

(35) 端部SRC、中央部鉄骨造のロングスパン 合成構造梁を有する病院の構造設計

堀 駿¹・向井 裕貴¹・荻野 雅士¹・松岡 理²・長谷川 和夫²

¹正会員 株式会社日本設計 構造設計群 構造設計グループ (〒163-1329 東京都新宿区西新宿6-5-1)
E-mail: hori-sh@nihonsekkei.co.jp

²非会員 大成建設株式会社 関東支店 (〒330-0854 埼玉県さいたま市大宮区桜木町1-10-16)
E-mail: matsuoka@bcd.taisei.co.jp

本計画建物の構造計画では、免震部材の集約化と病院の利便性に配慮して、最大16mのロングスパンを採用している。当該梁には端部をSRC造、中央部を鉄骨造とした合成構造梁を採用し、高耐力・高剛性かつ軽量化を図る。本計画の設計、施工上の特徴は、下記の3点である。①柱はH形鋼を内蔵したSRC造とし、合成構造梁端部の内蔵鉄骨に生じる応力を、直接柱の内蔵鉄骨に伝達させる計画とする。②合成構造梁のSRC造と鉄骨造の切り替わり部では、鉄骨が負担するせん断力が支圧によりRC部に大きく移行するため、この移行せん断力に対する安全性に配慮している。③合成構造梁は梁端部のコンクリート強度が発現するまでは内蔵鉄骨のみで施工時荷重を支持しなくてはならないことに配慮した施工計画とする。

Key Words : structural design, long-span composite structure beams, steel-reinforced concrete

1. 建築計画概要

本計画建物は群馬県藤岡市に位置する地上8階建て、建物高さ34.45m、延べ面積約20,000m²の総合病院である。図-1に建物鳥瞰図を、図-2に建物配置計画を示す。

本計画建物は、災害拠点病院として地震災害時にも病院機能を維持させる必要がある。そのため、大地震時において構造躯体の損傷を許容せず、さらに、建物内の医療機器や情報機器の転倒・落下による建物機能低下を防止する目的として、免震構造を採用している。基礎形式は、概ねN値20以上が出現するGL-5.45mの砂礫層(Ag)を支持層とする直接基礎としている。なお、本計画建物に隣接するその他の既存建物や新築別棟とはEXPJを設けて、基礎も含めて別の構造体として計画している。



図-1 建物鳥瞰図

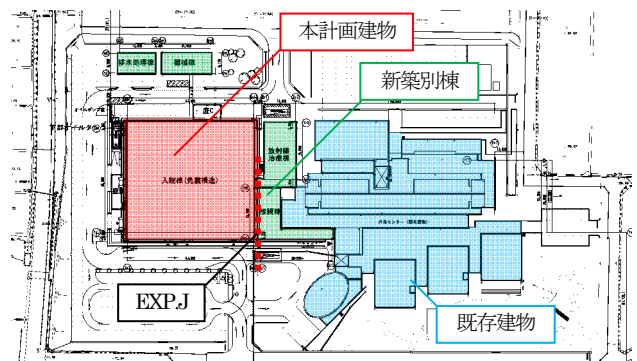


図-2 建物配置計画

2. 構造計画概要

(1) 架構計画概要

次頁の図-3に構造架構パース、図-4に代表床梁伏図、図-5に代表軸組図を示す。

構造種別は基本的には鉄骨鉄筋コンクリート造（以下SRC造）であるが、後述するように、一部の梁において鉄筋コンクリート造（以下RC造）およびSRC造と鉄骨造（以下S造）の混合構造を採用している。架構形式は純ラーメン構造としており、最下層である1階梁下部

に免震層を設けた基礎免震構造を採用している。免震層の最小クリアランスは550mmと設定し、免震部材の限界ひずみ(400%)状態においても免震部材を座屈させない目的で二次形状係数5.0以上を確保するために、免震部材の径は750φ以上を採用する。免震部材は、天然ゴム系積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承の他、長周期化のために弾性すべり支承を用いている。また、免震層の応答水平変位を低減し、免震構造システムとしての冗長性を持たせるためにオイルダンパーを採用している。

建物の平面形状は、救急、高度治療等が主用途となる1～3階までは約57m×47mの整形な矩形、主に入院用途となる5階床以上は東西面に窪みのあるI形の平面形状となっている。階高は、建物用途に合わせ、1～3階が4.2～4.8m、基準階である4～7階は3.9mとしている。

X方向の架構はY1、Y2、Y3、Y4通りの4構面で、すべての構面のスパンは6m（一部7～9m）×9スパンで構成している。柱SRC造、梁RC造としており、RC梁の主筋は柱梁接合部で柱内蔵鉄骨と干渉することから、梁端部に水平ハンチを設けて配筋の通りを良くしている。（図-12(後述)参照）。

