

論文 鋼棒ストッパーの縁端距離が桁座・桁端の破壊性状に与える影響

室内 悠吾*1・田畑 勝幸*2・轟 俊太郎*3・田所 敏弥*3

要旨：過去の地震では、鋼棒ストッパーを有する鉄道コンクリート橋りょうの支承部において、桁端の桁遊間側のストッパー埋込み部のコンクリートが損傷した場合、修復に時間を要した。本研究では、ストッパーの縁端距離を同一とした桁端と桁座を模擬した実大実験から、桁端と桁座の損傷順序を主に検討した。また、桁端の桁遊間側のストッパーの縁端距離を変数とした FEM から、縁端距離が損傷に与える影響を検討した。その結果、桁端と桁座でストッパーの縁端距離を同一とした場合、桁端の損傷が先行した。また、桁端の桁遊間側のストッパーの縁端距離を増加させた場合、耐力は変化しないものの、桁端の損傷が低減された。

キーワード：鉄道橋りょう、桁座、桁端、鋼棒ストッパー、縁端距離、ストッパー埋込み部のコンクリート

1. はじめに

鋼棒ストッパーは、鉄道コンクリート橋りょうの支承部において、主に桁長 15m 程度以下の桁で移動制限装置および落橋防止装置として用いられる。熊本地震等の地震において、鋼棒ストッパー埋込み部のコンクリートにせん断によるひび割れやはく離等の損傷が生じた¹⁾。桁座および桁端の桁中央側に損傷が生じた場合には、検査や修復が比較的容易であるが、桁端の桁遊間側に損傷が生じた場合には、検査や修復が困難である。

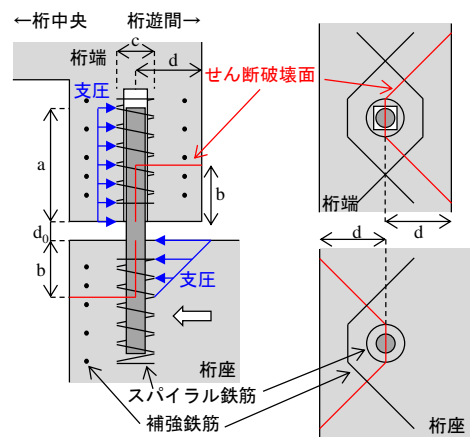
設計²⁾ではストッパー本体の照査は曲げ破壊、せん断破壊について、ストッパー周辺の桁座・桁端の照査はコンクリートの支圧破壊、せん断破壊、補強鉄筋の降伏について各耐力を算定して行う。ストッパー周辺の桁座・桁端の照査は、柱のように復旧性を考慮して設定した各損傷レベルを限界値とする設計ではなく、いわゆる耐力設計である。そのため、桁座・桁端が破壊に至るまでの損傷順序は必ずしも明らかではない。それらの損傷メカニズムが明らかとなれば、桁座・桁端のストッパーの縁端距離等に差を設けることにより、桁端の桁遊間側に生じるストッパー埋込み部のコンクリートの損傷を制御できれば修復性を向上することができると考えられる。

本研究では、ストッパーの縁端距離を同一とした桁端および桁座を模擬した実大実験を行い、繰返し载荷を実施することで、ストッパーの縁端距離を同一とした場合のストッパーおよび桁座・桁端のストッパー埋込み部のコンクリートの損傷順序等の破壊性状について検討した。また、桁端の桁遊間側に生じるストッパー埋込み部の損傷を制御することを目的として、桁端の桁遊間側のストッパーの縁端距離をパラメータとした FEM から、ストッパーの縁端距離が破壊性状に与える影響を検討した。

2. 鋼棒ストッパー周辺の桁座・桁端の設計

図-1 に支圧応力分布とせん断破壊面を示す。設計²⁾では、鋼棒ストッパー埋込み部のコンクリートの破壊に関する照査において、ストッパーの埋込み部に生じる支圧応力分布を仮定する。桁端の埋込み部では、図-1 に示すように、埋込み部のコンクリートの支圧応力を等分布としている。一方、桁座の埋込み部では、支圧応力が桁座上面に集中することから³⁾、支圧応力の鉛直方向の分布長を鋼棒直径の3倍とした三角形分布としている。

