プレビーム工法による大スパン建築物 の設計・施工

太田道彦^{*1}・畑中公樹^{*2}・村井和雄^{*3}

概要 近年の情報化社会の発展に伴い、建物についても積載能力の大きい長スパンの床構造に対するニーズが高まりつつある。プレビーム工法は、このようなニーズに対する有力な技術である。東和興産・日本アイ・ビー・エム大和研究所ビルは、上記の特徴を生かしてプレビームを初めて建築に大規模に展開したものである。本稿では、プレビームの設計と施工および関連した実験について報告する。

キーワード：合成構造，床工法

1. はじめに

近年の情報化社会の発展に伴い、電算センター、インテリジェントビル等の建築需要が増加しつつある。これらの建物は、従来の事務所建築に比較して、大きな積載能力を必要とする。また、その機能を維持・発展させるためには、空間的に高度なフレキシビリティを実現する十分大きなスパンを必要とする。東和興産・日本アイ・ビー・エム大和研究所ビルは、研究者の執務する研究室、それを支持するコンピュータ室、および各種の実験室から構成されているインテリジェントビルであり、

機能上のフレキシビリティが設計上の主要テーマの一つとなった。機能空間に関して 13×13 m を基本的柱割りとして、この部分の床構造に関し、種々の工法を検討した。10 m を超すスパンに対する工法としては鉄骨(S)造、鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造、プレストレストコンクリート(PC)造等が考えられるが、それらとプレビームとを比較検討した結果、プレビームが構造性能、施工性、経済性等について総合的に優れていると判断し採用した。プレビームは、その時点では建築物に大規模に適用した例がなかったため、設計にあたっては、プレビームのポイントである耐力および振動性状に

写真-1 全 景

*1 おおた・みちひこ／㈱竹中工務店東京本店設計部副部長

*2 はたなか・こうき／㈱竹中工務店東京本店設計部構造課
課長

*3 むらい・かずお／㈱竹中工務店技術研究所（大阪）

表-1 各種工法の比較

		構造性能		施工性		コスト	総合判定
		たわみ振動	床自重	プレファブ化	揚重		
在来構法	S	△	◎	◎	◎	△	○
	SRC	○	△	△	◎	△	△
	PC	○	○	○	△	○	○
プレビーム構法*		◎	○	◎	○	◎	◎

ついて十分な性能確認実験を実施した。また、製作および施工にあたっては、建築部材としての大量生産体制および品質管理体制の整備を製作者と一体となって推進し、所期の目的を達成することができた。

2. 建物概要

建物名称：東和興産・日本アイ・ピー・エム大和研究所ビル

建築地：神奈川県大和市下鶴間

用途：事務所

建築主：東和興産㈱

建築面積：7 740.38 m²

延床面積：46 187.27 m²

規模：地下1階，地上7階，塔屋2階

構造種別：鉄骨鉄筋コンクリート造

工期：昭和58年11月～60年6月

3. 設計概要

3.1 構造設計概要

本建物は地下1階から地上2階までが107×66mの長方形平面であり，主要な用途は，機械室，実験室，計算機室およびパブリックスペースである。3階以上は46×66mのH形平面をもつ2つのブロックがブリッジで

図-1 基準階はり伏図

図-2 軸組図

接続された形態であり，研究室となっている。

基礎型式は，GL -18m 以深の砂れき層を支持層とする場所打ちコンクリートぐいである。主体構造はSRC造であり，架構型式は耐震壁をもつラーメン架構である。H形平面の1つのウイングは13×26mの無柱空間と，その両側の設備動線を構成する3.2m スパンの架構から構成されている。このウイングの先端と中央のコア部に耐震壁を集中的に配置し，十分なフレキシビリティをもつ空間を実現している。

ウイング中央部の13×26mの床は，設備機能上のフレキシビリティを高める目的で，構造体の厚さをできるだけ小さく抑える必要があった。一方で，短辺スパン13m という床構造は，振動障害を生じないよう十分な剛性が必要とされる。また，使用勝手に対するフレキシビリティを確保するため，余裕のある積載能力も必要である。これらのことから，この部分の床構造にプレビ

Design and Construction of Long Spanned Structure Using Pre-Beam

By M. Ohta, K. Hatanaka and K. Murai

Concrete Journal, Vol. 25, No. 9, pp. 40~48, Sept. 1987

Synopsis In these days, having been required more intellectual equipments in buildings. We need new floor system which can carry much heavier load and caver much wider space. We developed "Pre-Beam System" and first applied it to the field of architecture as powerful technique. We use it in our design of Towa Kosan IBM Japan Yamato Research Center, and in this paper, we report structural design and construction of "Pre-Beam System" and experiments conducted for assuring its capacity.