Y方向の架構は10構面で、X1、X3、X8、X10通りの4構面は、7.5～9.0mと比較的短スパンとすることで、水平剛性を確保し、地震力の約6割を負担している。この構面は、柱梁ともH形鋼内蔵のSRC造としている。一方、X2、X4、X5、X6、X7、X9通りの6構面は15.3m、16m、15.6mのロングスパンで構成している。柱はH形鋼内蔵のSRC造であるが、梁は端部SRC造、中央S造（H形鋼梁の端部のみを鉄筋コンクリートで被覆した構造）とし、梁自重による応力を軽減しつつ、曲げ剛性を確保する構造としている。

1階梁（免震層上部梁）は基本的にRC造とし、ロングスパン部はH形鋼内蔵SRC造として計画している。

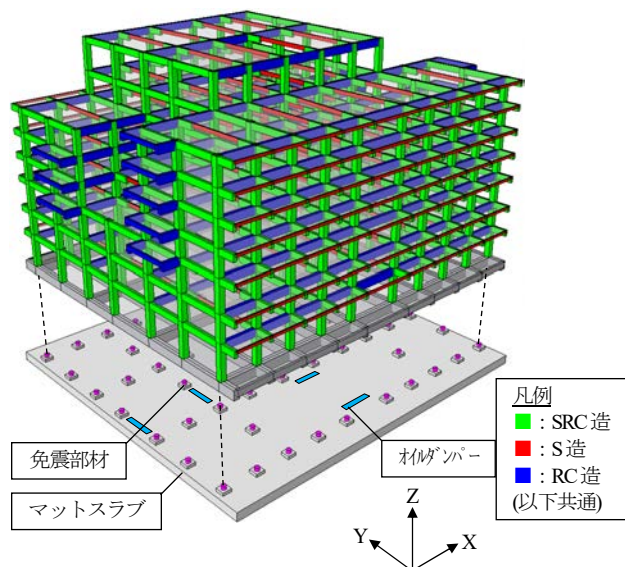


図-3 構造架構パース

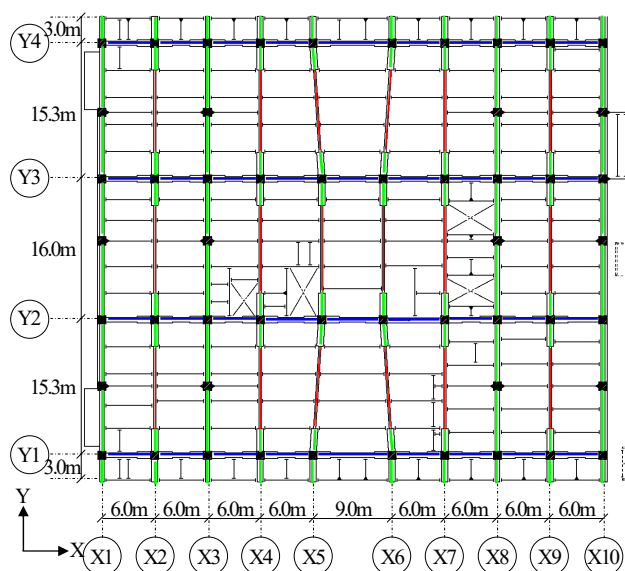
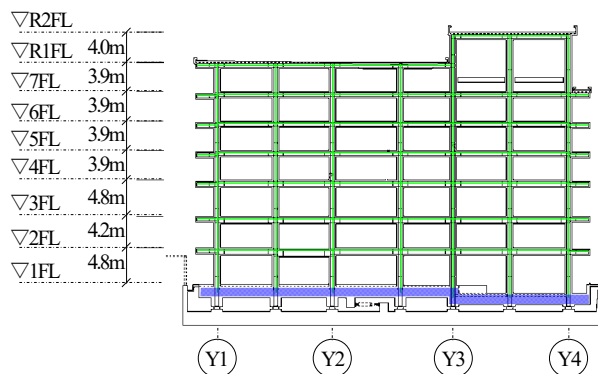
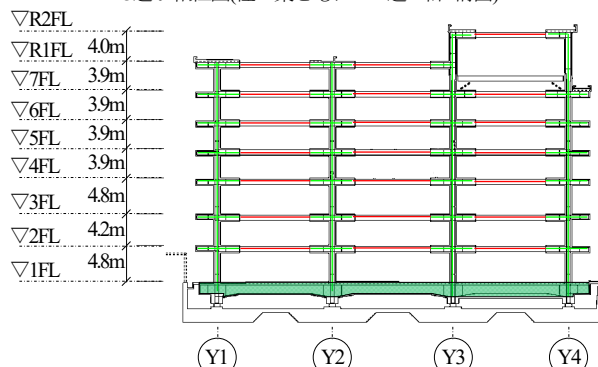


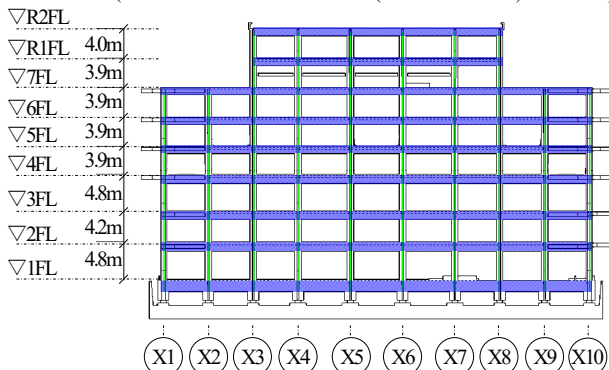
図-4 代表床梁伏図(3階床梁伏図)



