（16）材端部RC造中央部S造とした複合構造梁の開発と実構造物への適用

鈴木　英之[1]・西原　寛[2]

[1]安藤建設　技術研究所（〒356-0058　埼玉県ふじみ野市大井中央1-19-61）
E-mail: suzuki-hideyuki@ando-corp.co.jp

[2]安藤建設　技術研究所（〒356-0058　埼玉県ふじみ野市大井中央1-19-61）
E-mail: nishihara-hiroshi@ando-corp.co.jp

筆者らは，梁の材端部を剛性が高い鉄筋コンクリート(RC)造とし，スパン中央部を自重の軽い鉄骨造とした複合構造梁構法を開発した。本構法により，柱をRC造としながら鉄骨造並の大空間を実現でき，また鉄筋コンクリート造の梁端部は鉄骨造よりも剛性が高いため，たわみや振動を軽減することができる。さらに鋼材量の低減によるコストの削減も計れる。本報では，まず複合構造梁構法の概要を示し，RC部と鉄骨部分の応力伝達の考え方を示す。さらに，本構法とプレキャスト工法と組み合わせ，大規模な建築物に適用した事例を報告する。

Key Words : *steel structure, reinforced concerete, hybrid structure, stress transfer, precast concrete*

１．はじめに

近年，建築分野では価格競争が激化しており，建物の性能を満足させつつ，コスト競争力の高い建物躯体の構築が望まれている。特に，鋼材価格の高騰を背景として従来は純鉄骨造で構築された構造物に対して，部分的にコンクリートを使用することで鋼材の使用量を低減し，構造性能と経済性を両立したハイブリッド構造が開発されている。たとえば，柱 RC 造，梁 S 造で構成される混合構造や，CFT 造は鉄骨とコンクリートを組み合わせることで鉄骨の使用量を低減しているハイブリッド構造である。

一方で工期短縮に対する要求も強いため，施工性を考慮する必要もある。

本稿では，鉄筋コンクリート造と鉄骨造を組み合わせた複合構造梁 [1]（AHBS 構法：ANDO Hybrid Beam System）を紹介し，その利点，応力伝達の考え方，および実構造物への適用例を紹介する。

２．複合構造梁の構法概要

図１に，材端部 RC 造中央部 S 造梁の形状を示す。この複合構造梁は，梁の材端部を従来の RC 造としながら，

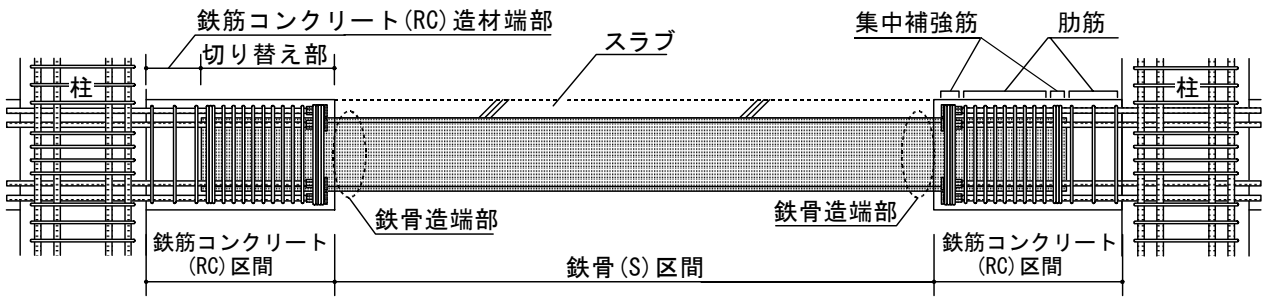


図１　材端部 RC 造中央部 S 造梁

梁スパンの中央部を自重の軽いS造あるいは合成梁とすることで，従来のRC造建物より広い室内空間を提供することや，従来のS造梁より撓み性状等を改善することを可能としている。さらに鉄骨が埋め込まれた区間の応力伝達機構を明確にすることで，鉄筋コンクリート部分の配筋を簡素化することができる。鉄骨からRC部分への応力伝達は梁スパンの途中で行われるが，その機構については後述する。

