

論文 鋼棒ストッパー埋込み部の構造が地震時の破壊性状に与える影響

田畑 勝幸*1・轟 俊太郎*2・堂内 悠吾*3・田所 敏弥*4

要旨：過去の地震において、鉄道橋りょうに配置される鋼棒ストッパー埋込み部のコンクリートに斜めひび割れや局所的な圧縮破壊が生じた。本研究では、実大載荷試験およびFEM解析により、それらの損傷メカニズムおよび損傷を抑制する構造について検討した。その結果、修復性の観点から、かぶり部分のコンクリートに生じた斜めひび割れの抑制には鋼棒ストッパーから縁端までの距離である縁端距離を増やすこと、鋼棒ストッパー埋込み表層部に生じた局所的な圧縮破壊の抑制には鋼棒ストッパーの一部であるさや管につばを設けた構造とすることが有効であることを明らかにした。

キーワード：鉄道橋りょう, 鋼棒ストッパー, 損傷抑制, 鋼棒ストッパー埋込み部の構造, さや管

1. はじめに

図-1に鉄道橋りょうの支承部を示す。鋼棒ストッパーは、移動制限装置および落橋防止装置として桁長15m以下の桁で用いられ、端横桁(桁端)と橋脚(桁座)を連結するように埋込まれている。桁端にはさや管が配置され、さや管内のあきにより固定ストッパー、可動ストッパーの区別がなされる構造形式である。

過去の地震において、写真-1に示す斜めひび割れや局所的な圧縮破壊による損傷が生じた。これらの損傷は、高所作業車等を用いた狭隘箇所での検査や補修作業が必要となり、修復に時間を要する。そのため、これらの損傷メカニズムを明らかとし、損傷を抑制できれば修復性を向上することができると考えられる。

既往の研究¹⁾²⁾では、実大載荷試験やFEM解析により、斜めひび割れにより鋼棒ストッパー前面のかぶりコンクリートがはく落する損傷が鋼棒ストッパーの耐力に与える影響は小さいことや鋼棒ストッパー中心から桁座、桁端縁端までの距離(縁端距離)が同一の場合の損傷順序等を明らかとしている。しかし、これらの損傷を抑制する検討は少ない。

本研究では、実大載荷試験およびFEM解析により、桁端、桁座における損傷メカニズムを明らかとし、その損

傷メカニズムに基づき斜めひび割れや局所的な圧縮破壊を抑制する構造について検討した。

2. 実験および解析概要

(1) 実験概要

試験体の諸元を表-1に、材料試験結果を表-2に示す。No1試験体の寸法、配筋、さや管の構造を図-2に示す。試験体は、実大の桁端、桁座を模擬し、桁端は桁長10mの単純T型桁の端横桁を、桁座は、ラーメン高架橋の桁受け部を想定している。桁端と桁座の遊間100mmを確保するため、架台を設けスライド支承を設置した。載荷は、桁端を水平に維持するため、桁座、桁端の配置を実橋とは上下逆さとし、桁端を基部スタブ、桁座を加力スタブとして実施した。No1試験体は、鋼棒ストッパーの埋込み長は600mm、縁端距離は350mmとし、桁端、桁座ともにD19の補強鉄筋を配置している。No2試験体では、No1試験体から桁端の縁端距離を550mmとし、補強鉄筋を配置しない配筋とした。鋼棒ストッパーは桁座に埋込み、桁端には一般的に使用されているつばの有る角型さや管を配置し、鋼棒ストッパーとさや管の隙間は0.5mmとした。載荷状況を写真-2に示す。載荷は、水平ジャッキ2台と桁座の浮き上がり防止のための鉛直

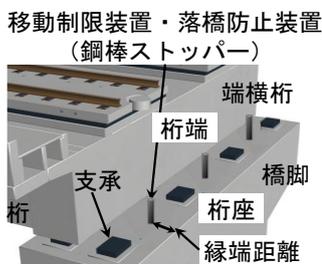


図-1 支承部の概要



写真-1 実桁に生じた損傷

*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 研究員 修(工) (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 主任研究員 博(工) (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 研究員 (正会員)

