鋼の格子面で構成し、これをパラボラ型のテンション材と束材で支持するもので、テンション材には、PC鋼棒(A, C種, 32mm経)、束材及びノードは、NSトラス部品を用い、テンション材端部のジョイントには、ソケット型を用いている。

テンショングレーディングシステムの例として、“日本長期信用銀行本店ビル(設計：(株)日建設計)(写真9, 10参照)”のアトリウムを紹介する。本ビルのアトリウムは、南北の二箇所に分かれており、南側は英国ビルキントン社のガラスシステム、北側はRFR方式といわれるガラスシステムであり、この両方にNSテンションシステムを採用しガラスの支持構造を架けた。

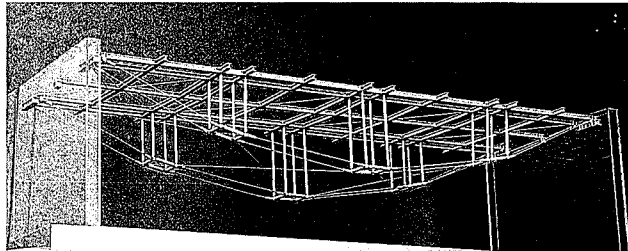


写真8 アイケイビルアトリウム構造模型

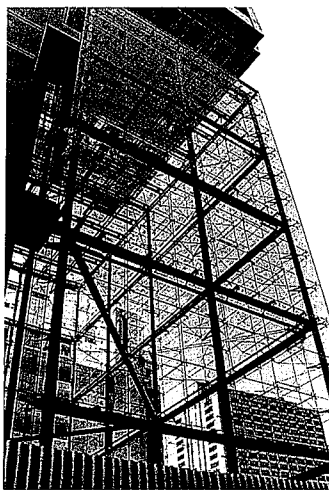


写真9 日本長期信用銀行本店ビルアトリウム

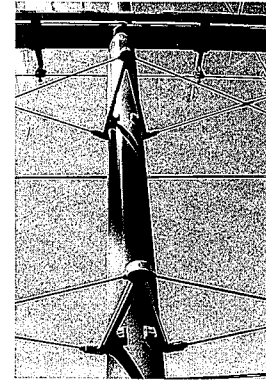


写真10 日本長期信用銀行本店ビルアトリウムディテール

5. かん合式ジョイントによる単層シェル構造

かん合式ジョイントとは、鉄骨構造の従来の溶接やボルトによる接合方法に対して、部材の端部をフープと呼ばれる輪にテンションを発生させて締付けることにより接合させる方法である。このかん合式ジョイントは、当初鉄骨造の柱梁接合用に開発されたが、大空間架構の単層シェル構造の接合方法としても適したシステムである。

単層シェル構造は、複層スペースフレームに比べ少ない部材で空間を覆い、かつ構造体の占める成を低減できることから、より軽快な空間を創造することが可能であるが、大空間架構に対応するためには、その接合部に十分な耐力と剛性を有し、信頼性の高い接合システムが要求される。特に単層ラチス構造の場合、面外の剛性が複層に比べて低いためフレームの座屈安全率が低く、その上部材の製作誤差や施工時の建方誤差等の初期不整により座屈荷重が大きく低下することが知られており、精度の高い接合システムが要求される。かん合式ジョイントは、機械的な接合方法であり、溶接による歪やボルト接合の“がた”がなく、また、かん合することにより部材間のクリアランスも無いため、極めて精度の高い接合方式である。

図9に接合システムの構成を示す。本ジョイントは、部材端部に予め溶接された部分円筒形状の板(エンドプレート)を、上下より据え込まれるプレストレスリングによりジョイントの芯である円形鋼管(コアドラム)に締結し、その際に導入される接触圧によって応力を伝達する形式のものである。エンドプレート及びリングは、テーパ状の断面を有しており、図10に示すように、油圧ジャッキでリングを据込むことにより、リングに張力が導入される。リングに導入されるプレストレス力は、エンドプレートからリングに加わる引張力により生じるフープテンションにより決定される。またコアドラム内部を貫通してリングの脱落防止用のキャップ及び鋼棒を取り付ける。