この複合構造梁を用いた躯体の柱と柱梁接合部は従来のRC造と同じである。また，スパン中央に使用する鉄骨は通常のH形鋼である。つまり，比較的高価な角形鋼管を必要とせず，複雑な溶接が少ないため，純粋な鉄骨造と比較して納期やコストの面で大きな利点がある。

図2に他の構造形式と比較した本構法の優位点を示す。SRC造やプレストレス造と比較して躯体が軽量となり，また鉄骨造と比較して剛性が高いため，たわみや振動を軽減できる。コストは，建物の仕様や敷地条件にも大きく作用されるが，概ね従来の大スパン構造と比較して安価となる。

図3に，本構法の適用例を示す。柱と柱梁接合部は従来のRC造と同じであるため，一方向のみ，あるいはXY両方向，または大きなスパンが必要な個所だけに使用する等，多様な平面形の建物への適用を可能としている。なお，4章ではXY両方向の梁に本構法を採用した施工事例を紹介する。

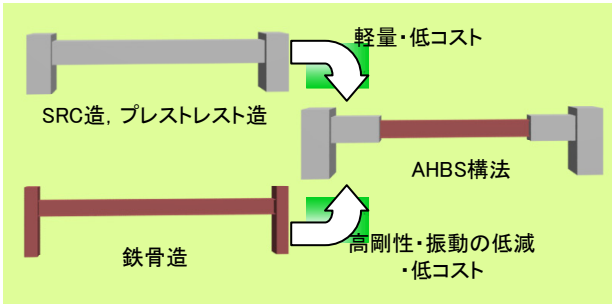


図2　AHBS構法のメリット

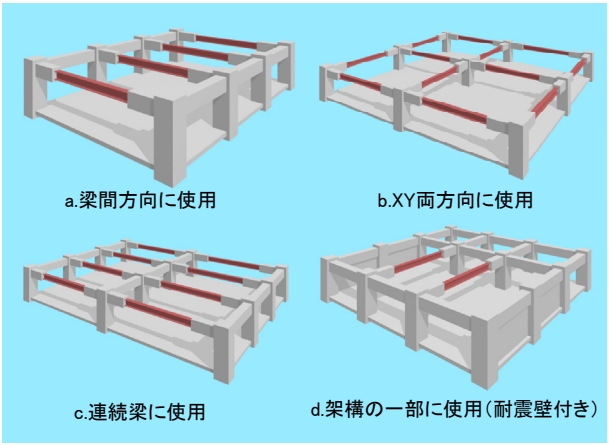


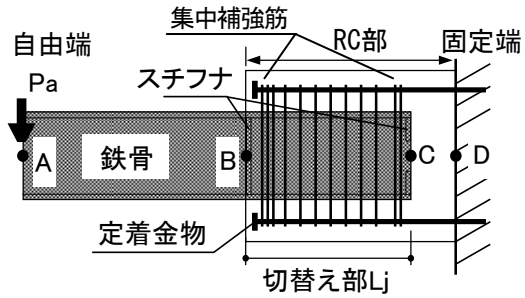
図3　AHBS構法の適用例

3．応力伝達のモデル化

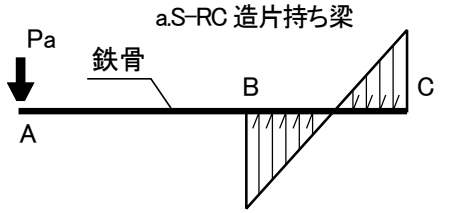
(1) 片持ち梁の応力図

図4aに自由端側S造固定端側RC造の片持ち梁の形状を示す。この梁は，鉄骨がRC部分にある長さ(L_j：以下，切替え部)埋め込まれており，切替え部の両側に肋筋を密に配し(集中補強筋)，主筋の先端に定着金物を設けていることが特徴である。また，鉄骨には支圧応力を受けるためのスチフナが図中のB,C付近に設けられている。

