

論文 補強鉄筋の降伏強度が鋼角ストッパー周辺のコンクリートのせん断破壊に及ぼす影響

岡本 圭太*1・轟 俊太郎*2・笠倉 亮太*2・草野 浩之*1

要旨: 桁座を模擬した矩形フーチングに鋼角ストッパーを埋め込んだ供試体を用いて実大実験および FEM 解析を行い、補強鉄筋の降伏強度がせん断破壊に及ぼす影響を検討した。その結果、補強鉄筋の降伏強度に関わらず、せん断破壊性状は、鋼角ストッパー前面のコンクリートがフーチング上面から深部に損傷が進展することがわかった。せん断破壊メカニズムは、補強鉄筋の降伏強度に関わらず、荷重の増加とともに鋼角ストッパー前面の水平力の合力位置がフーチング深部に移行することで最大荷重に至ること、また、せん断破壊メカニズムから、補強鉄筋の降伏強度を増加しても最大荷重が増加しない場合があることがわかった。

キーワード: 鉄道橋梁, 鋼角ストッパー, 桁座, 補強鉄筋, 高強度鉄筋, せん断破壊

1. はじめに

鉄道において、常時および地震時に発生する水平力によって生じる桁の橋軸直角方向の変位は、車輪横圧を発生させ、脱線を引き起こす可能性がある。また、橋軸方向の変位は、特に斜角桁の落橋や桁同士の衝突による桁遊間部の損傷を引き起こす可能性がある。一般に、設計では、常時の水平力に対して橋軸直角方向の変位を拘束することを前提としているため、剛性が高いストッパーを用いることとしている。コンクリート橋梁においては、支承本体とは独立して鋼角ストッパー（以下、ストッパー）が桁座、桁端を連結するように、桁座、桁端に埋め込まれる。

耐震設計では、一般に、ストッパーの機能を十分に発揮するため、桁座、桁端のコンクリート（以降、ストッパー周辺のコンクリート）は破壊させない。

一方で、熊本地震では、写真-1 に示すように、ストッパー周辺のコンクリートにひび割れ等の損傷が発生し、高所作業車等を用いた検査や狭隘箇所での補修が必要となり、復旧に時間を要した。熊本地震は、兵庫県南部地震後に発刊した、鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾を適用して設計された構造物が大規模地震を受けた初めてのケースである。そのため、同標準を適用した類似の構造物は、同規模の地震によりストッパー周辺のコンクリートに損傷が発生する可能性がある。したがって、ストッパー周辺のコンクリートの破壊性状、破壊メカニズムを明らかにし、地震後に発生する損傷箇所と程度を制御するとともに早期復旧を実現する設計法を構築する必要がある。既往の研究^{3),4),5)}では、実橋梁のストッパー諸元を基にした実験や解析から、ストッパー前面のコンクリートがせん断破壊する際には、主にせん断破壊面と交差する補強鉄筋が、水平力を負担することで最大荷重に至る

ことがわかっている。そのため、補強鉄筋の降伏強度を増加させることで、ストッパー周辺のコンクリートのせん断耐力は増加すると考えられる。しかし、補強鉄筋の降伏強度を増加すると、破壊メカニズムが変化することで、補強鉄筋の降伏強度を増加させても最大荷重が増加しない可能性がある⁶⁾。そのため、本研究では、実橋梁のストッパー諸元に基づき設定した実大供試体について、補強鉄筋の降伏強度をパラメータとした実験および FEM 解析を行い、補強鉄筋の降伏強度がせん断破壊性状に及ぼす影響を確認するとともに、実験では計測が難しいコンクリート内部の水平力分布をモデル化し、鉄筋の降伏強度がストッパー周辺のコンクリートのせん断破壊メカニズムに及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要および解析概要

2.1 実験概要

表-1 に実験に用いた各材料の材料試験結果を示し、写真-2、図-1 に No.1 を例として、載荷状況、供試体諸元およびひずみゲージ設置位置を示す。供試体は、桁座を模擬した矩形フーチングに埋め込んだストッパーであり、角形鋼管とコンクリートから成る。供試体は実橋のストッパー諸元に基づき実大スケールで設定した。実験パラメータは、補強鉄筋の降伏強度 f_{sy} としており、



写真-1 実桁に生じたせん断ひび割れ

*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 副主任研究員 修(工)(正会員)

