

袖壁・腰壁・垂れ壁を活用した実大 5 層鉄筋コンクリート造建築物の静的載荷実験を用いた損傷評価分析
その 2: FEM 解析による 2014 年度試験体の損傷の定量化

損傷評価 実大建物試験体 ひび割れ幅
ひび割れ長さ ひび割れ率 非線形有限要素解析

正会員 ○桑原 亮*1 正会員 北村 史登*1
正会員 河野 進*1 正会員 渡邊 秀和*1
正会員 向井 智久*2 正会員 前田 匡樹*3
正会員 衣笠 秀行*4

1. はじめに

本稿その 2 では、ひび割れ幅、長さ、間隔を有限要素解析を用いて再現した。

2. 有限要素解析を用いた損傷量の算出

2.1. ひび割れ間隔

本研究は CEB-FIP Model Code 1978 で提案された式 (1)¹⁾を用いてひび割れ間隔を算出する。ただし、式はひび割れ数が飽和した状態を前提としており、本研究では R=1/400 以降で精度が高くなった。

$$s_{rm} = 2 \left(c_s + \frac{s_y}{10} \right) + k_1 k_2 \frac{d_{by}}{p_v} \quad (1) \quad \left[\begin{array}{l} \text{各変数については文献 3)} \\ \text{を参照されたい。} \end{array} \right]$$

2.2. ひび割れ幅

$$w_i = \int_{h_i}^{s_{rm} + h_i} \epsilon_{zz} dz \quad (2) \quad \left[\begin{array}{l} w_i: \text{ひび割れ幅} \quad s_{rm}: \text{ひび割れ間隔} \\ h_i: \text{材端から要素端までの距離} \\ \epsilon_{zz}: \text{要素の材軸 } z \text{ 方向の伸びひずみ} \end{array} \right]$$

式(2)を用いてひび割れ幅算出を行う。図 1 に各部材回転角時のひび割れ幅累積値を実験と解析の比較として示す。ひび割れ幅の累積は各部材クリアスパン内で行った。北柱ではピーク時において、解析値と実験値の整合性が高く、ひび割れ幅累積値と部材軸方向変位との整合性も良好である。一方、除荷時においては解析と実験との整合性はあまりよくない。これはその 1²⁾の図 8-11 に示すように残留変形角が実験と解析では異なることが原因の 1 つとして考えられる。北梁では、上端位置(計測範囲左上部分)のピーク時ひび割れ幅累積値は概ね良好に実験値を評価できている。一方、下端位置(計測範囲右下部分)では実験値が解析値よりも高い結果となった。ただし、累積値の増加傾向は比較的良好に評価できている。袖壁では、ピーク時、除荷時ともに解析値が過大評価する結果となった。このような結果から本研究では、残留ひび割れ幅の再現は解析で得られたピーク時のひび割れ幅にひび割れ幅残留率(ピーク時最大ひび割れ幅に対する除荷時最大ひび割れ幅)を乗じ、除荷時におけるひび割れ幅の再現を行う。ひび割れ幅残留率は R=1/1600~1/100 で実測されたすべてのひび割れを対象として、その平均値を用い、北柱、袖壁、北梁でそれぞれ 0.23, 0.48, 0.60 とした。

2.3. ひび割れ長さ

図 2 に実験における各部材の R=1/100 時における損傷状況を示す。実験におけるひび割れ長さの計測は除荷時

に行ったが、解析では除荷時とピーク時のひび割れ長さが同じと仮定して³⁾、ピーク時のものを使用する。ひび割れ長さの算定方法を式 2 に示す。まず、ひび割れ位置での両端要素のひずみから平面保持の仮定より、中立軸の算出 x_n を行う。引張縁から中立軸位置までの長さ $D-x_n$ からひび割れひずみ(式 3)以下の長さを減じた長さをひび割れ長さ($L_{cr(fem)}$)とする。次に、 $L_{cr(fem)}$ にひび割れの蛇行・分岐(α_1)やひび割れの曲げせん断による斜め方向への進展(α_2)に関する補正係数を乗じて、実験の再現を行った。補正係数 α_1 は実測されたひび割れ長さ($L_{cr(exp)}$)をひび割れの始点から終点までの直線距離(L_v)で除し、蛇行や分岐を表現した。補正係数 α_2 は実測されたひび割れの水平投影長さ(L_h)を前述の L_v で除し、ひび割れの斜め方向への進展を表現した。実験データを元に北柱では $\alpha(\alpha_1 \times \alpha_2)=1.15$ 、袖壁では 1.28、梁では 1.51 とした。

