

床スラブとの合成効果に期待した鉄骨梁横補剛工法

Development of a lateral bracing method for H-shaped steel beams using bracing effects of reinforced concrete slab

五十嵐治人*1 相羽修均*2 鞆 伸之*3

概 要

鉄骨梁の設計において、横座屈に対する検討は欠かすことが出来ない。鉄骨梁の横座屈を防止する手段として、横補剛材を設けることが一般的であり信頼性も高いが、横補剛材、ボルト、ガセットプレートなどが必要となり、コスト、工期の面では好ましくない。一方、建物の梁は通常は床スラブと合成構造をなす。床スラブと合成された梁は、上フランジの水平移動、梁材軸回りの回転を抑えられ、横座屈には有利である。

本工法は、この点を積極的に考慮して、床スラブによる横補剛効果を定量的に評価し、これまで使用してきた横補剛材を省力化してコストダウン、工期短縮を目的とする。ただし、横補剛材は上下フランジの水平移動を拘束できるが、床スラブは上フランジのみ拘束が出来るため、床スラブによる横補剛効果は万全とは言い難い。今回、フレーム実験および有限要素法解析を実施し、その有用性を確認した。これらの結果について報告する。

key words : 鉄骨梁、横座屈、床スラブ、フレーム実験、シアコネクタ

1. はじめに

鉄骨造建築物の梁はH形鋼を使用するのが一般的である。H形鋼の特徴は、強軸に対して弱軸の断面2次モーメントが極端に小さい点である。この状態で強軸回りに曲げモーメントを受けると、梁全体が横に倒れる横座屈を生じる恐れがある。この場合、十分な構造性能が得られず、最悪の場合は建物が崩壊する恐れがある。

これに対し、現行設計では梁が横座屈しない様、小梁等による横補剛材を設けることとしている。本工法は、頭付きスタッド等のシアコネクタで梁と合成構造をなす鉄筋コンクリート造の床スラブを横補剛材として評価することで、上述の横座屈を防止するための横補剛材を省略して、コストダウン、工期短縮を図ることを目的とする。

更に、図-1のように片側のみスラブを有している場合は、シアコネクタのへりあきが小さいことから、低い耐力で側方の被りコンクリートが破壊する可能性がある。本工法ではこの場合、通常柱付近の隅角部に配筋するひび割れ防止筋を、シアコネクタを囲うように配筋し、へりあき部への「補強筋」に兼用した。これにより配筋が煩雑となることの防止を図った。

本報では、フレーム実験の概要と結果、更に有限要素法解析の結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

本実験は、2本の角形鋼管の柱とH形鋼の梁によって構成された床スラブを有するフレーム試験体に対し、床スラブによる鉄骨梁の横補剛効果について検証を行った。本実験の試験体一覧を表-1に、試験体F1、F2の形状および寸法を図-2に示す。試験体は多層骨組から取り出した1層1スパンの部分骨組とし、縮尺は5/9とした。試験体のパラメータは、「梁鉄骨のサイズ」、「床スラブの配置」、「床スラブの種類」とし計4体を製作した。なお、鉄骨柱断面、ダイヤフラム、スパンは全て同一である。

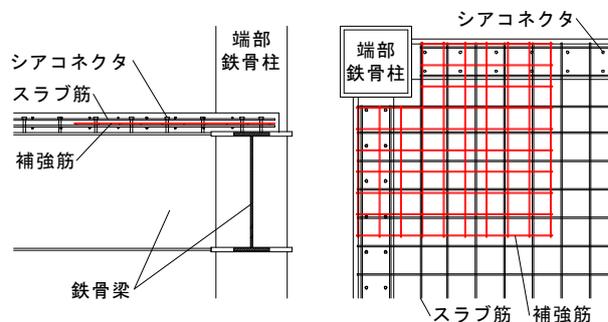


図-1 片側のみスラブが取りつく梁

*1 Haruhito IGARASHI

*2 Masanobu AIBA

*3 Nobuyuki TOMO

技術本部技術研究所 主席研究員

技術本部技術研究所 研究員

設計統轄部構造設計部

また、鉄骨柱と床スラブの間には、床スラブに直接圧縮力が作用しないように20mmのクリアランスを設けた。試験体F1は標準試験体で片側床スラブ付き、試験体F2は両側床スラブ付きの試験体、試験体F3は片側床スラブで床スラブをデッキスラブと想定した試験体、試験体F4

