

4. 3次元 FEM 解析による基礎の破壊形態の検証

3章の検証結果より、PC 鋼棒が劣化していたと仮定した場合、地震時に着目接合部において基礎の曲げ破壊が生じ破壊に至る可能性のほか、基礎の曲げ破壊とせん断破壊の両方が生じ破壊に至る可能性を確認した。本章では、本橋と同様の被災事例は少ないことを踏まえ、基礎が破壊に至った過程を検証することとし、着目接合部の曲げ破壊に着目して、2.2 で示した被災状況と同じ破壊形態に至る過程を検証するため、3次元 FEM により PC ウェル基礎本体の形状と破壊形態の再現を試みる。

3次元 FEM 解析による基礎の破壊形態の検証は、本橋の P3 橋脚の PC ウェル基礎本体を抽出し、以下のとおり実施した。

- ・破壊した中空セグメントと上部セグメントをモデル化し、3次元 FEM 解析により、PC 鋼棒の破断過程の検証を行った。
- ・その後、破壊した中空セグメントと下部セグメントをモデル化し、3次元 FEM 解析により、破壊した中空セグメントの破壊形態の検証を行った。

4.1 PC 鋼棒の破断過程の検証

(1) 検証方法

PC 鋼棒の破断過程の検証は、PC 鋼棒が健全である場合と劣化（脆化、耐力の低下、PC 鋼棒とコンクリートの付着を考慮）しているケースにおける基礎のモデル化を行い、上部構造死荷重等の鉛直荷重を載荷したうえで水平荷重を漸増載荷させる解析を実施した。

なお、PC 鋼棒は破断後も破断前の荷重を分担する条件で解析を実施した。

(2) 解析条件

1) 基礎のモデル化

基礎のモデル化は、破壊した中空セグメントと上部の充実セグメントの 2 つのセグメントを抽出し行った。セグメントのコンクリートはソリッド要素で、PC 鋼棒は梁要素とした。セグメントを繋ぐ PC 鋼棒は、機械式継手を介して接続され、継手部は PC 鋼棒よりも剛性が高い構造となり、前後の PC 鋼棒は継手部と相対的に剛性が低くなる。この影響を確認するため、継手部の剛性を考慮した。セグメント同士の接合面や中空セグメント下端には、接触や浮き上がり等を考慮するためインターフェース要素を設けた（表 4-1、図 4-1）。

表 4-1 解析に用いる要素

項目	要素
PC ウェル基礎	ソリッド要素
鉄筋	モデル化しない
PC 鋼棒	梁要素
セグメント接合面	(面) インターフェース要素
PC 鋼棒とコンクリート間	(線) インターフェース要素
荷重載荷用線材	梁要素 (剛)
平面保持用線材	梁要素 (剛)