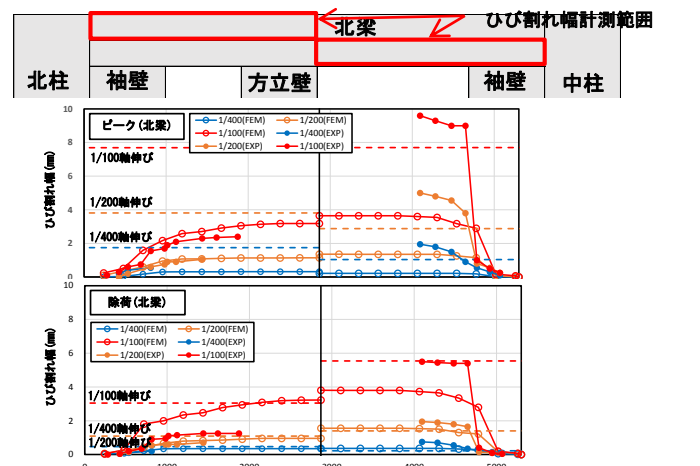
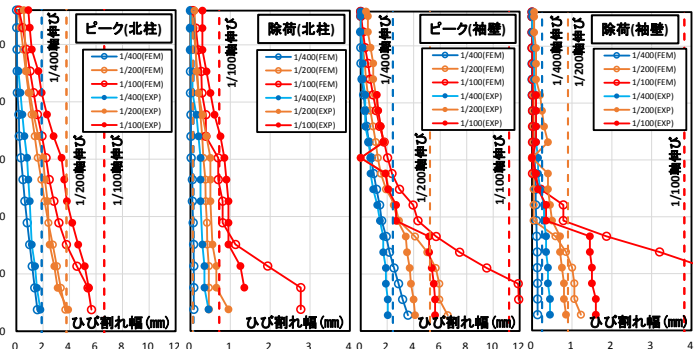


図 1 各部材のひび割れ幅累積値

Damage Evaluation of the five story building tested at BRI in 2014 with a nonlinear finite element analysis Part2: Damage Evaluation with nonlinear finite element analysis.

Fuhito KITAMURA, Ryo KUWABARA, Eko Yuniarsyah Hidekazu WATANABE, Susumu KONO, Tomohisa MUKAI, Masaki MAEDA, Hideyuki KINUGASA

2.4. ひび割れ率の比較

ひび割れ率は部材に発生した総ひび割れ長さを部材表面積の平方根で除した無次元量である。また、実験では被災度区分判定基準⁴⁾より、ひび割れ幅 $\sim 0.2\text{mm}$ 以下、 $0.2\sim 1.0\text{mm}$ 以下、 $1.0\sim 2.0\text{mm}$ 以下、 2.0mm 超過ごとに損傷度を設定した。北柱、袖壁、北梁におけるひび割れ率の比較を積立グラフとして図4に示す。ピーク時のひび割れ幅、間隔が概ね良好に評価できている北柱、北梁では総ひび割れ長さも比較的良好に評価できている。一方、ひび割れ間隔の評価は良いが、ひび割れ幅で実験と大きな差異が見られた袖壁では、ひび割れ長さの評価も困難である。そのため、総ひび割れ長さの評価には、ピーク時のひび割れ幅、間隔の評価が良好であることが前提条件である。ひび割れ幅ごとのひび割れ長さについては、北柱・北梁ともに1/200まで概ね良好に評価できている。しかし袖壁では1/400まで過大評価する傾向がある。1/100では、各部材ともひび割れ幅 0.2mm 以下のひび割れ長さを過小評価し、北梁ではひび割れ幅 0.2mm 以上のひび割れ長さを過大評価する傾向にある。北柱・袖壁の解析値では1/200サイクル以降ひび割れ率が減少傾向にある。これは2階以上の層に変形が集中し、1階の変形が緩和されたと考えられるが、現段階で明確な根拠が得られておらず、今後の研究課題としたい。

3. まとめ

実大5層試験体の静的載荷実験から得られた損傷データを元に、有限要素解析を用いて損傷の再現を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) ピーク時における北柱、北梁のひび割れ幅累積値は実験で計測されたひび割れ幅を概ね良好に評価できている。一方、残留ひび割れ幅は、北柱、梁南側、袖壁で大きな差異が見られた。これは、実験と解析において残留変形角が一致していないことが原因と考えられる。
- 2) ピーク時のひび割れ幅、間隔が良好に評価できていれば、平面保持を仮定した手法により残留ひび割れ長さの再現が可能であることが確認された。またひび割れ長さについて、補正係数 α を用いてひび割れの蛇行・分岐や斜め方向への進展を表現することで、実験のひび割れ長さを概ね良好に再現できた。

