

軸方向鉄筋に Head-bar[®]を用いた壁-スラブ接合部の耐震性能評価

山本 悠人^{*1}・村田 裕志^{*1}・畠 明仁^{*1}・竹田 智^{*2}・藍谷 保彦^{*3}

Keywords : mechanical anchorage, wall-slab joint, seismic performance evaluation, quasi-static cyclic loading
Head-bar, 壁スラブ接合部, 耐震性能評価, 正負交番載荷試験

1. はじめに

コンクリート工の生産性向上の一環として機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン^①（以下、ガイドラインと記す）が発刊され、設計の時点での適用が検討されるようになったことから、その適用が急速に進んでいる。発刊3年後のフォローアップ調査^②では工事への採用率が2倍近くになったと報告されている。ただし、上記ガイドラインではせん断補強鉄筋への適用が中心に記載されており、軸方向鉄筋への適用に関しては詳細な記述はなされていない。

機械式鉄筋定着工法の適切な部位・部材への適用のためにはコンクリート標準示方書^③（以下、コ示と示す）などの適用する示方書の構造細目を満たすとともに、各工法の技術認証（例えば（一財）土木研究センターの建設技術審査証明など）と独自に定めている各工法の設計・施工指針を確認する必要がある。各工法の設計・施工指針は主に定着・継手指針^④で定められている試験結果を元に、その工法の適用性を評価して作成されたものであり、大成建設が開発した Head-bar は他工法に先んじて（財）土木研究センター（当時）から技術認証を取得した^⑤。

現在の定着・継手指針にはせん断補強鉄筋への適用性の検討として定着効果を確認するブロック引抜き試験、せん断補強効果を確認する梁の曲げ試験、拘束効果を確認する柱の正負交番載荷試験が記載されている。一方で、軸方向鉄筋への適用に関してはブロック引抜き試験等の要素試験が記載されているのみであり、具

体的な部材試験の例は示されていない。したがって土木分野においては、軸方向鉄筋として機械式鉄筋定着工法の性能を部材レベルで確認している事例はまだ少ない。しかし機械式定着鉄筋はマッシブなコンクリートへ定着した場合には、従来の標準フックによる定着と比較し高い定着力を持つことが確認されている^⑥ことから、高密度配筋となることが多い壁スラブ接合部のスラブ部材の軸方向鉄筋へ適用することにより配筋を合理化できる可能性がある。そこで本研究では主に軸方向鉄筋に使用される円形プレートの Head-bar^⑦（図-1）を対象に、実構造物の1/2スケール規模の壁-スラブ接合部の試験体を作成し、正負交番載荷試験により耐力・ひび割れ・伸び出し等の計測からスラブ部材の軸方向鉄筋に機械式定着鉄筋を適用した際の耐震性能を検討した。



図-1 軸方向鉄筋に適用する円形プレートの Head-bar
Fig.1 Circular Plate Head-bar for Longitudinal bar

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

*2 国際事業本部 土木工事作業所

*3 ブイ・エス・エル・ジャパン（株）

2. 試験概要

2.1 試験体設計

試験体の図面を図-2 に、使用した材料諸元を表-1 に示す。試験体は地下 RC ボックスカルバート躯体の壁-スラブ接合部を切り出し、1/2 スケールに縮小して設計したものである。また試験体は 90 度回転した状態で壁部材に相当する箇所を地面水平方向にして打設・加力をしている。対象とした実部材は壁部材を打設し、2 次施工としてスラブ部材を構築するためスラブ部材の軸方向鉄筋は壁部材施工時に先に配筋されており、同一断面において機械式継手により接続されている。試験体においても同様に再現し、SA 級の端部ねじ加工型（トルク管理型）の機械式継手を同一断面上に配置している。またスラブ部材のせん断補強鉄筋は標準フックと同等の横拘束効果が確認されている矩形プレートが摩擦圧接された機械式定着鉄筋をスラブの軸方向鉄筋に掛けるように適用している。

