

水平二方向載荷を受ける実規模 RC 部材の せん断破壊挙動に関する解析的検討

宍倉 佳浩¹・山本 悠人²・渡辺 和明³・小松 怜史⁴・横田 克哉⁵

¹正会員 大成建設株式会社 原子力本部 原子力土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)
E-mail: sskysh00@pub.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 技術センター 都市基盤技術研究部構造研究室
(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1)
E-mail: ymmyuz01@pub.taisei.co.jp

³正会員 大成建設株式会社 原子力本部 原子力土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)
E-mail: kwatanab@ce.taisei.co.jp

⁴正会員 一般財団法人電力中央研究所 地球工学研究所構造工学領域
(〒270-1194 千葉県我孫子市 1646)
komatsu3762@criepi.denken.or.jp

⁵正会員 関西電力株式会社 土木建築室 (〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島 3-6-16)
yokota.katsuya@e2.kepco.co.jp

現在、原子力発電所の屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針の拡充を目的に、RC 製地中構造物（ボックスカルバート）の耐震性能照査の高度化に関する研究が進められている。その研究の一環で、これまで実施例の少ない実大規模（部材厚 1 m 以上）の RC 製柱部材を対象とした水平二方向ベンチマーク実験が行われ、三次元非線形解析の精度向上検討のための基礎データが得られた。本研究では、このベンチマーク実験を対象に、汎用解析コードを用いたシミュレーション解析を実施した。初めに、水平二方向に繰り返し載荷を受けせん断破壊する実験の初期載荷について実験と解析の比較を行い、離散鉄筋要素を用いた三次元材料非線形解析手法の適用性を確認した。そして、様々な水平二方向の載荷が部材のせん断破壊挙動に与える影響を数値解析により検討した。

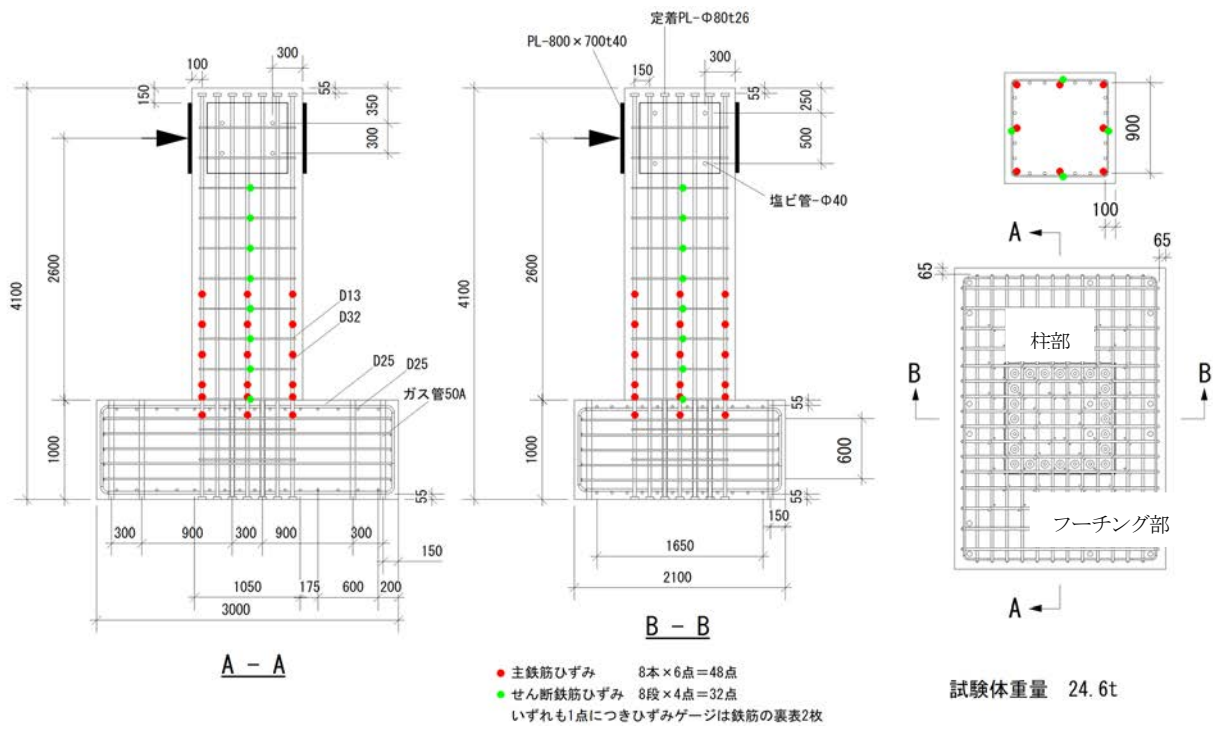
Key Words: full-scale reinforced concrete members, three dimensional nonlinear FEM, horizontal bilateral loadings, post analysis, discrete modeling of a reinforcing bar

1. はじめに

近年の鉄筋コンクリート構造物の三次元非線形解析技術の向上に伴い、コンクリート標準示方書〔設計編〕¹⁾において、非線形有限要素解析に基づく性能照査が導入された。原子力分野においても、原子力発電所に係わる新規制基準²⁾の改訂により、各施設の地震時の安全性を確認する基準地震動の最大加速度振幅が増加し、屋外重要土木構造物である取水路等の RC 製地中構造物（ボックスカルバート）の耐震性能照査において、その地震時挙動を精緻に評価できる解析手法や安全性を合理的に照査できる指標の重要性が増している。既に、現行の耐震性能照査指針³⁾において、RC 製地中構造物を対象とした三次元非線形解析による照査手法が導入されているが、

