

柱 RC・梁 S からなる混合構造 (FSRPC-B 構法) における 偏心接合部の耐火性能に関する解析的研究

飯田 康介 佐々木 仁
佐藤 幸博 シング ラヴィ
伊藤 直美

概 要

当社が開発している柱 RC・梁 S で構成される FSRPC-B 構法は、近年、梁の偏心が可能となった。本研究の目的は FSRPC-B 構法における梁が偏心した柱梁接合部を対象に、火災時における構造性能について、その安全性を 3 次元有限要素解析により検証することである。柱幅は 750mm、偏心率は柱幅の 1/6 の接合部を解析対象とし、伝熱解析と構造解析を実施した。伝熱解析でははじめに過去の载荷加熱実験の解析を行い、その後、実大モデルの解析を行った。その結果、接合部コンクリートの強度残存率は 72% であることが分かった。構造解析では建物外周構面の接合部を対象とし、ト字形部分架構モデルで検討した。構造解析により得られた柱梁接合部に生じるせん断力と、伝熱解析により得られた構成材料の残存強度から求めたせん断耐力を比較した結果、検定比は最大で 0.631 であり、火災時における柱梁接合部の構造安全性を確認できた。

Analytical Study on Fireproof Performance of Eccentric Beam-Column Joints in Hybrid Structure with RC Columns/Steel Beams (FSRPC-B Method)

Abstract

In recent years, in the FSRPC-B construction method composed of RC columns and S beams, developed by FUJITA, it has become possible to make beams eccentric. The purpose of this study is to verify the safety of the beam-column joints with eccentric beams in the FSRPC-B construction method by 3D finite element analysis. The heat transfer analysis and the structural analysis were performed separately for a joint with a column width of 750 mm and an eccentricity of 1/6 of the column width. In the heat transfer analysis, we first analyzed the past loading and heating test specimens, after which we analyzed the full-scale model. As a result, the residual strength rate of the joint concrete was 72%. In the structural analysis, the joints on the outer structure plane of the building were targeted and examined by a T-shaped partial frame model. As a result of the test using the shear force obtained from the structural analysis and the shear strength using the residual strength obtained from the heat transfer analysis, the test ratio was a maximum of 0.631, confirming structural safety in the event of a fire.

キーワード: FSRPC-B 構法、偏心接合部、耐火性能
有限要素法、火災

§1. はじめに

筆者らはこれまで、柱が鉄筋コンクリート(RC)造・梁が鉄骨(S)造で構成されるハイブリッド構法において、より合理的な平面計画の実現のため、梁を偏芯させた柱梁接合部(以下、偏芯接合部と表記)のディテールを開発してきた。偏芯接合部の概要を図1に示す。

これまで、梁が偏芯しない柱梁接合部の耐火性能についてはト字形部分架構試験体による荷重加熱実験²⁾により検証しているが、偏芯接合部については検証できていない。

本研究はハイブリッド構法における偏芯接合部を対象とし、3次元有限要素法(以下、FEM解析と表記)により火災時を想定した簡便な温度解析および構造解析を行い、温度分布状況や火災時の残存材料強度、構造安全性について検討したものである。

§2. 伝熱解析

2.1 検討方法および解析手法

火災時のせん断耐力の検証を目的とし、モデル架構における偏芯接合部を構成する材料の残存強度をFEM解析により求める。まず、予備解析として既往の荷重加熱実験²⁾の解析を行い熱伝導率と比熱をフィッティングする。その後、得られた物性値を用いて実大サイズの解析を行う。伝熱解析には汎用の解析プログラムを用いた。解析において、要素は全てソリッド要素を用いた。拡散方程式の解法にはクラニクニルソン法を用いた。

2.2 解析条件(予備解析)

はじめに、既往の荷重加熱実験²⁾により得られた実験結果を用いてFEM解析によるパラメータスタディを行い、コンクリート、鉄筋および鉄骨の熱伝導率や比熱、また、加熱面の熱伝達率のフィッティングを行った。荷重加熱実験試験体の解析モデルの概要を図2に示す。モデルは試験体の対称性を利用し1/4モデルとした。コンクリートは4種類、ウェブパネルは3種類、深さ方向に物性を分け、それぞれ比熱と熱伝導率を設定した。せん断補強筋が存在する深さの要素について、せん断補強筋は単体でモデル化をせず、コンクリートとの複合要素(分散鉄筋要素)としてモデル化し、せん断補強筋とコンクリートの断面積比で物性値に重付

