

床スラブとの合成効果に期待した鉄骨梁横補剛工法

－最上階梁についての有限要素法解析－

Development of a Lateral Bracing Method for H-Shaped Steel Beams Using Bracing Effects of Reinforced Concrete Slab － FEM Analysis for the Beam on the Top Floor －

五十嵐治人*¹ 相羽均修*²

概 要

H形鋼鉄骨梁と鉄筋コンクリート造床がシアコネクタで結合された合成梁は、上フランジが材軸直交方向への変形を拘束され、横座屈（梁が曲げを受けた際に材軸直交方向に倒れる現象）に対する抵抗性が向上する。これまで、この効果を積極的に評価して、横座屈防止に必要な横補剛材を省略する工法を開発した。しかし、開発工法は中間階で上下階の柱と剛接合された状態で検討しており、最上階、もしくはセットバックして上階がない場合については未検討である。実際には、上階に柱がない場合は下階柱頭の降伏が先行し、梁は建物メカニズム時まで横座屈を起こさない場合が多い。しかしながら、それを理由として横補剛材を省略するには、別途検討が必要となる。そこで、上階柱がない場合の合成梁の横座屈に対する抵抗性についてFEM解析を用いて検討した。その結果、本工法は上階に柱がない場合についても同様に評価できることが分かった。

key words : 鉄骨梁、横座屈、床スラブ、シアコネクタ、有限要素法解析

1. はじめに

建築物の梁にH形鋼を使用した場合、鉄筋コンクリート（以下、RC）造の床スラブとシアコネクタを介して結合された合成梁として評価することが一般的に行われている。これにより梁は曲げ剛性が向上するが、その他に上フランジの材軸直交方向への変形が拘束されることにより、横座屈への抵抗機構も向上することが期待される。これまで、この抵抗機構を設計で定量的に取り入れるべく実験、解析を行い、一定の条件の下では床スラブのH形鋼梁に対する横補剛効果を評価することができた。しかし、いずれも梁が上下階ともBOX柱と剛接合された状態についてのみ検討したため、最上階もしくはセットバックした部分で上階に柱がない場合の梁については未検討であった。上階柱が無い場合はこれによる振り抵抗が期待できないなどの懸念もある。

実際には、上階に柱がない場合は梁端よりも柱頭の降伏が先行することが多い。そうなると梁は建物メカニズム時に至るまで降伏せず、ひいては横座屈も起こさないこととなるが、それを理由として横補剛材を省略することはできず、終局時の設計用外力を大きく評価するなどの対応が必要となる。そこで、開発した本工法によって横

補剛材を省略できるかを有限要素法解析により確認した。解析に際しては柱を線形部材として扱った。これは、実験を行っても柱降伏が先行して梁が降伏しないためであり、梁の曲げ降伏後の靱性能に着目した検討を行った。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

本検討は、既報¹⁾に示す試験体について、有限要素法解析を実施した結果、および考察について報告する。実験を行った試験体は4体でF1～F4、これに、実験は実施していないが、梁、柱はF1～F3と同等でスラブ無しのモデルF0の解析も行った。いずれも梁は上下階の柱と剛接合されている。これについて、今回はF0～F4について上階の柱が無いモデルについても解析を行った。F0～F4の5体の仕様を表-1に示す。詳細は既報¹⁾に示す通りである。スラブに使用したコンクリートは全試験体とも同一で圧縮強度 $\sigma_B=19.3\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E_c=22,000\text{N/mm}^2$ であり、後述するシアコネクタの各耐力はこの数値を用いて算定した。曲げモーメントの変曲点が生じた位置がスパン中央で、正曲げ負曲げがスパンの各々1/2ずつと仮定すると、合成率は約2.5となる。