No.1 は補強鉄筋に SD390 を用いた供試体であり、No.2 は補強鉄筋に KSS785 を用いた供試体である。フーチングの寸法は、既往の研究結果³⁾から得たせん断破壊線の発生角度 70° を参考に、境界条件の影響を受けないように、幅 2400mm、高さ 1400mm とし、PC 鋼棒は、ストッパーと PC 鋼棒を結ぶ圧縮ストラットの形成を避けるため荷重方向背面に設置した。補強鉄筋の定着長は、せん断破壊線と補強鉄筋の交差位置から必要定着長以上を確保するため、フーチングの側面端までとった。なお、フーチングとストッパーの充填コンクリートの材料諸元は、同一である。

計測項目は、荷重、荷重位置のストッパー水平変位、**図-1** に示す補強鉄筋のひずみ、ストッパーのひずみである。なお、荷重位置はフーチング上面から 300mm であり、荷重方法は静的な一方方向の単調荷重とした。

2.2 解析概要

図-2 に解析モデルを示す。解析対象は**図-1** に示す CL 断面を対称面とした 3 次元 1/2 モデルである。荷重は x 方向の強制変位とし、拘束は対称面を y 方向固定、フーチング下端を xyz 方向固定とした。なお、解析には汎用の構造解析システムである DIANA(ver.9.6)を用いた。

ストッパーを構成する充填コンクリートはソリッド要素で、角形鋼管はシェル要素でモデル化し、各々は完

全結合とした。ストッパーとフーチング間には、インターフェース要素を配置した。補強鉄筋は埋込み鉄筋要素とし、コンクリートと補強鉄筋の付着は完全付着とした。

図-3(a)(b)(c)に、コンクリート、補強鉄筋、インターフェースの材料構成則を示す。コンクリートは、圧縮側には Parabolic 式⁷⁾、引張側には Hordijk 式⁸⁾を用いた。なお、等価長さ h は、要素体積 V の 3 乗根とした。ひび割れモデルは固定ひび割れモデル、せん断伝達モデルは前川らのせん断伝達モデル⁹⁾を用いた。補強鉄筋は、降伏条件に Von Mises 基準を用いた完全弾塑性とした。インターフェースは、接触時のみ剛とするノーテンションモデルとした。また、角形鋼管および充填コンクリートは弾性とした。

表-2 に、解析ケースおよび解析に用いた材料諸元を示す。なお、解析には**表-1** に示す材料試験結果も用いた。No.1, No.2 は実験を模擬した解析ケースであり、case1 ~ case4 は、 f_{sy} が 427 N/mm^2 である No.1 を基準に f_{sy} をパラメータとして、0 (補強鉄筋を用いないケース)、190, 785, 1275 N/mm^2 と変化させた。圧縮破壊エネルギーは、中村らによる式¹⁰⁾からコンクリートの圧縮強度 f'_c を用いて算出した。引張破壊エネルギーは、鉄道構造物等設計標準・同解説²⁾より f_t および粗骨材の最大寸法から算出した。

表-1 材料試験結果

No.	コンクリート			補強鉄筋			ストッパー			
	圧縮強度	引張強度	弾性係数	記号	降伏強度	弾性係数	降伏ひずみ	降伏強度	弾性係数	降伏ひずみ
	f'_c	f_t	E_c		f_{sy}	E_s	ϵ_{sy}	f_{sy}	E_s	ϵ_{sy}
N/mm^2	N/mm^2	kN/mm^2	N/mm^2	kN/mm^2	μ	N/mm^2	kN/mm^2	μ		
1	23.6 ^{※1}	1.89 ^{※1}	23.7	SD390	427	187	2286	597 ^{※3}	201	2886
2	28.1 ^{※2}	2.13 ^{※2}	21.9	KSS785	837 ^{※3}	185	4507	622 ^{※3}	206	3014

※1 粗骨材の最大寸法13mm ※2 粗骨材の最大寸法20mm ※3 0.2% オフセット値

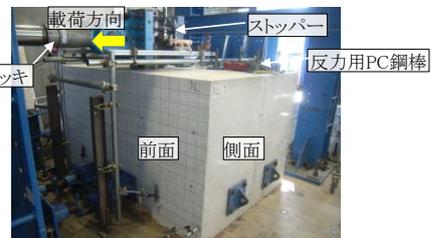


写真-2 載荷状況 (No.1)