その解析手法の有効性を実証するためのベンチマーク実験において実規模 RC 部材を対象としたものは水平一方向載荷のみで、水平二方向載荷を受けるものは実施されていない。そこで、屋外重要土木構造物の耐震性能照査手法の高度化・標準化を目的とし、水平二方向載荷によりせん断破壊が生じる部材厚 1 m 以上の実規模 RC 部材を対象とした構造ベンチマーク実験が実施され、破壊状況や耐荷性能に与える三次元効果や載荷履歴依存性の影響に関する基礎的な実験データが整理された⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

本論文では、ベンチマーク実験に対して、三次元材料非線形解析手法を適用したシミュレーション解析を行い、離散鉄筋要素を用いたモデル化手法の適用性を確認した。さらに、ベンチマーク実験で行われた斜め 45° 方向に載荷した場合や主載荷方向と直交する面に初期の斜めひ



び割れによる損傷を生じさせた場合（以下、プレクラック）について、せん断破壊に至るまでの挙動や耐荷性能を分析し、水平二方向载荷による三次元効果や载荷履歴がせん断破壊挙動に与える影響を解析的に検討した。

表-1 断面諸元

部材幅 (mm)	1100
断面高さ (mm)	1100
有効高さ (mm)	1000
引張鉄筋比(最外縁鉄筋) (%)	0.51
せん断補強鉄筋比 (%)	0.08

2. ベンチマーク実験の概要

(1) 試験体の概要

図-1 に試験体の概要、表-1 に断面諸元を示す。試験体は RC 製地中構造物（ボックスカルバート）の棲壁を想定し、一辺の長さが 1.1 m の正方形断面の柱部材とフーチング部材で構成されている。なお、試験体の曲げせん断耐力比（=せん断耐力/曲げ降伏水平力）は 0.87~0.88、せん断スパン比（=载荷点~フーチング先端距離 a /有効高さ d ）を 2.6 とし、斜め引張破壊型の試験体とした。

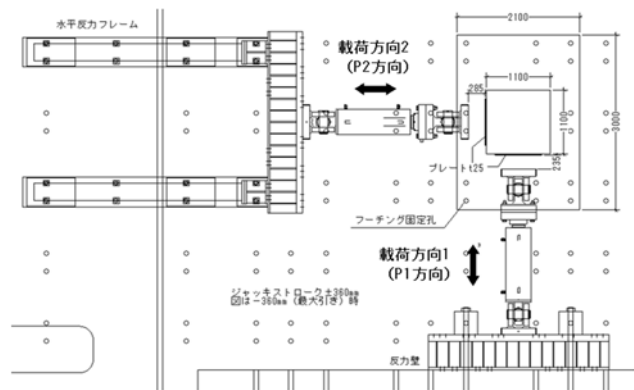


図-2 载荷装置の平面図

(2) 試験ケースと载荷パターン

図-2 に载荷装置平面図を示す。载荷は、载荷方向 1（以下、P1 方向）、载荷方向 2（以下、P2 方向）の二方向とし、それぞれ 3 MN ジャッキで载荷を行う。図-3 に試験ケースと载荷パターンを示す。N-1 の载荷パターンは、P1 方向への载荷とし、試験体のせん断耐力ピークを確認した後、除荷を行う。N-2-1 は、P1 方向、P2 方向の同時载荷による 45° 方向への载荷（以下、PY 方向）とし、せん断耐力ピークを確認した後、除荷を行う。N-2-2 は、最初に P2 方向に正負交番载荷を行い斜めひび割れ発生を発生させる。その後、試験体を原点復帰させ、

P1 方向への载荷を行い、せん断耐力ピークを確認の後、除荷を行う。なお、三次元ベンチマーク実験では、初期载荷後に P2 方向（PX 方向）への载荷、P1 方向（PY 方向）への再载荷が行われている。実験の詳細については関連論文⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾を参考されたい。

(3) 実験結果の概要

基本ケースである一方向载荷の N-1 の荷重変位関係を図-4 に示し、二方向载荷である N-2-1 と N-2-2 との荷重変位関係の比較を図-5 と図-6 にそれぞれ示す。なお、図

ケース名称	荷重イメージ (初期荷重)	
N-1 (基本ケース)	耐力ピーク確認 	
N-2-1 (斜め45° 加力)	耐力ピーク確認 	
N-2-2 (ブлекаック)	せん断ひび割れ 	耐力ピーク確認

図-3 実験ケースと荷重パターン

中の設計せん断耐力の値は、二羽らの提案式⁸⁾を参考に算定した。

図-4よりN-1では、設計せん断耐力を上回る約1300kNでせん断補強筋の初期降伏が発生した。その後、荷重点変位約30mm直前で耐力が急激に落ち込み、せん断破壊に至った。なお、最大耐力は、設計せん断耐力を3割程度上回った。

図-5より、斜め45°荷重のN-2-1のせん断補強筋の初期降伏は、N-1とほぼ同じ、1300kN前後で発生した。ただし、N-2-1はせん断補強筋初期降伏後の耐力の低下がN-1に比べて小さく、最終的にN-1に対し、最大耐力が1割程度、最大耐力時水平変位は2割程度増加した。なお、N-2-1は、N-1に比べて、主筋初期降伏が早い段階で発生しており、局所的な損傷状況が顕著となっていた。