は梁鉄骨断面が異なる試験体である。

試験体F1、F2、F3の梁材はJIS規格の一般的なH形鋼の最大サイズH-900×300×16×28を想定し、幅厚比がほぼ同等となるようなH形鋼を選定した。

表-1 試験体概要

試験体名	梁	幅厚比		床スラブ			
		フランジ	ウェブ	形状	厚さ (mm)	スラブ筋	補強筋
F1	H-500×150×9×12	6.25	52.9	片側	83	D6@120 縦横	D4@150 ダブル
F2				両側	83	D6@120 縦横	—
F3				片側	44/42	D4@80 縦横	D4@150 シングル
F4	H-530×230×9×12	9.58	56.2	片側	83	D6@120 縦横	D4@150 シングル
共通事項	柱：□-300×16(BCR295) 梁：SM490A 柱芯間距離：6,000mm ダイヤフラム：t16 床スラブ：F3は山上44mm、溝高さ42mmのデッキスラブを示す。						

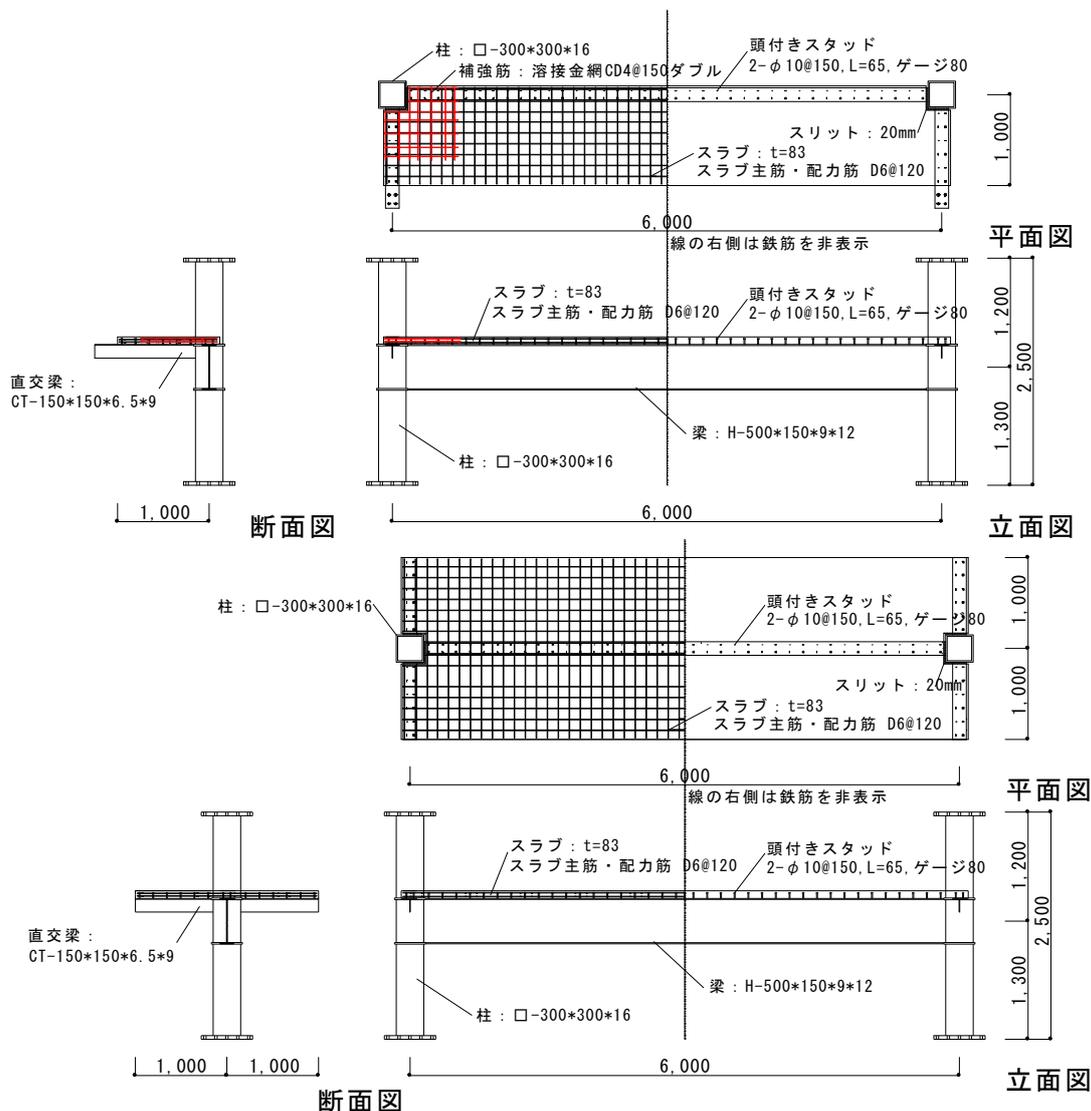


図-2 試験体概要(上; F1、下; F2)

試験体の RC スラブは一般的な形状とし、厚さ 83 (実大 150) mm とした。デッキスラブは山上のみを模擬した RC スラブとし、スラブ部分は厚さ 44 (実大 80) mm、梁上にデッキ高さ分の 42 (実大 75) mm のかさ上げを設けた。

また、RC スラブと鉄骨梁の結合にはシアコネクタとして頭付きスタッドを用い、文献³⁾で規定される完全合成梁を満足するように本数等を設定した。さらに、片側スラブ付き試験体には、頭付きスタッドの縁あき部の損傷防止のため、梁端部から梁の内法長の 1/10 の範囲に補強筋を配置した。

材料試験結果を表-2 に示す。コンクリートの結果の値は、1 体目加力前、4 体目加力後に実施した試験結果の平均値である。

2.2 実験概要

実験は図-3 に示す荷重装置を用いて行った。2 本の柱の柱頭および柱脚を反曲点としてピン支持にて固定し、頂部にロードセルを介して油圧ジャッキを水平に連結した。また、柱には面外への変形、ねじれ変形を拘束する目的で面外拘束装置を設置した。