図4bに鉄骨に作用する力の釣り合いを示す。この梁の自由端側A点に荷重P_aが作用したとき，RC部内に埋め込まれた鉄骨は，てこ作用によって釣り合い，この支圧応力の反力が切替え部のRC部分に作用すると考える。同図では支圧応力分布を三角形[2)]としているが，この形状については後述する。この片持ち梁の応力図を**図5**に示す。鉄骨に作用する支圧応力分布の形状によって，図中BC間の応力図の形状が変化し，切替え部のRC部分には部材に作用するせん断力P_aよりも大きなせん断力が作用し，鉄骨にはそれと逆方向のせん断力が作用する。

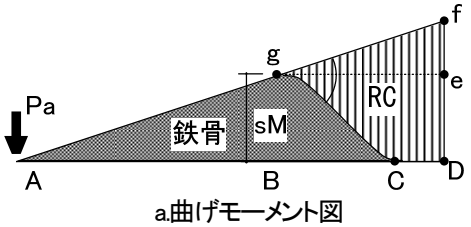


a.S-RC造片持ち梁

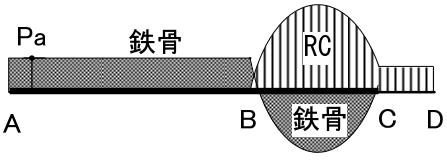


b.鉄骨に作用する力の釣り合い

図4　自由端側S造固定端側RC造の片持ち梁



a.曲げモーメント図



b.せん断力図

図5　片持ち梁の応力図

⑵ 切替え部のひずみ分布

図 6 に筆者等が行った固定端 RC 造自由端 S 造で構成される片持ち梁の実験 [1]より得られた，主筋および鉄骨のひずみを示す。**同図 a** は引張側における鉄骨フランジ，および主筋のひずみ分布である。鉄骨フランジの引張ひずみは埋込み始端よりも若干内側で最大となり，そこから直線的に減少している。一方，主筋のひずみ分布は鉄骨とは逆勾配であり，材端部において降伏ヒンジが形成されていた。**同図 b** に正加力+1/50rad.時における鉄骨ウェブの主ひずみとひび割れを示す。これによると，鉄骨ウェブの最大主ひずみの方向とひび割れの方向が一致している。これらは，鉄骨部と RC 部ではモーメント勾配が反対であることを示しており，言い換えれば鉄骨部と RC 部に作用するせん断力の方向が正反対であることを示している。**図 6** に示したひずみ分布から**図 5a** および b に示した応力図の形状を類推するのは困難であるが，定性的な傾向は一致していた。