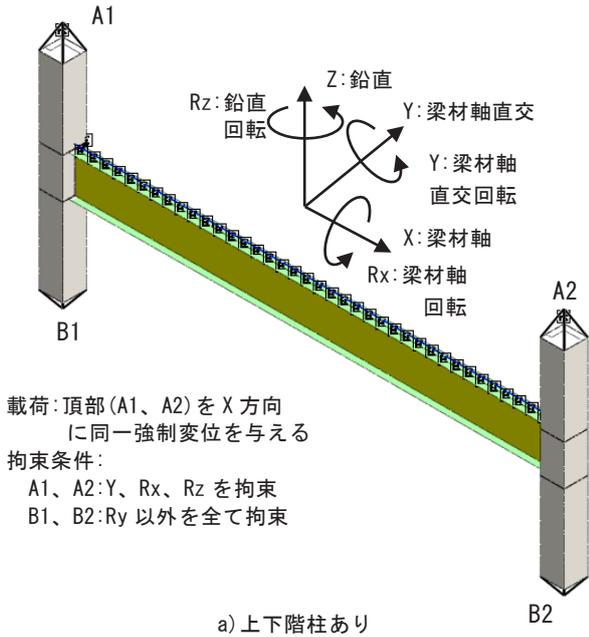
*1 Haruhito IGARASHI

技術本部技術研究所 主席研究員

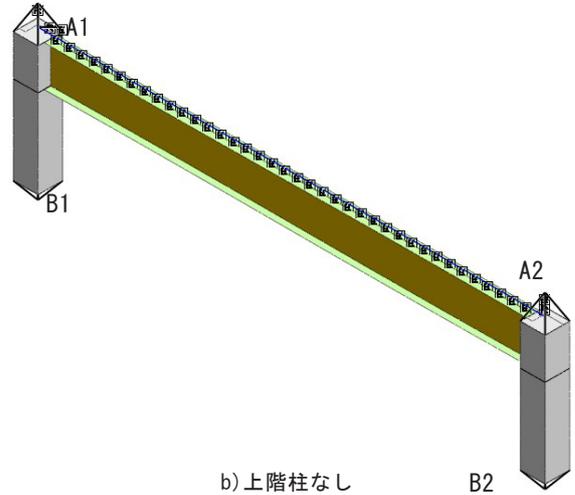
*2 Masanobu AIBA

技術本部技術研究所 研究員

使用ソフト: Midas GTSNX(マイダス社)
 材料・幾何学的非線形解析



初期不整: Y 方向に対し、初期不整量 u は、
 $u = \ell/1000 \cos(\pi x/\ell) + \ell/10000 \sin(2\pi x/\ell)$
 内法スパン: $\ell=5700\text{mm}$



a) 上下階柱あり

b) 上階柱なし

図-1 解析モデル

表-1 試験体概要

試験体名	梁	床スラブ		解析		実験結果
		形状	厚さ	a)	b)	
F0	H-500×150×9×12	無し	—	○	○	無し
F1		片側	83	○	○	有り
F2		両側	83	○	○	有り
F3	H-530×230×9×12	片側	44/42	○	○	有り
F4		片側	83	○	○	有り

柱: □-300×16 (BCR295)
 共通事項: ダイヤフラム: R-16 いずれも線形
 梁: SM490A 柱芯間距離: 6,000mm
 解析 a) 上下階柱有り b) 上階柱無し
 F3 スラブ厚さ: 梁上 86mm、その他 42mm