*4 (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 室長 博(工) (正会員)

ジャッキ1台で変位制御により行った。各変位の繰返し回数は1回とし、各ステップの変位は、No1試験体で、3、6、9、12、15、30、50mm、No2試験体で、3、6、9、12、15、20、25、30、40、50mmとした。鉛直力は、桁中央側のスライド支承周りのモーメントの釣合からNo1試験体では600kNとし、縁端距離を増加させたNo2試験体では、最大荷重が増加する可能性があったため800kNとした。計測項目は、荷重、水平変位、鋼棒ストッパー、鉄筋のひずみである。

(2) 解析概要

図-3に解析モデルを示す。解析モデルは、試験体中央を対象とした3次元1/2モデルである。桁端の下面を

全方向固定とし、載荷板の全節点に水平変位を与えた。表-3に解析ケースを示す。解析は、No1試験体をモデルとしたCase1、No2試験体をモデルとしたCase2、また、Case2を対象として、図-3(b)に示すつばの無いさや管形状としたものをCase3とした。

図-4にコンクリート、鋼棒ストッパー、鉄筋の材料構成則を示す。コンクリートの引張強度および引張破壊エネルギーは土木学会コンクリート標準示方(以下、示方書)、圧縮破壊エネルギーは既往の研究⁴⁾により、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および圧縮強度の低減係数はひび割れ直交方向のひずみに応じて低減

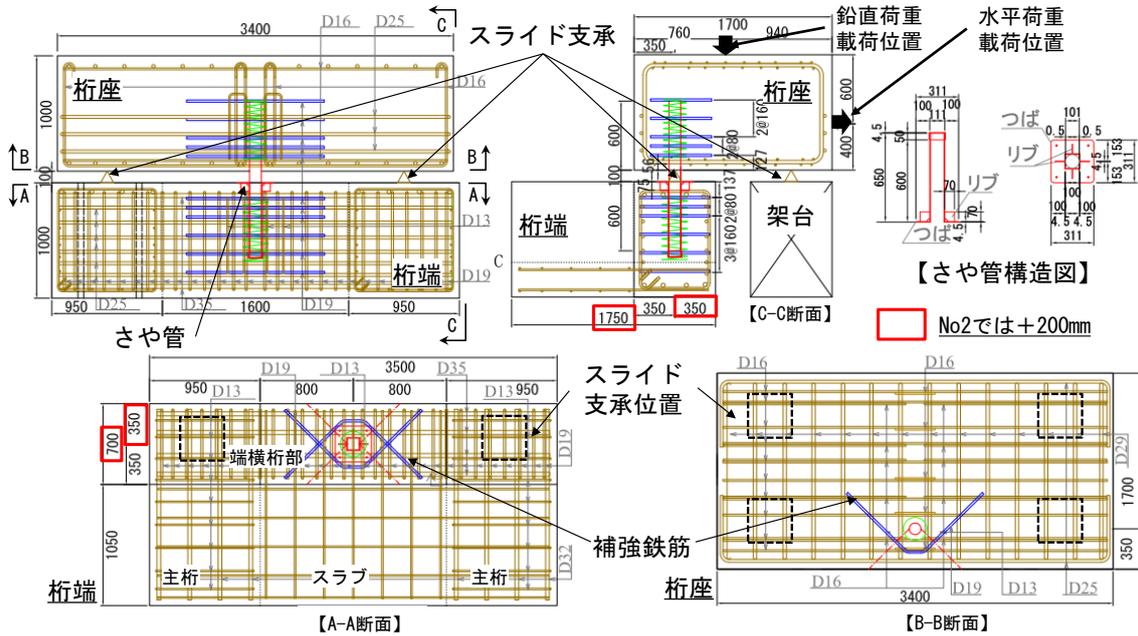


図-2 試験体寸法, 配筋図 (単位: mm)