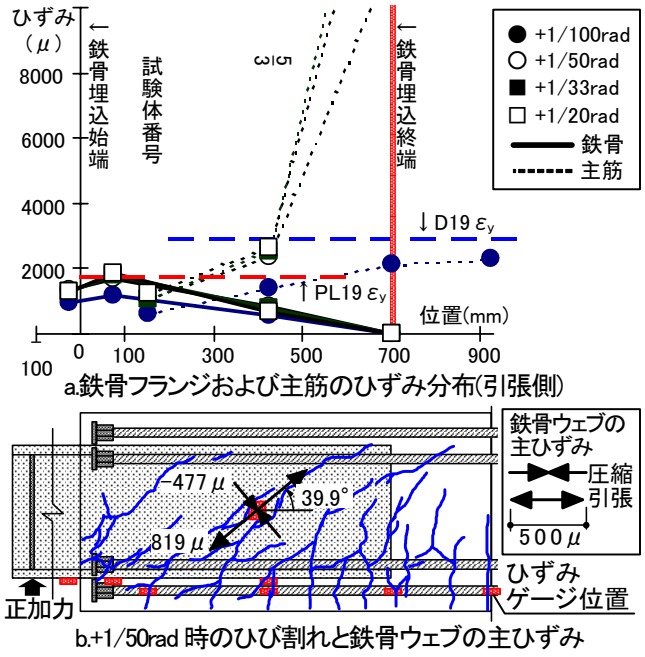


図 6 主筋および鉄骨のひずみ

⑶ 切替え部の曲げモーメント図

図 5a の曲げモーメント図のうち，切替え部を含む材端部の曲げモーメントを，**図 7** に示すように△efg と□BDeg の二つに分割して，それぞれの応力状態を考える。△efg のモーメント図はせん断力 *Pa* に応じた勾配を持つ区間 BD の RC 部分の曲げモーメントを表している。一方，□BDeg のモーメント図は B 点を通る断面における鉄骨の曲げモーメント *sM* を，切替え部を介して D 点を通る断面の RC 部分に伝達させることを表しており，区間 BD における鉄骨と RC 部分の曲げモーメントの和は一定である。曲線 gC は鉄骨から RC 部への曲げモーメントの移行を表しており，この形状は支圧応力分布の形状によって変化する。