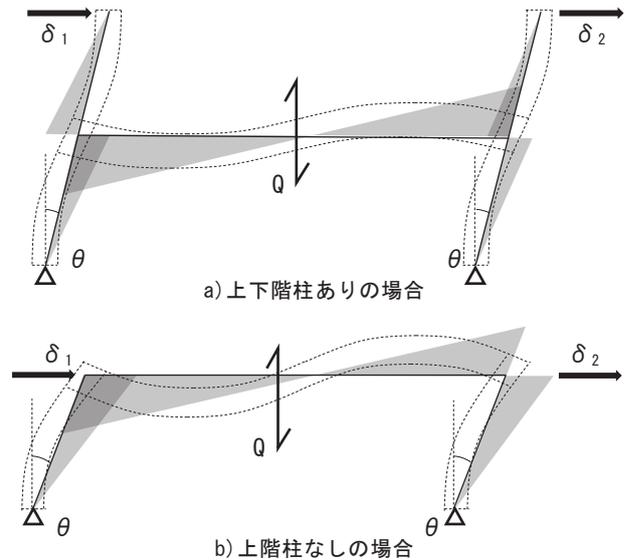


図-2 解析モデルの変形、曲げモーメント分布

*a)、b)とも $\delta_1 = \delta_2$ となるように載荷

解析は材料・幾何学的非線形解析で、一方向漸増載荷とした。解析モデル概要を図-1に示す。(a)各方向、拘束条件、載荷方向、材料非線形考慮の有無、初期不整の設定仕様も併せて示す。解析コードは「Midas GTSNX」である。載荷は、上下階柱ありモデルは上階柱頂部、上階柱無しモデルは接合部頂部(いずれも A1、A2)について、X(梁材軸)方向に同一変形(図-2中の $\delta_1 = \delta_2$)となるように与えた。拘束条件は A1、A2 は Y(梁材軸直交)方向、Rx(梁材軸回転)方向、Rz(鉛直回転)方向を、下階柱底部(いずれも B1、B2)は Ry(梁材軸直交回転)方向以外の全てを拘束した。初期不整値 u は、文献²⁾を参考にして設定した。各々のモデルの変形、曲げモーメント分布を図-2に示す。上下階柱ありのモデルは、梁端の曲げモーメントは節点位置において上階柱脚と下階柱頭の曲げモーメントの合計となるが、上階柱無しモデルは、梁端と下階柱頭の曲げモーメントは節点で同一となる。従って、上階柱無しモデルは実際には下階柱頭の応力が大きくなり、建物メカニズム時

には柱頭のヒンジが先行して生じてしまうことが考えられる。これに対して、今回の解析では梁の横座屈を考慮した降伏後の靱性能に対する上階柱の有無の影響に着目するため、柱は線形部材として評価した。

スラブ、シアコネクタのモデル化を図-3に示す。ここで、実験を行った試験体は直交梁を有している。これによりスラブは3辺についてシアコネクタで鉄骨梁と合成構造をなしているが、解析では直交梁はモデル化しなかった。しかしながら、梁のせん断力は直交梁上のシアコネクタを介しても柱に伝達されていることを考慮するため、以下に示すモデル化を行った。

- ・直交梁上に打設したシアコネクタを、一つのせん断ばねに集約し柱の隅角部に定義した。
- ・スラブは全幅を考慮した梁要素に置換し、梁のウェブ上に、柱の中心部分までモデル化した。
- ・スラブ端部と直交梁上のシアコネクタを剛体要素で結合した。

なお、図-3は両側にスラブが取りついている試験体F2を示す図であり、片側スラブ付きの場合はスラブのある側にのみ剛体要素、直交梁上のシアコネクタのばねを定義した。なお梁上のシアコネクタは、実際は梁材軸直交方向に2列配置であるが、並列する2本のシアコネクタを1本に集約してウェブ直上にフランジとスラブの重心同士を繋ぐ様にモデル化した。せん断ばね、回転ばねとも1個の要素に2本分の性能を与えてモデル化した。梁上のシアコネクタはせん断ばね、回転ばねを考慮したが、直交梁上のシアコネクタはせん断ばねのみを考慮した。また、スラブは便宜的に柱と接触しないで柱内部まで定義したが、実際の試験体ではスラブと柱の間に隙間を設けており、実験終了まで接触することは無く、スラブから直接柱を通じてせん断力が伝達されることが無かったため、このモデル化で問題ないものと判断した。

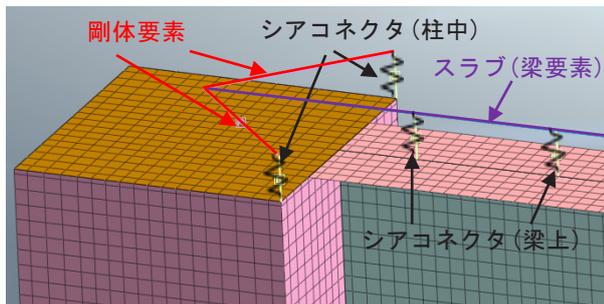


図-3 スラブ、シアコネクタモデル化(試験体F2)