表-1 試験体諸元

No	部位	鋼棒ストッパー (mm)	縁端距離 (mm)	埋込長 (mm)	補強鉄筋
1	桁端	100	350	600	SD345
	桁座				
2	桁端	100	550	600	-
	桁座		350		

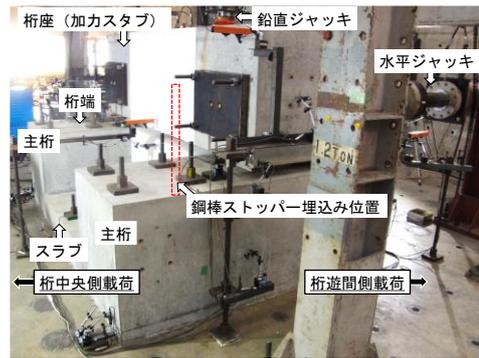


図-3 載荷状況

表-2 材料試験結果

No	部位	コンクリート		鋼棒ストッパー ^{*1} (SS400)		さや管 ^{*1} (SS400)		補強鉄筋: D19 (SD345)		軸方向鉄筋 (SD345)		せん断補強筋 (SD345)	
		f _c N/mm ²	E _c kN/mm ²	f _y N/mm ²	E _s kN/mm ²	f _y N/mm ²	E _s kN/mm ²	f _y N/mm ²	E _s kN/mm ²	桁端: D35		桁座: D19	
										f _y N/mm ²	E _s kN/mm ²	f _y N/mm ²	E _s kN/mm ²
1	桁端	47.2	26.9	293	200	281	205	364	193	384	197	364	193
	桁座	47.1	28.2			-	-			403	193	-	-
2	桁端	49.3	26.1	268	205	291	205	-	-	387	193	385	195
	桁座	48.1	25.3			-	-			385	190	-	-

*1: ミルシート, 0.2%オフセット

する Al-Mahaidi モデル⁵⁾および示方書のモデルを用いた。また、ひび割れが生じたコンクリート要素では、ひび割れ後のポアソン比の減少を Selby and Vecchio モデル⁶⁾を用いて考慮し、三軸応力下でのコンクリートの圧縮強度の増加は、Hsieh-Ting-Chen 破壊曲面⁷⁾を用いて考慮した。鉄筋、鋼棒ストッパーはバイリニア、さや管は線形とした。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。

図-5 にインターフェースの構成則を示す。スライド支承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図-5 (a) に示すノーテンションモデルとした。鋼棒ストッパーとさや管との境界には線インターフェースを配置し、鋼棒ストッパーとさや管の間隙 0.5mm を考慮した法線方向の圧縮方向のみ剛とする図-5 (a) に示すノーテンションモデルとした。鋼棒ストッパーと桁座コンクリートとの境界およびさや管と桁端コンクリートとの境界は面インターフェースを配置し、図-5 (b) に示すクーロン摩擦モデルを用いた。鉛直力を導入後、変位を単調増加させた。なお、解析には汎用的な解析プログラムである DIANA(ver10.3)を用いた。

3. 損傷状況および損傷メカニズム

図-6 に No1 試験体の桁遊間側荷重の荷重-変位関係、損傷の発生過程を示す。図-7 に荷重試験終了後の試験体の損傷状況を示す。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。鋼棒ストッパーの降伏は、縁引張ひずみから判定した。

No1 試験体の損傷は、3mm 荷重時に桁端の桁遊間側の上面にさや管から 45 度方向の斜めひび割れが確認された。また、12mm 荷重時に桁端の上面に生じた 45 度方向の斜めひび割れが側面に進展し、30mm 荷重時に端横桁のせん断補強鉄筋に沿うようにかぶり部分のコンクリートがはく落した。桁座は、6mm 荷重時に鋼棒ストッパー前面に局所的な圧縮破壊による損傷が見られ、9mm 荷重時に 45 度方向の斜めひび割れ発生とともに、側面まで到達した。その後、桁座側面にてひび割れは進展した。なお、50mm 荷重まで荷重は低下することはなかった。