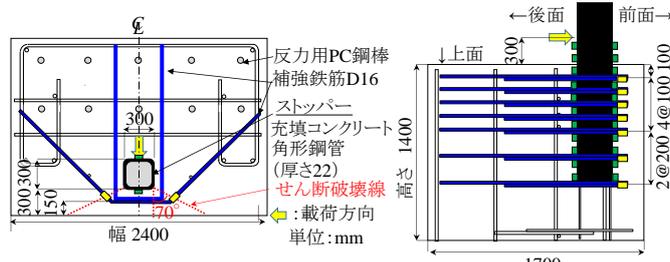


図-1 供試体諸元およびひずみ測定位置

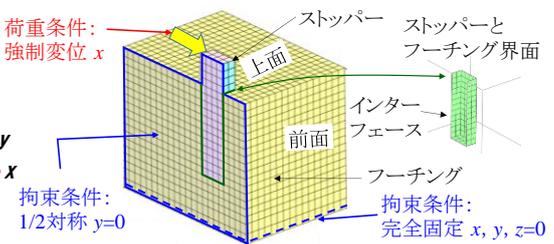


図-2 解析モデル

表-2 解析に用いた材料諸元

解析ケース	補強鉄筋		コンクリート	
	降伏強度	引張破壊エネルギー	圧縮破壊エネルギー	引張破壊エネルギー
f_{sy}	N/mm^2	N/mm^3	G_c	G_f
	N/mm^2	N/mm^3	N/mm	N/mm
No.1	427			
case1	0			
case2	190		42.6	0.067
case3	785			
case4	1275			
No.2	835		46.5	0.083

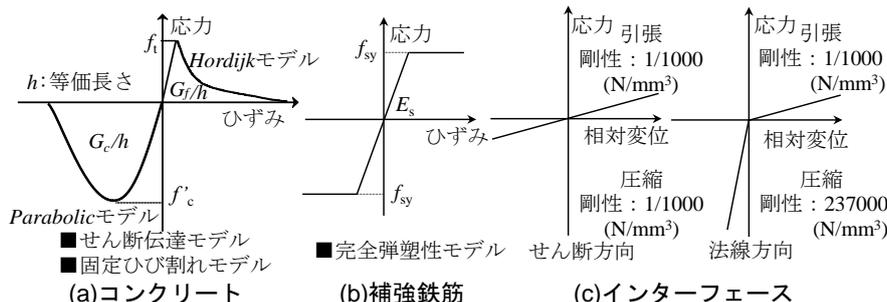


図-3 材料構成則

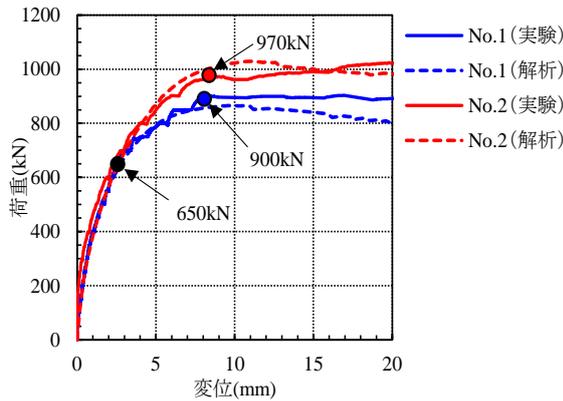


図-4 荷重-変位関係

3. 補強鉄筋の降伏強度が鋼角ストッパー周辺のコンクリートのせん断破壊性状に及ぼす影響

図-4に、荷重-変位関係を示す。No.1, No.2の実験結果は、650kN付近までの傾向は同様であるが、650kN付近からNo.1は荷重の増加量が小さくなり、900kNに達して以降は、荷重が横ばいとなっている。No.2は、650kN以降も荷重は増加し、970kNに達して以降はNo.1と同様に荷重が横ばいとなっている。No.1に対してNo.2は補強鉄筋の降伏強度が1.96倍であるが、荷重が横ばいとなった900kN, 970kNを最大荷重とすると、No.1に対してNo.2の最大荷重は1.08倍である。補強鉄筋の降伏強度の増加分に対して、最大荷重の増加分は小さい。

図-5に、載荷終了後の損傷状況を示す。No.1, No.2ともに、図中に太線で示すストッパーの隅角部からフーチング端部に向かうひび割れがフーチング上面に生じた。その後、ひび割れはフーチング上面から深部に向かって進展した。なお、No.1に対してNo.2は、載荷終了後の脆弱部をはつり出すことで確認した図中に赤色ハッチングで示すせん断破壊面の面積が小さい。図-6に、解析から得たNo.1およびNo.2の最大荷重時のひび割れひずみ分布を示す。なお、ひび割れひずみとは、引張強度に達した後に発生したひずみである。図-5に示すフーチングの損傷状況と同様に、ストッパーの隅角部からフーチング端部に向かう損傷がフーチング上面に生じ、フーチング深部に向かって進展している。

