

## 実規模 RC 部材を対象とした水平二方向載荷経路とせん断破壊挙動に関する解析的検討

大成建設 (株) 正会員 ○穴倉 佳浩 正会員 渡辺 和明  
 (一財) 電力中央研究所 正会員 小松 怜史  
 関西電力 (株) 正会員 横田 克哉

## 1. はじめに

水平二方向地震力を受ける RC 部材の耐震性に関しては、これまで RC 橋脚等を対象とした繰返し載荷実験やファイバー要素等を用いた数値解析による検討が行われてきた<sup>1)</sup>。最近では、原子力発電所の RC 製地中構造物の耐震性能照査手法の高度化を目的として、水平二方向載荷を受けてせん断破壊する実大規模 (部材厚 1m 以上) の RC 部材を対象とした構造実験<sup>2)</sup>が実施された。筆者らは、その破壊挙動をより詳細に分析するために、三次元材料非線形 FEM 解析を用いた解析的検討を実施した<sup>3)</sup>。本研究では、上記の構造実験<sup>2)</sup>で行えなかった水平二方向の載荷経路がせん断破壊挙動に及ぼす影響について、同様の解析的検討による詳細分析を行う。

## 2. 解析条件

解析モデルは、**図-1** に示すように実際の構造実験<sup>2)</sup>の試験体を模擬して、コンクリートと載荷板 (鋼製) をソリッド要素、鉄筋を離散鉄筋 (埋め込み鉄筋トラス要素) でモデル化した。

**表-1** に解析条件を示す。コンクリートの非線形構成則には、圧縮、引張、せん断特性ともに 2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編] に示されているものを用いた。ただし、圧縮特性は、せん断補強鉄筋による拘束効果を考慮して、軟化域を調整した。また 2014 年制定複合構造標準示方書を参考に、柱主鉄筋部とそれ以外の部分に分けて、それぞれのせん断特性のパラメータを設定した。なお、本検討には、汎用解析コード DIANA Ver10.4<sup>4)</sup>を用い、ひび割れモデルに、Maekawa-Fukuura Concrete Model<sup>4)</sup>を適用した。

**図-2** に示す載荷パターンは構造実験<sup>2)</sup>を参考に設定した。なお矩形載荷は、斜め 45° 載荷と十字載荷を参考に、試験体の合変位方向が斜め 45° 程度 (+PY 方向) になる位置 (着目点 1; 図中の○点)、合変位方向が +P2 方向となる位置 (着目点 2; 図中の◇点) で、載荷経路の違いによる各ケース間の耐力や破壊状況を比較可能となるように設定した。

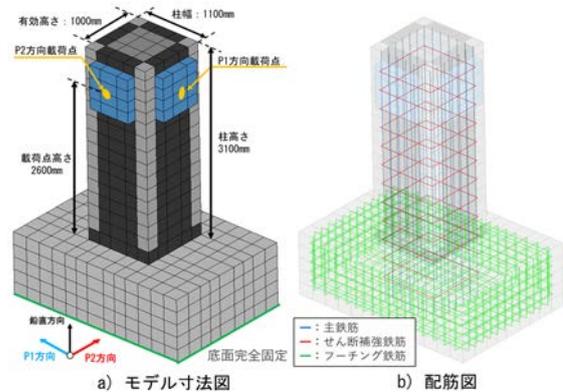


図-1 解析モデル

表-1 解析ケースと解析条件

解析ケース	矩形載荷	斜め45° 載荷	十字載荷	
せん断補強鉄筋比(%)	0.07			
せん断スパン比a/d	2.6			
材料強度 <sup>※</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリート圧縮強度	36.9	39.1	36.9
	主鉄筋(D32)降伏強度	508		
	せん断補強鉄筋(D13)降伏強度	360		
	フーチング鉄筋(D25)降伏強度	380		
せん断特性 (柱主筋部)	せん断劣化係数	0.4		
	せん断劣化開始ひずみ(μ)	4,000		
せん断特性 (上記以外)	せん断劣化係数	1.962		
	せん断劣化開始ひずみ(μ)	400		
付着すべり	主鉄筋	fibモデル		
関数	主鉄筋以外	付着応力-すべり関係		

※構造実験<sup>2)</sup>の試験体の実強度より設定。

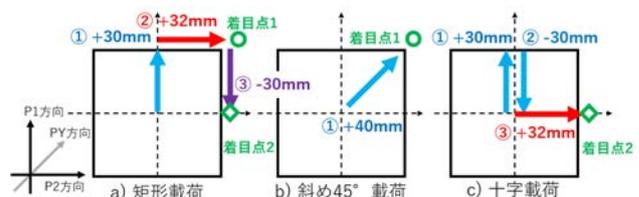


図-2 載荷パターンとケース間の耐力の比較ポイント

## 3. 解析結果と考察

**図-3** に P1 方向と P2 方向の荷重-合変位関係を示す。着目点 1 においては、矩形載荷と斜め 45° 載荷の耐力が概ね一致した。一方、着目点 2 では、矩形載荷の耐力が、十字載荷を 2 割程度下回る結果となった。このような傾向について、以下、詳細に分析する。

着目点 1 において、柱基部コンクリートの断面内鉛直ひずみコンターを**図-4**に示す。矩形載荷と斜め 45° 載荷のひずみ分布の傾向は概ね一致している。また、**図-5**に示す柱基部位置の主鉄筋軸応力コンターにおいても、両者に大きな差は見られなかった。これに対して、