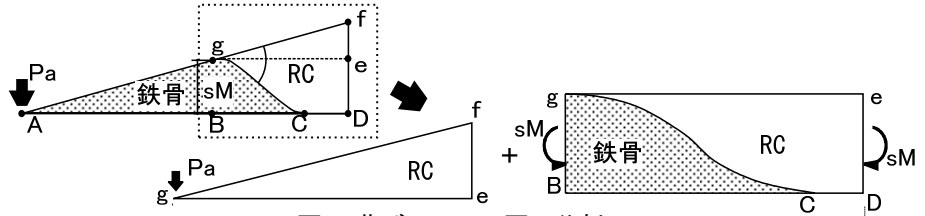


図 7 曲げモーメント図の分割

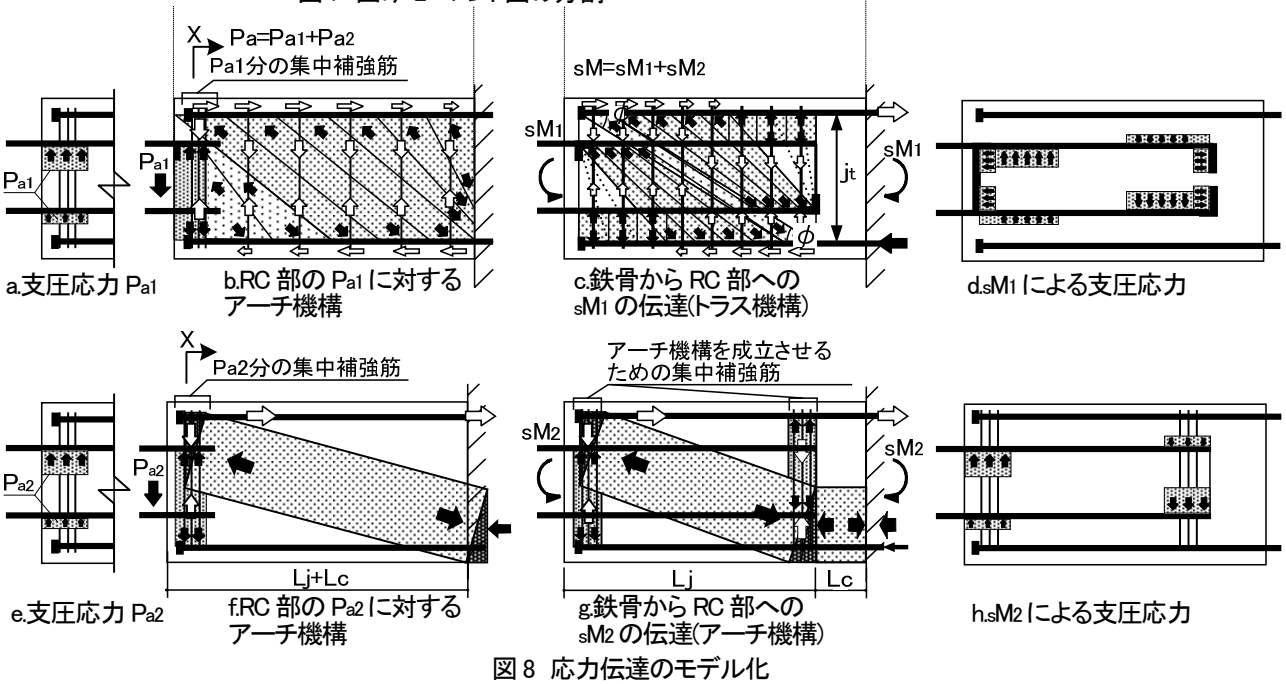


図 8 応力伝達のモデル化

(4) 応力伝達機構を考察する上での仮定条件

このような機構を形成するためには鉄骨部分および RC 部分が，**図 5** に示した応力図に対して安全側の耐力を有する必要がある。切替え部を含んだ RC 部分の抵抗機構を考察するにあたって，鉄骨ウェブは十分な強度を有していると仮定する。また，コンクリートと鉄骨間の応力伝達は，鉄骨フランジとスチフナに作用する支圧応力によってのみ行われるとする。鉄骨とコンクリート間の相互作用として摩擦力，あるいは付着力も考えられるが，これらは鉄骨とコンクリート間の相対滑りを伴うため，その滑りが全体の変形に及ぼす影響を考慮する必要がある。本報では摩擦係数，および付着力の定量化は行っていないため，これらの効果は無視した。

(5) RC 部に形成される抵抗機構と支圧応力

図 7 に示した応力図を基に RC 部分の抵抗機構を考察する。まず，自由端側で鉄骨が負担していたせん断力を RC 部分へ伝達するために，埋込み始端側の B 点付近で鉄骨フランジからコンクリートへ**図 8a,e** に示す支圧応力($Pa1$,$Pa2$)が作用する。片持ち梁である RC 部に，**図 7** 中の△efg のような曲げモーメントが作用するためには，支圧応力($Pa=Pa1+Pa2$)と釣り合う引張力を負担する集中補強筋が必要となる。RC 部に作用する Pa に対して**図 8b,f** に示すトラス機構とアーチ機構が形成される。**図 9** に集中補強筋を含んだ肋筋のひずみ分布を示す。これによると，埋込み始端側のひずみが大きくなっているのがわかる。

次に，**図 7** の□BDeg は B 断面近傍の鉄骨の曲げモーメント sM を RC 造材端部に伝達することを表している。**図 8c** はフランジとスチフナに作用する支圧応力と，コンクリートの圧縮束，肋筋の引張力，および主筋の引張力で構成されるトラス機構を表している。**図 8g** は切替え部の両端に集中補強筋が配されることによって形成されるアーチ機構であり，アーチ機構の負担せん断力と同量の引張力を負担する集中補強筋を，鉄骨の埋込み始端および終端側に配する必要がある。

この時に鉄骨に作用する支圧応力は**図 8d,h** に示す通りである。フランジに作用する支圧応力を足し合わせると階段状の分布となる。切替え部に作用するせん断力を算出する際は，この階段状の分布を**図 4b** に示した三角形分布に置き換えている。

集中補強筋と釣り合うコンクリート圧縮束，および**図 8c** に示すトラス機構に伴うコンクリート圧縮束は，**図 10a** に示すように H 形鋼の上下フランジに作用するが，この圧縮束が梁せいとなす角度が小さい方(図中，上フランジ)が支圧応力が大きくなる。