図-7に、実験から得た荷重-補強鉄筋のひずみ関係を示す。なお、補強鉄筋のひずみは図-1に示す同一鉄筋のひずみを平均して算出している。No.1, No.2ともに、補強鉄筋の位置がフーチング上面に近いほど荷重の増加に対するひずみの増加量は大きい。この理由は、荷重の増加に従いストッパー前面のコンクリートがフーチング上面から深部に損傷したためであると考えられる。また、900kN時のNo.1, No.2のひずみ分布が同等であることから、フーチング内部においてせん断破壊面が交差する補強鉄筋の範囲は同等であり、900kN時において補強鉄筋が負担する荷重は同等であると考えられる。補強鉄筋と

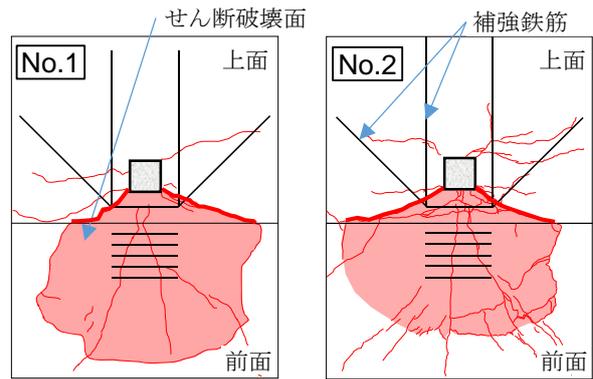


図-5 載荷終了後の損傷状況 (実験)

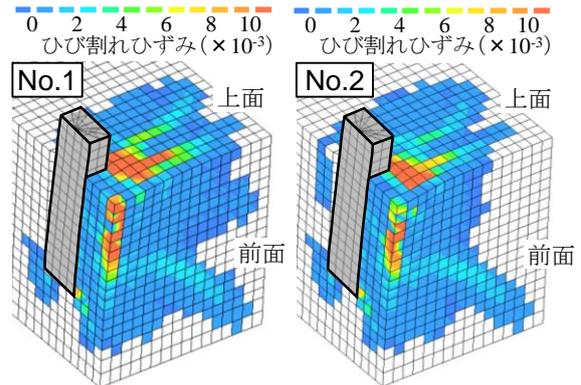


図-6 最大荷重時のひび割れひずみ (解析)

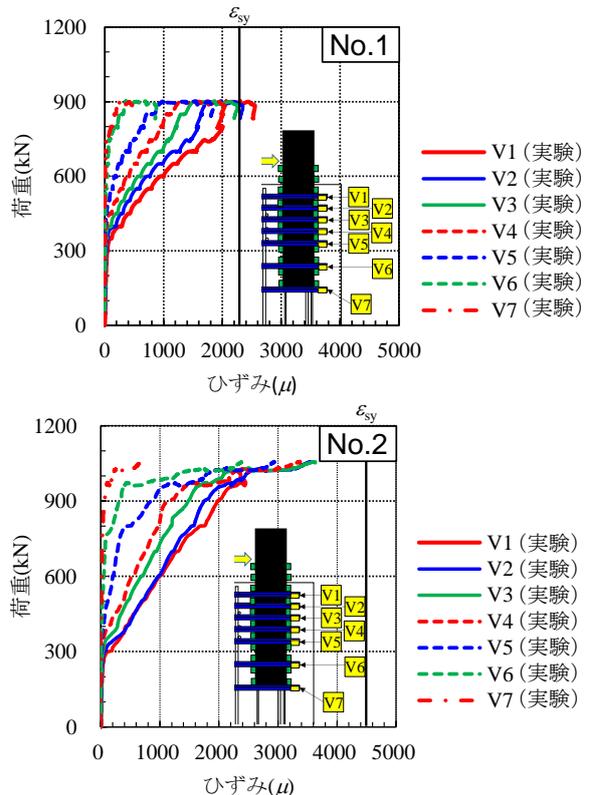


図-7 荷重-補強鉄筋のひずみ関係

コンクリートが荷重を負担すると考えると、コンクリートが負担する荷重も同等であり、本実験においてせん断破壊面の大きさの差が、コンクリートが負担する荷重に及ぼす影響は小さかったと考えられる。なお、本実験では、ひび割れ幅が徐々に開口するため、粗骨材の最大寸