X3通り軸組図(柱・梁ともにSRC造・計4構面)



X5通り軸組図(柱SRC造・梁端部SRC中央S造(ロングスパン梁)・計6構面)



Y3通り軸組図(柱SRC造・梁RC造・計4構面)

図-5 代表軸組図

(2) 主体構造概要

a) 柱

1～7階：B×D=900×900+H-500×200（SRC造）

b) 大梁

□X方向（桁行方向）梁

2～R階床：B×D=(750～500)×1000（RC造）

1階床：B×D=1050×1500（RC造）

□Y方向（梁間方向）梁

・一般部（SRC造）

5～R階床：B×D=600×800+H-500×200

2～4階床：B×D=500×1000+H-700×200

1階床：B×D=1050×1500

・ロングスパン部（SRC(端部)+S(中央)造）

2～R階床：端部 B×D=750×1000+H-700×250

：中央H-700×250

1階床：B×D=600×(2000～1500)+H-(1600～1200)×200

材の基数を減らす方がメリットがあることが確認できた。

そこで次に、柱スパンを大きくし柱軸力を集約させることで、免震部材の適正面圧に近づけることを目的としてロングスパン化を図り、ロングスパン構造を可能とできるプレストレストコンクリート構造（B案）、鉄骨造（C案）、混合構造（D案）の3タイプを比較した。さらに、アウトリガー効果に期待した3m跳ね出し案（E案）も併せて提案している。比較検討を行った結果、総合的な判断から、E案（柱SRC、梁端部SRC中央S造、一部RC造）を採用した。

ロングスパン化を行うことで、廊下廻りに柱が存在しないため、ナースステーションから見通しの良い空間を構成できる。さらに、柱を3mセットバックさせることで、建物の外周に柱が存在しないため、窓付近が解放的になり、本建物の特徴的な横連窓の外観を実現させることもできている。

3. 架構形式の比較検討

本架構形式の採用にあたり、躯体コスト、工期、居住性、空間の自由度などの項目に対して各種架構形式との比較検討を行っている。RC造純ラーメン構造、6m×9mグリッドを基本案とし、その架構に対して比較検討を行った結果を表-1に示す。RC造の適正スパンである6～9mグリッドで計画すると上部構造に関しては経済的であるが、一方で柱本数が多くなることから免震部材が増えることになる。免震部材の面圧を基準面圧に設定すると免震部材の径は小さく抑えられるが、比較検討ではある程度スパンを大きくし、軸力を集約することで免震部

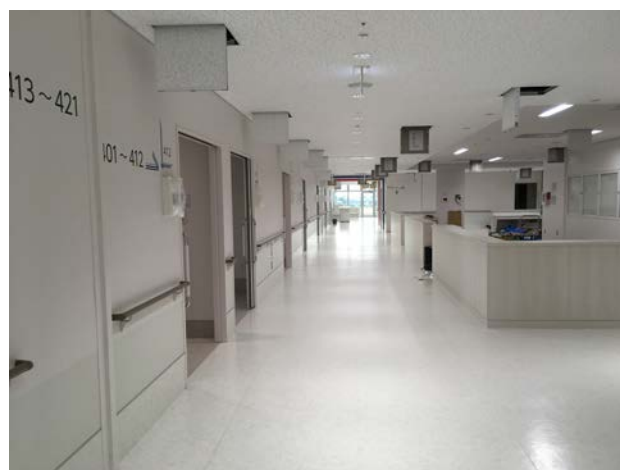


写真-1 病室階ナースステーション廻り（施工中）

表-1 構造形式の比較

	基本案	A案	B案	C案	D案	E案（本計画）
架構イメージ						
構造上の特徴	RC造	RC造	RC(PC)造	S造	柱SRC造 梁端部SRC中央S造、RC造	柱SRC造 梁端部SRC中央S造、RC造
	6m×9m	6m×9m	6m×18m	6m×18m	6m×18m	6m×16m+3m
	純ラーメン構造	耐震壁付きラーメン造	純ラーメン構造	純ラーメン構造	純ラーメン構造	純ラーメン構造
免震部材の引抜き	なし	あり (14箇所)	なし	なし	あり (4箇所)	なし
工期	-	○～△	○～△	◎	○～△	○～△
居住性	◎(十分に良い)	◎(十分に良い)	○	×(V-70 [※])	△(V-50 [※])	○(V-30 [※])
空間自由度	△	△	○	○	○	◎
上部躯体金額	-	○	×	×	△	△
免震部材金額	-	×	○	○	△	◎
判断	○	×	△	×	△	◎