このかん合式ジョイントシステムの強度及び変形性能を把握するために、実物の1/2スケールの試験体の加力試験を行ったのでその一部を以下で紹介する。

図11に試験体及び加力装置の概要を示す。試験体はジョイント本体と部材の一部(パイプ材)により構成される。この加力装置により、単純引張試験、単純曲げ試験、一定引張下での漸増曲げ試験を行い、単純圧縮試験については、ジョイント部分だけで構成される試験体をアムスラー型万能試験装置によって直接載荷した。試験体はリングの厚さの異なる二つのタイプ、試験体A(平均厚さ

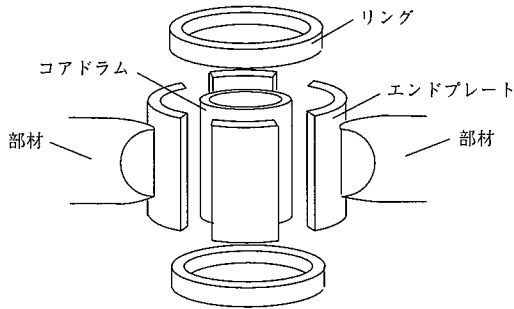


図9 かん合式ジョイントシステムの構成

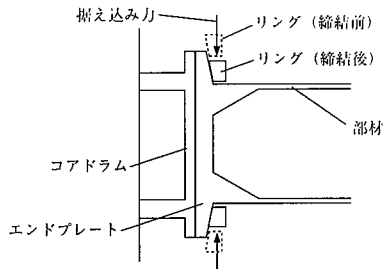


図10 リングへの張力導入方法

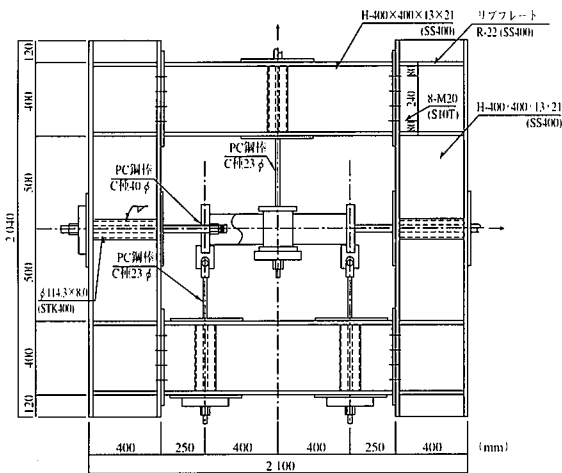


図11 試験体及び加力装置の概要

12.7mm)、試験体B(平均厚さ19.1mm)を用意した。リングに導入される張力の設計値は19tfであり、これを応力に換算すると試験体Aが60kgf/mm²(歪0.29%)、試験体Bが40kgf/mm²(歪0.19%)となる。試験体は、スパン36mの円筒形屋根を想定して設計された接合部の1/2モデルであり、最大耐力目標として、円筒形屋根に生ずる応力を基に表1のような値を設定している。各試験結果を以下にまとめる。

(1)単純引張試験結果(図12参照)より、荷重-変位関係は、歪が弾性限度以下にあるような低荷重レベルから既に軟化型の非線形形状が認められ、塑性化が始まる以前にエンドプレートのコアドラムからの離脱によって剛性低下が起こることを示唆している。

(2)単純曲げ試験結果(図13参照)より、荷重初期段階において試験体Aの試験体に著しいゆるみが見られる。図中に示した直線は、半剛性ボールジョイントについて、ほぼ同程度のスケールのモデルを用いた接合部加力試験における最も剛性の高い試験体の初期曲げ剛