法が最大荷重に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-8 に、実験および解析から得たストッパーの曲げモーメント分布の推移を示す。曲げモーメントは、ストッパー前面および後面のひずみから求まるストッパーの曲率と、角形鋼管と充填コンクリートの剛性を累加することで求まるストッパーの剛性から算出した。No.1 の実験結果は、200kN で曲げモーメントの最大位置がフーチング上面から-150mm 付近であり、その後、荷重の増加に伴い深部へと移行し、最大荷重では、フーチング上面から-200mm 付近となる。No.2 の実験結果は、No.1 と同等であり、200kN で曲げモーメントの最大位置が、フーチング上面から-150mm 付近となり、荷重の増加に伴い深部へと移行し、最大荷重では、フーチング上面から-200mm 付近となった。

以上より、補強鉄筋の降伏強度に関わらず、ストッパー前面のコンクリートがフーチング上面から深部に向かって損傷して最大荷重に至るため、押し抜きせん断のように、載荷板全体に等分布荷重が載荷されることで載荷面の周囲全体が一樣に押し抜かれる破壊性状ではない¹⁾。破壊性状が押し抜きせん断と異なる理由は、図-1 に示すようにストッパーのフーチングから突出している部分に荷重が載荷されることで荷重が偏心することから、コンクリート内部に生じる水平力がフーチング深部に向かって一樣に分布していないためであると考えられる。一方で、コンクリート内部の水平力分布は実験で計測することが困難であり、図-4, 5, 6, 8 に示す実験結果と解析結果が概ね一致していることから、以降、本解析モデルを用いて水平力分布をモデル化し、せん断破壊メカニズムの検討を行う。

4. 補強鉄筋の降伏強度が鋼角ストッパー周辺のコンクリートのせん断破壊メカニズムに及ぼす影響

4.1 ストッパーの水平力分布のモデル化

図-9 に、No.1, case3 を例に、ストッパー周辺のコンクリートに生じる水平力分布の推移を示す。なお、水平力は、インターフェース要素に生じる応力と面積から求めた。ストッパー前面の水平力分布は、荷重の増加とともに、フーチング上面からストッパー前面のコンクリートが損傷していくことで、フーチング深部に広がり、その分布形状は三角形分布から矩形へと変化する。一方で、ストッパー後面の水平力は下端付近で生じている。そこで、ストッパー前面および後面の水平力分布から求まる各水平力の合力 H_2 , H_3 と L_1 , L_2 を用いて、図-10 に示すように、ストッパー下端まわりのモーメントの釣り合いから H_1 の増減について考える。なお、 H_1 は載荷荷重、 L_1 は荷重の載荷位置からストッパー下端までの距離であり、 L_2 はストッパー前面の水平力の合力位置からストッ