※は建築学会指針による評価

4. 構造設計上の留意点

梁自重を軽減しつつ部材の剛性、耐力の確保を目的とした混合構造として、既往の研究^(例えば、1)においては柱RC造+梁端部RC造中央S造などが研究されており、応力伝達機構に対する設計式が多く提案されている。しかし、これらの構造システムはそれぞれ要素実験に基づいた設計式であり特許技術に因るところも多いため、限られた条件下で設計する必要があることから一般的な構法とは言い切れない。一方本計画建物は、図-6に示すように柱と梁の端部に内蔵鉄骨を挿入してSRC造の力学的挙動として評価しているため、通常のSRC造と同様、日本建築学会等の指針、規準等を用いて構造安全性を検討できる。

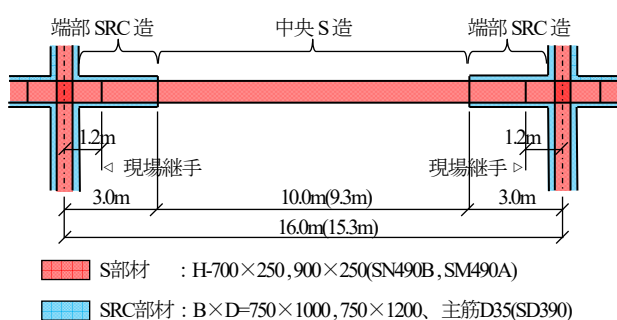


図-6 端部SRC造中央S造梁の概要図

(1) 端部SRC造中央S造梁のモデル化

応力解析においては、図-6に示す端部SRC造中央S造梁を、図-7に示すようにS造およびSRC造の構造種の切り替わり位置に節点を設け、3部材の材端剛塑性ばねモデルを連結したモデルとしている。材端特性は、SRC部材をひび割れによる剛性低下と降伏を考慮したTri-Linearモデル、S部材を降伏を考慮したBi-Linearモデルとし、SRC部材のTri-Linear材端特性は(1)式²⁾より定めている。

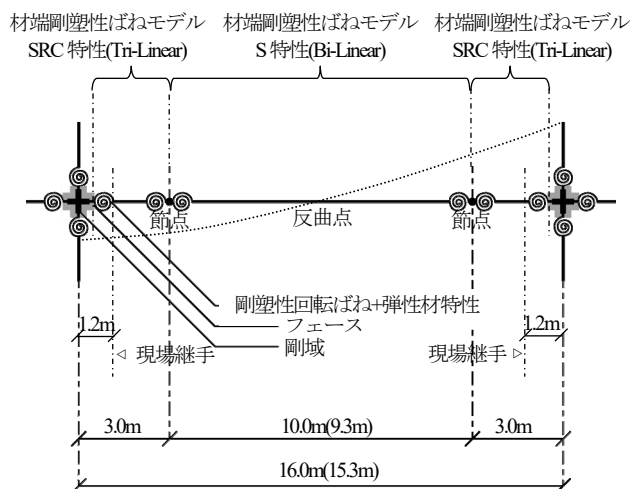


図-7 端部SRC、中央S梁の応力解析モデル及び応力分布

$$K_2 = \beta_1 K_1 \quad K_3 = \beta_2 K_1 \quad (1-1)$$

$$\beta_1 = (M_y - M_c) / (M_y / \alpha_y - M_c) \quad (1-2)$$

$$\alpha_y = (0.043 + 1.64n P_t + 0.043a / D + 0.33\eta_0) \cdot (d / D)^2 \quad (1-3)$$

K_1, K_2, K_3 : 第1、第2、第3剛性

β_1 : ひび割れ後の剛性低下率

M_c : ひび割れモーメント

M_y : 降伏モーメント

n : ヤング係数比 P_t : 引張鉄筋比

a : せん断スパン ($=L_{SRC}/2$, L_{SRC} : SRC部材長)

η_0 : 軸圧比

図-7によりモデル化される端部SRC造中央S造梁の部材端（柱フェース位置）曲げモーメント一部材回転角関係（以下、 $M-\theta$ 関係）は、図-8に示すSRC造としての材端特性を柱フェース位置、構造種切替部それぞれに与えた3部材モデルを別途作成し、当該モデルに逆対象曲げを与えた静的増分解析をおこない $M-\theta$ 関係を導出することで確認している。図-9に導出された $M-\theta$ 関係を示す。極めて稀に発生する地震動レベルにおいては、ひび割れによる剛性低下を生じているが、部材降伏による剛性低下は生じておらず、極めて稀に発生する地震動レベルでは概ね線形的な挙動を示している（極めて稀に発生する地震動時の等価剛性は初期剛性の73%程度）。