加力は、左右の柱が同一変形角となるように油圧ジャッキを調整しながら水平力を与え、梁に逆対称曲げモーメントを生じるように、正負交番の繰返し加力とした。水平力の荷重は、柱のピン支持間距離 $h_p (=3000\text{mm})$ に対する柱頭の相対水平変位 δ の比の相対部材角 $R (= \delta / h_p)$ による変位制御とし、その荷重プログラムは、 $R=0.005$ 、 0.01 、 0.015 、 0.02 、 0.03 および 0.04rad を正負 2 サイクルずつ行い、最後に $R=0.05\text{rad}$ を正荷重側のみ行った。

2.3 計測計画

実験では、水平力 P を 2 基の水平ジャッキに取り付けたロードセルにて、水平変形 δ を柱の頂部に取り付けた

2 台の高感度変位計にて計測した。また柱、梁、スラブ主筋、補強筋、頭付きスタッドの各所に関してそのひずみ量を、貼付したひずみゲージにて計測した。

表-2 材料試験結果

(単位: N/mm²)

		圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
コンクリート		19.3	22000	1.84

鋼材	降伏強度	引張強度	ヤング係数	使用部位
t9	376	545	202000	梁ウェブ
t12	370	562	201000	梁フランジ
t16	355	418	187000	柱、ダイヤフラム
D4	363	510	170000	スラブ筋(F3)、補強筋
D6	331	495	176000	スラブ筋(F1、F2、F4)
φ10	385	490	191000	頭付きスタッド

3. 実験結果

3.1 水平力-柱部材角関係

各試験体柱頭部に作用した水平力と柱の部材角の関係を図-4 に示す。ここで、図中の水平力、部材角は、共に左右の柱の平均値とした。また、図中の横線は床スラブの合成効果を考えない純鉄骨梁の曲げ降伏モーメント時水平力、全塑性曲げモーメント時水平力である。また、上フランジ、下フランジ降伏時のステップを併せて示す。これらは、添付したひずみゲージで計測された値のうち、どれか一枚が最初に降伏ひずみに達した点を示す。その他最大荷重、端部で溶接部に破断が生じた点も示す。これは、梁端部に大きな音が発生し、荷重が大きく低下した点を破断と定義した。