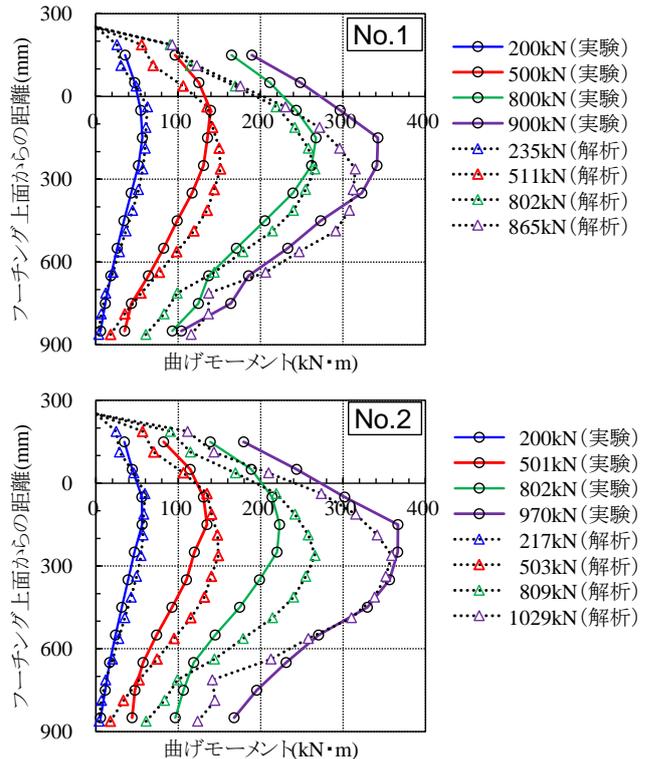


図-8 ストッパーの曲げモーメント分布の推移

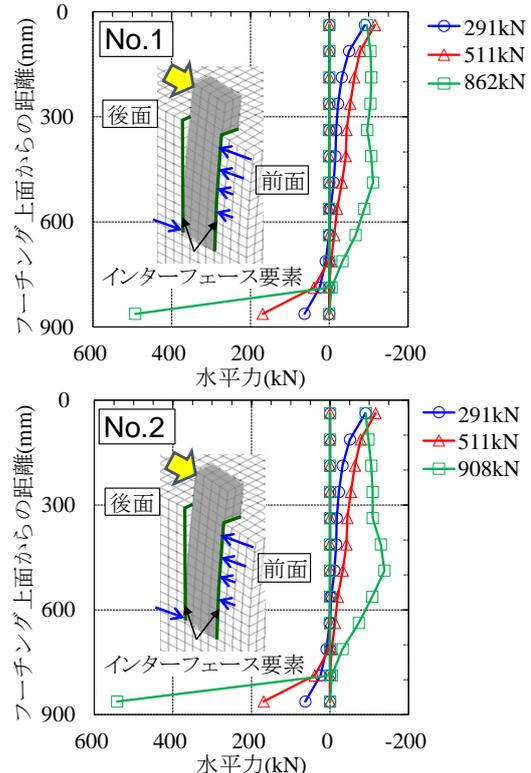


図-9 水平力分布の推移(解析)

パー下端までの距離である。No.1 を例として、ストッパー後面の水平力の合力 H_3 の合力位置は、図-9 より、最大荷重時にストッパー下端から約 38.6mm となり、荷重の載荷位置からストッパー下端までの距離 L_1 (=1200mm) に対して 3.2% であるため、モーメントの釣り合いに対する影響は小さいと考えられる。なお、No.1 以外のケース

においても同様の結果である。そのため、ストッパー後面の水平力の合力 H_3 の合力位置はストッパー下端として以降検討を行う。図-10より、載荷荷重 H_1 は $H_2 \times L_2 / L_1$ となる。 L_1 は一定であるため、載荷荷重 H_1 は、ストッパー前面の水平力の合力位置からストッパー下端までの距離 L_2 とストッパー前面の水平力の合力 H_2 の増減に依存する。

4.2 補強鉄筋の降伏強度がストッパーに生じる水平力の合力およびその位置の推移に及ぼす影響

図-11に、case1, case2, No.1, case3を例に、載荷荷重 H_1 、ストッパー前面および後面の水平力の合力 H_2 、 H_3 、ストッパー前面の水平力の合力位置からストッパー下端までの距離 L_2 と変位の関係を示す。全ての解析ケースにおいて、ストッパー前面の水平力の合力 H_2 は変位の増加に従い増加する。なお、ストッパー前面および後面の水平力の合力 H_2 、 H_3 は、載荷荷重 H_1 が最大荷重となるまで増加する傾向にある。そのため、フーチング内部が破壊することで最大荷重に至る破壊メカニズムではないと考えられる。ストッパー前面の水平力の合力の載荷

位置からストッパー下端までの距離 L_2 は、変位の増加に伴い減少する。ストッパー前面の水平力の合力、ストッパー前面の水平力の合力位置からストッパー下端までの距離について、全てのケースにおいて変位の増加に伴う増減の傾向が同様である。そのため、補強鉄筋の降伏強度により、せん断破壊メカニズムは変化しないと考えられる。また、図中に示す最大荷重時のストッパー下端からストッパー前面の水平力の合力の載荷位置までの距離 L_2 は、いずれも荷重の載荷点からストッパー下端までの距離 1200mm の 1/2 の位置に相当する 600mm よりも小さい。

このことから、せん断破壊メカニズムは、補強鉄筋の降伏強度に関わらず、ストッパー前面の水平力が荷重と共に増加し、その合力位置がフーチング深部に向かって荷重の載荷点からストッパー下端までの距離の 1/2 の位置付近に移行することで最大荷重に達する。また、補強鉄筋の降伏強度が増加しても、フーチング内部の破壊に至る破壊性状には変化しない。

4.3 補強鉄筋の降伏強度がせん断耐力に及ぼす影響

図-12に、補強鉄筋の降伏強度と最大荷重の関係を示す。補強鉄筋の降伏強度の増加に伴い最大荷重は増加するが、補強鉄筋の降伏強度がある程度大きくなると最大荷重の増加量は小さくなり、やがて増加しなくなる。

図-13に、case2, No.1, case3, case4を例として最大荷重時の補強鉄筋が負担する応力の応力分布を示す。なお、補強鉄筋が負担する応力は、ひび割れひずみが最大となる位置の補強鉄筋の応力を平均して算出している。また、