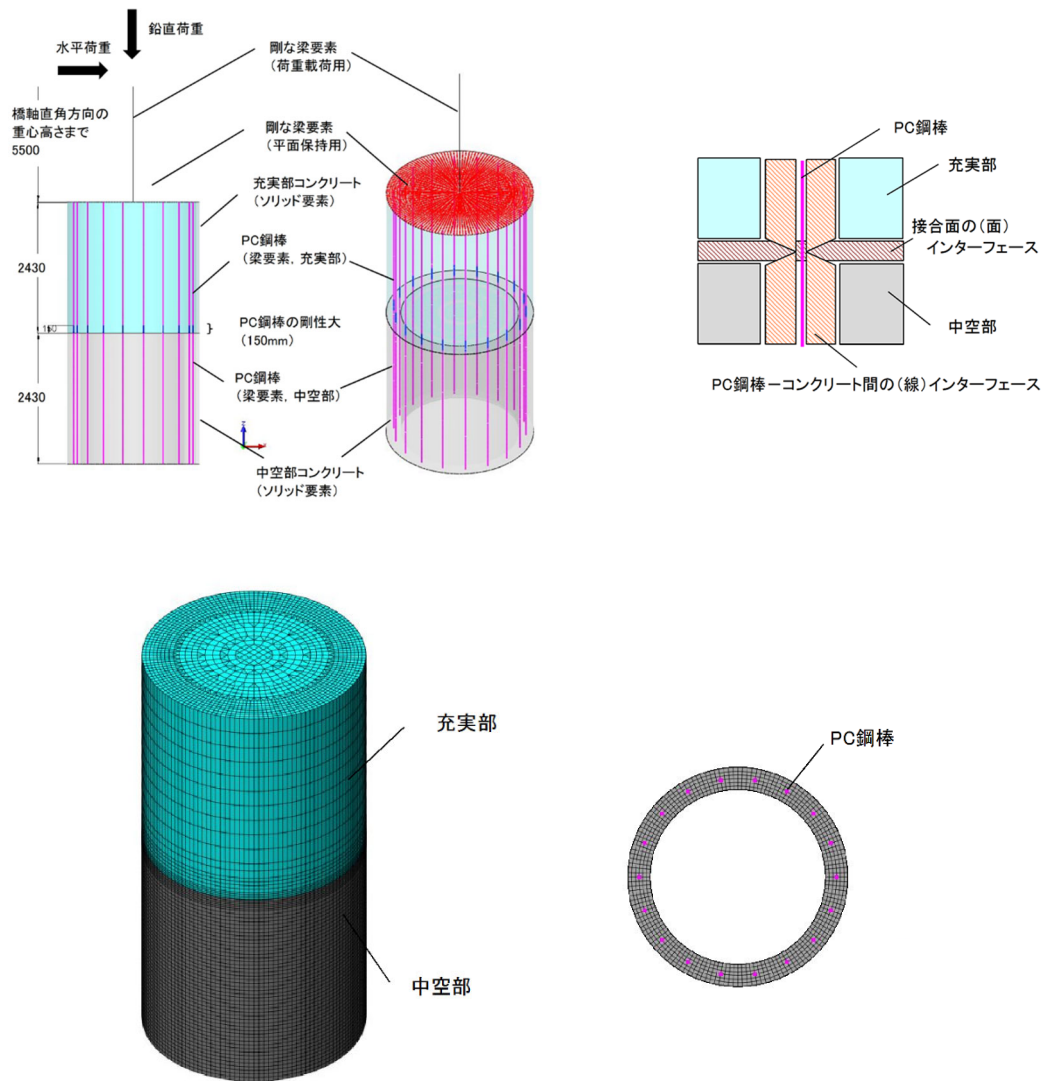


図 4-1 モデルイメージ

2) 荷重条件

作用する荷重は、上部構造と橋脚梁部の死荷重、水平荷重とした。上部構造及び橋脚梁部の死荷重は、既往の復旧設計報告書より、上部構造：7200kN (1 支承あたり約 1800kN)、橋脚梁部：2229.5kN とし、水平荷重は 3.3. (1) 2) の荷重条件と同様に上部構造の重心位置に漸増载荷した。

3) 検証ケース

PC 鋼棒の破断過程の検証は、3.1 に示した PC 鋼棒のモデル化と同様の健全、劣化 1 と劣化 2 の場合の 3 ケースを対象に行った (表 4-2)。

表 4-2 PC 鋼棒破断過程の検証ケース

ケース	劣化状況	概要
ケース1	健全	<ul style="list-style-type: none"> 降伏強度は通常、破断伸びは通常 (5%ひずみ) PC鋼棒-コンクリート間の付着あり
ケース2	劣化1	<ul style="list-style-type: none"> 降伏強度を25%低下、降伏後すぐに破断 (脆化) PC鋼棒-コンクリート間の付着あり
ケース3	劣化2	<ul style="list-style-type: none"> 降伏強度を25%低下、降伏後すぐに破断 (脆化) PC鋼棒-コンクリート間の付着なし

(3) 検証結果

着目接合部位置に生じる曲げモーメントと水平変位関係を以下に示す (図 3-10~3-12)。解析時の応力コンター図は、巻末の参考資料Ⅱに示す。

1) ケース 1 : 健全

3.3 (5) で得られた応答震度より、着目接合部に生じる曲げモーメント $M=15,110\text{kNm}$ が作用した時点において、PC 鋼棒は降伏していない。図 4-2 に示すとおり、接合部の PC 鋼棒の終局曲げモーメントとセグメント本体の終局モーメント $M_u=23,370\text{kNm}$ を比較すると、セグメント本体の終局モーメントの方が小さい結果となった。