けをし、設定した。主筋要素は、主筋の公称断面積と面積を同一にした。加熱面の外気温度はISO加熱曲線に準じた。加熱面の熱伝達率は $110W/m^2$ に設定した。

2.3 解析結果(予備解析)

接合部断面および柱断面の各検討節点における温度の経時変化、加熱3時間時の温度分布図および温度コンター図を図3に示す。各断面の温度分布から、概ね良好な一致を確認した。また、解析値は実験結果に比べやや大きい値であることから安全側と判断し、本解析により得られた物性値を採用することとした。

最終的に得られた物性値の一覧を表1に示す。得られた物性値の妥当性を確認するため、各物性値に相当する温度を熱伝導率は文献3、比熱は文献4に記載の式により求めた。相当温度は外側に向かって高くなり、概ね2から3時間加熱時の温度であることを確認した。

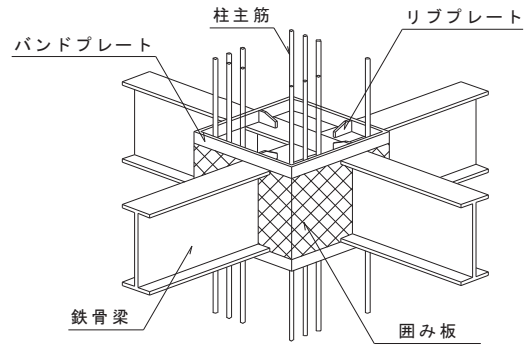


図1 偏芯接合部の概要

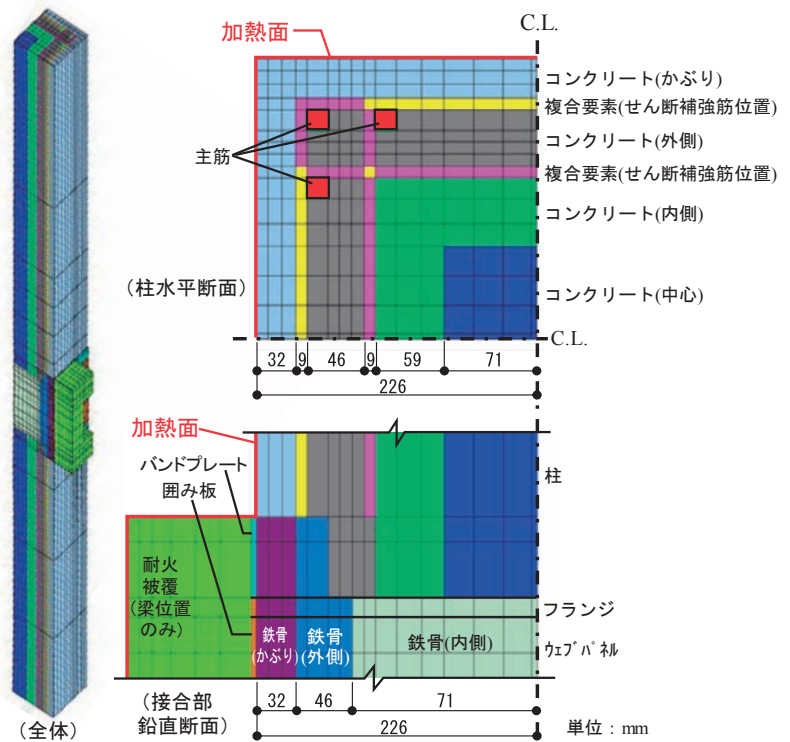


図2 伝熱解析の予備解析モデル

2.4 解析条件 (実大モデル)

予備解析にて得られた物性値を用い、実大モデルの解析を行った。表 2 に実大モデルの諸元、図 4 に解析モデルの概要を示す。実大モデルは 1 方向の梁を柱幅の 1/6 偏芯させ、最も厳しい条件とするため、加熱面は外周 4 面、無耐火被覆とした。特に表層での温度変化が大きいため、物性値は表面からの距離を予備解析と同一にして設定した。

2.5 解析結果 (実大モデル)

加熱 3 時間時の接合部中央高さおよびウェブパネルの温度コンター図を図 5 に示す。ウェブおよびフランジが熱を伝えやすく、鋼材周辺の温度が高くなっていることが分かる。