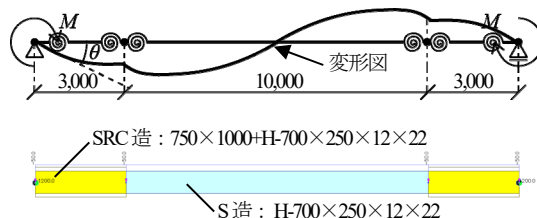


図-8 3部材モデル概要

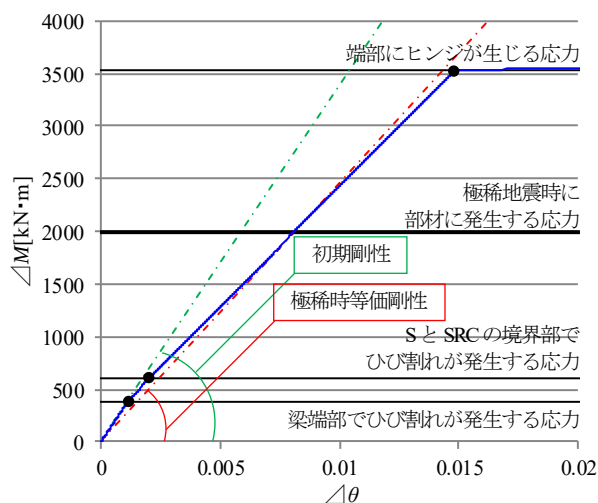


図-9 3部材モデルにて得られた部材端の $M-\theta$ 関係

図-7に示される解析モデルにおいて、(1)式の剛性低下率を定める実験データは単一部材の逆対象曲げモーメントの実験結果主体で構成されるものである一方で、端部SRC部材の地震時の応力状態は、図-7の曲げモーメント図に示されるように曲げモーメントの反曲点が部材外に位置していることから、端部SRC部材の剛性低下率の評価に関しては妥当性に問題があると考えられ、実験による検証等が必要と考えられる。しかしながら、本設計は免震構造を採用し、上部構造を極めて稀に発生する地震動においても部材降伏を許容していないことから、図-9に示すように当該地震動レベルにおいても部材は塑性化することなく概ね弾性的な挙動を示すこと、部材剛性のばらつきを考慮し、部材設計に余裕をもたせていること、時刻歴応答解析においては地震入力エネルギーの95%以上を免震層が吸収しており、部材のひび割れが応答性状に与える影響が小さいことから、当該端部SRC造中央S造梁の剛性低下率の設定が架構の設計に与える影響はないと判断している。

以降では、以上の仮定に基づき得られた応力に対して、特に構造安全性の検討が必要である、・SRC部材とS部材の切替部におけるせん断力伝達の設計、・柱梁仕口部の設計、・建て方時の施工時荷重に対する設計の3つに関して述べる。

(2) SRC部材とS部材の切替部におけるせん断力伝達の設計

SRC部材とS部材切替部における移行せん断力に対する検討を行う。SRC梁端が許容曲げモーメントに達したときにSRC部材とS部材の切替部において移行すべきせん断力を算出し、せん断力が移行できるようRC部材のスターラップの補強を行う。図-10に示すようにSRC部材端部のRC部材の許容曲げモーメントを M_0 、SRC部材とS部材の切替部におけるRC部材の曲げモーメントを0とし、RC部材の曲げモーメント勾配を直線的と仮定する。また、安全側の検討として、切り替え部における移行せん断力が最も大きくなるように、SRC部材内においてS部材の曲げモーメントは増大しないものと仮定する。検討対象断面を次ページの図-11に示す。

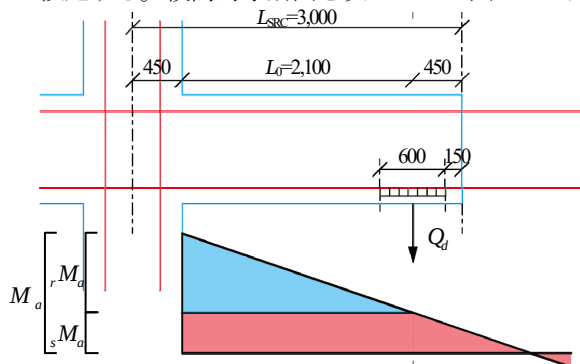


図-10 仮定した曲げモーメント分布

SRC部材とS部材の切替部で支圧によりS部材からRC部材に移行すべきせん断力の作用範囲は、指針³⁾に準拠し、柱フェースから切替部までの長さ(3000-450=2550mm)の1/3以下となる600mmとし、せん断補強筋のかぶり厚さ150mm分、柱フェース側に入った位置に設定する。その支圧応力を受ける範囲の合力 Q_d の作用位置と柱フェース間距離である L_0 は2,100mm、 $M_d=2,067\text{kN}\cdot\text{m}$ であることより、

$$Q_d = \frac{rM_d}{L_0} = \frac{2,067}{2.10} = 985 [\text{kN}] \quad (2)$$

となり、S部材からRC部材へのせん断力移行のために必要なせん断補強筋断面積 ${}_{\text{r}}A_s$ は、鉄筋材質をSD295A($f_t=295\text{N/mm}^2$)として、

$${}_{\text{r}}A_s = 985 \times 1000 / 295 = 3,340 [\text{mm}^2] \quad (3)$$

となる。図-10に示す梁端部600mmの範囲の梁のせん断応力に対するせん断補強筋2-D13 x 7列($A=1,778\text{mm}^2$ 、SD295A)を、4-D16 x 7列($A=5,572\text{mm}^2$ 、SD295)に置換し、その差分の断面積のせん断補強筋がS部材からRC部材へのせん断力移行に対するせん断補強筋量と考える。補強した断面積は、

$$5,572 - 1,778 = 3,794 [\text{mm}^2] > {}_{\text{r}}A_s = 3,340 [\text{mm}^2]$$

となっており、せん断力移行のために必要なせん断補強筋断面積 ${}_{\text{r}}A_s$ を満足している。よって、次頁の図-12に示す通り、SRC梁先端位置において4-D16@100-7列のせん断補強筋を配置するものとする。