図-8, 9 に桁座、桁端の鋼棒ストッパー周辺の鉄筋の荷重-ひずみ関係を示す。鉄筋のひずみは、補強鉄筋だけでなく、鋼棒ストッパー周辺に配置され、鋼棒ストッパーから生じる斜めひび割れと交差する鉄筋にも生じているがいずれの鉄筋も降伏には至っていない。

図-6 に Case1 の荷重-変位関係を併せて示す。解析結果は、荷重-変位関係や鋼棒ストッパーの降伏時の荷重、変位が概ね整合している。図-10 に、Case1 のさや管と桁端コンクリートの境界に配置したインターフェースに生じる応力を高さ別に示す。桁端における支圧応力

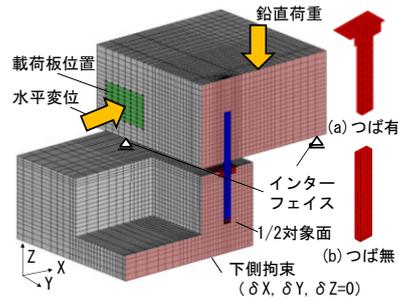


図-3 解析モデル

表-3 解析ケース

Case	対象試験体	縁端距離(mm)		さや管形状	圧縮破壊エネルギー(N/mm)		引張破壊エネルギー(N/mm)	
		桁端	桁座		桁端	桁座	桁端	桁座
1	No1	350	350	つば有	60.3	60.2	0.098	0.098
2	No2	550	350	つば有	61.6	60.8	0.1	0.098
3	No2	550	350	つば無				

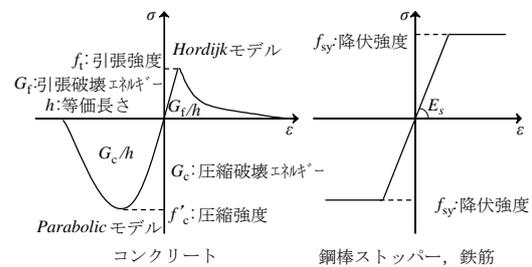
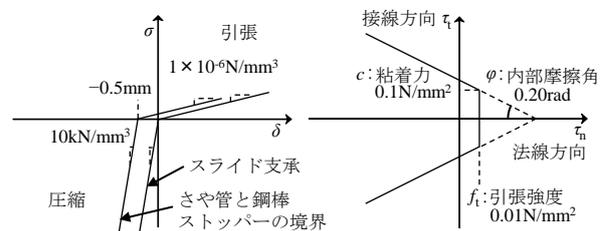


図-4 材料構成則



(a) ノーテンション (b) クーロン摩擦

図-5 インターフェースの構成則

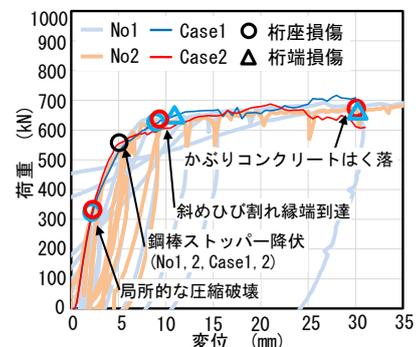


図-6 荷重-変位関係

は概ね三角形分布を示している。補強鉄筋は桁端上面から 137mm の位置から配置されているため、支圧応力はそれよりも上部に集中して生じていることとなる。ここで、図-11 に荷重 650kN 時の最大主ひずみ、最小主応