コンクリートと鋼材の材料強度について、接合部内の各要素の中心温度から強度残存率を求め、それらを平均

することでウェブパネル、フランジ内コンクリート、フランジ幅外コンクリート (図 5 参照) ごとに強度残存率を求めた。各部位の強度残存率を平均化する際、要素体積による重付けを行った加重平均を採用した。温度と強度残存率の関係は Eurocode No.4³⁾ および鋼構造耐火指針⁵⁾ に示される関係式に拠った。強度残存率はそれぞれウェブパネルが 79%、フランジ内コンクリート、フランジ幅外コンクリートおよび接合部全体のコンクリートは全て 72% であった。

表2 伝熱解析: 実大モデルの諸元

部材	項目	値
柱	柱幅 B_c , せい D_c (mm)	750×750
	コンクリート強度 F_c (N/mm ²)	42
	主筋	20-UD41
	フープ筋	U13@80
梁	寸法 (mm)	H-750×200×12×25
	偏芯率 e/B_c	1/6
	偏芯距離 e (mm)	125
接合部	スチフナー・囲み板厚さ (mm)	12

表1 伝熱解析: 要素の物性値一覧

要素	色	密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg/°C]	熱伝導率 [W/m/°C]	相当温度* [°C]	備考
コンクリート(かぶり)		2400	1.28	0.875	900	
コンクリート(外側)		2400	1.23	1.01	700	
コンクリート(内側)		2400	1.075	1.48	300	
コンクリート(中心)		2400	0.988	1.74	140	
せん断補強筋複合要素		2940	1.15	4.45	580	分散鉄筋要素(鉄筋断面積比10%)
せん断補強筋複合要素(2重)		3480	1.10	7.77	580	分散鉄筋要素(鉄筋断面積比20%)
主筋		7850	0.548	45.3	260	
囲み板		7850	0.873	27.3	800以上	
バンドプレート		11780	0.873	27.3	800以上	要素厚さは囲み板と同一にし、密度を増加させ、質量(体積と密度の積)を実験値に合わせた。
鉄骨(かぶり)		7850	0.873	27.3	800以上	
鉄骨(外側)		7850	0.796	30.7	700	
鉄骨(内側)		7850	0.564	44.0	300	
耐火被覆材		308	1.2	0.1	-	実験はセラミックファイバー(厚さ75mm)+ケイ酸カルシウム板(厚さ25mm)