Keywords : composite beam, floor system

図-3 プレビーム工法の概要

ームを採用した。

3.2 プレビーム工法の概要

プレビームは鉄骨ばりの下フランジを高強度コンクリートで囲み、鉄骨自体の復元力を利用して下フランジコンクリートにプレストレスを導入した鉄骨とコンクリートの合成ばりであり、その原理および製作過程は図-3に示したようなものである。まず鉄骨ばりを、設計荷重時にプレビーム自体が水平になるよう、製作過程から逆算したむくりをもたせて製作する。このほりに設計荷重時の曲げ応力分布を包含するようなプレフレクション応力を与え、その状態で下フランジにコンクリートを打設する。コンクリートに所定の強度がでたところでプレフレクション応力を解放(リリース)すると、下フランジの引張り力が周囲のコンクリートを圧縮し、プレストレスが導入される。ここまでの工程は工場に進められる。下フランジのみにコンクリートが打たれた状態のほりは現場に搬入され、所定の位置に設置後、上部の床版のコンクリートを打設し、プレビームが完成する。

以上のように、プレビームは原理的に鉄骨ばりがプレフレクション時に設計荷重時の応力を負担する必要があるが、この時の鉄骨の許容応力度は製作過程で一時的なものであることから、通常の長期許容応力度よりも緩和されている。また、鉄骨造として設計した場合、プレビームを用いるような長スパンでは、一般に鉄骨断面は変形制限によって決定される。これらのことから、プレビームで用いる鉄骨は鉄骨ばりよりもはるかに小さくなる。すなわち、プレビームは鉄骨の耐力をフルに利用しつつ、剛性の不足を安価なコンクリートで補剛したものと考えられ、この点が本工法の最大のメリットであると言える。

本建物で使用したプレビームの代表的な断面を図-5に示す。

プレビームは鉄骨とコンクリートの合成ばりであるか

図-4 プレビームの特徴

図-5 プレビーム断面

ら、当然両者を一体とするシアコネクタはきわめて重要である。従来のプレビームは、図-5に示すようにシアコネクタとして、上フランジはスタッドジベル、下フランジは角鋼ジベルを用いている。本建物では、このほかに編付H形鋼を用いているが、シアコネクタとしての性能はフランジ面の編のみで十分なことを実験的に確認している。付加的ジベルが不要であり、工場製作、現場施工の両面で生産性向上のメリットがある。

3.3 プレビームの設計

プレビームは橋りょうにおいて多くの実績を残してきており、その分野では設計法も「プレビーム合成げた橋設計・施工指針」として確立している。このような状況から、本設計は、基本的にはいわゆる土木仕様である同指針を建築における各種法令、設計規準等と整合させたうえで、同指針に準拠して行った。上記の工法の概要から推定できるように、プレビームの設計には以下のような幾つかのチェックポイントがある。

- 1) プレフレクション時の鉄骨の応力度
- 2) リリースした時の下フランジの応力度
- 3) 設計荷重時の鉄骨およびコンクリートの応力度
- 4) 製作過程での変形

上記のチェックポイントのうち、設計荷重時のチェックは、当然、リリース以降のコンクリートのクリープを考慮してなされる。以上の検討は変形の面からも行い、

それによって当初の鉄骨ばりの製作キャンパーを決定する。各ポイントにおける設計の考え方を以下に簡単に述べる。

(1) プレフレクション時の鉄骨の応力度

上記の指針を参照し、プレフレクション時の鉄骨の許容応力度は $0.8\sigma_y$ とした。鉄骨の応力状態は、設計荷重時も含めて、プレフレクション時が最も厳しい。このことから、本建物では、鋼材として SM 50 Y を用いた。この鋼材は降伏強度は SM 53 と同等であるが、引張強度が SM 50 なみであるため、長期許容応力度は SM 50 と同じ値に抑えられている。プレビームでは、プレフレクション時には SM 50 Y の σ_y を SM 53 と同強度に設定できるため、より安価な SM 50 Y 材で SM 53 なみの性能を発揮できる。