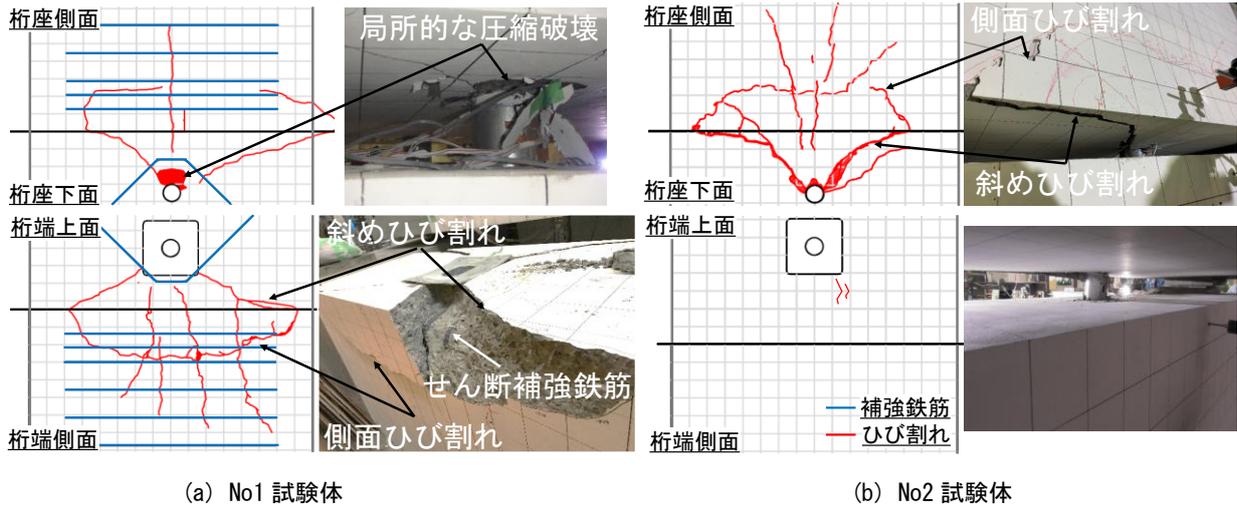


図-7 損傷状況写真

力を示す。最大主ひずみは、桁端上面からの距離 100mm 程度の位置で縁端に向かって卓越しているため、補強鉄筋が有効に荷重を負担しなかったと考えられる。これらから、斜めひび割れによる損傷は、支圧応力が補強鉄筋の配置されていない埋込み表層部に集中するため、かぶり部分のコンクリートに破壊面が形成されることで生じるメカニズムであると考えられる。

図-12に、Case1の鋼棒ストッパーと桁座コンクリートの境界に配置したインターフェースに生じる応力を高さ別に示す。桁座では、荷重 300kN 時までは三角形分布を示しているが、荷重 300kN から 650kN にかけて桁座下面からの距離 0, 50mm の位置で支圧応力が桁座の圧縮強度に達した後低下している。これは、図-7に示す局所的な圧縮破壊を示しているものと考えられる。このことから、局所的な圧縮破壊は、鋼棒ストッパー埋込み表層部のコンクリートは拘束がないため、鋼棒ストッパーからの支圧応力が一軸圧縮状況下の圧縮強度に達することで生じるメカニズムであると考えられる。

その後、支圧応力は桁座深部に再分配されるが、桁座下面からの距離 100mm の位置に集中している。ここで、図-13に荷重 650kN 時の最小主応力、最大主ひずみを示す。最小主応力は桁端と異なり、桁座深部に分布しているが、最大主ひずみは、支圧応力の集中する桁座下面からの距離 100mm の位置において縁端に向かって卓越している。補強鉄筋は桁座下面から 127mm の位置から配置されているため、補強鉄筋は有効に荷重を負担しなかったと考えられる。また、図-7に示す載荷試験終了後の桁座の損傷状況は、桁端の損傷状況と概ね同様である。これらから、桁座では、局所的な圧縮破壊を生じ、支圧応力の集中する位置が深部に移行するものの、斜めひび割れによる損傷メカニズムは桁端と同様に桁座下面に集中する支圧応力により、破壊面がかぶり部分のコン