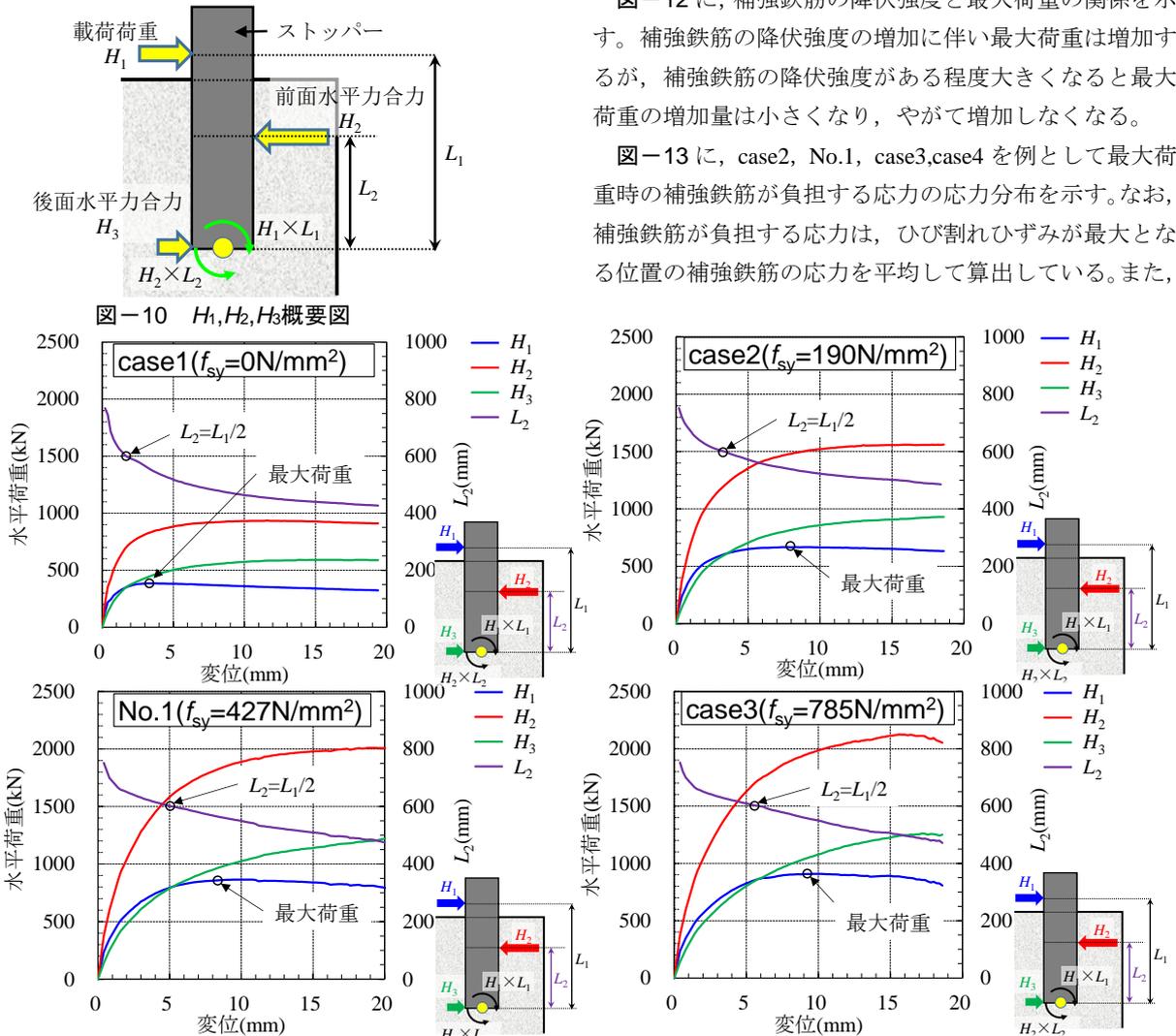


図-11 H_1, H_2, H_3, L_2 -変位関係 (解析)