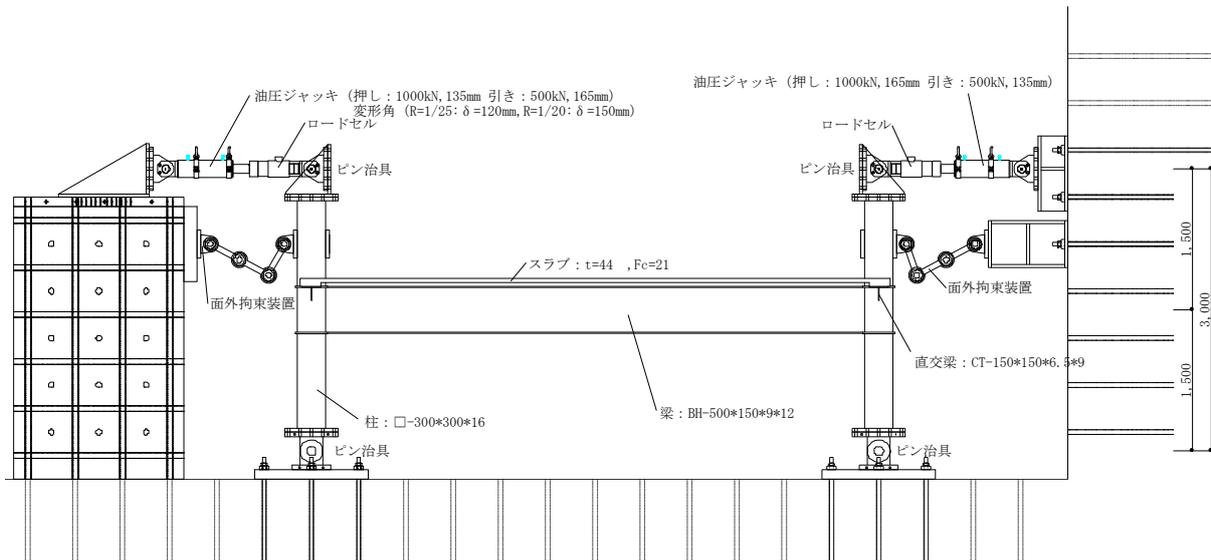


図-3 加力装置

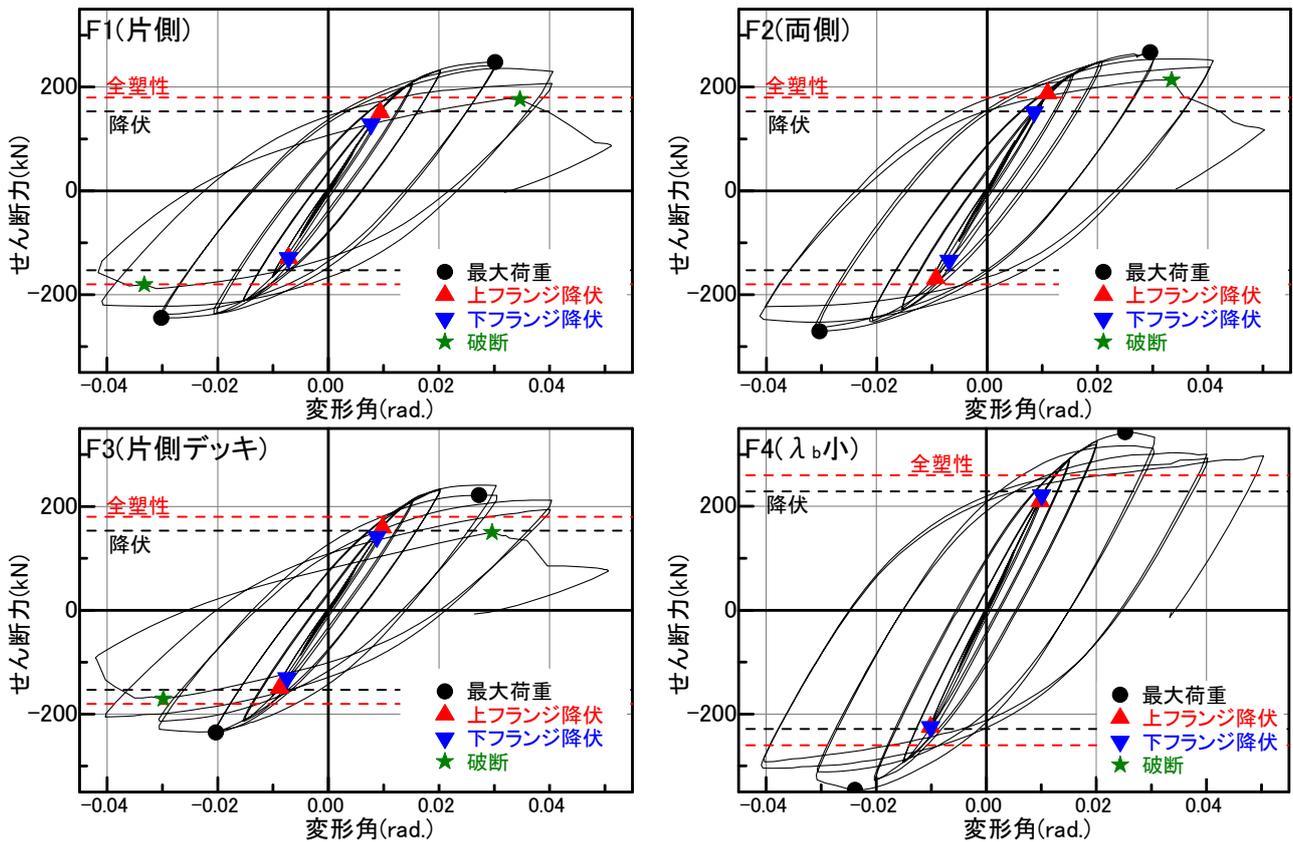


図-4 実験結果 水平力P-変形角R関係

試験体 F1 では、 $R=1/200$ サイクル時に床スラブの曲げひび割れが生じた。 $R=1/100$ サイクル時に下フランジが降伏し、 $R=1/67$ サイクル時に全塑性曲げ計算値に達した。 $R=1/50$ サイクル時に下フランジに局部座屈が目視にて確認され、 $R=1/33$ 時に最大荷重を生じた。 $R=1/25$ サイクルの 2 回目の負加力時、 $R=1/20$ サイクルの正加力時に下フランジに破断が生じて大きく荷重が低下した。

試験体 F2 では、 $R=1/200$ サイクル時に床スラブの曲げひび割れが生じた。 $R=1/100$ サイクル時に鉄骨梁上下フランジが降伏し、曲げ降伏時の計算値に、 $R=1/67$ サイクル時に全塑性曲げ時の計算値に達した。 $R=1/33$ サイクル時に下フランジに局部座屈が目視にて確認され、最大荷重を生じた。 $R=1/20$ サイクルの正加力時に下フランジに破断が生じて荷重が低下した。

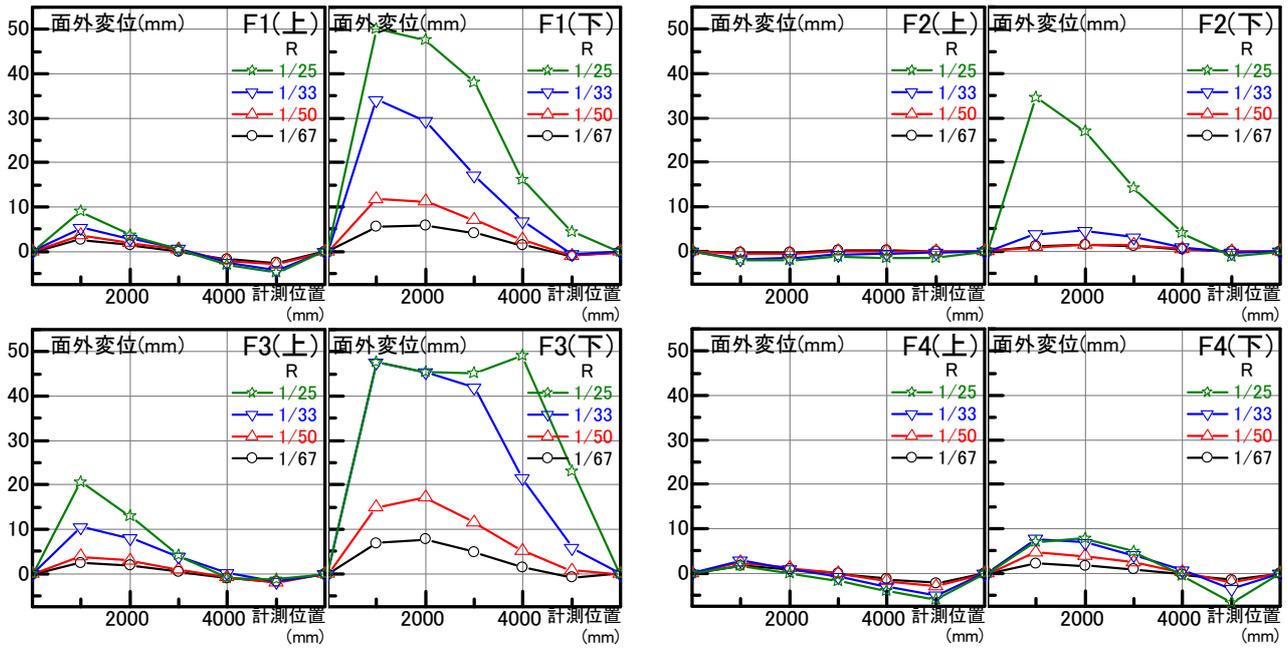
試験体 F3 では、 $R=1/200$ サイクル時において床スラブの曲げひび割れが生じた。 $R=1/100$ サイクル時に鉄骨梁上下フランジが降伏し、曲げ降伏時の計算値に、 $R=1/67$ サイクル時に全塑性曲げ時の計算値に達した。 $R=1/50$ サイクル時に下フランジに局部座屈が目視にて確認され、 $R=1/33$ サイクル時に最大荷重を生じた。 $R=1/25$ サイクル時には梁のねじれに伴う床スラブ損傷が確認された。 $R=1/25$ サイクルの 2 回目の負加力時、 $R=1/20$ サイクル時の正加力時に下フランジに破断が生じて荷重が低下した。