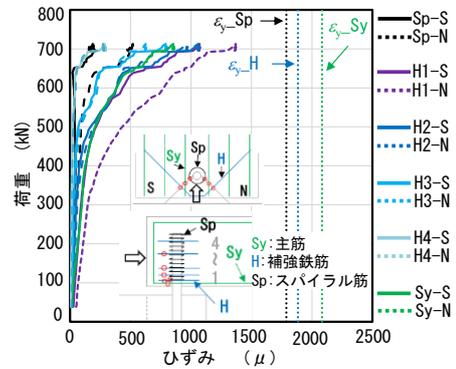


図-8 荷重-ひずみ関係 (桁座)

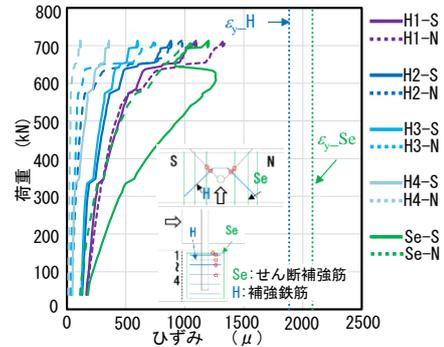


図-9 荷重-ひずみ関係 (桁端)

クリートに形成されることによると考えられる。なお、これらの損傷により、荷重が低下することはないため、鋼棒ストッパーの耐力への影響は小さいと考えられる。

4. 桁端の縁端距離の増加による破壊性状への影響

斜めひび割れによる損傷は、鋼棒ストッパーから桁座、桁端の縁端に向かって、かぶり部分のコンクリートに破壊面が形成されていることから、ひび割れ耐力には鋼棒ストッパー径、縁端距離が影響するものと考えられる。ここでは、縁端距離に着目し、桁端の縁端距離を増加さ

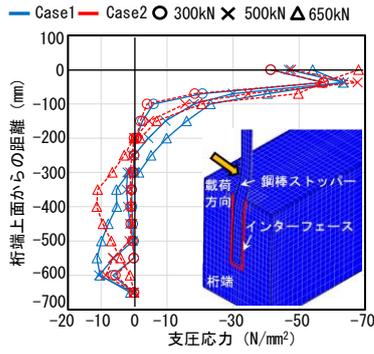


図-10 桁端支圧応力分布

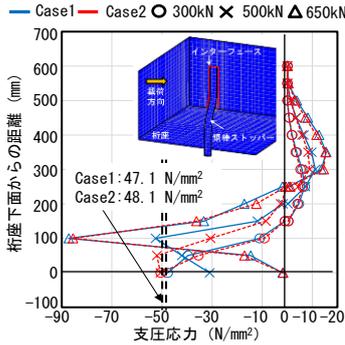


図-12 桁座支圧応力分布

せ、損傷の抑制が可能であるかを実大載荷試験により検討した。また、FEM解析により縁端距離の増加による桁端、桁座の支圧応力分布への影響を検討した。

図-6にNo2試験体およびCase2の荷重-変位関係、損傷の発生過程を示す。解析結果は、荷重-変位関係等が概ね整合している。図-7に載荷試験終了後の試験体の損傷状況を併せて示す。No2試験体の載荷試験時の損傷の進展は、6mm 載荷時に桁座の下面に45度方向の斜めひび割れとともに局所的な圧縮破壊による損傷が確認された。9mm 載荷時に桁座に生じた45度方向の斜めひび割れが側面に達し、その後、側面においてひび割れは進展し30mm 載荷時にひび割れに囲まれたかぶり部分のコンクリートが全体に浮きを伴っていた。その後50mm 載荷まで荷重は低下することなく、桁端は載荷終了までほぼ無損傷の状態であった。なお、No2試験体は、補強鉄筋を配置していないが、図-7に示す桁座の損傷状況はNo1試験体の桁座と同様であるため、斜めひび割れによる損傷に対し補強鉄筋の効果は小さいと考えられる。