図-6よりN-2-2のせん断補強鉄筋の初期降伏のタイミングは、N-1と概ね一致した。しかし、N-2-2の耐力は、N-1がせん断破壊した荷重点変位約30mm以降も上昇し、最終的にN-1に対して、最大耐力が1割程度、最大耐力時の水平変位が4割程度増加した。

3. 解析手法の適用性検討

(1) 解析モデル概要

図-7に解析モデルの概要を示す。解析モデルは実験に用いた試験体と同様に一辺あたり1.1mの正方形断面を有する柱部材とフーチング部材で構成されており、コンクリートと荷重板は二次のソリッド要素でモデル化した。主なRC構造物の鉄筋のモデル化手法として、分散鉄筋要素と離散鉄筋要素を用いるものがある。分散鉄筋要素は、鉄筋の効果をコンクリート要素に重ね合わせた1つの要素で表現し、複雑な鉄筋の配置を簡易にモデル化でき、耐震性能照査指針³⁾の照査例のボックスカルバートの

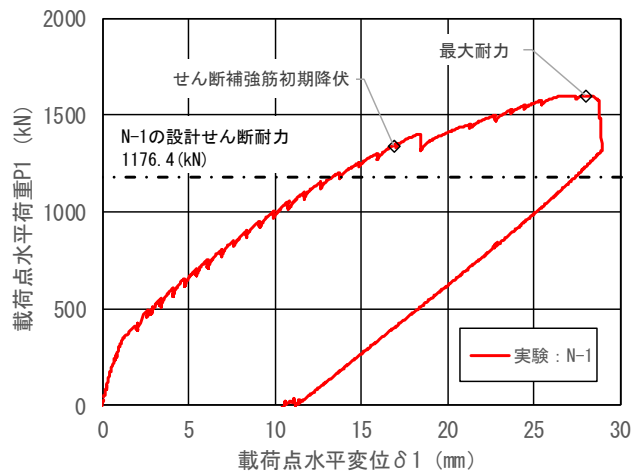


図-4 N-1の荷重変位関係

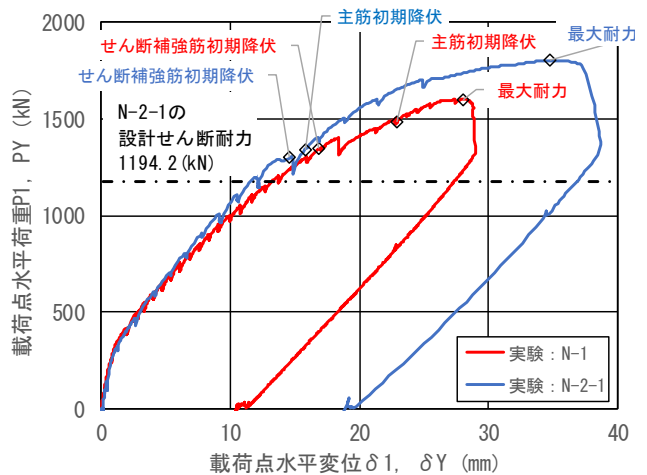


図-5 N-1とN-2-1の荷重変位関係の比較

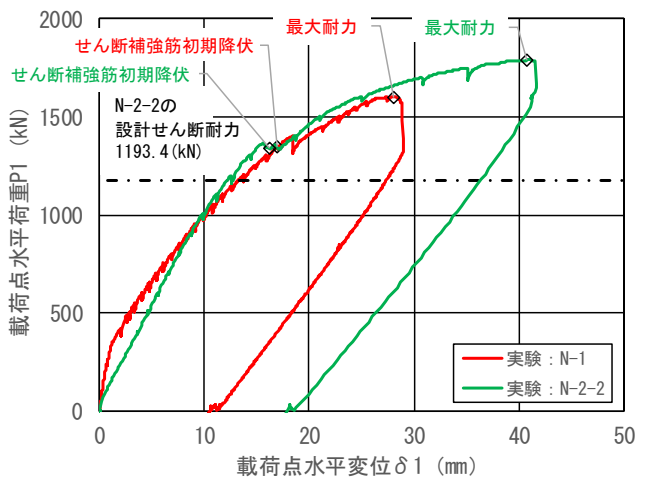


図-6 N-1とN-2-2の荷重変位関係の比較

のモデル化に用いられている。一方で離散鉄筋要素は、分散鉄筋要素では表現しきれない三次元的な鉄筋の配置、鉄筋の抜け出し効果を精緻に考慮できるという利点を有している。前川-福浦モデルと離散鉄筋モデルを組み合