鋼棒ストッパー埋込み部のコンクリートのせん断破壊に関する照査においては、せん断破壊面を仮定する。図-1 に示すように、せん断破壊面は桁端、桁座ともに上面における鋼棒ストッパー端から 45° で想定する破壊線と鋼棒直径の3倍の位置から縁端までの破壊線とから成る3次元の破壊面としている。



a: 鋼棒ストッパーの埋込み長, b: 支圧応力度の鉛直方向の分布長, c: スパイラル鉄筋の外径, d: 縁端距離

図-1 支圧応力分布とせん断破壊面

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士(工学) (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士(工学) (正会員)

3. 実験概要

図-2 に供試体の寸法, 配筋を, 表-1 に材料試験結果を, 表-2 に材料試験結果を用いて算出した各限界値に対する水平耐力の算定値を示す。

供試体は, 桁端と桁座の損傷順序を把握するため, 桁端と桁座を模擬した。桁端は, スパン 10m の単純 T 形桁のスパン端部を模しており, 端横桁, 主桁, スラブを模擬した。また, 桁座は, ラーメン高架橋の桁受部を模擬した。桁座, 桁端, ストッパーの諸元は, 実橋の標準的な仕様を参考に設定している。鋼棒ストッパー径は $\phi=100\text{mm}$, 埋込み長は $a=600\text{mm}$ とした。ストッパーの縁端距離 (ストッパーの中心から桁座・桁端縁端までの距離) は, 実橋りょうにおいては, 桁座よりも桁端における方がストッパーの縁端距離が長く, 桁座と桁端のストッパーの縁端距離が同一とは限らないが, ここでは, ストッパーの縁端距離以外が桁座と桁端の損傷順序に与える影響に着目するため, 桁座, 桁端共に $d=350\text{mm}$ と

同一とした。ストッパーは, 桁座に埋め込み, ストッパーを取り囲むように $c=200\text{mm}$ とした D13 のスパイラル鉄筋を配置した。桁端には, 鋼棒を差し込むための角型さや管 (鋼板厚さ 4.5mm, 内径 101mm) を埋設し, $c=220\text{mm}$ とした D13 のスパイラル鉄筋を配置した。

写真-1 に, 載荷状況を示す。桁端を PC 鋼棒で反力床に固定すると共に, スタブを設け, 主桁およびスタブ上にスライド支承を設置して, 支承上に桁座を設置した。桁端および桁座の遊間は, $d_0=100\text{mm}$ とした。そして, 桁座に PC 鋼棒と載荷板を介して水平ジャッキ 2 機を取り付け, さらに鉛直ジャッキ 1 機を取り付けた。載荷方法は, 鉛直ジャッキで桁長 10m の自重 1/2 相当の鉛直力 600kN を導入した後, 変位制御による正負交番載荷とした。各変位の繰返し回数は 1 回とし, 各ステップの変位は 3mm, 6mm, 9mm, 12mm, 15mm, 30mm, 50mm とした。