図-10に、Case2のさや管と桁端コンクリートの境界に配置したインターフェースに生じる応力を高さ別に示す。桁端の支圧応力は、Case1と比較し荷重の増加に応じて深部に広がらず、桁端上面からの距離200mm内において集中して生じている。Case1では、斜めひび割れが縁端まで進展するため、桁端上面におけるコンクリートの剛性が低下し、深部に支圧応力が広がったと考えられる。斜めひび割れの進展以前である荷重500kN程度

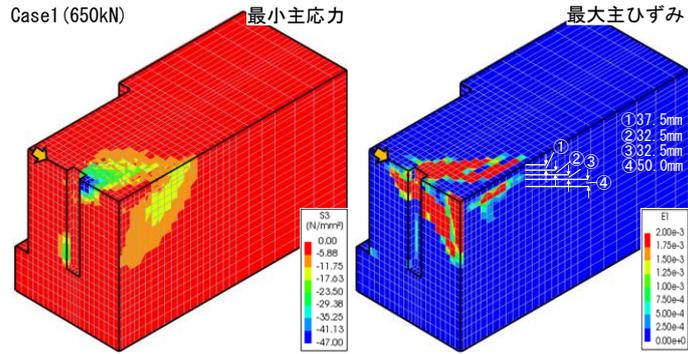


図-11 No1 桁端最小主応力、最大主ひずみ

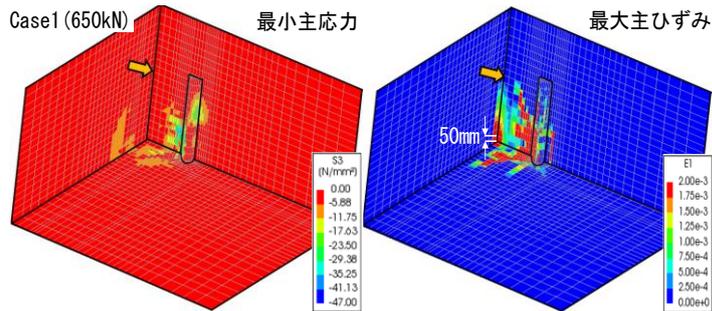


図-13 No1 桁座最小主応力、最大主ひずみ

まではCase1、Case2ともに同様の支圧応力分布を示しており、縁端距離の増加による支圧応力分布への影響は小さいと考えられる。図-12に、Case2の鋼棒ストッパーと桁座コンクリートの境界に配置したインターフェースに生じる応力を高さ別に平均した値を示す。Case2の支圧応力分布はCase1と概ね一致しており、桁端の損傷の有無による桁座の支圧応力分布には変化はなく、桁座の損傷状況も概ね同様である。

このことから、縁端距離を増加し斜めひび割れが形成される破壊面を大きくすることは損傷の抑制に有効である。なお、縁端距離を増加させることによって桁座、桁端の支圧応力分布は変わらないため、鋼棒ストッパーの耐力に与える影響は小さいと考えられる。

5. さや管のつばによる破壊性状への影響

写真-1に示す実桁に生じた局所的な圧縮破壊は、桁端、桁座ともに生じているが、図-7に示す本実験の桁端には生じていない。これは、本実験で使用したさや管につばが設けられている影響が考えられる。そこで、FEM解析においてつばの無いさや管を再現し、つばの有無による損傷や支圧応力分布への影響を検討した。

図-14にCase3の荷重-変位関係を、図-15にさや管と桁座コンクリートの境界に配置したインターフェースに生じる応力を高さ別にCase2の結果とともに示す。Case3では、3章で示した桁座の埋込み表層部における支圧応力の低下と同様に、荷重350kN程度時に0, 37.5mm