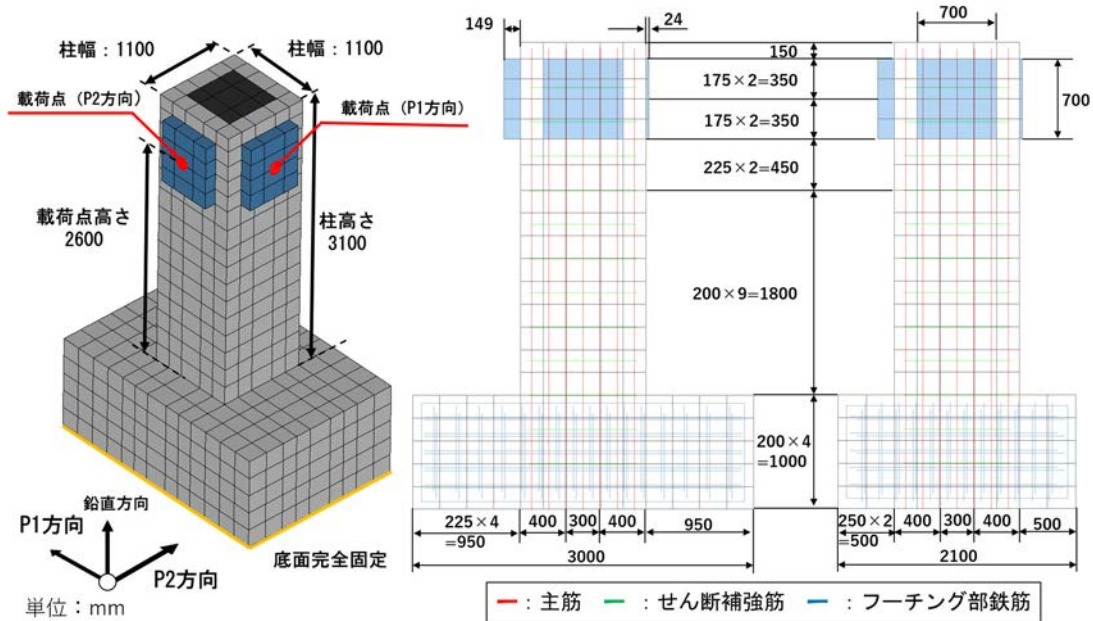


図-7 解析モデルの概要図

わせたモデル化は、既往の研究⁹⁾においても、部材厚0.7 m程度ではあるが、せん断破壊が生じる柱試験体に対して、適用性が確認されている。よって本研究では、鉄筋は全て離散鉄筋要素（埋め込み鉄筋トラス要素）でモデル化することとした。なお、同じベンチマーク実験に対して、他のモデル化手法による分析が行われている^{10),11)}。別途参照していただきたい。

解析には、汎用解析コード DIANA Ver10.3¹²⁾を用い、コンクリートのひび割れモデルには同解析コードに実装されている前川-福浦モデル¹²⁾を用いた。

N-1 試験体への荷重は、実験の最大水平変位まで変位制御で行い、1ステップあたり0.1 mmずつとした。また、非線形方程式の解法には割線剛性法（準 Newton 法）を用いた。

(2) 材料条件・非線形構成則

コンクリート及び鉄筋の材料物性値は、試験体の実強度に基づいて設定した。特にコンクリートについては試験日当日の一軸圧縮試験の結果を用いた。

コンクリートの非線形構成則には、圧縮・引張・せん断ともに2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕¹⁾に示されているものを用いた。図-8にコンクリート構成則のイメージ図、表-3にパラメータを示す。圧縮特性と引張特性のパラメータについても、同様にコンクリート標準示方書に従い設定した。なお、せん断特性のパラメータは、2014年制定複合構造標準示方書¹³⁾を参考に、柱の主筋が通る要素とそれ以外の要素に分けて、それぞれにせん断伝達係数とせん断軟化開始ひずみを設定した。主鉄筋とせん断補強筋の非線形構成則とパラメータを表-4に示す。コンクリートと鉄筋の付着すべり関係には島

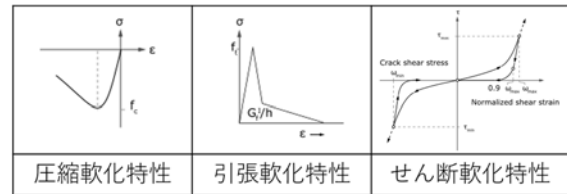


図-8 コンクリート構成則のイメージ¹²⁾

表-3 各試験体のコンクリート要素のパラメータ

	N-1	N-2-1	N-2-2
一軸圧縮強度 (N/mm ²)	36.9	39.1	39.0
圧縮強度低減モデル	コンクリート標準示方書 ¹⁾		
引張強度 (N/mm ²)	2.55	2.65	2.65
引張破壊エネルギー (N/mm)	0.0904	0.0921	0.0921
引張軟化係数	1.962		
柱主筋部	せん断伝達係数	0.4	
	せん断劣化開始ひずみ	4000μ	
柱主筋部以外	せん断伝達係数	1.962	
	せん断劣化開始ひずみ	400μ	

表-4 鉄筋の非線形構成則とパラメータ

	柱主筋	せん断補強筋	フーチング部鉄筋
鉄筋径 (mm)	31.8	12.7	25.4
降伏応力 (N/mm ²)	508	360	380
ヤング率 (N/mm ²)	2.0 × 10 ⁵		
硬化則	等方硬化		硬化なし
付着すべり関数	式(1a)	式(1b)	
せん断応力係数	0.2	1.0	