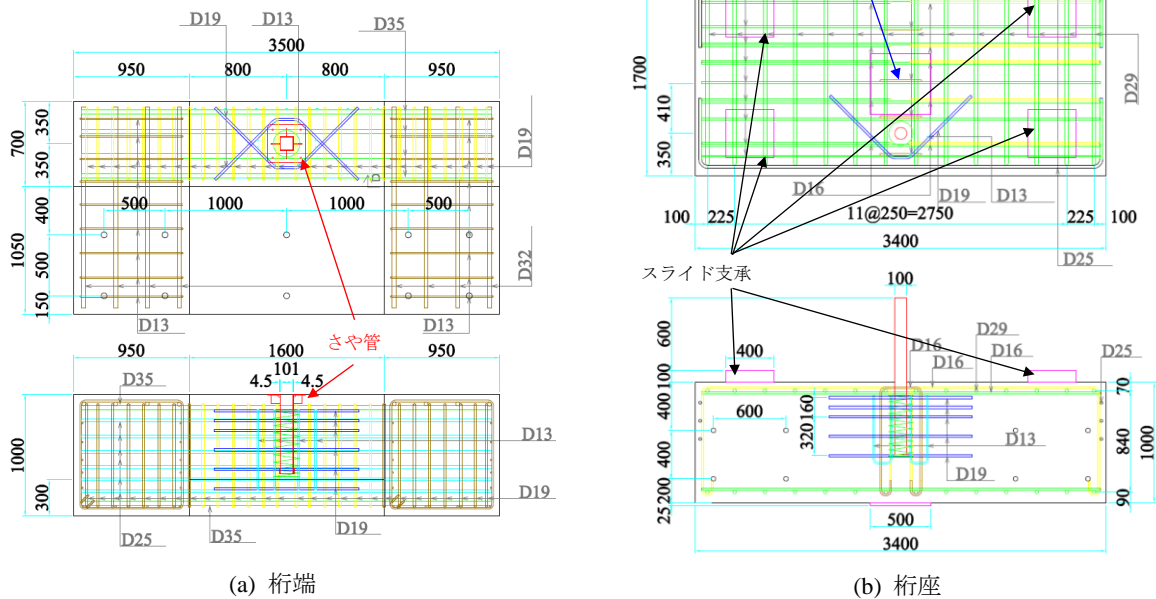


図-2 供試体寸法, 配筋 (単位: mm)

表-1 材料試験結果

	コンクリート			引張鉄筋		補強鉄筋・端横桁帯鉄筋			
	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	鉄筋径	降伏強度 f_y (N/mm ²)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)	鉄筋径	降伏強度 f_y (N/mm ²)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)
桁端	50.9	3.59	26.7	D25	389	192	D19	364	193
桁座	48.9	3.37	28.6	D25	389	192	D19	364	193

表-2 耐力算定値

鋼棒ストッパー本体			桁端埋め込み部			桁座埋め込み部		
曲げ 降伏 H_{my} (kN)	曲げ 全塑性 H_{my} (kN)	せん断 H_v (kN)	コンクリート 支圧 H_{s1} (kN)	コンクリート せん断 H_{sp1} (kN)	補強鉄筋 降伏 H_{sy1} (kN)	コンクリート 支圧 H_{s2} (kN)	コンクリート せん断 H_{sp2} (kN)	補強鉄筋 降伏 H_{sy2} (kN)
386	656	1335	6226	1691	417	1415	1872	625

4. ストッパーの縁端距離を同一とした場合の破壊性状

図-3 に荷重-変位関係、各損傷の発生やストッパーの降伏の過程を、写真-2 および写真-3 に荷重終了後の損傷状況を示す。なお、水平荷重は水平ジャッキの合計値とし、水平変位は桁座の変位の平均値とした。また、ストッパーの降伏は、ストッパーの縁引張りひずみから判定した。

+3mm 荷重時に、桁端の桁中央側の上面にさや管から 45 度方向のひび割れが確認された。それと同変位の負側 -3mm 荷重時に、桁端の桁遊間側の上面に同様のひび割れが確認された。その後、-9mm 荷重時に、桁座の桁中央側の下面にストッパーから 45 度方向のひび割れが確認された。また、+12mm、-12mm 荷重時に、+3mm、-3mm 荷重時に桁端の上面に生じた 45 度方向のひび割れがこれもまた同じ変位で側面に進展した。さらに、そのひび割れが進展して、桁端の桁遊間側、桁中央側共に、+30mm、-30mm 荷重時に、同じ変位で端横桁の帯鉄筋に沿うように、コンクリートが剥落した。本実験では荷重終了後も、桁座においては、コンクリートの剥落は生じなかった。なお、桁端、桁座に配置したいずれの鉄筋も降伏することはなかった。

図-4 に、ストッパーのひずみ分布を示す。鋼棒は、+6mm 荷重時および-6mm 荷重時に桁座を模擬した供試体内部において降伏ひずみに達した。桁端を模擬した供試体内部においては、+12mm 荷重時および-12mm 荷重時に降伏ひずみに達した。