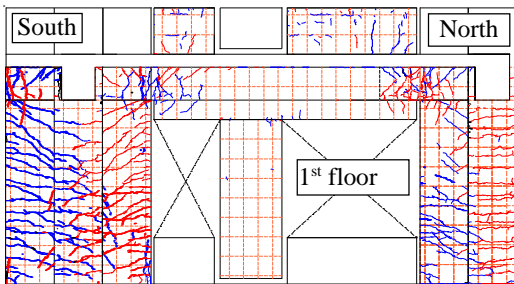
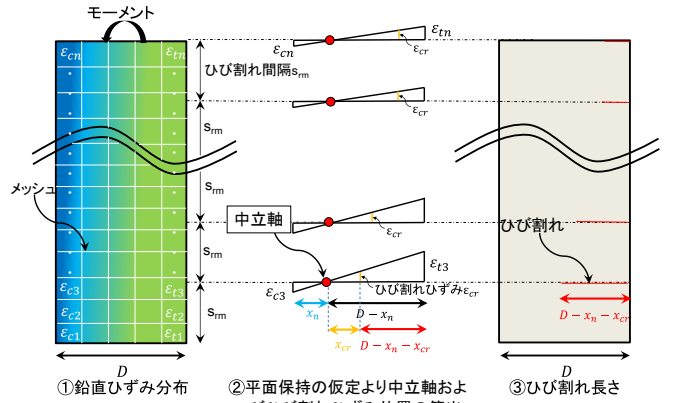


図2 ひび割れ図 (R=1/100rad)



$$\begin{cases}
 L_{cr}(fem) = \alpha(D - x_n - x_{cr}) & (3) \\
 \epsilon_{cr} = 2 \cdot \frac{\sigma_t}{E_c} & (4) \\
 \alpha_1 = \frac{L_{cr}(exp)}{L_v} & \alpha_2 = \frac{L_v}{L_h} & (5) \\
 \alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2 & (6)
 \end{cases}$$

L_{cr} : 総ひび割れ長さ D : 部材せい
 x_n : 中立軸位置 σ_t : 引張応力
 x_{cr} : 中立軸位置から引張りずみまでの長さ
 α : ひび割れ長さ補正係数 ϵ_{cr} : ひび割れひずみ
 E_c : コンクリートヤング係数

$L_{cr}(exp)$: ひび割れ長さ(実験値)
 L_h : ひび割れ水平投影長さ
 L_v : ひび割れ直線距離

図3 ひび割れ長さ算出方法

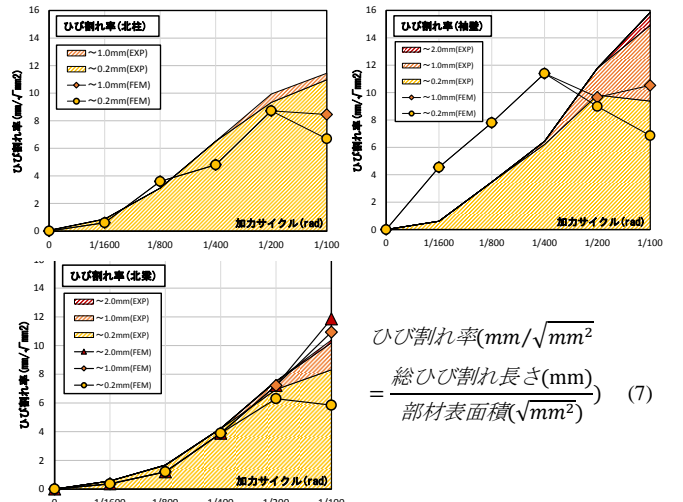


図4 各部材のひび割れ率

謝辞(Acknowledgments)

本研究で用いた実験は国総研総プロ「災害拠点建築物の機能継続技術の開発」として実施され、建築研究所重点課題「庁舎避難施設等の地震後の継続使用性確保に資する耐震性能評価手法の構築」との共同研究で実験に参画し、得た実験データを利用しました。関係各位に謝意を表します。

参考文献(references)

- 1) CEB-FIP: Model Code for Concrete Structures, 15.2.3 Checking of the limit state of cracking, pp.156-160,1978
- 2) 北村史登ほか: 袖壁・腰壁・垂れ壁を活用した実大5層鉄筋コンクリート造建築物の静的載荷実験を用いた損傷評価分析 その1: 2014年度の柱・梁・袖壁の実験結果とFEM解析結果の比較, 日本建築学会学術講演会投稿中
- 3) 伊藤洋一、権淳日ほか: 脆性部材を有するRC造架構の構造性能評価に関する実験その5 損傷量進展過程の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) pp.815-816,2011.8
- 4) 日本建築防災協会・国土交通省住宅局建築指導課: 震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針, 2001

*1 東京工業大学 *2 国立研究開発法人建築研究所
 *3 東北大学 *4 東京理科大学

*1 Tokyo Institute of Technology *2 Building Research Institute
 *3 Tohoku University *4 Tokyo University of Science