試験体 F4 では、 $R=1/200$ サイクル時において床スラブの曲げひび割れが生じた。 $R=1/100$ サイクル時に鉄骨梁上下フランジが降伏した。 $R=1/67$ サイクル時に曲げ降伏時の計算値および全塑性曲げ時の計算値に達した。 $R=1/50$ サイクル時に下フランジに局部座屈が目視にて確認された。 $R=1/33$ サイクル時に最大荷重を生じた。その後、荷重低下を生じたが、最終サイクルまで梁端部下フランジの破断は生じなかった。

全ての試験体とも、早期に横座屈が発生することなく、全塑性曲げモーメントを十分発揮することが確認された。

3.2 フランジの面外変形

梁H形鋼のフランジで計測した梁の材軸直交方向変形量を図-5 に示す。左側、右側は各々上、下フランジの計測結果を示し、X 軸は材軸方向の計測位置 ($X=0, 6000$ は柱芯位置) を、Y 軸は梁の材軸直交方向変形量 (床スラブが付いていない方向が正方向) を示している。ここでは、各部材角の正加力 1 回目のピーク時のデータを用いており、変形量は最大値を 50mm とし、それ以上は 50mm として表記した。全塑性曲げモーメントが発現した $R=1/67$ の変形角においては、両フランジともに、試験体 F1、F3 はほぼ同程度の変形量を示し、試験体 F2、F4 は試験体 F1 と比較し変形量は少ない。試験体 F2 の上フランジにおいては 1mm 以下の変形量で殆ど変形を生じていなかった。



(左：上フランジ、右：下フランジ)
 図-5 実験結果 フランジの梁材直交方向変形

R=1/50 サイクル時では試験体 F1、F3 の下フランジの変形量が大きくなり、R=1/25 サイクル時では試験体 F2 においても下フランジの変形量は大きくなった。試験体 F4 の変形量は実験の最後まで 10mm 以下であった。

4. 有限要素法解析

4.1 モデル化

今回実施した構造実験の試験体結果について、有限要素法解析による検証を行った。解析モデルを図-6 に示す。また、解析の仕様、拘束条件等を併せて示す。梁の初期不整は材軸直交 Y 方向のみ式(1)に従って与えた。これは梁の内法スパンの 1 次モードで 1/1000、2 次モードで 1/100000 の不整を与えたこととなる。

$$u = 5.7 \cos\left(\frac{x}{5700} \pi\right) + 0.057 \sin\left(\frac{x}{5700} 2\pi\right) \quad (1)$$

x: スパン中央を 0 とした時の材軸方向位置

材料非線形は梁フランジ (t=12mm)、梁ウェブ (t=9mm) のみ与えた。柱およびダイヤフラム (t=16mm) は線形とした。材料試験結果のヤング係数、材料強度、ひずみ硬化を使用して、文献⁴⁾に基づき、応力 σ -ひずみ ε 関係は式(2)により真応力 σ_t -真ひずみ ε_t 関係で定義した。