(2) リリース時の下フランジコンクリートの応力度

コンクリートの圧縮応力度は、リリース時が最も厳しい状態である。許容圧縮応力度も、上記指針から $0.4 F_c$ とした。下フランジコンクリートの断面は、主としてリリース時のチェックで決定される。本設計では、プレビームの重量をできるだけ小さく抑える必要から、コンクリート強度は $F_c=500 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

(3) 設計荷重時の鉄骨およびコンクリートの応力度

設計荷重時の断面の応力分布は、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮を考慮して算定する。このためには、クリープ係数、乾燥収縮度等の定数を設定する必要がある。これらについては不明な点も少なくないが、本設計では上記指針に示された値を用いた。

設計荷重時においては、下フランジコンクリートの応力度がクリティカルである。プレビームの一般的設計法はパーシャルプレストレスリングの範ちゅうに入り、設計荷重時応力に対し、下フランジコンクリートに引張応力を許容している。この場合の許容引張応力度は、本設計では下フランジコンクリートのひびわれを許さないという方針から、日本建築学会の「プレストレストコンクリート設計・施工規準・同解説」に示された上限値、および以降に述べる実大のはりモデルによる載荷実験の結果を参照し、 18 kgf/cm^2 に設定した。

(4) 製作過程での変形

製作時のキャンパーの設定が悪いと、最終的にプレビームにむくりが残ったり、たわみすぎたりする。全体としての変形量が大いだけに、変形の把握は重要である。ここでも、クリープおよび乾燥収縮による変形量の推定が大きな要素として入ってくる。これらは時間とともに最終状態に漸近するが、変形については、床版打設直後にプレビームが水平になるようにキャンパーを設定した。

次に、本建物のプレビームの主要な設計条件を列記す

る。

- 1) 積 載 荷 重 : 研 究 室 330 kgf/m^2
計算機室 600 kgf/m^2
- 2) は り せ い : 研 究 室 700 mm
計算機室 850 mm
- 3) 床 剛 性 : 人間の歩行時の振動が感じられない程度の剛性を確保する。
- 4) はりの重量 : 吊込み時の重量を 6.7 t 以下に抑える。

本設計にあたっては、とくにプレビームのねらいである剛性に関して、下フランジコンクリートにいつひびわれが発生するのか、ひびわれ発生後の剛性はどの程度低下するのかといった点がポイントであった。また、前述のように一部のプレビームに新しい型式のシアコネクターを採用した。これらのことから、設計と平行して、ひびわれに関する性状の把握、シアコネクターの性能確認、およびプレビームの全体的な力学特性の確認を目的として実大実験を行い、設計の根拠とした。

4. 工場製作および現場施工概要

4.1 工場製作

プレビームの製作は、鉄骨ファブリケーターの工場で行った。プレビームは、橋りょうにおいては一般にスパンが長く運搬不可能であることから、リリースまでの工程を現場サイトで行っている。また、プレビームの一現場当りの数量自体もそう多くはないため、工程的にも現場サイトという方法で対応可能であった。本工事においては、プレビームを建築部材の一つとして短期間に大量に製作することが必要であり、この点が製作上のポイントであった。

本工事のプレビームの製作目標は、

製作期間 : 6 か月間

製作数量 : 318 台

というものである。この目標を達成するため、工場に新たにプレビームの製作ヤードを新設し、製作方法および品質管理の方法も在来のを大幅に改良した。製作方法の改良については、前記の実大実験の供試体製作を新製作法の試行として利用した。製作の概要について以下で簡単に述べる。

(1) 鉄骨製作

プレビームの鉄骨は、プレフレクション時に $0.8\sigma_y$ という、かなり過酷な応力状態にさらされる。このため、鉄骨内部の残留応力の状態によりプレフレクション時の変形量が異なり、プレビームの最終的な水平精度が悪くなる。本工事では、上記の供試体の製作を利用して残留応力の状態を確認し、本製作の精度を確保した。