材料非線形

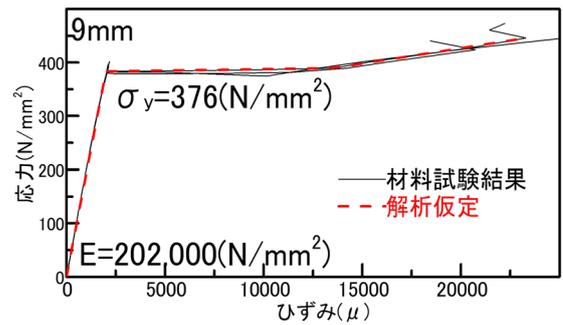
(1) 梁

梁はフランジ、ウェブに使用したそれぞれ9、12mmの鋼板について、材料試験結果に基づいて非線形性状を与えた。材料試験結果、および解析における応力-ひずみ関係を図-4に示す。材質はSM490であるが、降伏強度はそれぞれ376N/mm²、370N/mm²であった。

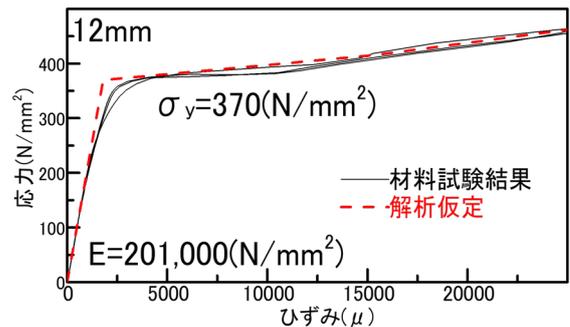
(2) シアコネクタ

シアコネクタはせん断ばねと回転ばねを定義し、せん断ばねは材料非線形を考慮し、回転ばねは線形とした。ばねの評価は文献^{3)~5)}に依った。せん断ばねの評価方法を図-5に示す。

ここで、せん断耐力 q_s の算定は式(1)によった。但し、計算値とこれまでの実験結果を総合的に見て、経験的な評価として結果の1.2倍の値とした。各記号は図-5に示す通りである。シアコネクタのせん断力-変位関係を



(a) 9mm 鋼板(ウェブ)



(b) 12mm 鋼板(フランジ)

図-4 梁材料非線形の仮定

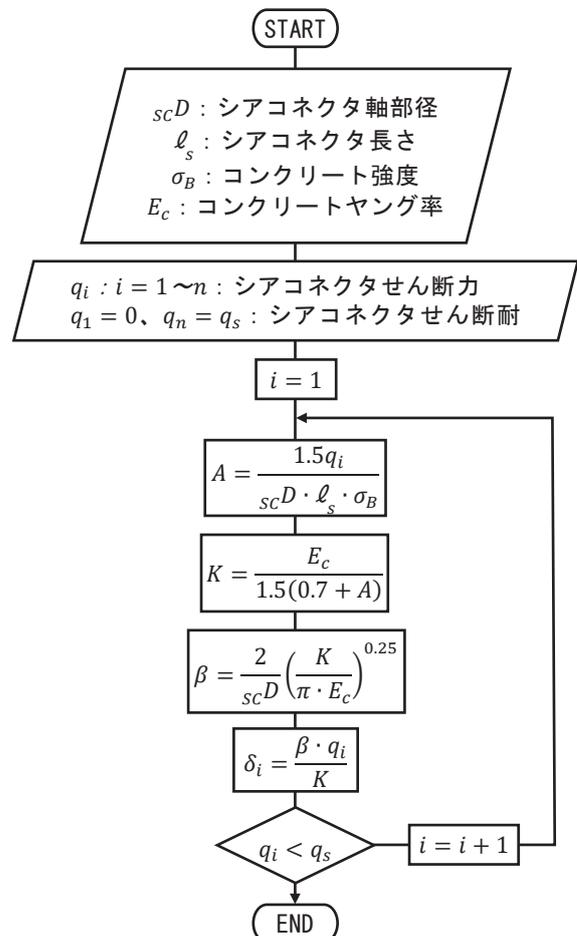
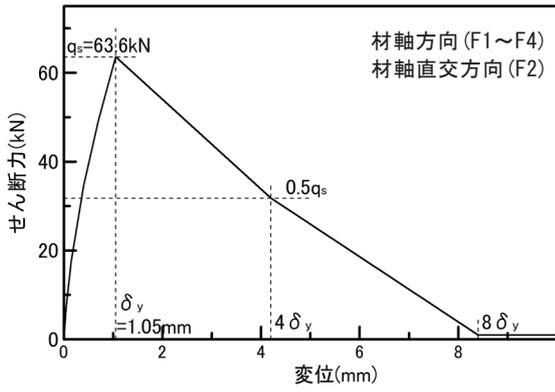
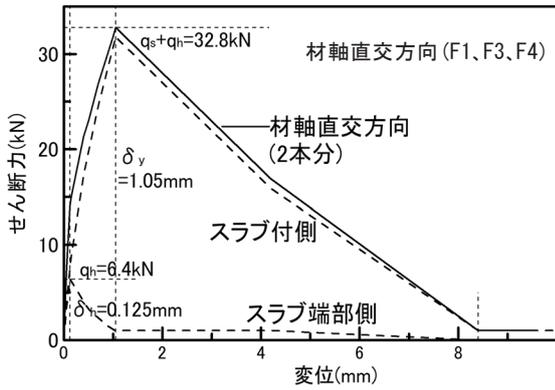