(3) 柱梁仕口部の設計

柱梁仕口部において、応力伝達が十分に行えるかの検討としては、下記方針で算定することとする。

a) 柱と梁で囲まれる部分のせん断力に対する検討

SRC規準⁴⁾に準拠し、下記の式を用いて長期荷重時、短期荷重時における安全性を確認する。

・長期荷重時

$$cV \cdot 3f_s \cdot (1 + \beta) \geq ({}_B M_2 + {}_B M_2) \cdot \frac{h'}{h} \quad (4)$$

・短期荷重時

$$cV_e(2f_s \cdot \delta + {}_w p \cdot {}_w f_t) + {}_s V \cdot {}_s f_s \geq ({}_B M_2 + {}_B M_2) \cdot \frac{h'}{h} \quad (5)$$

b) 内装される鉄骨のバランスに関する検討

下記の三段階の検討を行う。

・SRC規準⁴⁾に準拠

柱および梁における鉄骨部分のそれぞれの曲げ耐力の和が、以下の式を満たしていることを確認する。

$$0.4 \leq \frac{{}_s c M_p}{{}_s B M_p} \leq 2.5 \quad (6)$$

${}_s B M_p$: 集合する梁の鉄骨部分の曲げ耐力の和[kN・m]

${}_s c M_p$: 集合する柱の鉄骨部分の曲げ耐力の和[kN・m]

- ・(上記を満たしていない場合)存在応力に対しての伝達の確認

本設計は免震構造であり、建物の終局状態が免震部材にて決まることから、集合する梁の鉄骨部分が負担している存在応力に対して、柱の鉄骨部分の長期、短期許容応力度以下であれば問題ないと判断した。また、梁の鉄 S 部材が負担する曲げ応力は、梁の存在応力に対して RC 部材との耐力によって按分した。

$$\sum \left(M \times \frac{s_B M_P}{B M_P} \right) < \sum s_C M_A \quad (7)$$

M : 梁に存在する曲げモーメント[kN・m]

$B M_P$: SRC 梁の曲げ耐力[kN・m]

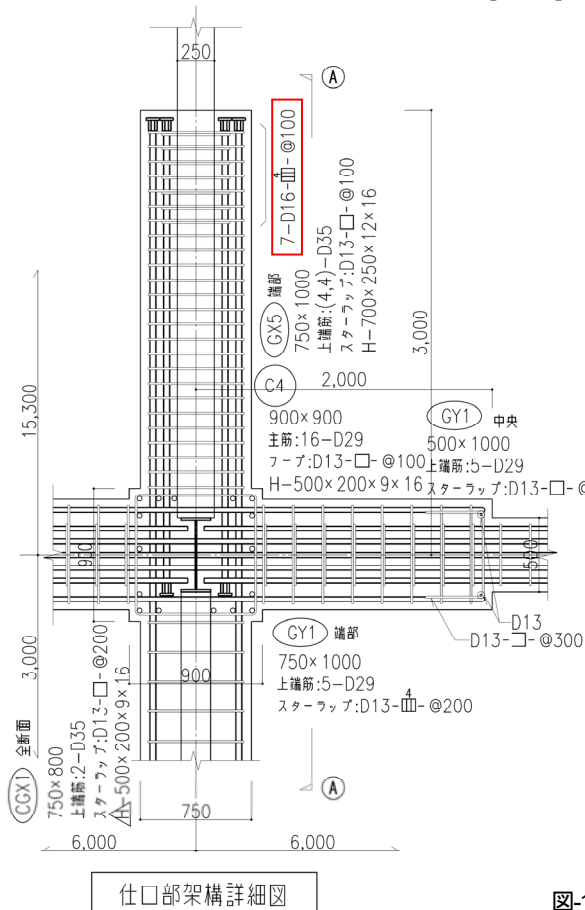
$s_C M_A$: 柱の鉄骨部分の許容曲げ応力度[kN・m]

- ・(上記2つを満たしていない場合)ストレスブロックの加算 (十字型接合部のみ)

十字型接合部においては、梁の S 部材に生じている曲げ応力は、柱のコンクリート部分の支圧抵抗により伝達することができるため、ストレスブロックによる応力を(7)式の右辺に加算することができる。

$$\sum \left(M \times \frac{s_B M_P}{B M_P} \right) < \sum s_C M_A + J M_A \quad (8)$$

$J M_A$: ストレスブロックによる抵抗モーメント[kN・m]