(2) プレフレクション

写真-2 プレフレクションの状況

在来の方法は現場サイトであり、プレフレクションの反力の処理が困難なことから、2本のプレビーム用鉄骨ばりを互いに向かい合わせ、その間にプレフレクション用のジャッキをセットし、鉄骨ばりが反力ビームを兼ねる方法が採られていた。この方法では、個々の鉄骨ばりにかかるプレフレクション応力を独立に制御することが困難なこと、また、下フランジコンクリートの下面の仕

上りが型わく面とこて仕上げ面の2種類できてしまうこと、等の問題がある。そこで今回は、専用の反力装置を作り、一本ずつ独立に製作した。また、プレフレクションの制御も、在来ではジャッキの油圧管理のみであったが、最終の水平精度を高めるため、変形管理も併せて行った。

(3) 下フランジコンクリート

下フランジコンクリートは、生コン工場を選定し、そこから供給を受けた。本設計では、下フランジ下面のかぶり小さくコンクリートの充填性に問題があるため、流動化コンクリートを用いた。ベースのスランブは8cm、流動化剤添加後のスランブを18cmに設定した。コンクリートの調合は下記の養生方法も含めて総合的に検討し、水セメント比は32%、セメント量は500kg/m³とした。

下フランジコンクリートの養生期間短縮は今回の生産計画のポイントであり、そのため蒸気養生を導入した。養生温度の計画はプレキャスト工場等の方法を参考にし決定した。図-7に温度管理の基準を示す。これにより、従来7日間であった養生期間を3日間に短縮し、生産目標を達成することができた。

コンクリートの強度管理は上記の製作工程に合わせ、3日強度(設計基準強度の90%以上)および7日強度

(設計基準強度以上)で管理した。

(4) リリースおよび仮置き

プレフレクション時の変形量は、鉄骨が材料であるため、比較的安定している。それに対してリリース時は、コンクリートの性質が効いてくる。したがって、この時の変形に関してはばらつきが大きくなると予想されたが、結果はすべて許容範囲内に納めることができた。

プレビームは、リリース後、床版のコンクリート打設までの間に、下フランジコンクリートのクリープによりむくり量に変化する。変化量は5~7mmである。クリープ変形量はコンクリートの応力状態に関わると考えられるため、最終的水平精度を確保するには、リリースから床版コンクリート打設直前までののはりの応力状態を一定に保つ必要がある。このような観点から、仮置きの方法についても十分注意を払った。また、仮置きの存置期間も、この変形量に影響する。したがって、工場か

図-6 コンクリートの調合と養生方法

図-7 蒸気養生設備の試験結果

写真-3 仮置き状況

らの出荷順序についても、存置期間をできるだけ一定にそろえるように管理した。

4.2 現場施工

現場施工上、プレビームは鉄骨小ばりと同様に考えられるが、揚重重量の点で、どうしても下フランジコンクリートの分だけ重くなる。プレビームの重量は、その工事で用いるクレーンの能力設定に影響するうえ、設計時にある程度コントロールすることが可能であるため、設

写真-4 架設状況

図-8 リリース時の変形

計上きわめて重要である。本建物では、プレビームの最大重量は 6.8t に抑え、プレビームの各タイプとも、図面に重量を明記した。

現場施工上大きな問題点はなく、プレビームの採用で小ばり、床版部分が無足場工法となったため、躯体工事期間を標準工程 (7.5 か月) に対して 1.5 か月短縮することができた。

5. 実験概要

5.1 実大はり実験

すでに設計および製作に関する部分で述べたように、設計作業と並行して、実大のはりモデルによる実験を行った。本実験の目的を以下に改めて整理する。

図-9 工事工程表

- 1) プレベームの力学特性の確認
- 2) 下フランジコンクリートの初ひびわれ強度の確認
とひびわれが剛性に及ぼす影響の把握
- 3) 新しいシアコネクターの性能の確認
- 4) 振動性状の確認

また、本実験は供試体製作を本製作の試行として位置付け、設計、製作方法および品質管理手法について以下の検討資料を得ることを目的とした。

- 5) 鉄骨ばりの残留応力の把握
- 6) リリース時の導入プレストレスの確認
- 7) 短期間のクリープ性状の把握
- 8) H形鋼のむくり加工法の妥当性確認
- 9) プレフレクションの方法および管理法の妥当性確認