RC 部分の抵抗機構はトラス機構とアーチ機構で説明できるとすれば，これらの機構を構成する材料がその材料強度に達した時に終局耐力を迎えることになる。

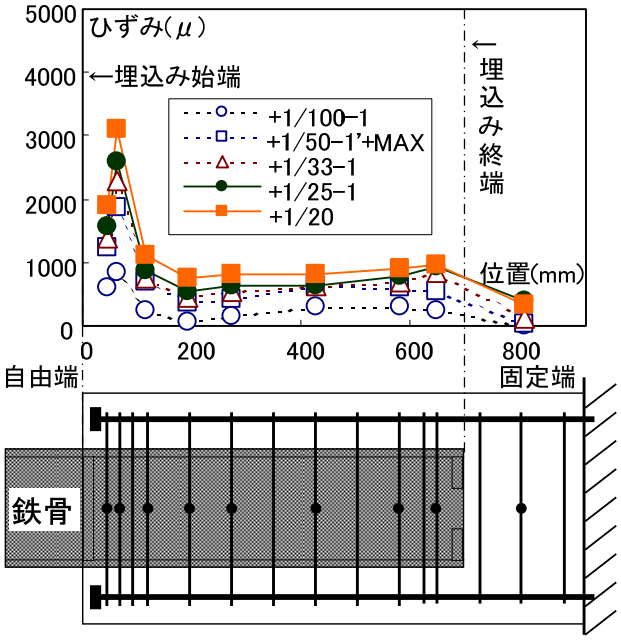


図 9 集中補強筋．肋筋のひずみ分布

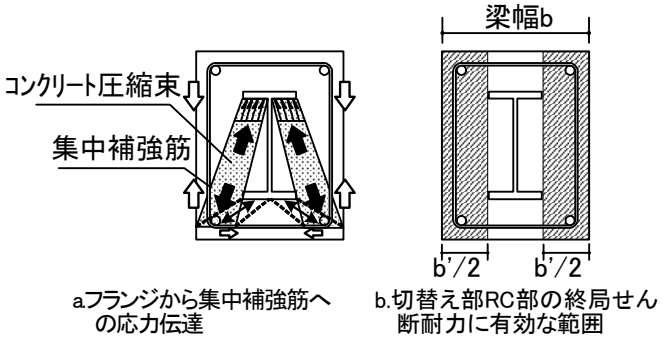


図 10 切り替え部の梁断面(X 断面)

4．施工事例

本構法による複合構造梁を大規模な建築物に適用した事例を示す。本建物は地上 5 階，延べ床面積約 38,000m^2 の物流倉庫である。一般的な梁のスパンは約 10.5～12m であり，従来であれば鉄骨造で計画される建物である。柱は場所打ちの RC 造とし，複合構造梁は現場敷地内で製作するサイトプレキャスト工法とした。両端を RC 造中央部を鉄骨造とする 1 スパン分を一つのプレキャスト部材とし，スラブ下までハーフプレキャストとした。小梁は鉄骨造，スラブはデッキ型枠とした。

図 11 に躯体のサイクル工程を示す。大梁の本数は約 600 本であり，プレキャスト梁の型枠はサイトの広さとサイクル工程を考慮して 60 セット用意し，平均 10 回転用した。**写真 1** に敷地内に設けたプレキャスト部材製作ヤードを示す。製作ヤードのベットと型枠は木製とした

ため，その精度管理が重要であった。

図 12 に総合仮設計画を示す。敷地内で建物周囲の空地が 1 方向に偏っていたため，重機の配置が制限されており，450ton トラッククレーンを使用して建方を行った。

写真 2 に大梁の建方を示す。従来であれば，**図 13a** に示すように複合構造梁，小梁，デッキプレート，スラブコンクリート等の重量，および施工時荷重のすべてをサポートに負担させる必要がある。そこで**図 13b** に示すように，大梁の重量を支えるために柱頭部に仮設用のあご（コーベル）を設け，コーベルに自重を含めた施工時荷重の一部を負担させ，仮設材の低減を図った。このようなコーベルを設けることは，プレハブ工場製の部材，特にプレストレス工法ではよく使われる手法である。工場製の場合はコンクリート強度が十分に発現した後に建方が行われるため問題は少ないが，今回の工事では柱のコンクリートが場所打ちであるため，梁を載せ架ける時の柱頭部のコンクリート強度の管理が重要であった。

コーベルについては，計算によりその大きさと必要鉄筋量，および建方時とスラブ打設時に必要とされるコンクリート強度を求めた。実際に梁の架設前とスラブ打設前にはシュミットハンマーにより柱のコンクリート強度の確認を行った。