図-5 シアコネクタ せん断ばね評価方法



(a) 材軸方向 (F1~F4)、材軸直交方向 (F2)



(b) 材軸直交方向 (F1、F3、F4)

図-6 シアコネクタのせん断力-変位関係

$$q_s = \frac{\pi \cdot s_c D^2}{8} \sqrt{\sigma_B \cdot E_c} \quad (1)$$

$$q_h = 0.156\pi \cdot c^2 \sqrt{\sigma_B} \quad (2)$$

ここで、 $\sqrt{\sigma_B \cdot E_c} \geq 900 N/mm^2$ の場合は
 $\sqrt{\sigma_B \cdot E_c} = 900 N/mm^2$ とする。

c : シアコネクタの芯からスラブ端までの
 距離で 図-7 による。

$$\frac{1}{k_\beta} = \frac{1}{k_{\beta 1}} + \frac{1}{k_{\beta 2}} \quad (3)$$

$$k_{\beta 1} = \frac{\pi \cdot E \cdot s_c D^2 \cdot s_c d^2}{4 \ell_s \cdot \ell_p} \quad (4)$$

$$k_{\beta 2} = \frac{64 E \cdot t_f^3}{60 \ell_g} \quad (5)$$

ここで、 E : 鋼材のヤング率

t_f : 梁フランジの厚さ

$s_c d$: ゲージ + 縁あき距離

ℓ_p : シアコネクタのピッチ

ℓ_g : シアコネクタのゲージ

図-6 に示す。(a)には図-5 の方法で算定したシアコネクタのせん断力-変形関係を示す。最大耐力 q_s に至るまでは図-5 に示す方法に従い、それを超える変形時時には、安全側の評価として、解析が不安定にならない程度に負勾配として耐力低下を考慮した。

(b)には、片側スラブ付き梁上で、片側のコンクリート被りが小さい場合、側方にコーン状に破壊する「端抜破壊」を起こす恐れがある場合のせん断力-変位関係を示す。端抜破壊の状況を 図-7 に示す。この場合は、式 (1) ではなく、式 (2) による端抜耐力 q_h として評価した。ただし、シアコネクタは 2 列配置であり、スラブの端部側のシアコネクタしか端抜破壊する可能性はないため、図-6(b)に示すように、1 本はせん断破壊、もう 1 本は端抜破壊するとして 2 本分を 1 個のせん断ばねとして評価した。端抜破壊についてのせん断力-変位関係も、せん断耐力を端抜破壊耐力に読み替えて、図-5 に示す方法によって求めた。なお、各種合成構造設計指針によれば、合成梁に使用するシアコネクタは端抜破壊の検討を行うようにはなっておらず、単にシアコネクタの側面は 100mm 以上のコンクリートの被りを設けるようにのみ規定されている。今回、端抜破壊の検討を追加したのは、合成効果を期待して設計されたシアコネクタについて、更に横座屈の防止を期待することを考えたことによる。