* 文献3,4の算定式による熱伝導率・比熱に対応する温度

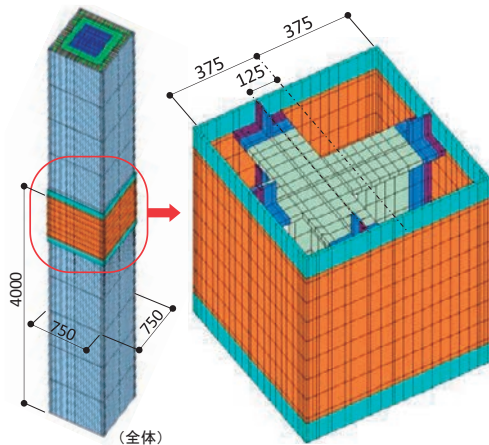


図4 伝熱解析: 実大モデルの概要

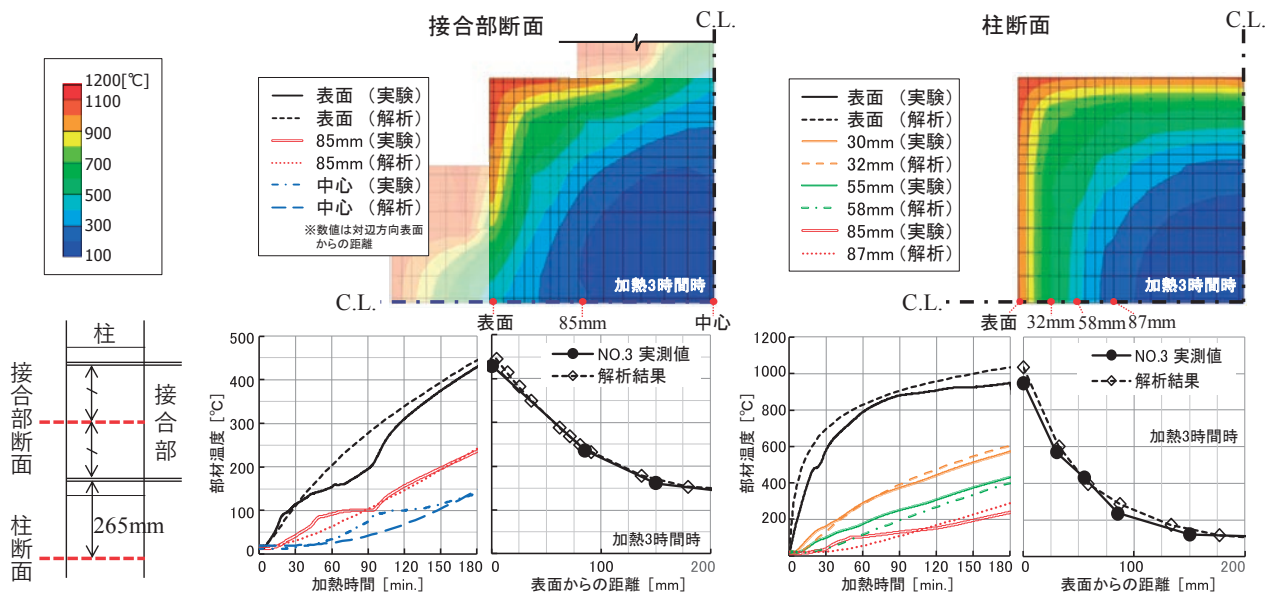


図3 伝熱解析: 予備解析結果

§3. 構造解析および検定

3.1 解析方法

火災時を想定した梁の伸び出しによる力(押し出し力)を受ける偏芯接合部に生じるせん断力を、FEM 解析により求めた。解析には汎用プログラムを用いた。材料および幾何学的非線形は考慮せず弾性解析とした。

3.2 解析モデルおよび解析条件

解析パラメータの位置付けを図 6 に、解析ケースの一覧を表 3 にまとめて示す。解析モデルの概要と境界条件は図 7 に示す。解析対象は建物外周側の接合部とし、外周梁に段差を設け、室内の火災によって外周構面に直交する梁(加力梁)が加熱され伸びだす状況を想定し、ト字形部分架構(外周構面は十字型)により検討する。解析パラメータは外周梁の段差サイズおよび接合部に取付く直交梁のせいとした。

まず CASE-1 として、物流施設の事務室等で設けられることが多い段差サイズを基準とし、梁せいは一般的なサイズ、段差を 125mm に設定した。

CASE-2 は梁段差サイズが接合部内せん断力に及ぼす影響を確認するため、外周梁のアスペクト比を限界まで小さくし段差を大きくした場合(アスペクト比 0.8、梁せい 940mm、段差(h)315mm)について検討した。

次に直交梁せいの影響を確認するため、CASE-3 として、CASE-1 の直交梁せいを大きくし外周梁の外-外フランジに取付く場合、CASE-4 として、CASE-2 の直交梁せいを大きくし外周梁の外-内フランジに取付く場合について検討した。

モデル化範囲は、柱は上下階階高の 1/2 まで、直交梁はスパンの 1/4 まで、外周梁は柱フェースまでを想定してモデル化した。直交梁(=押し出し力を与える梁)、外周梁はどちらも偏芯率 1/6 で偏芯させた。梁せい、梁段差以外の諸元は表 1 と同じである。

直交梁の端部は自由端とし、梁の軸方向に柱が曲げ耐力に達するときの押し出し力(P)を与えた。

柱の境界条件について、上下端面が回転するよう、柱の中央位置で回転軸直交方向の変位を拘束した。柱上端面には 1/3F_c の軸力を与えた。

解析モデル各要素の種類、物性値を表 4 に示す。コンクリートはソリッド要素、鉄骨梁はシェル要素、鉄筋はトラス要素により表現した。

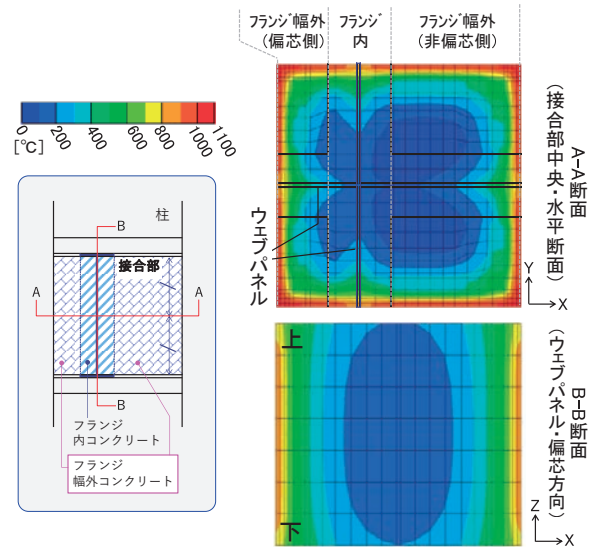


図5 伝熱解析:実大モデル温度コンター図(加熱3時間時)