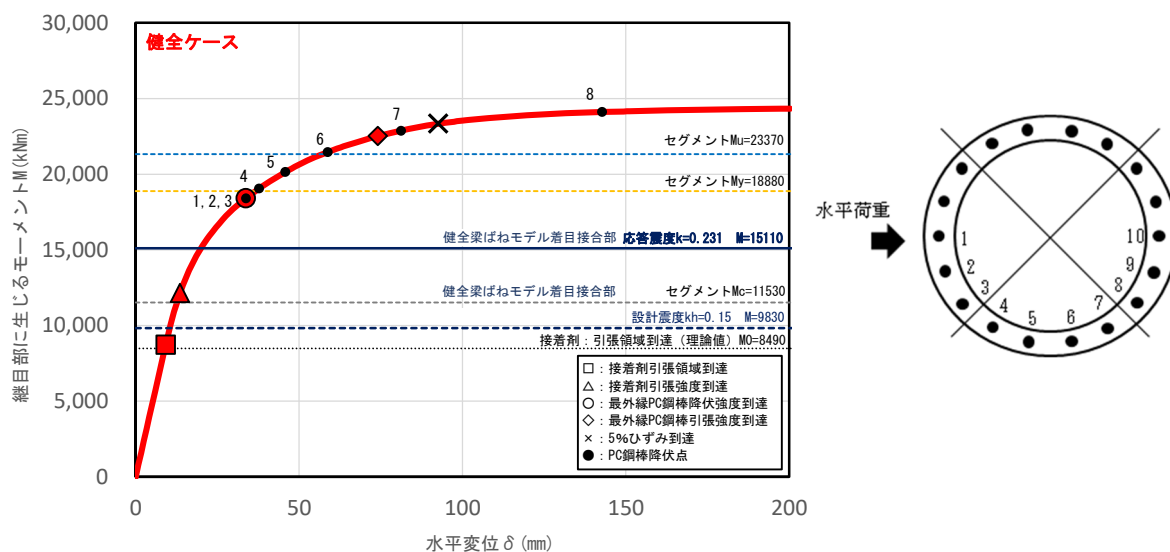


図 4-2 着目継目部に生じるモーメントと水平変位関係 (ケース 1 : 健全)

2) ケース 2 : 劣化 1

3.3 (5) で得られた応答震度より、着目接合部に生じる曲げモーメント $M=15,110\text{kNm}$ が作用した時点において、荷重作用方向から 4 列目までの PC 鋼棒が降伏し破断に至ることを確認した。図 4-3 に示すとおり、接合部のほとんどの PC 鋼棒は、セグメント本体の初期降伏モーメント $M_y=18,880\text{kNm}$ を超える前に破断する結果となった。