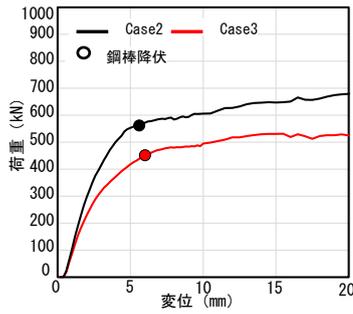


図-1 4 荷重-変位関係

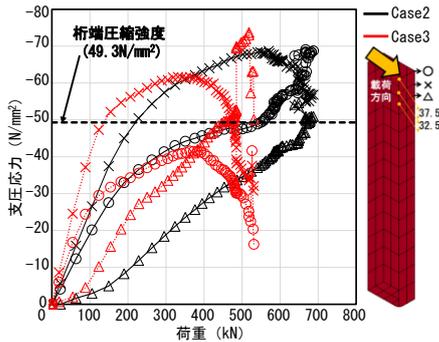


図-1 5 支圧応力-荷重関係

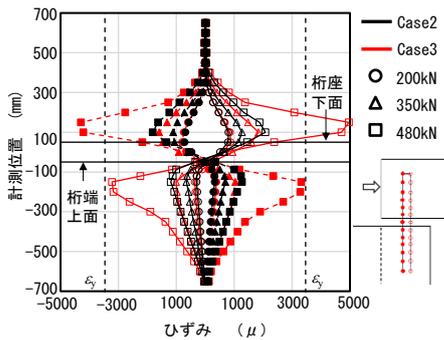


図-1 6 鋼棒ストッパーひずみ分布

位置の支圧応力が桁端の圧縮強度付近から低下している。なお、支圧応力の低下は、表層部と内部のコンクリートの拘束により、一軸圧縮状況下の桁端の圧縮強度から増減がある。一方、Case2の支圧応力は、圧縮強度を大きく上回っている。これは、さや管のつばにより、埋込み表層部のコンクリートがより拘束され、圧縮強度が見かけ上増加していることが主要因と考えられる。これにより、本実験では実桁の損傷状況と異なり、さや管周辺の局所的な圧縮破壊を抑制できたと考えられる。ここで、図-1 6に鋼棒ストッパーの縁引張ひずみをCase2の結果と併せて示す。荷重200kNまでは、鋼棒ストッパーのひずみ分布は、Case2と同程度であるものの、その後Case3のひずみが増大している。これは、0、37.5mm位置の支圧応力が低下するため、鋼棒ストッパーのせん断スパンが長くなることで、Case2に対し早期に鋼棒ストッパーが降伏ひずみに至ったと考えられる。

このことから、さや管につばを設け、表層部のコンク

リートを拘束することは、局所的な圧縮破壊の抑制に有効である。また、それにより鋼棒ストッパー本体の耐力を向上できると考えられる。

6. まとめ

鋼棒ストッパー埋込み部の斜めひび割れや局所的な圧縮破壊の損傷メカニズムおよびそれらの損傷を抑制する構造について、実大載荷試験やFEM解析により検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 桁座、桁端に生じる斜めひび割れや局所的な圧縮破壊による損傷は、鋼棒ストッパーからの支圧応力が鋼棒ストッパー埋込み表層部に集中するために生じる。
- (2) 斜めひび割れの抑制にはかぶり部分のコンクリートの破壊面を大きくするために、縁端距離を増加させることが有効である。
- (3) 局所的な圧縮破壊の抑制には、さや管につばを設け、コンクリートを拘束する構造とすることが有効である。

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) 室内悠吾, 田畑勝幸, 轟俊太郎, 田所敏弥: 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, コンクリート工学年次論文集, vol.42, No2, pp.901-906, 2020
- 2) 笠倉亮太, 轟俊太郎, 草野浩之, 西恭彦: 鋼棒ストッパーの埋込み長と桁座の配筋量がストッパーの破壊性状に与える影響, コンクリート工学年次論文集, vol.40, No2, pp.1051-1056, 2018
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, 2017
- 4) Nakamura, H.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, 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
- 6) Selby, R. G., Vecchio, F. J.: Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete, Tech. Rep.93-02, Univ. Toronto, dept. Civil Eng., Toronto, Canada, 1993
- 7) Hsieh, S. S., Ting, E. C., Chen, W. A.: A Plastic-Fracture Model for Concrete, International Journal Solids Structures, vol.18, pp.181-197, 1982