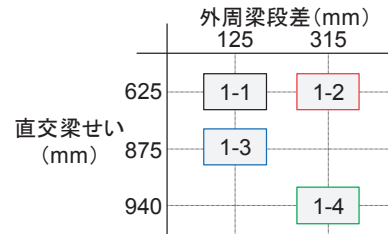


図6 構造解析:解析ケースの位置付け

表3 構造解析:解析ケースの一覧

解析ケース	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	
加力構面の接合部の型式	ト型				
外周梁	偏芯率	1/6			
	梁幅(mm)	200			
	梁せい	750	940	750	940
	$D_{p,c}$ (mm)	1.00	0.80	1.00	0.80
	アスペクト比	1.00	0.80	1.00	0.80
段差 h (mm)	125	315	125	315	
直交梁	偏芯率	1/6			
	梁幅(mm)	200			
	梁せい	625	625	875	940
	$D_{b,p}$ (mm)	1.20	1.20	0.86	0.80
直交梁の接続位置	上フランジ	外周梁 内側上	外周梁 外側上	外周梁 外側上	
	下フランジ	外周梁 内側下	外周梁 外側下	外周梁 内側下	
火災時の純せん断耐力 $V_{j,0}$ (kN)	1,827		1,341	1,248	
火災時の純ねじり耐力 $T_{j,0}$ (kN)	511,986		511,986	511,986	
火災時の複合時せん断耐力 $V_{j,c}$ (kN)	1,668		1,275	1,194	
立面図 外周梁(十字型)構面 :偏芯あり-段差あり					
立面図 直交梁(ト型)構面 :偏芯あり					

3.3 せん断耐力の算定

解析結果の検定のため、伝熱解析により得られた加熱 3 時間時の材料強度 (残存率 72%) を用いて、火災時を想定したねじりモーメントが作用する時の接合部せん断耐力 (V_{ju}) を既存の評価式によって求めた。ねじりモーメントが作用するときの柱梁接合部の破壊条件には Furguson らの提案式⁶⁾を準用した。以下に同式を示す。

$$\left(\frac{V_{ju}}{V_{ju0}}\right)^2 + \left(\frac{T_{ju}}{T_{ju0}}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

$T_{ju} = V_{ju} \times e$ (e : 偏芯距離) を代入し V_{ju} について解くと、

$$V_{ju} = V_{ju0} \cdot T_{ju0} \cdot \sqrt{\frac{1}{T_{ju0}^2 + e^2 \cdot V_{ju0}^2}} \quad (2)$$

ここで、

V_{ju0} : 火災時の柱梁接合部のせん断耐力 (N)

T_{ju0} : 火災時のせん断力が作用しない状態での接合部の純ねじり耐力 (Nmm)

接合部のせん断耐力 (V_{ju0}) は、文献 7 に準じて求めた。ただし、ウェブパネルのせん断耐力については本式が RC 造を対象とした式であること、囲み板による耐力は伝熱解析の結果から、それぞれ 0 とした。

純ねじり耐力 (T_{ju0}) の算定には文献 8 に記載されるねじりモーメントを受ける RC 部材の終局耐力の評価法を準用した。以下に式を示す。

$$T_{ju0} = \alpha_1 \cdot 0.8 \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot D_c \cdot B_c^2 \quad (3)$$

ここで、 D_c : 柱せい (mm)

B_c : 柱幅 (mm)

α_1 : 形状係数 (= 0.958)

以上より V_{ju} は CASE-1 および CASE-2 が 1,668kN、CASE-3 が 1,275kN、CASE-4 が 1,194kN であった。

3.4 解析結果

接合部に発生する水平せん断力 (${}_hV_j$) について接合部内の要素中心のせん断応力に各要素の水平断面積を乗じてせん断力に変換し、同一高さ (要素中心の Z 座標) の要素のせん断力を全て足し合わせて求めた。せん断力の算定対象部材は主にせん断力を負担している考えられるコンクリート、加力方向のウェブパネルおよび囲み板とした。