シアコネクタの回転ばね k_β の算定式を式 (3) ~ (5) に示す。これは、2 列配置である点を考慮した式であり、線形ばねとして評価した。ここに示す以外の記号は 図-5 の通りである。

$k_{\beta 1}$ はシアコネクタの軸変形による回転剛性、 $k_{\beta 2}$ はフランジの曲げ変形による回転剛性で、全体の剛性は各々の直列和とした。文献³⁾によれば、これらの他、スラブのたわみによる回転剛性を考慮することが示されているが、今回の解析では、スラブはモデル化しているため、この影響は無視できるものと考えた。

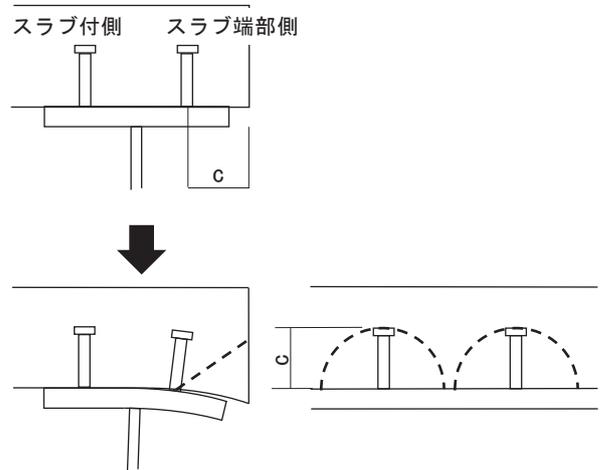


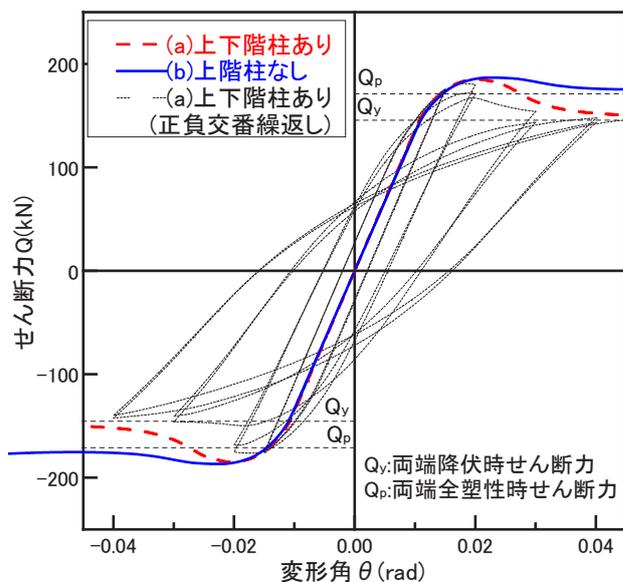
図-7 端抜破壊の状況

3. 解析結果

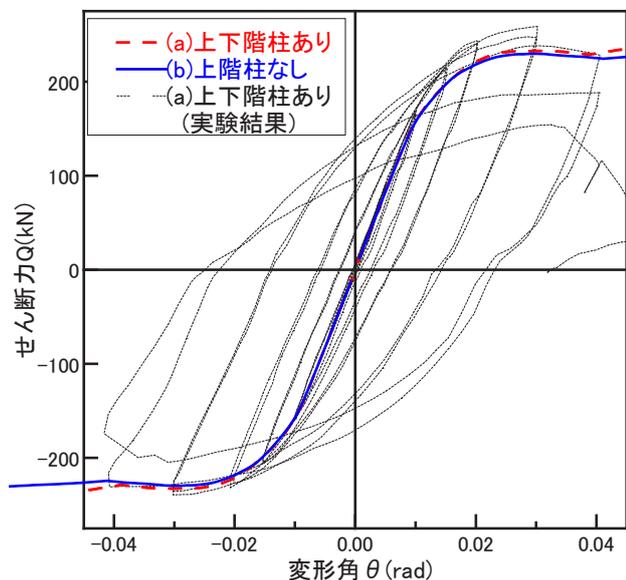