写真 3 にコンクリート打設前の柱梁接合部を示す。梁下端主筋の接合は，柱梁接合部内でのエンクローズド溶接とした。

この後，デッキプレートを敷き，梁上端主筋およびスラブ筋を配筋し，スラブのコンクリートとともに柱梁接合部のコンクリートを打設することで柱梁の架構が一体

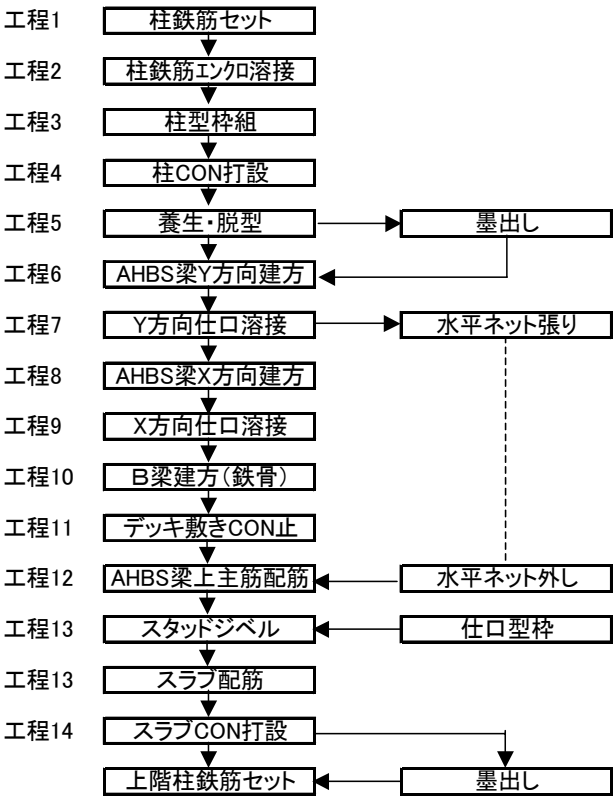


図11　躯体サイクル工程

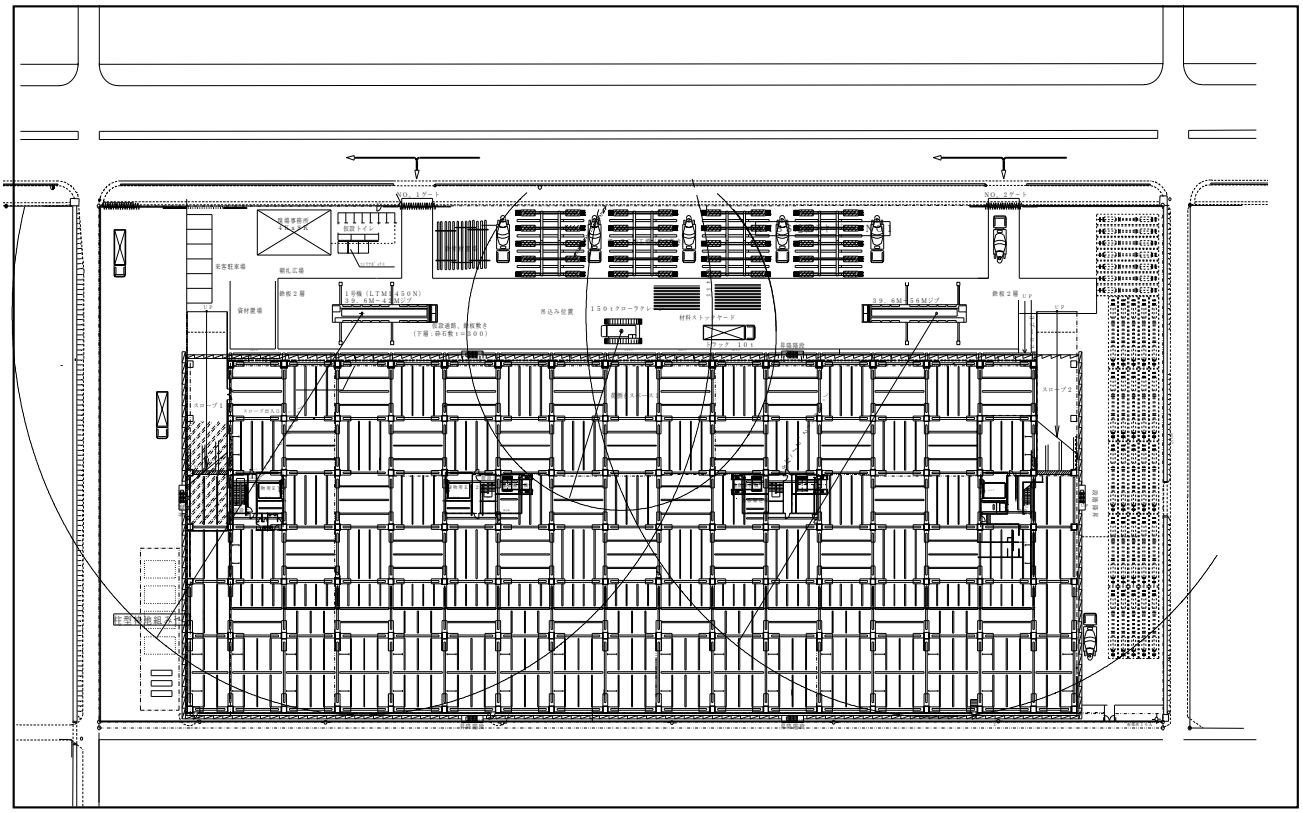
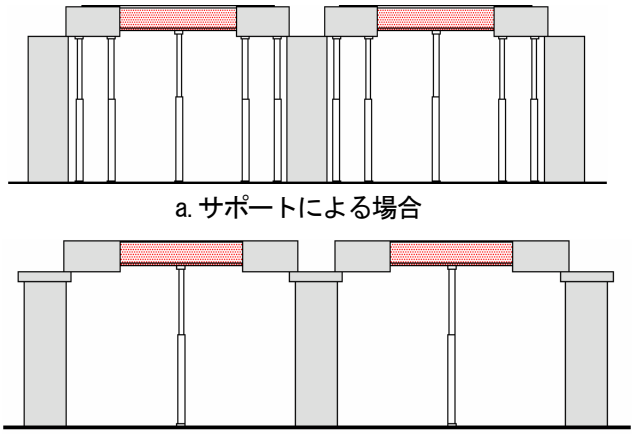