ら¹⁴⁾により提案されたモデルを用いる。主鉄筋には式(1a)、それ以外には式(1b)を適用させた。

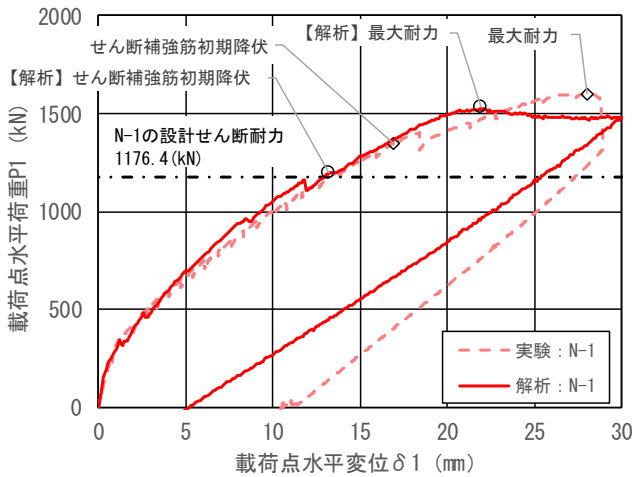


図-9 N-1の実験と解析結果の比較

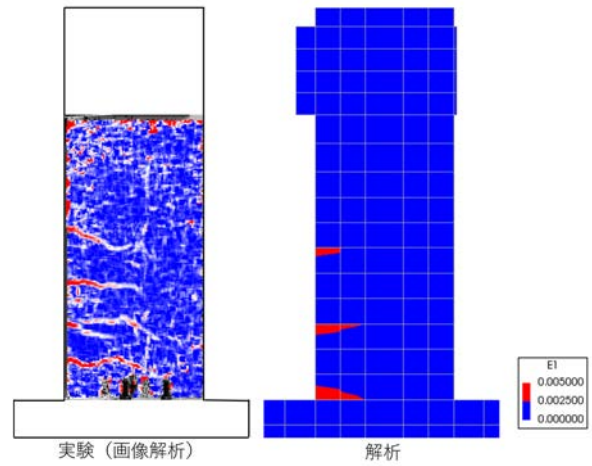


図-10 N-1のP1方向平行面の最大主ひずみコンターの比較 (荷重 600kN)

$$\tau/f'_c = 0.73(\ln(1 + 5s))^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad (1a)$$

ここで

$$s : s = 1000 S/D$$

τ : 付着応力 (N/mm²)

f'_c : コンクリート強度 (N/mm²)

S : すべり量 (mm)

D : 鉄筋径 (mm)

ε : ひずみ

$$\tau = 0.9f'_c \cdot 2^{2/3} (1 - e^{-40s^{0.6}}) \quad (1b)$$

ここで

$$s : s = S/D$$

(3) 基本ケース (N-1) による適用性検討

図-9 に実験と解析結果の荷重変位関係の比較, 図-10 ~ 図-12 に代表的な荷重ステップの試験体側面 (荷重方向平行面) の最大主ひずみコンターの比較を示す. 実験の画像解析 (DIC⁵⁾ の詳細は, 関連論文⁷⁾を参考にされたい.

図-9 より, 解析結果は, 実験結果の荷重変位関係の全体的な傾向と概ね一致しており, 斜めひび割れを伴う試験体の挙動を再現できている. また, 最大耐力についても, 実験結果の約 1600kN に対して解析結果は約 1500kN で相対誤差は 5%程度となっており, 両者の結果は概ね一致していると考えられる.

図-10 の実験結果は, 画像解析を開始した荷重 600 kN の比較的初期の荷重ステップとなり, 試験体の柱引張側に曲げひび割れが発生している. 解析でも実験と同程度の大きさの曲げひび割れが発生している. 図-11 の解析結果は, せん断補強筋が初期降伏したときの荷重ステッ

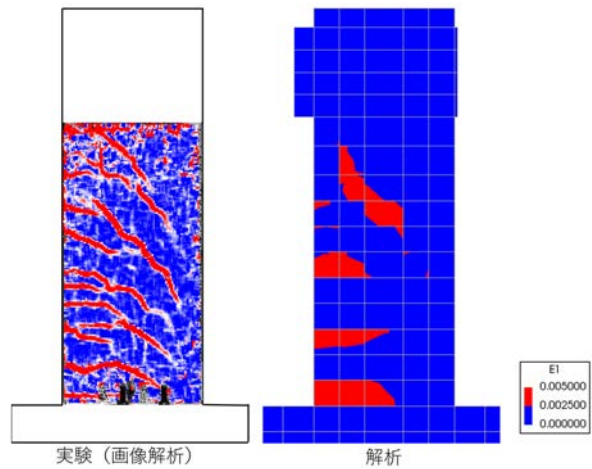


図-11 N-1のP1方向平行面の最大主ひずみコンターの比較 (解析: せん断補強筋初期降伏時)

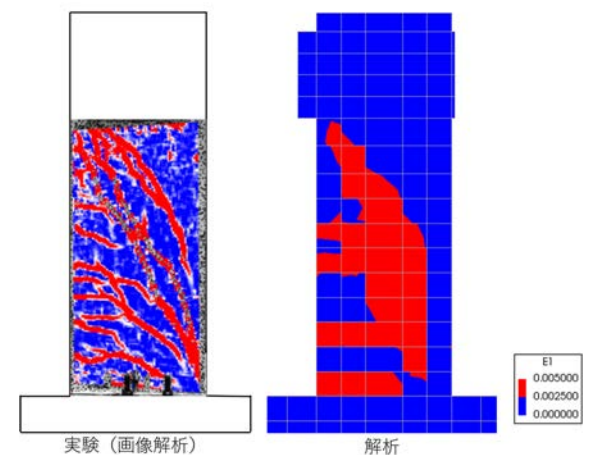


図-12 N-1のP1方向平行面の最大主ひずみコンターの比較 (最大水平変位時)