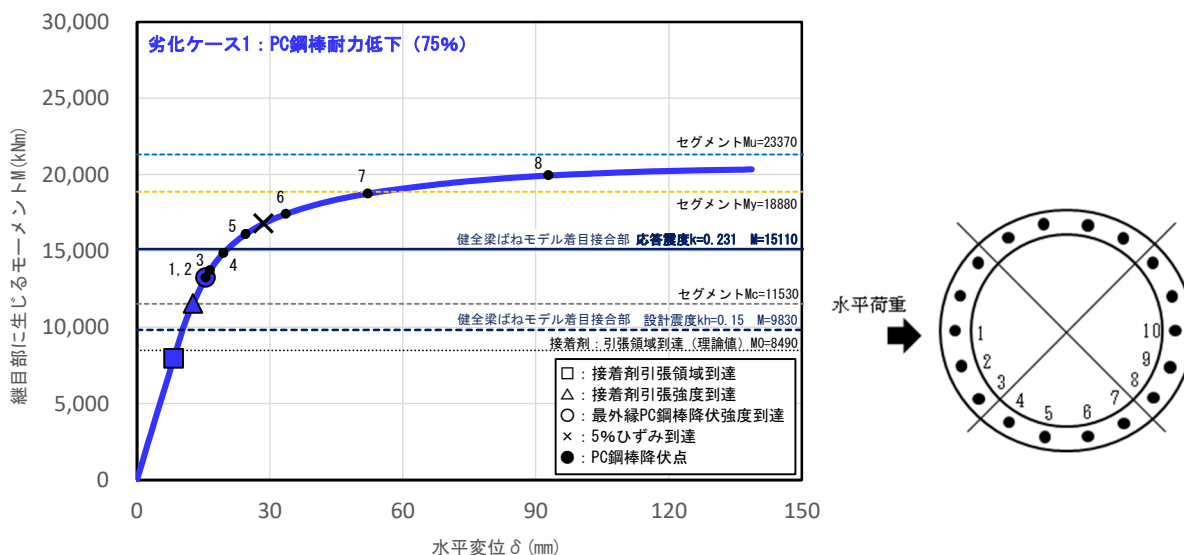


図 4-3 着目継目部に生じるモーメントと水平変位関係 (ケース 2 : 劣化 1)

3) ケース 3 : 劣化 2

3.3 (5) で得られた応答震度より、着目接合部に生じるモーメント $M=15,110\text{kNm}$ よりも低い曲げモーメントにより、接合部の全ての PC 鋼棒が降伏し破断に至ることを確認した。図 4-4 に示すとおり、PC 鋼棒はセグメント本体のひび割れモーメント $M_y=11,530\text{kNm}$ を超える前に破断が始まり、ケース 2 と比べて極端に PC 鋼棒の降伏が早く生じる結果となった。

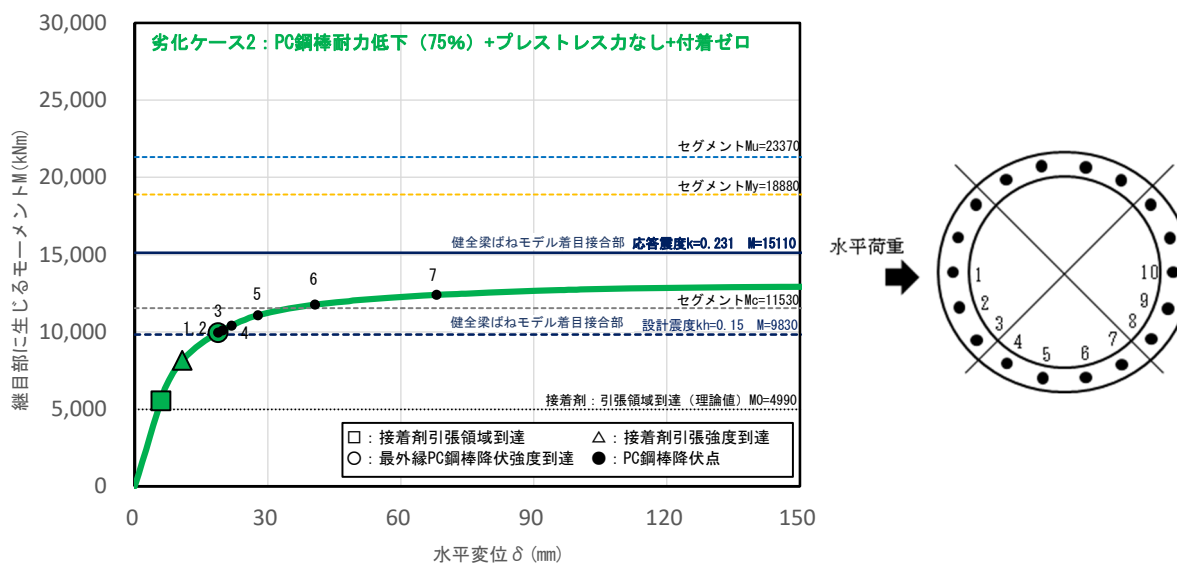


図 4-4 着目継目部に生じるモーメントと水平変位関係 (ケース 3 劣化 2)

PC 鋼棒が健全なケースでは、接合部の PC 鋼棒は破断しないことを確認した。一方、接合部の PC 鋼棒の劣化を仮定したケースでは、接合部の PC 鋼棒が破断しセグメント本体より先に破壊が生じる可能性があることが確認できた。

4.2 PC 鋼棒破断後の破壊形態の検証

(1) 検証方法

PC 鋼棒破断後の破壊形態の検証方法は、2.2 に示した現地の被災状況より、上段の充実セグメントと下段の中空セグメントが分離し相対変位が生じ、下段の中空セグメント内面に点接触したことにより、基礎の破壊に影響したと仮定した（図 4-5）。