図 12　総合仮設計画

写真1　プレキャスト製作ヤード

写真2　大梁の建方

写真3　下端筋の溶接（柱梁接合部）



a. サポートによる場合

b. コーベルを併用した場合

図 13　支保工計画の改善

写真 4　RC 造柱と複合構造梁による架構

化される（**写真 4**）。複合構造梁は切り替え部で複雑な配筋となっているが，サイトプレキャスト化することによって，施工の合理化を図ることができた。その結果，鉄骨造並みの工期で躯体の施工を終えることができた。

５．まとめ

RC造から鉄骨造に切り替わる部分の応力伝達とその抵抗機構をモデル化し，材端部RC造中央部S造の複合構造梁を開発した。本構法は，柱と梁を同一の構造形式とする従来の躯体と比較しても多くの利点を有している。

この複合構造梁とプレキャスト工法を組み合わせ，純鉄骨造の代替構法として実際の施工に採用した。その結果，鉄骨造よりも剛性が高いという利点を持ちながら，経済性および施工性に優れていることが確認された。

参考文献

1）鈴木英之，西原寛，崎浜博史：鉄筋コンクリートおよび鉄骨で構成される複合梁の実験的研究(その 1～3)，日本建築学会大会学術講演梗概集,C-1,2001～2003

2）塚越英夫，神野靖夫：根巻き型鉄骨柱脚の応力伝達と設計式の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集,C-1,1996.9，pp.387-388

DEVELOPMENT OF HYBRID BEAM CONSISTING OF H-SHAPED STEEL AND REINFORCED CONCRETE , AND ADOPTION FOR ACTUAL STRUCTURE

Hideyuki SUZUKI and Hiroshi NISHIHARA

The Ando Hybrid Beam System is the structural system of beam which consists of reinforced concrete with high stiffness in the beam ends and H-shaped steel that is lightweight in the middle of the span. It is possible to build a considerable space, despite using a reinforced concrete column. Compared with a steel structure, both deflection and vibration are reduced because of high stiffness of the beam ends. Moreover, the frame cost was slashed because of the decreased steel involved. In this paper, an execution instance for Hybrid Beam, which was applied to two-way precast concrete beams in a distribution warehouse, was introduced.