プで, 画像解析の結果は直近の撮影ステップである 1200 kN 時のものである. 実験と解析ともに, 図-10 で発生した曲げひび割れが進展し, 試験体側面斜めひび割れが発

生している。図-12の最大水平変位時では、実験と解析ともに試験体側面の斜めひび割れが広範囲に拡がり、せん断破壊が発生していることが確認できる。これらの結果から、解析モデルは、荷重の増加に伴うひび割れの発生と進展、破壊モードを概ね再現できていることが確認された。

以上の検討により、せん断破壊が発生する実大規模の試験体（部材厚 1.1 m）に対しても、前川福浦モデルと離散鉄筋要素による解析モデルを用いた非線形解析手法は、十分な適用性を有していると考えられる。

4. 水平二方向荷重に対するせん断破壊挙動の検討

(1) 斜め 45° 荷重 (N-2-1) の検討

図-13に基本ケースであるN-1とN-2-1の荷重変位関係の解析結果の比較を示す。なお、参考データとして、それぞれの実験結果も併せて示す。図-14に代表的な荷重ステップの最大主ひずみコンター比較、図-15に代表的な荷重ステップの最小主応力コンターを示す。

解析より得られた荷重変位関係においては、両ケースの解析結果は、せん断補強筋初期降伏以降の傾向が若干異なるものの、ほぼ同程度の耐力値となっている。ただし、主筋初期降伏は実験と同様にN-1より早期に発生しており、局所的な損傷状況が数値解析上でも確認された。

図-14の最大主ひずみコンターより、せん断補強筋初期降伏時では、柱引張縁に曲げひび割れ、荷重方向と並行方向に斜めひび割れが発生しており、基本ケースのN-1と似た最大主ひずみ分布となっている。しかし、N-1の斜めひび割れがPI方向に平行な1つの面にのみ発生しているのに対して、N-2-1は、PY方向に45°の角度をなす2つの面を跨ぐように斜めひび割れが進展している。最大変位時では、せん断補強筋初期降伏時に確認された曲げひび割れと斜めひび割れがさらに進展し、破壊に至っていることが確認できる。

図-15より、せん断補強筋初期降伏時では、柱圧縮側の基部に一軸圧縮強度 39.1 N/mm²に相当する最小主応力が発生している。その後の荷重ステップである最大耐力時では、柱圧縮側の基部で最小主応力がほとんどゼロになっており、基部の圧縮破壊が発生している。

以上より、柱部材（矩形断面）に対して、対角方向の斜め 45°方向荷重した場合においても、部材面直角の一方方向に荷重した場合と同程度の最大耐力、破壊挙動となることが明らかになった。ただし、解析より得られた耐力の上昇傾向及び最大耐力値は、実験に比べて若干異なるものとなった。これは、解析の圧縮軟化が実際よりも早期に生じた結果であると推測される。そのため、今後、

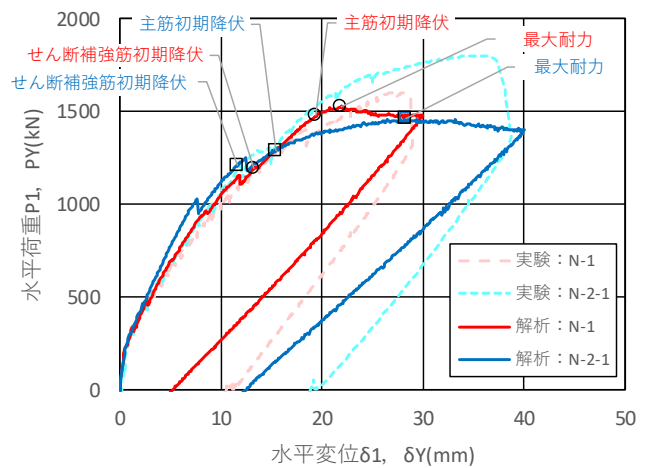


図-13 N-1とN-2-1の実験と解析の比較

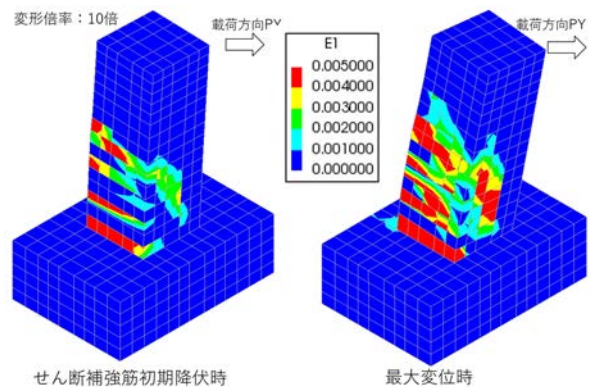


図-14 代表的な荷重ステップの最大主ひずみコンター

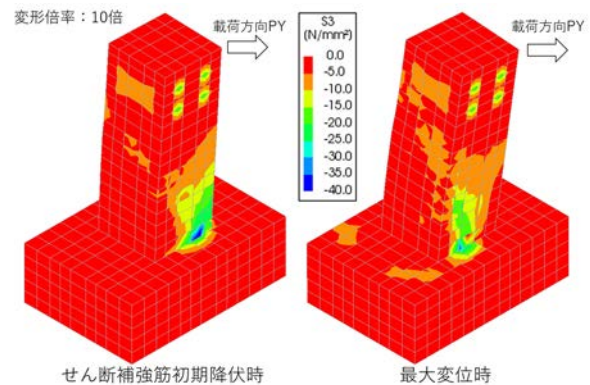


図-15 代表的な荷重ステップの最小主応力コンター

解析モデルの更なる高精度化の検討が必要と考えられる。

(2) プレクラック (N-2-2) の影響検討

図-16にN-1とN-2-2の荷重変位関係の解析結果の比較を示す。また、N-2-1と同様で、実験結果も参考データとして示す。図-17に代表的な荷重ステップの最大主ひずみコンター、図-18に基本ケース (N-1) とプレクラック (N-2-2) のひび割れの比較、図-19に代表的な荷重ステップの最小主応力コンターを示す。