$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon) \quad \varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

降伏曲面は von Mises とし、正負漸増繰返しの解析では移動硬化則を採用した。スラブの断面性能は線形として梁要素でモデル化した。断面形状は試験体の形状のまま、全てを有効幅として考慮した。シアコネクタは、ゲージ方向に並ぶ 2 本分の性能を 1 個のせん断ばね、回転ばねとして定義した。せん断ばね剛性 k_u は文献^{5, 6, 7)}を参考に、回転ばね剛性 k_β は文献^{5, 8)}を参考に定めた。

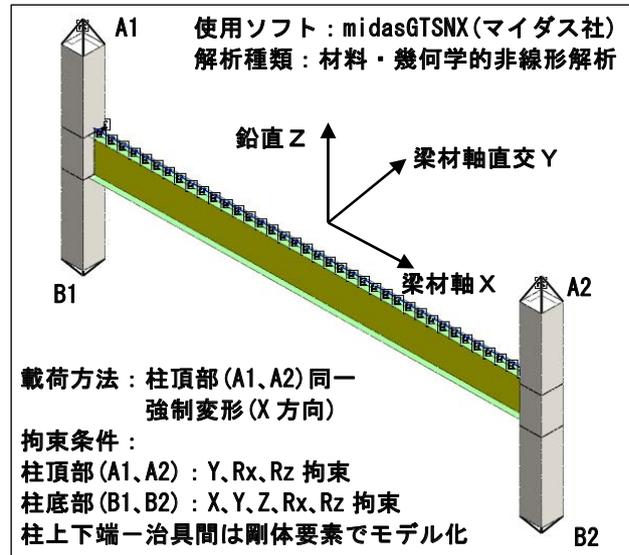


図-6 解析モデル概要、仮定

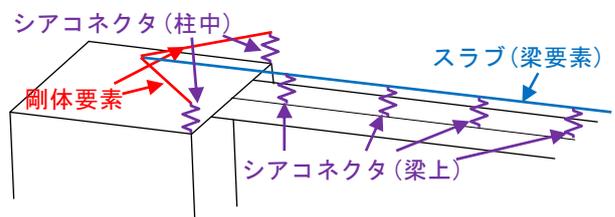


図-7 解析モデル接合部、梁上部分詳細

ここで、実験では直交梁にもシアコネクタを打設しているため、梁の応力はシアコネクタから直交梁を通じて柱に伝達されることを考慮し、スラブを図-7 に示す様に柱の中心までモデル化し、剛体要素で隅角部の直交梁分のシアコネクタのばねと連結した。図は両側スラブ付き梁である F2 のものを示す。その他の試験体の剛体要素は片側のみ定義した。