なお、上記ストレスブロックは、既往資料 ⑨により下記のように算定する。

$$J M_A = (1 - \mu) \cdot C_n \cdot (C D - D_{br}) \quad (9)$$

$$C_n = \sigma_{br} \cdot b_{br} \cdot D_{br}$$

σ_{br} : コンクリート支圧耐力(圧縮耐力の2倍とする)

b_{br} : 応力ブロック幅(特別な抵抗機構がないため鉄骨の梁幅とする)

D_{br} : 応力ブロックの奥行き(柱せい $C D$ の半分に 0.7 を乗じた値とする)

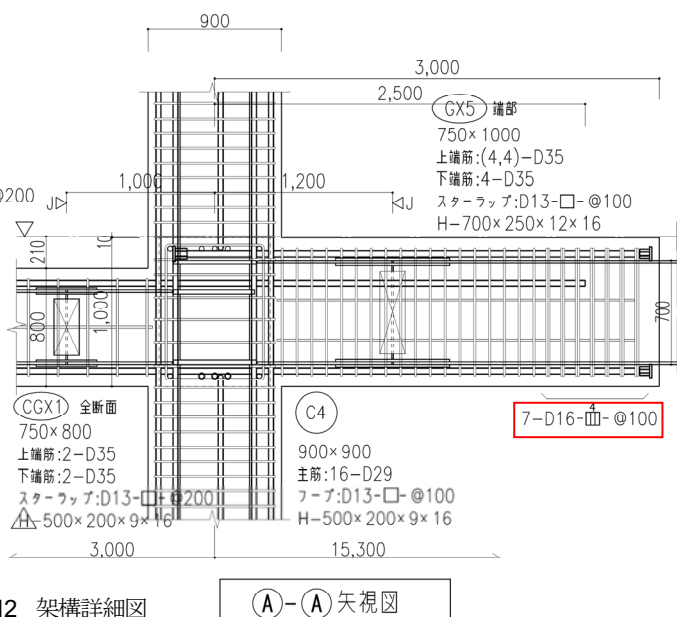
μ : 応力中心間距離のスパンに対する比率

上記3段階の検討により、本建物の柱梁仕口部に対しての構造安全性を確認している。図-12 に、以上の検討により決定した接合部の詳細を示す。

位置	端 部	中 央
断 面		
B x D	750×1000	-
鉄 骨	H- 700× 250×12×25	H- 700× 250×12×22
上端筋	一段筋 4- D35 二段筋 4- D35	-
下端筋	二段筋 - 一段筋 4- D35	-
スターラップ	D13-□-@100	-
腹 筋	4-D13	-

図-11 3階 GX2 梁断面

鉄骨部材
柱 無印: SN490B 大梁 無印: SN490B
△印: SM490A(同強度の別材質へ変更可能)



(3) 建て方時の施工時荷重に対する設計

a) 概要

本建物のロングスパン梁は、梁端部を SRC 造として構造設計を行っているが、施工時において端部の RC 部材の強度が発現される前は、内蔵鉄骨のみで施工時荷重を支持しなくてはならない。また、柱は H 形鋼が内蔵された SRC 造としているが、同様に被覆 RC 部材の強度が発現される前は内蔵鉄骨のみとなるため、梁端部の固定度が応力解析モデルよりも低下し、結果としてロングスパン梁の中央曲げモーメントが増大する可能性がある。

本計画建物の設計段階においては、建方に必要となる仮設材を施工者の責任において計画することとし、構造設計者が施工段階において施工計画書を確認することとしている。そこで、実施工に先立ち、実際に構造設計者、施工者の間で協議を行い、施工時荷重に対する検討を行い、構造安全性の確認を行っている。

b) 検討内容

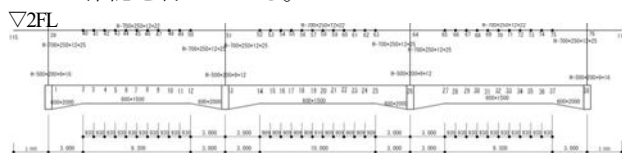
上記の理由により、当該梁に対するコンクリート打設時においては、梁端部（SRC 部）の梁底型枠を支持するための支保工（単管）以外にも、梁中央（S 部）にも支保工を設けることとする。また、端部コンクリートが硬化して強度が発現する前においては、当該梁の鉛直方向の曲げ剛性が十分ではないため、下層複数層にまたがって支保工を設け、複数の梁で施工時荷重を支持する計画とする。なお、支保工の軸剛性も適切に評価するために、支保工のモデル化も行う。検討の概要及び解析モデルを図-13 に示す。また、写真-2 に施工中の支保工の様子を示す。



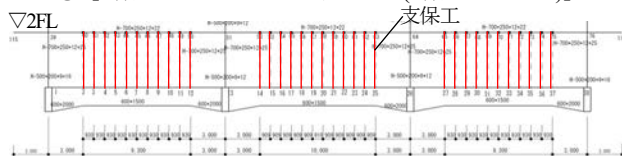
写真-2 施工中の支保工設置状況

設計荷重としては、建て方・デッキ敷込み時は、鉄骨自重+デッキプレート重量として 2.2kN/m を、RC 打設時には固定荷重として 26kN/m を考慮する。本施工時解析にて生じる中央曲げモーメントが、完成後の全体解析モデルにおいて当該 S 部材に生じている中央曲げモーメ