解析結果を図-8に示す。横軸は柱の回転角 θ 、縦軸は梁のせん断力 Q であり、 θ 、 Q の生じる位置は図-2に示す通りである。横軸の θ について、上下階柱ありモデルは柱1層分、上階柱なしモデルでは柱1/2層分の変形角であり、柱そのものの変形角は異なる。なお、試験体はF1が基準である。F0~F4の各モデルの説明は、基準試験体F1に対して変更した内容を示す。

(a)モデルF0(スラブなし)を見ると、最大耐力経験後は上階柱なしモデルの方が約17%高い耐力を示した。

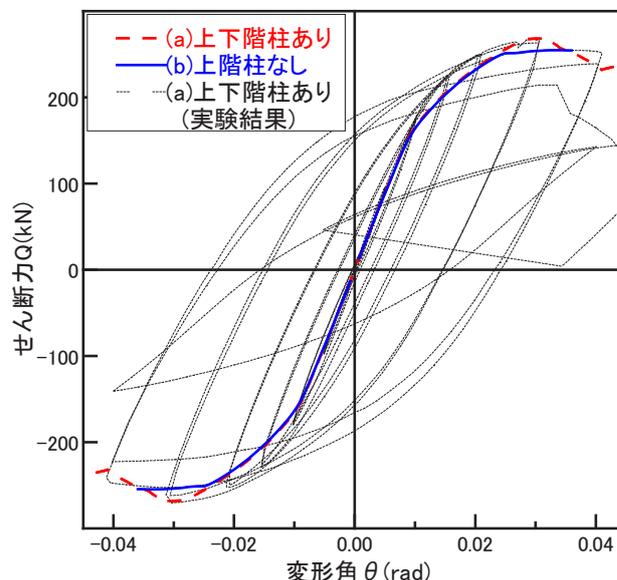
これは、このモデルのみ梁が全塑性モーメントに達せずに横座屈しており、上階に柱がなく、これによる振り剛性が無いためと考えられる。梁が横座屈した際、上下階の柱はこれによる耐力低下を抑える効果があるものと考えられる。



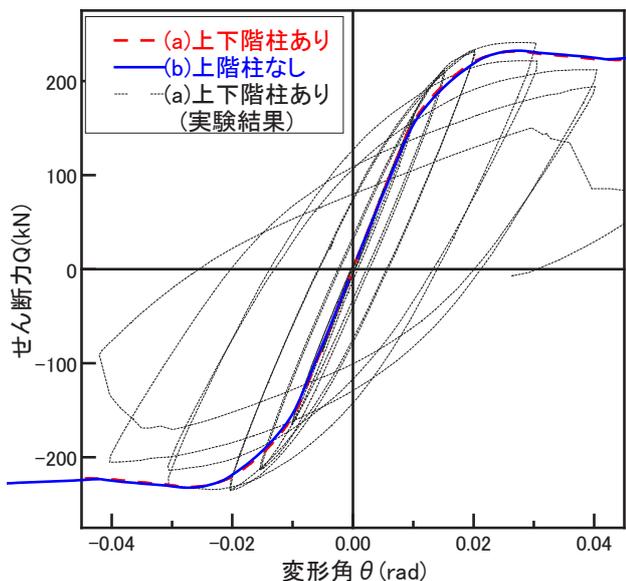
(a) モデル F0(スラブなし)