PC 鋼棒破断後に上部セグメントが下部の中空セグメントに点接触することにより破壊が始まる過程とし基礎のモデル化を行い、点接触する点に強制変位を漸増载荷させる解析により実施した。

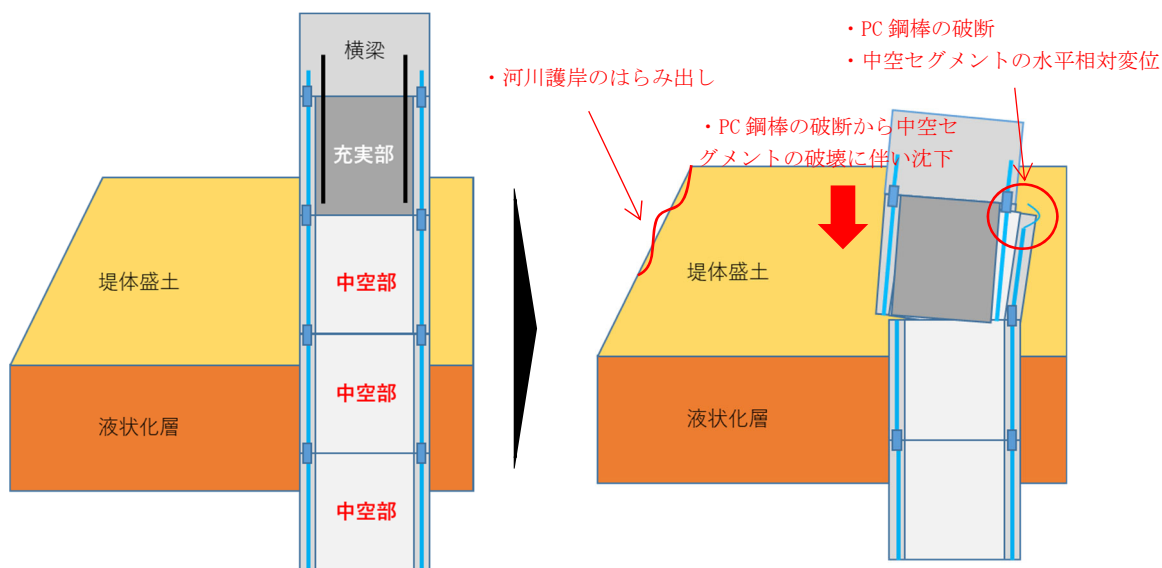


図 4-5 破壊形態イメージ（仮定）

(2) 解析条件

1) 基礎のモデル化

基礎のモデル化は、破壊した中空セグメントと下段の中空セグメントの 2 つのセグメントを抽出しモデル化を行った。下段の中空セグメントをモデル化したのは、破壊した中空セグメントのみをモデル化した場合に下面の変形が拘束され、実際の変形モードと異なる結果とならないようにするためである。セグメントのコンクリートはソリッド要素で、PC 鋼棒は梁要素とする。PC 鋼棒破断後の破壊形態の再現を行うため、PC 鋼棒の継手部の剛性やセグメント同士の付着は考慮しないこととした（表 4-3、図 4-6）。