本実験では、桁座および桁端の端横桁の他、主桁、スラブまで模擬したため、荷重方向の正負で、桁端の桁遊間側と桁座の桁中央側において損傷が異なることも考えられたが、ひび割れの発生・進展、ストッパーのひずみ分布から、正負荷重の影響は小さいと考えられる。本実験から、桁端、桁座全てのストッパーの縁端距離を同一とした場合、桁座よりも先に桁端の桁中央側と桁端の桁遊間側に同じように損傷が発生・進展することがわかった。なお、コンクリートが剥落したものの、剥落の領域は、かぶり部分のみであり、設計におけるコンクリート

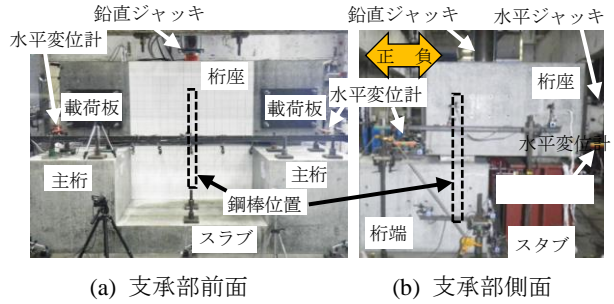


写真-1 荷重状況

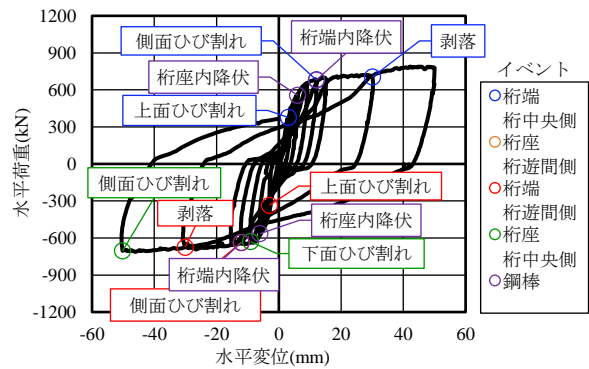


図-3 荷重-変位関係

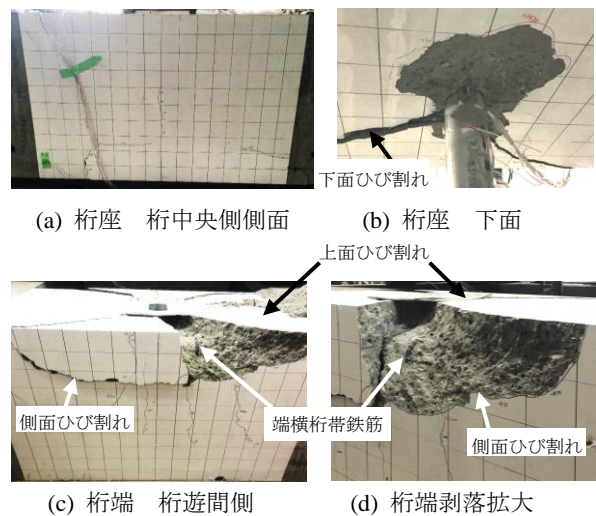


写真-2 損傷状況

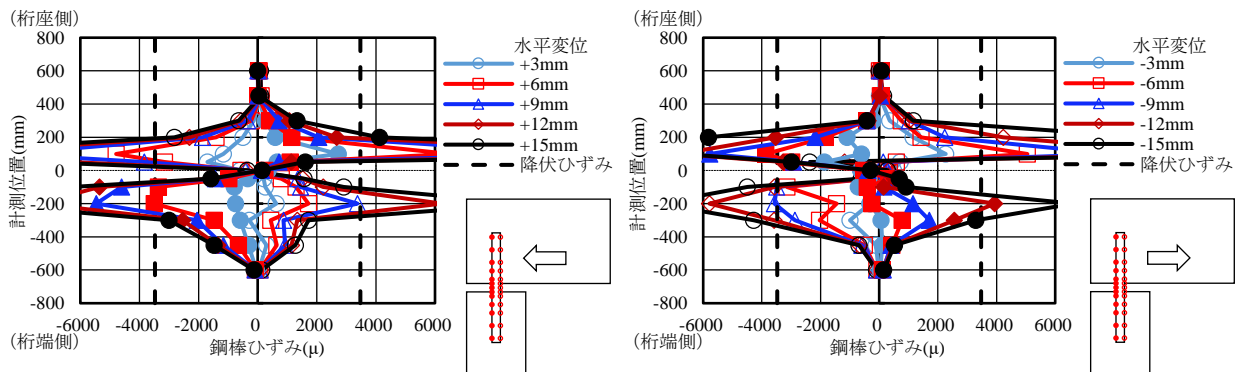


図-4 鋼棒ストッパーのひずみ分布

のせん断破壊面と比べて、その破壊領域は小さい。また、コンクリートの剥落後も荷重低下することなく、スパイラル鉄筋や補強鉄筋も降伏しなかったため、鉄筋内部のコンクリートは比較的健全な状態であった。そのため、コンクリートの剥落が構造的に及ぼす影響は小さいと考えられるが、桁端の桁遊間側に生じた場合には修復は容易ではない。

5. 解析概要

実験において、かぶりコンクリートが剥落したが、スパイラル鉄筋や補強鉄筋は降伏しなかった。そこで、かぶりコンクリートの剥落に繋がるひび割れの発生・進展を抑制して、修復性を向上させるため、本論では、桁端の桁遊間側の縁端距離に着目し、縁端距離を変数とした FEM を実施して、縁端距離が桁端の桁遊間側の損傷に与える影響を検討した。なお、解析には汎用の構造解析システムである DIANA(ver.10.3)を用いた。