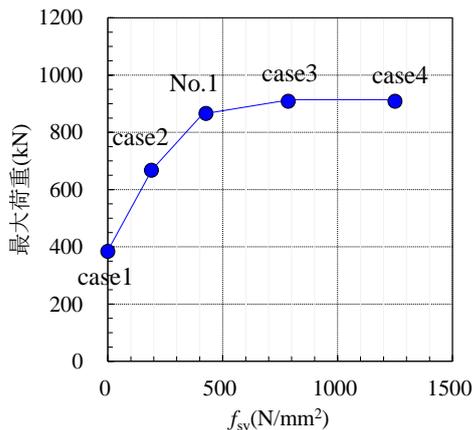


図-12 補強鉄筋の降伏強度と最大荷重の関係（解析）

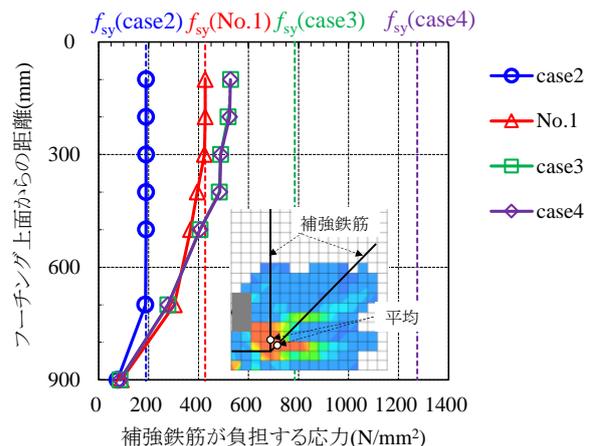


図-13 最大荷重時の補強鉄筋の応力分布（解析）

case2の補強鉄筋はフーチング上面から深部に向かって5段降伏しており、No.1の補強鉄筋は3段降伏している。一方で、case3の補強鉄筋は降伏していない。補強鉄筋が降伏する前に最大荷重に達しているため、case3に対してcase4は最大荷重が増加しないと考えられる。このことから、補強鉄筋が降伏する前にストッパー前面の水平力の合力が増加するとともにフーチング内部に移行し、荷重の載荷点からストッパー下端の1/2の距離の位置に達することで、補強鉄筋の降伏強度を増加させても、最大荷重が増加しない場合があると考えられる。

図-13に示すNo.1, case3, case4は同様の分布となっている。また、case3とcase4のひび割れひずみが最大となる箇所と補強鉄筋が交差する位置は同様であることを確認している。そのため、せん断破壊面が補強鉄筋と交差する範囲は同等であり、補強鉄筋の降伏強度が、せん断破壊面が補強鉄筋と交差する範囲の大きさに及ぼす影響は小さいと考えられる。

5. まとめ

本研究では、補強鉄筋の降伏強度がストッパー周辺のコンクリートのせん断破壊に及ぼす影響を検討するため、実橋の諸元を基に設定した供試体について、補強鉄筋の降伏強度をパラメータとした実大実験や、実験に基づくFEM解析を行った。以下に、得られた結果をまとめる。

- (1) せん断破壊性状は、補強鉄筋の降伏強度に関わらず、載荷面の周囲全体が様に押し抜かれる押し抜きせん断のような破壊性状ではなく、フーチング上面から深部に向かって損傷が進展して最大荷重に至る破壊性状である。
- (2) せん断破壊メカニズムは、補強鉄筋の降伏強度に関わらず、ストッパー前面の水平力が増加し、その合力位置がフーチング深部に向かって荷重の載荷点からストッパー下端までの距離の1/2の位置付近に移行することで最大荷重に達する
- (3) せん断破壊メカニズムから、補強鉄筋の降伏強度が

増加しても最大荷重が増加しない場合がある。

参考文献

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説変位制限，丸善，2006
- 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物，丸善，2004
- 3) 笠倉亮太，轟俊太郎，進藤良則，下津達也：鋼角ストッパー埋め込み部のコンクリートの破壊に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol38，pp37-42，2016.7
- 4) 轟俊太郎ほか：鋼角ストッパー周辺のコンクリートのせん断破壊に関する実験的検討，鉄道工学シンポジウム論文集，No.19，pp95-102，2015.8
- 5) 岡本圭太ほか：鋼角ストッパー周辺のコンクリートのせん断破壊メカニズムに関する一考察，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17，pp315-320，2017.10
- 6) 坂口淳一ほか：せん断補強鉄筋を多量に配置したRC梁部材のせん断破壊耐力に関する検討，土木学会論文集，Vol.69，No.2，pp192-206，2013.2
- 7) Feenstra, P.H : Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and reinforced Concrete PhD thesis, Delft University of Technology, 1993
- 8) HORDIJK, D A Local Approach to Fatigue of Concrete. PhD thesis, Delft University of Technology, 2001
- 9) (公社) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編，(公社) 土木学会，2012
- 10) Hikaru NAKAMURA : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp. 471-487, 2001.
- 11) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集，Vol.348，pp133-141，1984.8