表 4-3 解析に用いる要素

項目	要素
PC ウェル基礎	ソリッド要素
鉄筋	埋込鉄筋要素
PC 鋼棒	梁要素
PC 鋼棒とコンクリート間	考慮しない

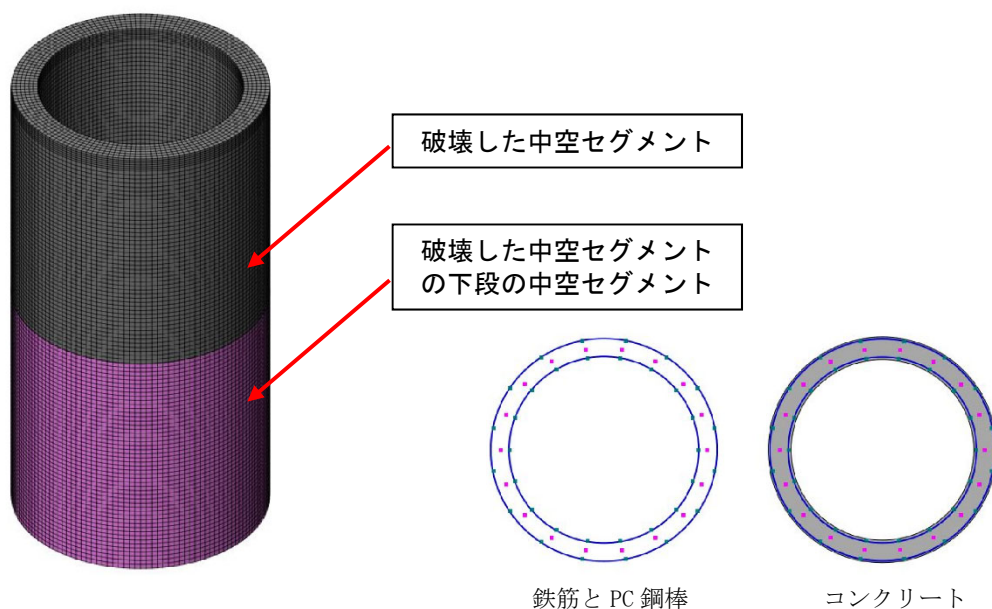


図 4-6 モデル化イメージ

2) 荷重条件

4.2 (1) で推定した破壊過程を踏まえ、中空セグメント内面の2点に、破壊過程のセグメントの傾きを高さ方向に 3° 、载荷する2点の位置は水平方向に中心線から 41.5° と仮定し、強制変位を漸増的に与えた(図4-7)。なお、これらの载荷角度は、2.1で示したP3橋脚の構造図や2.2で示した被災状況を踏まえて仮定した。

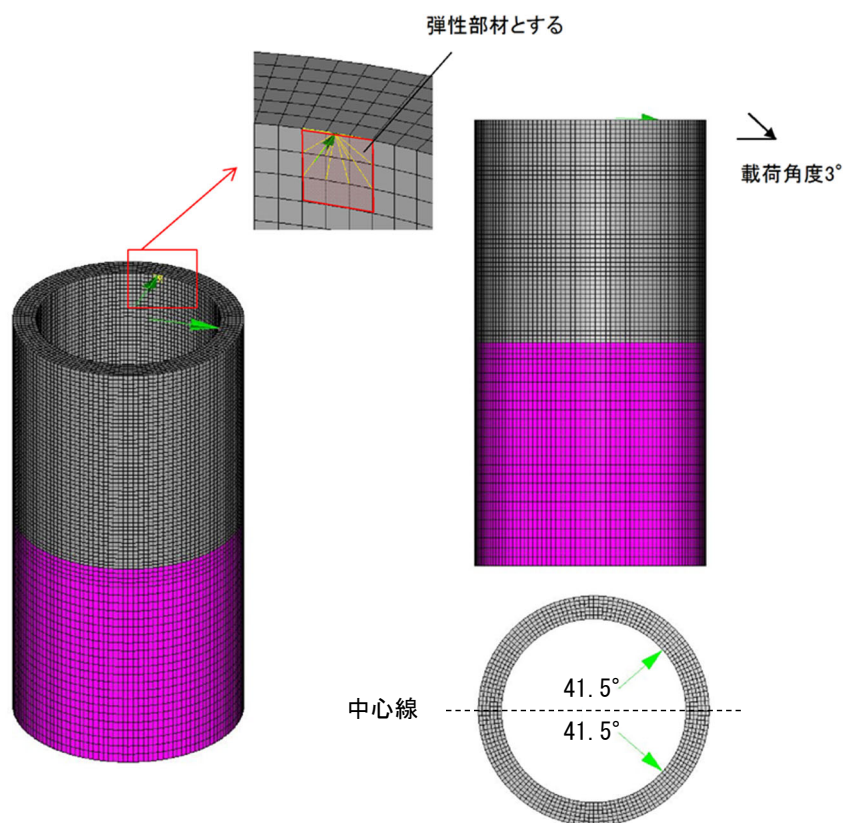


図4-7 荷重载荷図

(3) 検証結果

中空セグメントに作用する水平合力と水平変位関係図を図 4-8 に、解析時の最大主応力及び変形図を図 4-9 に示す。本来作用する可能性のある上部構造や橋脚梁部の荷重 (4913kN) に対し、中空セグメントは、内面からのわずか 175kN の外力の作用によって、0.793mm と小さい変形量で局所的に引張破壊されたため、それ以上荷重が伝達されなくなった。なお、解析時の応力コンター図は、巻末の参考資料Ⅲに示す。