図-5 に解析モデルを、表-3 に解析ケースを示す。図-6 にコンクリート、補強鉄筋および鋼棒の材料構成則を、図-7 にインターフェースの構成則を示す。

解析モデルは、供試体中央を対称とした 3 次元 1/2 モデルである。桁端の下面を全方向固定とし、荷重板位置の全節点に水平変位を与えた。

解析ケースは、Case A~Case E である。Case A は実験と同じ諸元で正負交番荷重したケースであり、Case B と Case C は実験と同じ諸元で片側一方向荷重としたケースである。そして、Case D (図-8)、Case E (図-9) が桁端の桁遊間側のストッパーの縁端距離を Case C の 350mm から 450mm、550mm としたケースである。Case D、Case E の鉄筋量は Case C と同じでありストッパーの縁端距離のみを変更した。荷重方向の正方向が桁端の桁中央側が損傷する方向、負方向が桁端の桁遊間側が損傷する方向である。

コンクリートの引張強度および引張破壊エネルギーは鉄道標準²⁾、圧縮破壊エネルギーは既往の研究⁴⁾により、それぞれコンクリートの圧縮強度をもとに算出した。ひび割れモデルは固定ひび割れ、ひび割れ後のせん断剛性の低減係数はひび割れ直交方向のひずみに応じてせん断剛性を低減する Al-Mahaidi モデル⁵⁾を用いた。鉄筋は、バイリニアとした。鉄筋とコンクリートの付着は、完全付着である。各モデルに使用した材料特性値は、表-2 に示す値とした。スライド支承の設置部には面インターフェースを配置し、法線方向の圧縮のみ剛とするノーテンションモデルとした。また、鋼棒と桁座コンクリートとの接触部およびさや管と桁端コンクリートとの接触部は、面インターフェースを配置し、クーロン摩擦モデルを用いた。さや管と鋼棒との接触部は線インターフェースと

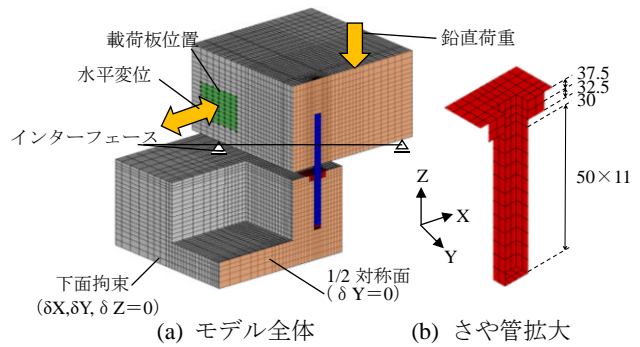


図-5 解析モデル

表-3 解析ケース (単位: mm)