図 8 に接合部内せん断力の鉛直方向の分布を示す。同図には比較用の結果も併せて示す。図に示すとおり、押し出し力がある場合せん断変形の向き (= 符号) が接合部内部で反転するため、符号が同じ範囲についてそれ

ぞれせん断力および検定比 (${}_hV_j / V_{ju}$) を算出した。

各ケースにおけるせん断力の解析結果および検定比を以下に示す。

【CASE-1】

せん断力平均値: (正) 415 kN (負) -134 kN

最大値: 641 kN

検定比 平均値: (正) 0.249 (負) 0.080

最大値: 0.384

【CASE-2】

せん断力平均値: (正) 418 kN (負) -127 kN

最大値: 642 kN

検定比 平均値: (正) 0.251 (負) 0.076

最大値: 0.385

【CASE-3】

せん断力平均値: (正) 344 kN (負) -245 kN

最大値: 659 kN

検定比 平均値: (正) 0.270 (負) 0.192

最大値: 0.517

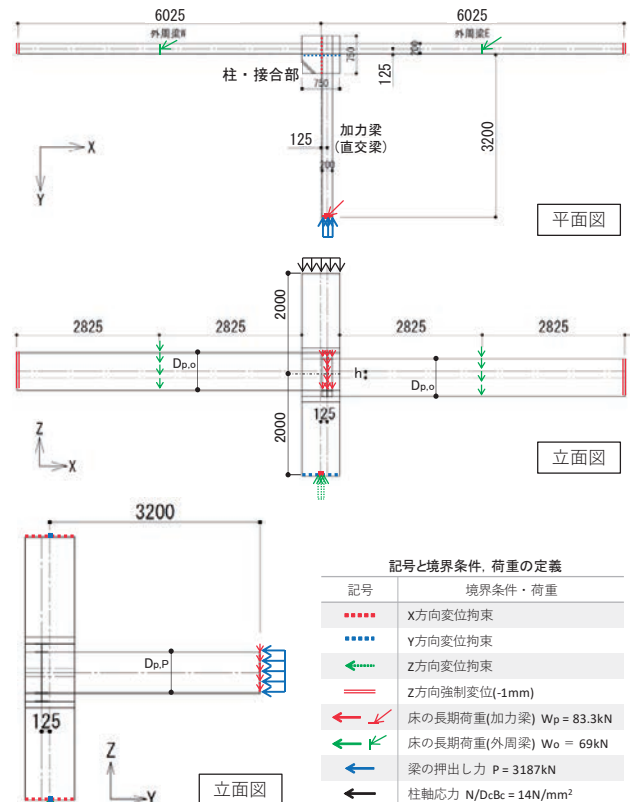


図7 構造解析: 境界条件一覧

表4 構造解析: 要素の種類と物性値

部材	要素種類	ヤング係数 (N/mm ²)	設計基準強度・降伏強度 (N/mm ²)
柱・接合部	8節点アイソパラメトリック要素	28518	42
梁			
バンドプレート	4節点アイソパラメトリック要素	205000	325
囲み板			
柱主筋			
柱帯筋	2節点トラス要素		390

【CASE-4】

せん断力平均値: (正)448kN (負)-180kN
 最大値: 754kN
 検定比 平均値: (正)0.357 (負)0.149
 最大値: 0.631

検定比は全てのケースにおいて 1 を下回ることを確認した。

CASE-1と2を比較した場合、接合部内部のせん断力は外周梁段差の大きさに影響を受けず同じであった。

CASE-1 と 3 を比較した場合、直交梁が外周梁外側フランジに取付き梁せいが大きくなると、接合部内部の正のせん断力は大きく、負のせん断力は小さくなった。全体の平均せん断力はほぼ同等であった。

CASE-1-2 と 4 を比較した場合、直交梁の梁せいが大きくなると、接合部内部の正のせん断力および負のせん断力ともに大きくなる傾向を示した。

§4. まとめ

FSRPC-B 構法における梁が偏芯した柱梁接合部を対象に、火災時の構造安全性を検証することを目的に、3次元有限要素解析により、伝熱解析および構造解析を行った。

伝熱解析では既往の実験結果を用いて物性値のフィッティングを行い、実大サイズの接合部の材料強度残存率を求めた。加熱3時間時のコンクリートおよび接合部全体の残存率は72%であった。