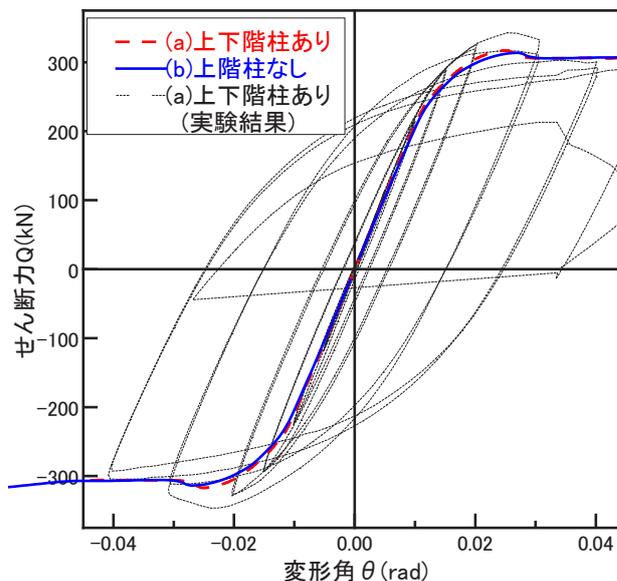
(b) 試験体 F1(基準: 片側 RC スラブ付き)



(c) 試験体 F2(両側 RC スラブ付き)



(d) 試験体 F3(片側デッキスラブ付き)



(e) 試験体 F4(片側 RC スラブ付き、かつ梁せい 530mm)

図-8 解析結果比較

試験体 F1～F4 について、いずれの試験体の解析、実験結果とも終局状態に至るまで梁は横座屈しなかった。また、全体的に解析結果は実験結果よりも低い耐力値を示した。これは、解析ではスラブと梁の上フランジ間のせん断力の伝達はシアコネクタのばねのみを考慮したが、実験においては、摩擦による伝達も働いたためと考えられる。

上階柱有無の影響を見ると、いずれも上階柱なしモデルの方が若干、低い耐力値を示した。この理由は、上階柱無しモデルは、有りモデルに比べて生じる曲げモーメントが約 2 倍であり、柱梁接合部のせん断変形も約 2 倍となり、これにより梁のせん断力が同一の場合にはフレーム全体の変形が若干大きくなったためと考えられる。したがって、性状の違いは柱の線形変形によるものであり、梁の性状には特に影響はなかったものと考えられる。

実験時の結果では梁端部の降伏、次にフランジ、ウェブの局部座屈が先行し、試験体によっては溶接部の破断が起こった。そして最終の変形角 1/20 時点まで梁の横座屈は確認できなかった。これについては解析結果も同様であった。上階柱無しモデルとしても梁の横座屈は見られないため、最上階の梁であっても、これにより横座屈が生じやすくなることはないと考えられる。

4. まとめ

便宜的に柱を線形部材とした仮定で、同一断面の場合の上階柱有無による、梁の横座屈を考慮した変形性能について解析的な検討を行った。

床スラブとの合成効果による横補剛がなされている場合は、上階柱の有無による梁の変形性能の違いは殆ど見られなかった。したがって、これまで実施してきた、上下階柱ありの場合同様に、上階柱なしの場合にも十分適用できる結果となった。

本工法を適用すれば、柱頭の降伏が先行する最上階部分についても、設計用外力を大きくすること等の別途検討することなく、横補剛材を省略して問題ないものと考えられる。

【謝辞】

この開発は、矢作建設工業と共同で実施したものである。ご協力頂いた関係各位に深甚なる謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 深津他「床スラブとの合成効果を考慮した鉄骨梁横座屈補剛工法の開発」(その 1～3) 2019 大会梗概集 構造Ⅲ pp. 1067～1072
- 2) 木村他「材長方向に連続補剛された H 形鋼圧縮部材の曲げ座屈荷重に対する回転補剛剛性及びウェブ変形の影響」建築学会構造系論文集第 614 号 pp. 147～153 2007. 04
- 3) 日本建築学会：鋼構造物の座屈に関する諸問題 2013、5 章付録 5. 1、5. 2、pp. 86～87、2013
- 4) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、p. 10 (13) 式、2010
- 5) 赤尾他：頭付きスタッドの押抜き挙動に及ぼすコンクリートの打込み方向の影響、日本鋼構造協会テクニカルレポート、No. 35、pp. 25～34、1996. 11