Case	水平変位 荷重方向	鋼棒中心からの縁端距離			損傷箇所	
		桁座	桁中央側	桁遊間側	桁座	桁端
A	正負交番	350	350	350	桁中央側	両側
B	正方向	350	350	350	なし	桁中央側
C	負方向	350	350	350	桁中央側	桁遊間側
D	負方向	350	350	450	桁中央側	桁遊間側
E	負方向	350	350	550	桁中央側	桁遊間側

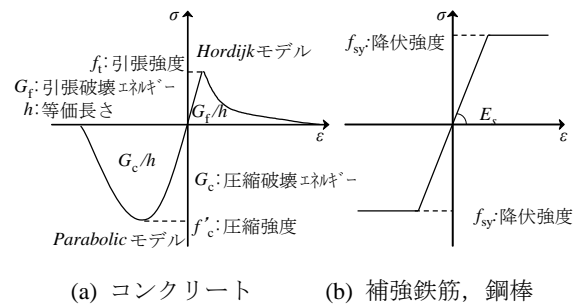


図-6 材料構成則

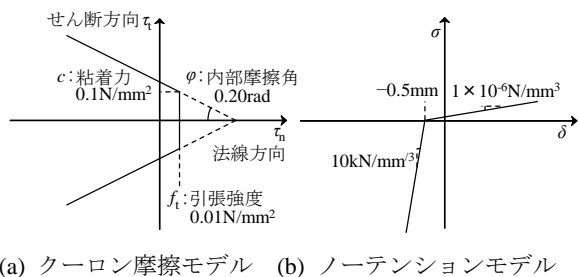


図-7 インターフェースの構成則

し、さや管と鋼棒との遊間 0.5mm を超過後に法線方向の圧縮のみ剛とするノーテンションモデルとした。

荷重は、桁自重を想定した鉛直力を荷重後、Case A では水平変位の正負交番荷重を、Case B, C, D, E では水平変位を単調増加させた。

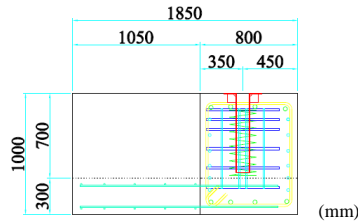


図-8 モデル図 (Case D)

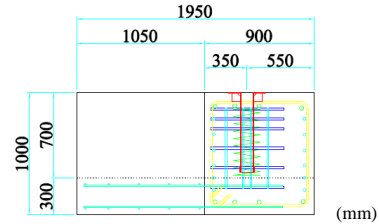


図-9 モデル図 (Case E)

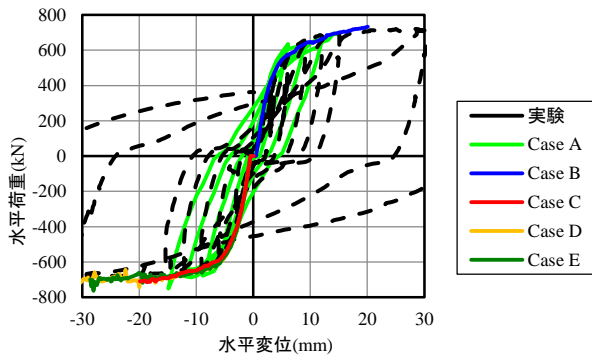
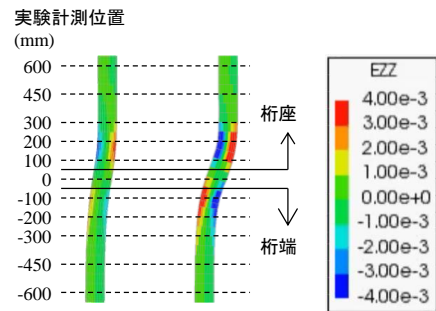
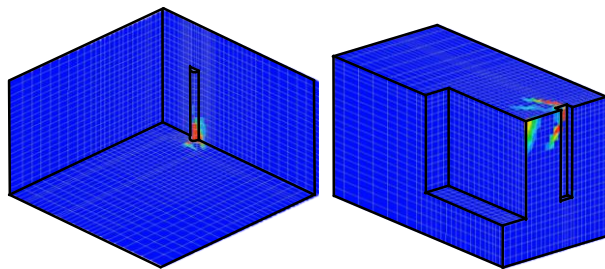