実験の荷重変位関係においては、基本ケースである

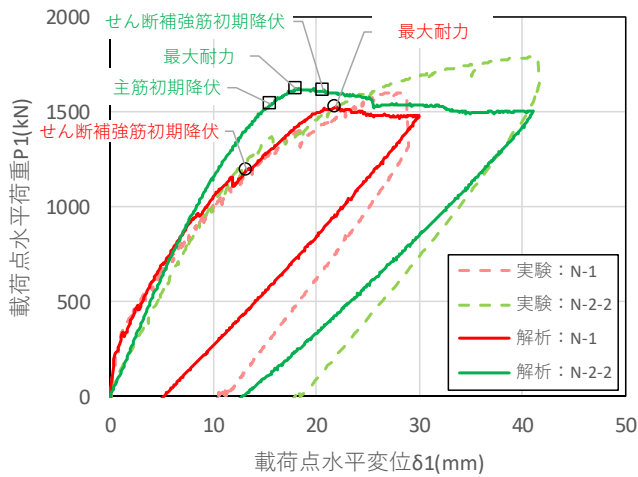


図-16 N-2-2の実験と解析の比較

N-1 に比べて初期勾配に若干の差が見られるが、実験結果と同様の最大耐力の増加傾向となっている。

図-17 の主筋初期降伏時の最大主ひずみコンターでは、これまでの傾向とは異なり、P1 方向直交面である柱引張縁での曲げひび割れの開口は小さく、0.001~0.004 程度の最大主ひずみが広範囲に分布している。また、P1 方向平行面には、斜めひび割れがわずかしこ発生しておらず、水平方向に発生していたプレクラックの開口が見られた。図-18のひび割れ図を確認すると、N-1に対してN-2-2 は、プレクラックにより引張縁の曲げひび割れの発生と P1 方向平行面での斜めひび割れの発生が抑制されていることが確認できる。その後、せん断補強筋初期降伏では、P1 方向平行面のプレクラック同士がつながるように斜めひび割れが発生している。

図-19 に示す最大耐力の直前の荷重ステップである主筋初期降伏時の最小主応力コンターでは、柱圧縮縁の基部において、最小主応力が一軸圧縮強度の 39.0 N/mm² に相当する値となっていた。その後の荷重ステップであるせん断補強筋初期降伏時には、柱圧縮縁の基部の最小主応力が減少しており、実験に比べて早い荷重ステップで圧縮破壊が発生していると考えられる。これは N-2-1 と同様の傾向である。

以上より、プレクラックを導入した N-2-2 は、N-1 に対して実験と同様の最大耐力の増加傾向が見られた。プレクラックによる最大耐力と靱性の上昇傾向は、既往の研究¹⁰でも報告されているが、今回の数値解析においても確認できた。