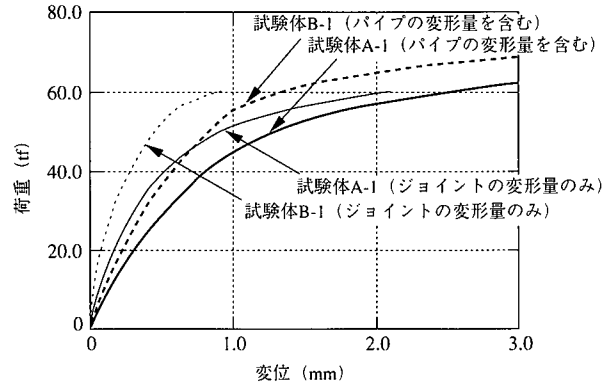


図12 単純引張試験における引張力-伸び変位関係

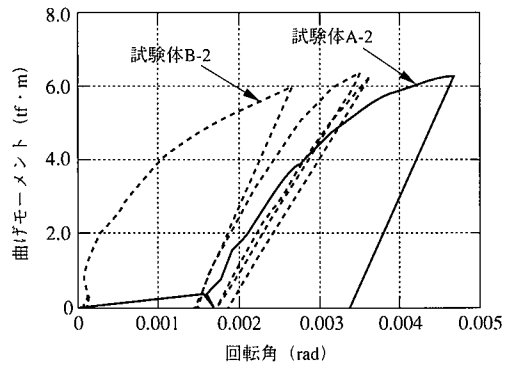


図13 単純曲げ試験における曲げモーメント-回転角関係

性を示しており、本ジョイントシステムが従来のボールジョイントシステムと比較して極めて高い剛性を有していることが分かる。

(3)単純圧縮試験結果(図14参照)より、圧縮時においても剛性、耐力は十分な値となっており、単純引張試験同様、安定した変形特性を示している。

(4)破断荷重(図15参照)より、破壊の形式はいずれの試験体もエンドプレートの曲げせん断破壊であった。

また、接合部の加力試験で得られた結果を基に、接合部を伸縮ばねおよび回転ばねでモデル化し、単層スペースフレーム全体の線形応力解析及び幾何学的非線形解析を行うことにより、本ジョイントシステムの適用が単層スペースフレームの力学特性に及ぼす影響を検討した。

解析モデルは、図16に示すようなスパン36mの円筒形単層スペース

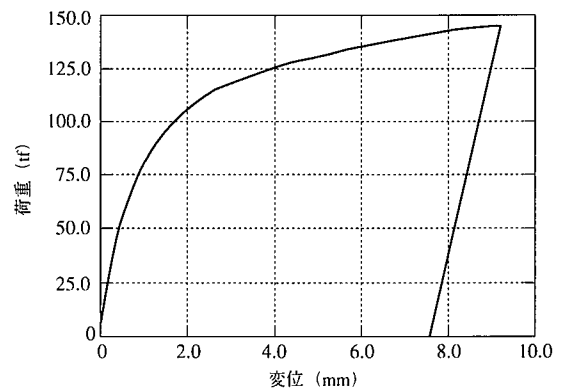


図14 単純圧縮試験における圧縮力-変位関係

スフレームとした。解析に用いた荷重条件を表2に示す。支点の支持条件は、節点1, 2をピン支持、節点3, 4をローラー支持として、節点1, 3間及び節点2, 4間をタイバーで繋いだものとしている。スペースフレームを構成する部材は直径350mm, 厚さ20mmの円筒形断面のパイプ材であり、タイバーは、これと同じ断面の部材を採用している。ヤング係数は、 $2.1 \times 10^5 \text{kg/mm}^2$ とした。接合部の面内曲げ剛性の1/1000で与えることにより、疑似的にピン接合の条件を与えて解析した。面外及び軸方向の剛性については、接合部の剛性を伸縮ばねと回転ばねで表して、図17に示すような部材モデルを設定し、加力試験の単純引張、単純圧縮及び単純曲げ試験結果のデータから、これらのばね定数を定めた。比較のため、接合部の剛性を評価しない完全剛接合モデルと、ボールジョイントのよう