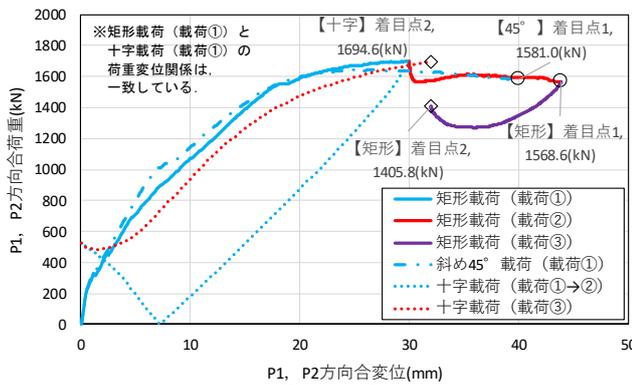


図-3 荷重-合変位関係

着目点2では、図-6に示すコンクリートの鉛直ひずみコンターにおいて、矩形荷重は、十字荷重に比べて、柱隅角部に圧縮ひずみが残留する傾向が見られるとともに、+P2方向圧縮縁側の広い範囲にわたって、圧縮ひずみ10,000 $\mu$ 以上で塑性化が著しい領域(図中青色)が分布している。また、図-7の主鉄筋軸応力コンターにおいても、矩形荷重と十字荷重で応力分布に顕著な差が見られ、荷重経路の違いにより両者の中立軸位置についても差が生じている可能性が高い。このように、荷重経路の違いによって、柱基部コンクリートのひずみ分布や主鉄筋の軸応力に違いが生じ、結果的にせん断耐力に影響を及ぼしたものと考えられる。

図-8に各荷重パターンの代表的なステップでの最大主ひずみコンターを示す。十字荷重では、荷重①で発生した斜めひび割れが、荷重②(-P1方向荷重)を経て、荷重③(+P2方向荷重)において閉口している。これに対して矩形荷重では、荷重③の+P2方向変形時(P1方向変位0)において、荷重①で発生した斜めひび割れの開口が柱隅角部に残留している。斜めひび割れの開口が残留した箇所は、柱基部コンクリートの塑性化が顕著な箇所(図-6 a)の真上に位置しており、柱基部の塑性化に伴って、ひび割れの開口が残留したものと考えられる。一般に、斜めひび割れが開口した場合、ひび割れを介した部材内の応力伝達が阻害され、耐力が低下することが知られている。従って、荷重経路の違いによって生じる耐力の差には、柱基部の塑性化に伴う斜めひび割れの開口状態も影響しているものと考えられる。

4. まとめ

三次元材料非線形FEM解析を用いた検討より、荷重経路の違いによってはせん断破壊挙動に差異が生じることが確認出来た。また、このような傾向は、断面内のコンクリートのひずみや主鉄筋の応力状況の差異、柱基部の塑性化に伴う斜めひび割れの開口状態の変化に

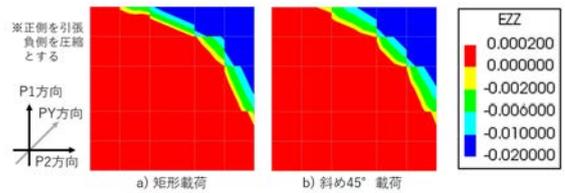


図-4 着目点1でのコンクリート鉛直ひずみコンター

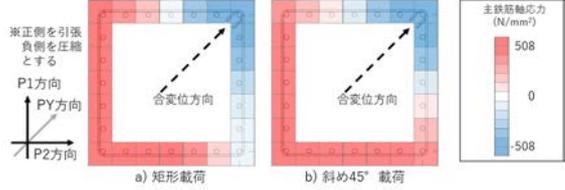


図-5 着目点1での主鉄筋軸応力コンター

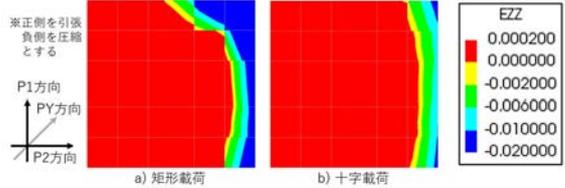


図-6 着目点2でのコンクリート鉛直ひずみコンター

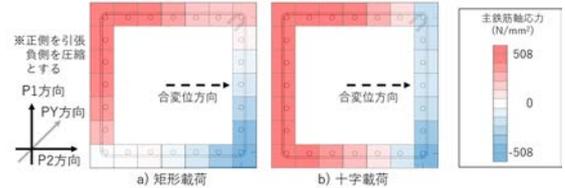


図-7 着目点2での主鉄筋軸応力コンター

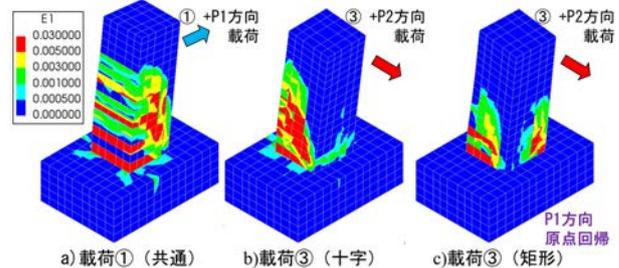


図-8 十字荷重と矩形荷重の最大主ひずみコンター

よって、説明できることが明らかになった。

参考文献

- 1) 早川ら：水平2方向地震力を受ける単柱式RC橋脚の耐震性，土木学会論文集 No.759/I-67,pp.79-98,2004.4
- 2) 坂下ら：水平二方向荷重履歴が実規模RC部材のせん断耐力に与える影響に関する実験的検討，構造工学論文集 Vol.67A,pp.578-590,2021.3
- 3) 宍倉ら：水平二方向荷重を受ける実規模RC部材のせん断破壊挙動に関する解析的検討，地震工学論文集 Vol.40 (印刷中)
- 4) DIANA FEA BV：DIANA10.4 User's Manual，2020

謝辞

本研究は、電力9社と日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)による原子力リスク研究センター共通研究として実施した。関係各位に謝意を表す。