5. まとめ

水平二方向荷重を受ける実大規模 RC 柱部材の荷重実験に対して、前川-福浦モデルと離散鉄筋要素を組み合わせた三次元材料非線形有限要素法によるシミュレーション

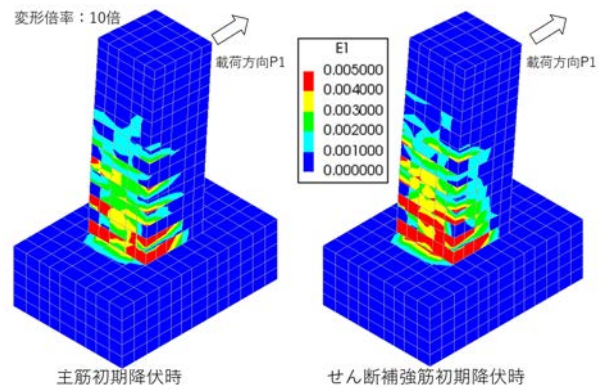


図-17 代表的な荷重ステップの最大主ひずみコンター

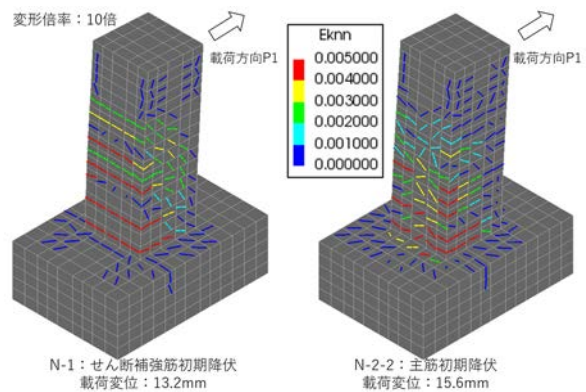


図-18 基本ケースとのひび割れの比較

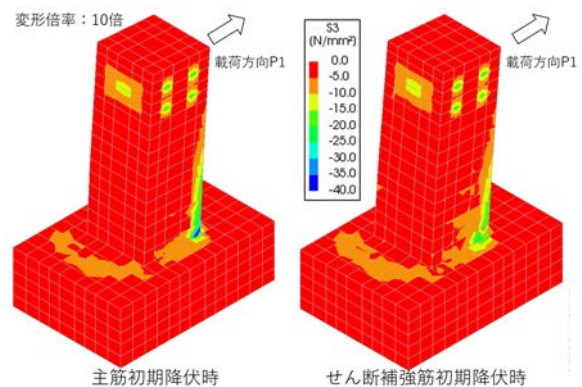


図-19 代表的な荷重ステップの最小主応力コンター

ョン解析を実施し、以下の結論を得た。

- (1) 前川-福浦モデルと離散鉄筋要素を組み合わせた解析モデルは、実規模の部材厚 1.1 m の試験体に対しても、荷重変位関係、ひび割れの発生等のせん断破壊挙動を概ね再現できることが確認できた。
- (2) 斜め 45° 荷重と基本ケースの解析結果の比較より、斜め方向に荷重した場合においても、水平一方向に荷重した場合とほぼ同程度の最大耐力となるものの、実験で見られた局所的な損傷（主筋初期降伏の先行）が顕著になる点が数値解析においても確認された。
- (3) プレクラックを導入した解析結果より、プレクラ

ックの影響により、曲げひび割れと斜めひび割れの発生と開口が抑制され、せん断耐力が増加する現象が数値解析においても確認できた。

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。

参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.3
- 2) 原子力規制委員会：実用発電用原子炉に係る新規規制基準について，pp.9-13，2016.2.17
- 3) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例，2018.
- 4) 坂下克之，山本悠人，松尾豊史，松居伸明：実規模二方向載荷実験による載荷履歴がせん断耐力に与える影響の検討，土木学会第75回年次学術講演会，2020.
- 5) 畑明仁，山本悠人，永田聖二，松居伸明：実規模RC部材を対象としたあと施工せん断補強効果に関する検討（その1）～実験検討～，土木学会第75回年次学術講演会，2020.
- 6) 永田聖二，松尾豊史，畑明仁，山本悠人，松居伸明：水平二方向載荷実験に基づくあと施工型せん断補強鉄筋で一面耐震補強を施した実規模RC部材の終局挙動に関する検討，コンクリート構造物の補修・補強・アップグレードシンポジウム，2020.（投稿中）
- 7) 坂下克之，山本悠人，畑明仁，松尾豊史，松居伸明：実規模RC部材の水平二方向繰り返し載荷履歴が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，2021.3（投稿中）
- 8) 二羽淳一郎，山田一宇，横沢和夫，岡村甫：せん断補強筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，第372号，V-5，pp.167-176，1986
- 9) 園部秀明，渡辺和明，小野英雄，山本悠人，坂下克之，畑明仁：離散鉄筋モデルを用いた非線形有限要素解析によるRC柱の2方向加力経路の影響検討，土木学会第74回年次学術講演会，2019.
- 10) 小松怜史，松尾豊史，畑明仁，横田克哉：水平二方向でせん断破壊する実規模RC部材への三次元材料非線形有限要素法解析の適用，第75回年次学術講演会集，2020.
- 11) 小松怜史，永田聖二，松尾豊史，畑明仁，前川宏一：水平二方向力が作用する実規模RC部材の破壊挙動の数値解析による分析，構造工学論文集 Vol. 67A，2021.3（投稿中）
- 12) DIANA FEA BV：DIANA10.3 User's Manual，2019
- 13) 土木学会：2014年制定複合構造標準示方書[設計編]，2015.5
- 14) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.195～pp.174，1987.2
- 15) 非接触歪み・変位計測 デジタル画像関連法:DICシステム | 西華デジタルイメージ：< <https://www.seikadi.com/measurement/material/dic.html> >（2020年8月4日アクセス）
- 16) Pimanmas. A and Maekawa, K. : Influence of pre-crack on RC behavior in shear, J. Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.669/V-50, pp.277-291, 2001.

(Received ??, 2020)
(Accepted ??, 2020)

NUMERICAL STUDY ON EFFECT OF HORIZONTAL BILATERAL LOADING HISTORY TO SHEAR FRACTURE BEHAVIOR OF FULL-SCALE RC MEMBERS

Yoshihiro SHISHIKURA, Yujin YAMAMOTO, Kazuaki WATANABE,
Satoshi KOMATSU and Katsuya YOKOTA

Currently, the studies on the improvement for seismic performance verification of RC underground structures (box culverts) are being conducted to expand the guideline named “Guideline and Recommendation for Seismic Performance Verification of Underground Reinforced Concrete Structures in Nuclear Power Stations”. As a part of these studies, we conducted horizontal bilateral benchmark experiments on a full-scale RC column member (more than 1 m thick), which are rarely conducted, to obtain basic data for studying the improvement of the accuracy of three-dimensional nonlinear analysis. In this study, a simulation analysis of the benchmark experiment was performed using a generic analysis code. First, a comparison between the experiment and the analysis for the initial loading under repeated loading in horizontal bilateral directions was made to confirm the applicability of the three-dimensional material nonlinear analysis method using discrete bar elements. And, the effect of the horizontal bilateral loading on the shear fracture behavior of a member was studied numerically using the analytical model that was confirmed to be applicable.