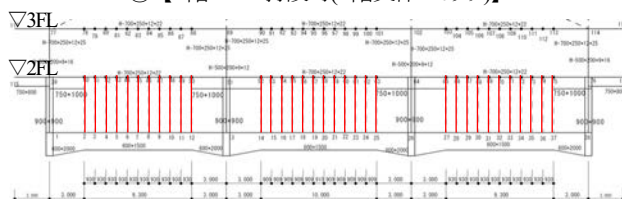
ント程度であれば問題ないと判断し、その値以下であることの確認を行っている。



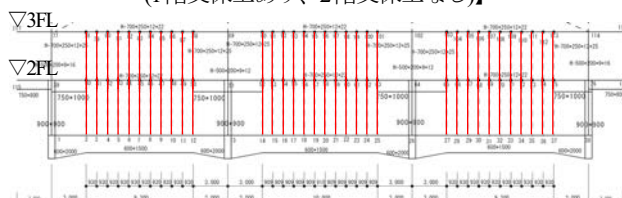
① 【2階 建て方・デッキ敷込み時(1階支保工なし)】



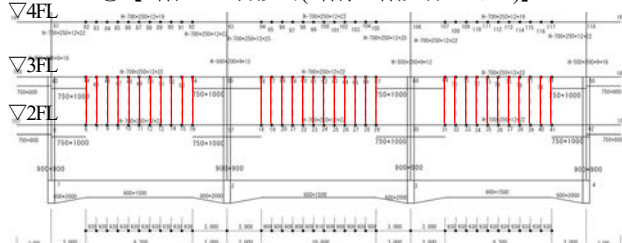
② 【2階 RC 打設時(1階支保工あり)】



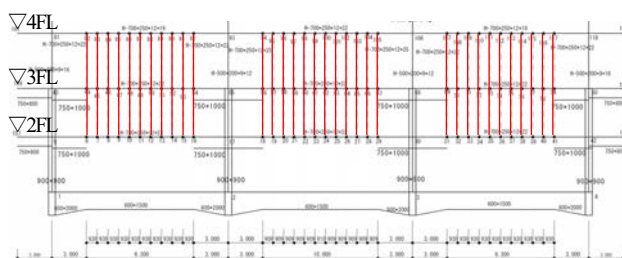
③ 【3階 建て方・デッキ敷込み時
(1階支保工あり、2階支保工なし)】



④ 【3階 RC 打設時(1階、2階支保工あり)】



⑤ 【4階 建て方・デッキ敷込み時
(2階支保工あり、1,3階支保工なし)】



⑥ 【4階 RC 打設時(2,3階支保工あり、1階支保工なし)】

図-13 施工時解析概要と解析モデル

以上より、支保工は、鉄骨中央に1mピッチで設けることとした。また、支保工は2層受けとし、打設する階の2つ下の階までに設けるように設定した。次頁の写真-3に支保工除去後の構造部材の様子を示す。



写真-3 支保工除去後の構造部材の様子



写真-4 竣工時外観写真

5. おわりに

本計画建物では、病院という建物用途に対して、主に免震部材の集約化によるコスト削減と機能の利便性に配慮し、最大 16m のスパンを有する混合構造を提案した。病院機能においては高い居住環境と耐震性能が要求されるため、ロングスパン梁は、端部のみを SRC 造とし、中央を鉄骨造とすることで、高耐力・高剛性かつ軽量化を図った。また、設計段階において、単一素材からなる構造システムとの比較を行い、コスト的に優れていることも示した。

謝辞：最後に紙面をお借りしまして、本構造計画を承認し、採用していただいた公立藤岡総合病院の皆様、並びに精度の高い躯体を制作・施工していただいた工事関係者の皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 辰濃達, 杉山智昭, 松本修一, 稲田博文, 小室努, 甲斐隆夫：プレストレスを用いて圧着した複合構造梁の構造性能 その1, 日本建築学会学術講演梗概集,C-1 pp.1399-1400, 2012
- 2) 菅野俊介：鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する実験, コンクリートジャーナル, Vol.11, No.2, 1973.2
- 3) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説, 2005.
- 4) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造規準・同解説—許容応力度計算と保有水平耐力—, 2014.
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造の設計と施工, pp.1-8, 2001.

Structural Design of a hospital using long-span composite structure beams composed of steel-reinforced concrete at the end and steel at the center

Shun HORI, Hiroki MUKAI, Masashi OGINO, Satoshi MATSUOKA and Kazuo HASEGAWA

The longest spans of up to 16M are adopted considering localization of seismic isolation devices and convenience of the hospital. There are three main characteristics of this project,

(1) The column is also made of steel-reinforced concrete with a built-in H-shaped steel. (2) The shear force caused by the steel largely shifts to the RC part by the bearing pressure, therefore safety for this transition shearing force shall be considered. (3) Composite structural beams shall be constructed with the consideration that only the built-in steel frame must support the load at the time of construction until the concrete strength at the end of the beam is developed.