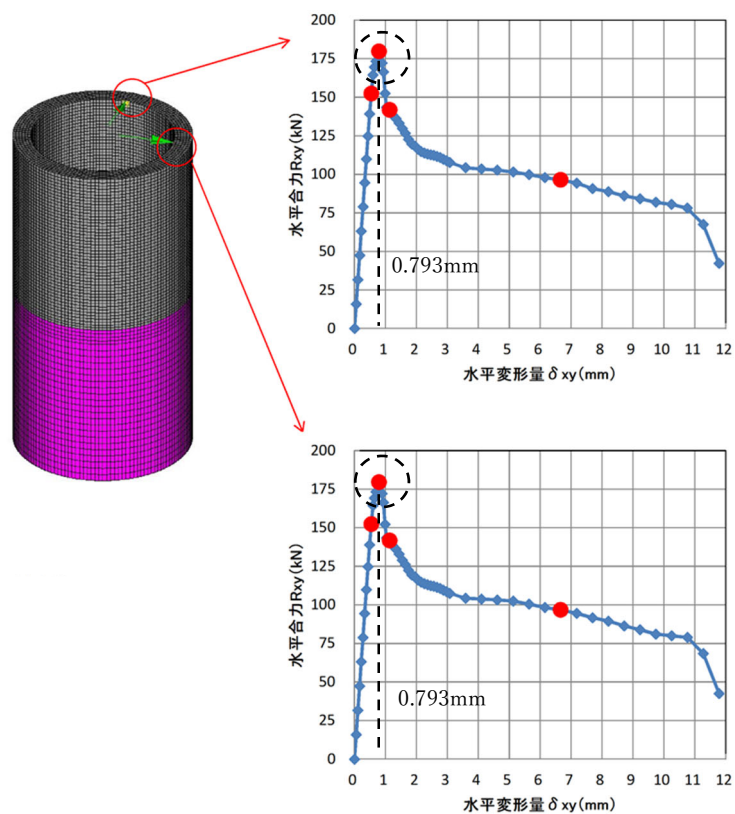


図 4-8 水平合力と水平変位関係図

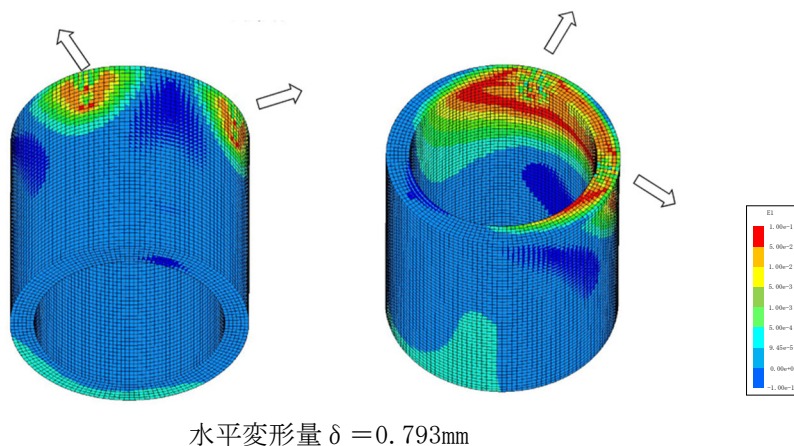


図 4-9 最大主応力（引張）及び変形図

4.1 で示した PC 鋼棒の破断過程と破断後の破壊形態の検証結果から、上部セグメントと中空セグメントに相対変位が生じ、上部セグメントの外面が中空セグメントの内面に接触し円周方向に引張力が働くような状態を仮定した場合、中空セグメントにひび割れが生じ上部セグメントの荷重を負担できなくなり破壊する可能性があることを確認した。