図-10 荷重—変位関係



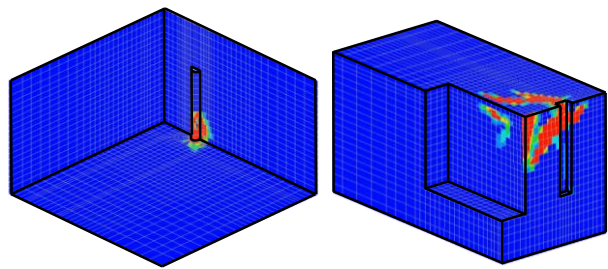
(a) 荷重変位-6mm (b) 荷重変位-12mm

図-11 鋼棒ひずみ (Case C)



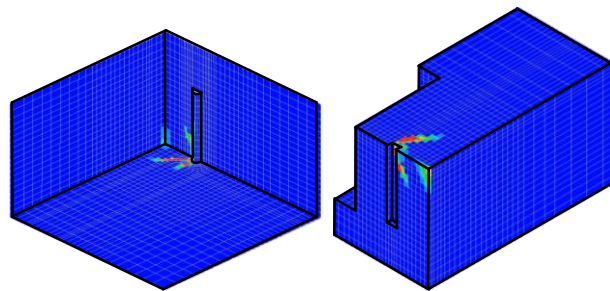
(a) 桁座 (b) 桁端

図-12 最大主ひずみ (Case B 荷重変位+3mm)



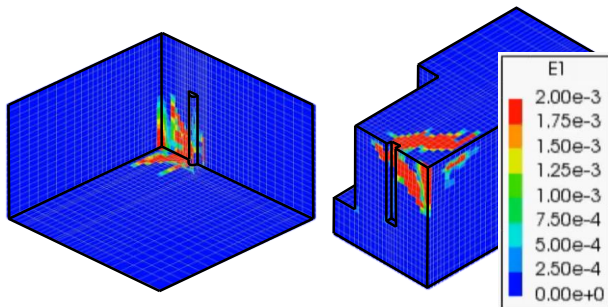
(a) 桁座 (b) 桁端

図-13 最大主ひずみ (Case B 荷重変位+12mm)



(a) 桁座 (b) 桁端

図-14 最大主ひずみ (Case C 荷重変位-3mm)



(a) 桁座 (b) 桁端

図-15 最大主ひずみ (Case C 荷重変位-12mm)

6. ストッパーの縁端距離が破壊性状に与える影響

図-10に荷重—変位関係を、図-11にCase Cの鋼棒のひずみ分布を、図-12～15に桁端および桁座の最大主ひずみ分布を示す。Case B および Case C の荷重—変位関係は概ね実験の包絡線と一致した。Case A の荷重—変位関係は除荷勾配が実験と異なるものの、包絡線は実験結果と一致しているため、繰返しの影響は小さいと考えられる。そのため、片側一方向荷重とした Case B と Case

C を用いて、実験時の正側、負側の損傷過程の再現性を確認する。同変位時の最大主ひずみを比べると、3mm 時 (図-12, 図-14) に、桁端の桁中央側、桁遊間側でほぼ同様に、桁端の上面にストッパー端から 45 度方向に最大主ひずみが卓越する。12mm 時の最大主ひずみ (図-13, 図-15) をみても桁端の桁中央側、桁遊間側でほぼ同様であり、桁端の上面に近い位置で最大主ひずみが卓越しており、かぶりコンクリートの剥落を示すような