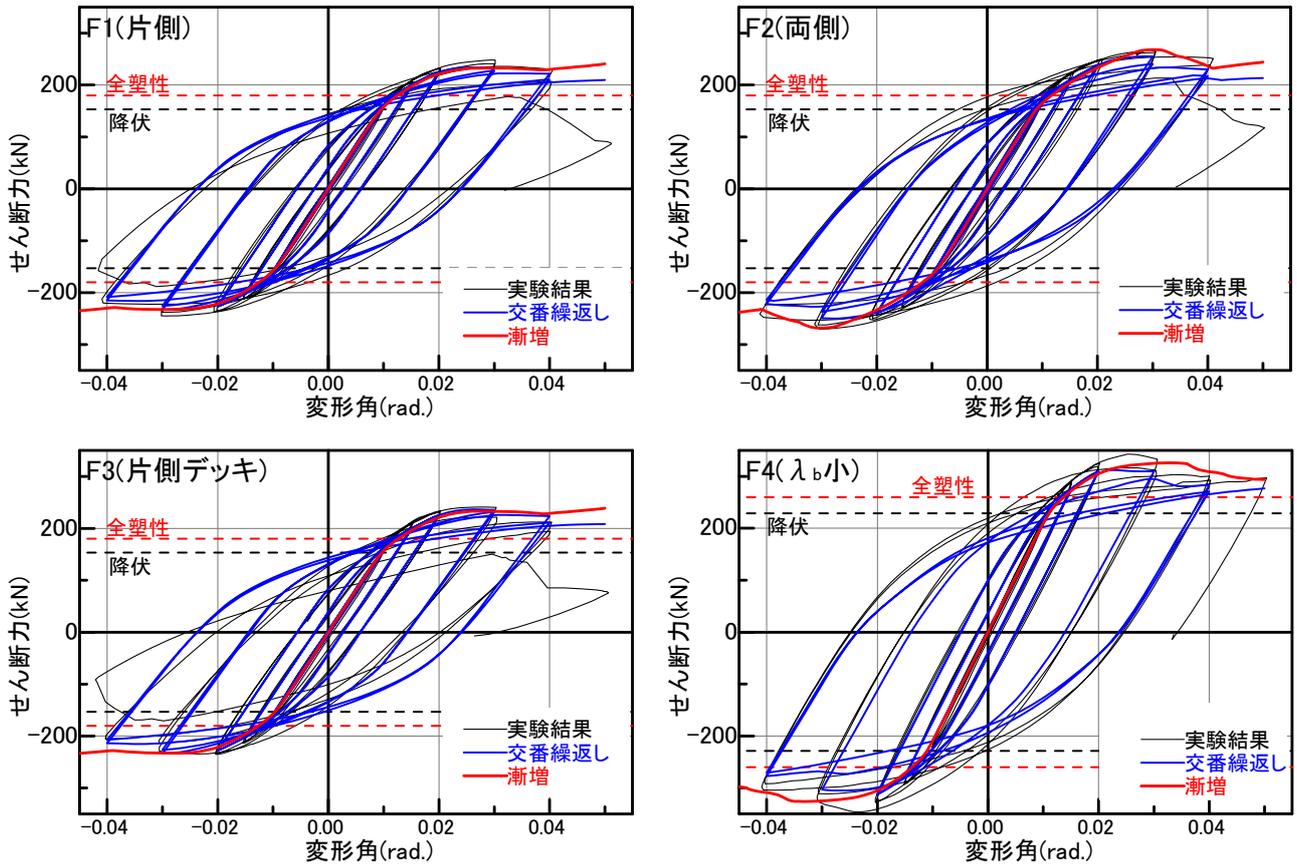


図-8 実験結果と解析結果の比較

4.2 解析結果

以上、4.1 の仕様で実施した有限要素法解析と実験結果を比較したものを図-8 に示す。図中の横線は純鉄骨梁の全塑性曲げ時水平力 P_p である。 $R=50 \times 10^{-3}$ rad. までを対象とした。

この結果、 $R=30 \times 10^{-3}$ rad. 以下の範囲では、解析結果は実験結果に対して、ほぼ安全側の評価となっていることが分かる。ただし、試験体 F1 や F3 で見られるように、 $R=40 \times 10^{-3}$ rad. に関しては、繰返しによる耐力低下を表現できていない。これは実験ではこの時点ではフランジ端部が破断しているのに対して、解析ではそうした破断をモデル化していないことが原因と考えられる。

ただし、総合的に判断すると、概ね両者ともに良好な対応を示したと考えられ、今回設定した解析モデルの妥当性が確認された。

5. まとめ

鉄骨梁の横座屈防止に床スラブを積極的に評価する項法の開発を試み、提案した工法の構造性能の確認のためフレーム実験を実施し、更に有限要素法解析によってその再現を試みた。この結果、実験では床スラブの横補剛効果が確認され、有限要素法解析では、その妥当性が確認された。今後は、本工法を実物件に積極的に採用し、更なる技術の改良を目指していく。

【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。開発を進めるにあたり、井戸田秀樹教授(名古屋工業大学)には多くのご助言、ご指導を賜りました。この場をもって、深甚なる謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針、2018. 2
- 2) 日本建築学会：鋼構造設計規準—許容応力度設計法—、2005. 9
- 3) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2010. 11
- 4) 小野徹郎、佐藤篤司：金属系素材の応力-歪度関係の定式化、日本建築学会論文報告集、pp. 177~184、2000. 6
- 5) 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
- 6) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、p. 10 (13) 式、2010
- 7) 赤尾親助、栗田章光、平城弘一：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
- 8) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、p. 236 (1)式、(2)式、2010