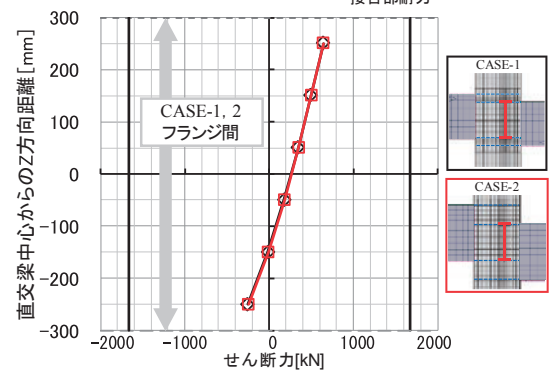
次に設計上想定される3種類の梁段差を有する偏芯接合部について、火災による建物外周側への梁の伸び出しを想定し、ト字形部分架構モデルで外周構面に直交する梁に押し出し力を与え、接合部内に生じるせん断力を求めた。また、同時にねじりを考慮したせん断耐力を求めた。その結果、検定比は最大 0.631 であり、柱幅が 750mm 以上、かつ、梁の偏芯率が柱幅の 1/6 以下であれば安全であることを確認した。

参考文献

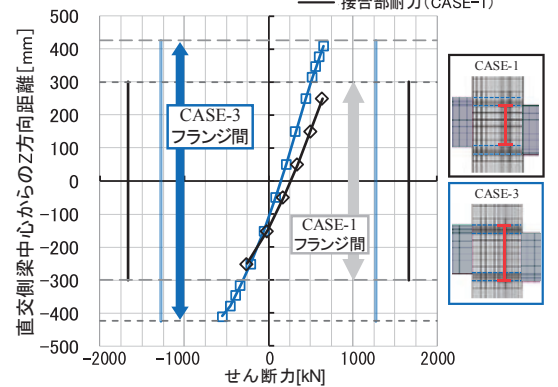
- 1) シングラヴィ 他: バンドプレートおよび囲み板により補強された柱 RC・梁 S とする混合構造に関する実験的研究 その 3 からその 5、日本建築学会大会学術講演梗概集
- 2) 松戸正士 他: 鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造の耐火性能-その 1 部分架構を対象とした荷重加熱実験結果および柱梁接合部の耐火性能-、日本建築学会構造系論文集 第 77 巻 第 679 号、pp.1463-1471、2012.9
- 3) Commission of European Communities : Eurocode No.4、Design of Composite Structures part10、Structural Fire Design、1990.4
- 4) 一瀬賢一・川口徹: 高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート柱部材の火災時における軸方向変形挙動に関する解析的研究、大林組技術研究所報 No.67、p.2、2003.12
- 5) 日本建築学会: 鋼構造耐火設計指針、2008.3

- 6) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災と今後の RC 構造設計、付録 3 ねじりモーメントの影響による柱梁接合部せん断耐力の耐力低下についての考察、pp.336-348、1998.10
- 7) 佐々木仁 他: 柱 RC・梁 S とする混合構造柱梁接合部のせん断抵抗機構、日本建築学会構造系論文集、第 461 号、pp.133-142、1994.7
- 8) 西村敏雄: 応用力学演習問題解析法、理工図書、pp.41-46、1968.5

CASE-1 vs CASE-2 (外周梁段差の影響)



CASE-3 vs CASE-1 (直交梁せいの影響)



CASE-4 vs CASE-2 (直交梁せいの影響)

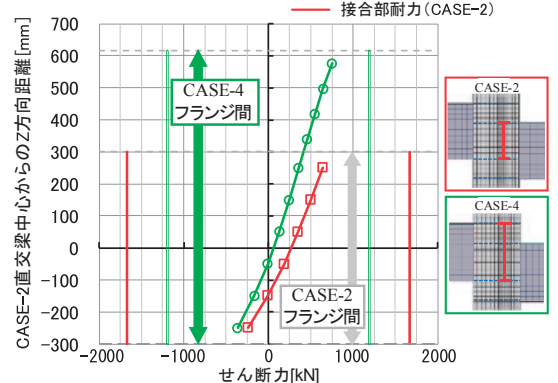


図8 構造解析: 発生せん断力の鉛直方向分布



飯田康介

ひとこと

最近、火災による甚大な被害が数多く報道されています。火災被害の低減に少しでもつながれば幸いです。