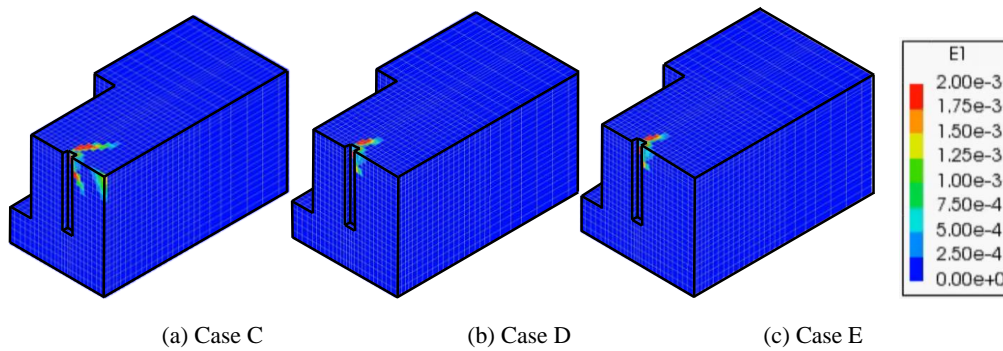


図-16 最大主ひずみ (载荷変位-3mm)

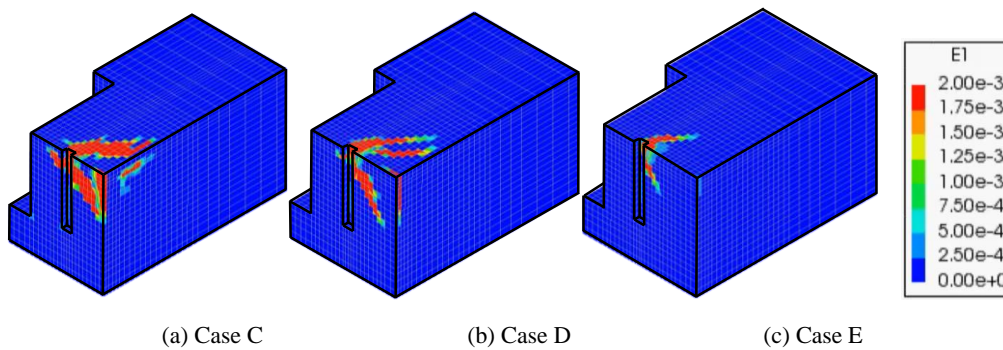


図-17 最大主ひずみ (载荷変位-12mm)

最大主ひずみが生じている。鋼棒のひずみは、Case B と Case C とともに、 $\pm 6\text{mm}$ 载荷時に桁座内で降伏した後、 12mm 载荷時に桁端内で降伏ひずみに達していた。このように、解析モデルは、実験の損傷過程を再現できている。

図-16、図-17 に桁端の最大主ひずみ分布を示す。なお、さや管の支圧応力分布は、さや管-桁端間の桁遊間側のインターフェース要素の応力を高さごとに平均した。縁端距離が増加するにつれて桁端前面における最大主ひずみが卓越しなくなることから、荷重-変位関係に差は見られなかったものの、桁遊間側の損傷が低減されている。

7. まとめ

ストッパーの縁端距離を同一とした桁端および桁座を模擬した実大実験によりストッパーおよび桁座・桁端の損傷順序等の破壊性状について検討した。また、ストッパーの縁端距離をパラメータとした FEM によりストッパーの縁端距離が破壊性状に与える影響を検証した。本研究により得られた知見を以下に示す。

(1) 桁座と桁端の桁遊間側、桁端の桁中央側のストッパーの縁端距離を同一とすると、桁端の桁遊間側と桁中央側は変わらず、桁端の上面にストッパー端から斜めひび割れが発生し、その後、桁座の下面のひび割れが発生して、最終的に、桁端の上面のひび割れが側

面に進展して、ひび割れに囲まれたかぶりコンクリートが剥落に至る。

(2) ストッパーの縁端距離を増加させることにより、荷重-変位関係に差は見られなかったものの、ストッパー埋込み部のコンクリートの損傷を抑制できる可能性がある。

本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) 第13回新幹線脱線対策協議会 資料1 熊本地震による九州新幹線の被害状況について 参照：http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo07_hh_000101.html
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造，丸善，2004
- 3) 石橋忠良，吉野伸一：鋼棒ストッパーの設計，構造物設計資料，No.73，pp15-17，1983
- 4) Edited By P.Benson Shing, Tada-aki Tanabe : Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001
- 5) AL-MAHAIDI, R.S.H. : Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members. Tech.Rep. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1979