実験は静的载荷実験および振動実験で、両者の供試体を兼用し、静的载荷実験の途中で振動実験を行うことにより、プレベームの受けたダメージと振動特性の変化を把握できるように計画した。供試体は、

- Aタイプ：新型式のシアコネクターのプレベーム
- Bタイプ：標準のシアコネクターのプレベーム
- Cタイプ：下フランジコンクリートにプレストレスを入れない SC ばり

の3種類とした。SC ばりはプレベームの合成効果にプレストレスの導入が必要不可欠であるかどうかを確認する目的で実験に加えたものである。

(1) 静的载荷実験

図-10 に荷重-変形関係を示す。下フランジにプレストレスを入れたプレベーム (A, B) の初期剛性は、全断面を有効と仮定した場合の計算値とよく一致し、下フランジコンクリートの初ひびわれ荷重は、設計荷重に対して十分な余裕があった。ひびわれ発生後の剛性は、下フランジコンクリートを無視した計算値と、また、終局耐力も計算値とよい一致を示し、設計式の妥当性が確認さ

図-10 荷重-変形関係

れた。さらに、シアコネクターの種類による結果の差異は見られず、新型式のシアコネクターの性能が確認された。

SC ばりは、自重により下フランジにひびわれを生じ、下フランジの剛性寄与は見られず、プレストレスの必要性が確認された。

(2) 振動実験

一次固有振動数は 7.3 Hz で解析値とよく一致し、ま

図-11 共振曲線 (はりモデル)

表-2 シアコネクター押し抜き実験結果

(単位: t)

タ イ プ		試 験 体 称	実 験 値	実 験 値 均 平	計 算 値
在 来 形 式	スタッドジベル	T1-2	51.1	53.3	51.6
		T1-3	55.5		
	角 鋼 ジ ャ ベ ル	T2-1	101.4	93.0	98.5
		T2-2	81.6		
		T2-3	96.1		
新 形 式	竊 付 H 形 鋼	T3-1	43.1	43.6	44.9
		T3-2	44.1

図-12 荷重-変形関係

図-13 共振曲線(実床)

た、下フランジのひびわれ後は、剛性の低下ほど固有振

動数は低下しなかった。減衰率は1%であった。この結果から、設計時の床の振動性状の推算がほぼ適切であったことが確認された。

(3) シアコネクタの押抜き実験

上記の載荷実験とは別に、種々のシアコネクタについて、押抜き実験により性能の検討を行った。その結果、いずれのシアコネクタもコンクリートの支圧応力に基づく耐力の計算値とよい一致を示し、それぞれの設計法めどがつけられた。

(4) 実床での振動実験

本建物の躯体がほぼ出来上がった時点で、プレビームによる床上で振動実験を行った。強制振動実験による共振振動時の振動パターンと振動数を解析結果と対比して図-14に示す。共振振動数は7.3 Hz, 11.3 Hz, 12.5

図-14 振動パターン

図一15 歩行時の振動感覚評価

Hz, 18 Hz で、振動パターン、振動数とも、解析とよい一致を示した。減衰率は 2% であった。人間の 1 人歩行時の応答量は $9 \mu\text{m}$ でほとんど感じないと評価される程度であり、設計の妥当性を確認できた。

6. あとがき

プレビーム工法は、10 m を超える長スパンの床を構成するはりとして、比較的小さなはりせいで十分な耐力、剛性を実現できる優れた工法である。大きな積載能力をもち、かつ機能的なフレキシビリティを満たす長スパンの床構造というニーズは、計算センター、精密工場、倉庫等、比較的限られた分野のものと考えられてきた。しかし、本建物がすでにその先駆けであったように、いわゆるインテリジェントビルの一般化により、事務所ビルの重装備化が進むとともに、本工法のメリットを生かせる機会が広がっている。当社においても、本建物以後、計算センター、事務所ビル等、すでに数件の実施をみている。本建物はその第一作であり、プレビームの基本的力学性状、振動性状の確認から設計法の確立、さらには生産体制までも整備し、今後の本工法の基礎を固めることができた。本稿がプレビームの今後の発展の一助となれば幸いである。