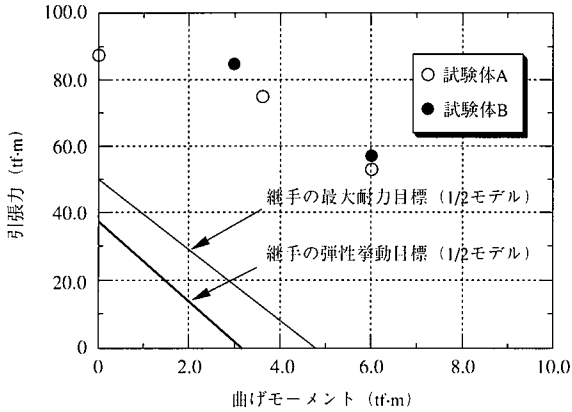


図15 破断荷重

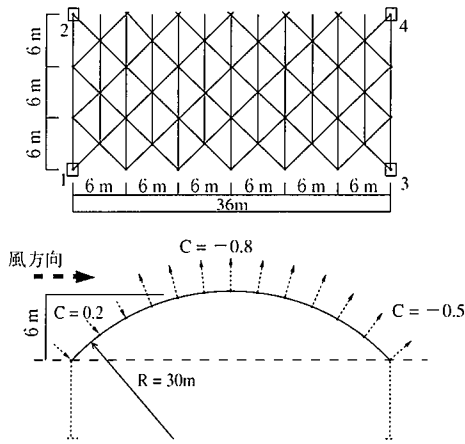


図16 スペースフレーム解析モデル

表2 解析用荷重条件

固定荷重	節点荷重 = 150kgf/m ²
風荷重	設計用風速変圧 = 280kgf/m ²

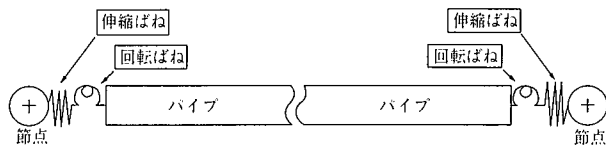


図17 接合部-部材のモデル化

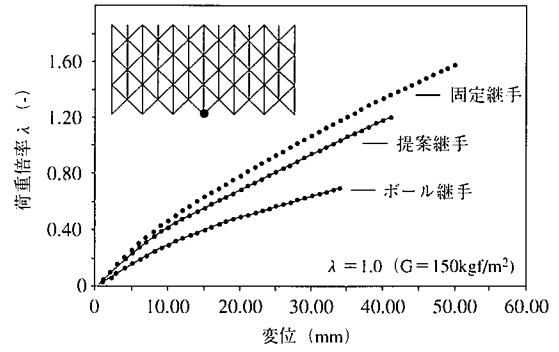


図18 幾何学的非線形解析における荷重-変位関係



写真11 大森ベルポートキャノピー外観

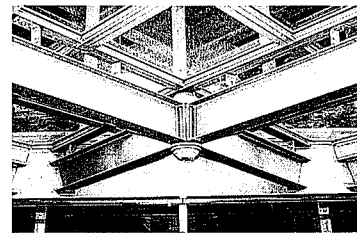


写真12 大森ベルポートキャノピーかん合式ジョイント

な比較的低い剛性を想定したモデル(回転ばねの剛性を本ジョイントの1/20としたもの)の解析も併せて行った。

図18に固定荷重を荷重モードとする幾何学的非線形解析により得られた荷重-変位関係を示す。変位はスパン中央部の鉛直変位を示している。接合部の剛性の差に比べれば構造全体の挙動の差は小さいが、ボールジョイントモデルの変位が完全剛接合モデルの変位の2倍程度になっているのに対し、本ジョイントの剛性を評価したモデルは、2割程度の増加に留まっている。

最後に、かん合式ジョイントによる単層シェル構造の実施例として、写真11, 12に大森ベルポート(設計:(株)山下設計)のキャノピーを紹介する。

6. 結 言

新日本製鐵建築事業部における鋼構造を基盤とした大空間特殊構造分野での開発エンジニアリングの例として、屋根パネルシステム、複合床パネル、NSテンションシステム及びかん合式ジョイントによる単層シェル構造について概要を紹介した。NSトラス、Yトラス、Sドーム等商品化された構造システムの開発だけではなく、鋼構造の素材の利用技術から建築駆体の開発に至る各階層それぞれに対して開発エンジニアリングを押し進めていくことが重要であり、今後とも、各方面の方々との御協力をいただき、更に発展させていく所存である。