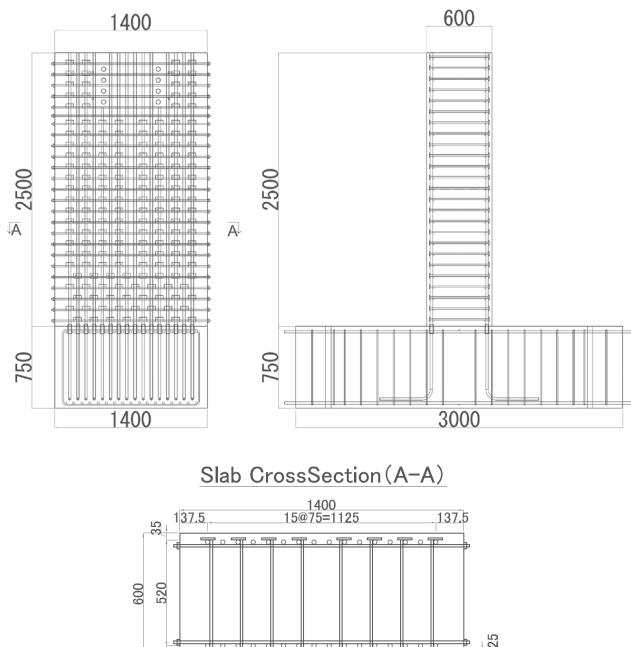


図-2 試験体図面 (ケース 1)
Fig.2 Drawing of specimen case-1

試験水準としては表-2 に示す通り、スラブ部材の軸方向鉄筋を直角フックによる定着としたケース 1 と機械式定着鉄筋を適用したケース 2,3 となっている。本試験体の条件においてコ示、道路橋示方書⁸⁾（以下、道示と記す）、鉄道構造物等設計標準・同解説⁹⁾（以下、鉄道標準と記す）で設計されたスラブ部材の軸方向鉄筋の定着長を表-3 に示す。標準ケースとなるケース 1 は、最大必要定着長となる道路橋示方書の定着長を全庁で満たしており、かつコ示にて定められる必要定着長よりも 17φ も長い定着長を確保した。ケース 2 はコ示に基づき計算された定着長 (30φ)，ケース 3 は部材接合部への適用細目を無視した、一番短くなる基本定着長（コ示および鉄道標準）である定着長 (20φ) として設定した。そのためケース 1,2 は壁部材の地山側の軸方向鉄筋付近で定着されている。一方で、ケース 3 は壁部材の途中で定着させている。また各ケースにおいて定着効果を高めるための囲い鉄筋や横拘束鉄筋は配置していない。

表-1 仕様材料諸元

Table 1 Material information

コンクリート	ヤング率	圧縮強度	ポアソン比
壁部材	2.70×10^4 N/mm ²	37.1N/mm ²	0.21
スラブ部材	2.70×10^4 N/mm ²	32.0N/mm ²	0.21
鋼材母材	ヤング率	降伏強度	破断強度
軸方向鉄筋 (SD490,D22)	1.98×10^5 N/mm ²	520N/mm ²	752N/mm ²
せん断補強鉄筋 (SD345,D13)	1.93×10^5 N/mm ²	390N/mm ²	539N/mm ²
定着体	材質	形状[mm]	
軸方向鉄筋	S45C	φ55-t18	
せん断補強鉄筋	SM490	40×70-t9	

表-2 スラブ軸方向鉄筋の定着仕様

Table 2 Development length of Main bars

	定着長	直線部	定着形状
ケース 1	50 φ	30 φ	直角フック (r=5 φ)
ケース 2	30 φ	30 φ	円形プレート (機械式定着)
ケース 3	20 φ	20 φ	

表-3 代表的な指針に基づく設計定着長
Table 3 Design anchorage length of major design codes

対象指針	基本定着長			接合部適用時		必要定着長	
	式 (かつ 20 φ以上)	通常	低減後	式	結果	通常	低減後
コ示	$\alpha f_{yd}/4f_{bod} \cdot \phi$	23 φ	20 φ	$+d/2^*$	+10 φ	33 φ	30 φ
鉄道標準	$k_1(0.7f_{syd}/f'_{cd} + 11)\phi$	23 φ	20 φ	+5φ	+5 φ	28 φ	25 φ
道示	$\sigma_{sa}/4\tau_{0a} \cdot \phi$	37 φ	27 φ	$+d/2$	+13 φ	50 φ	40 φ

ここで、 d : スラブ断面の有効高さ

コ示 α : 横補強・鉄筋間隔の係数、 f_{yd} : 鉄筋の引張降伏強度、 f_{bod} : コンクリートの設計付着強度

鉄道標準 k_1 : 鉄筋間隔係数、 f_{syd} : 鉄筋の引張降伏強度、 f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度

道示 σ_{sa} : 鉄筋の引張応力度の基本値、 τ_{0a} : コンクリートの付着応力度の基本値

*コ示における接合部の細目は $+d/2$ および+10 φの小さいほう

2.2 加力・計測計画

加力図を図-3 に、鉄筋のひずみ計測位置図を図-4 に示す。加力は壁部材の 2400mm 区間を PC 鋼棒の緊張により固定し、接合部から高さ 2200mm の位置にジャッキを取り付け水平加力を与えた。加力は橋脚の正負交番載荷試験方法¹⁰⁾（以下、試験ガイドライン）に基づき降伏変位を定め、水平荷重が 60%程度の低下または軸方向鉄筋が複数本破断するまで降伏変位整数倍-3 サイクルの加力を続けることとした。

計測は水平荷重と加力位置の水平変位、鉄筋ひずみ、軸方向鉄筋の伸び出し、デジタル画像相関法¹¹⁾による変位・ひずみ分布である。せん断補強鉄筋のひずみ計測位置は、軸方向鉄筋が座屈したタイミングを計測することを目的に定着プレートから 50mm 位置にて計測した。軸方向鉄筋の伸び出しは、接合部の位置の鉄筋に張り付けたワイヤーをシースにより試験体外に出し、変位計に結び付けて計測した。

比較項目は、接合部の斜めひび割れ発生荷重とスラブの耐力、じん性、軸方向鉄筋の伸び出しとした。

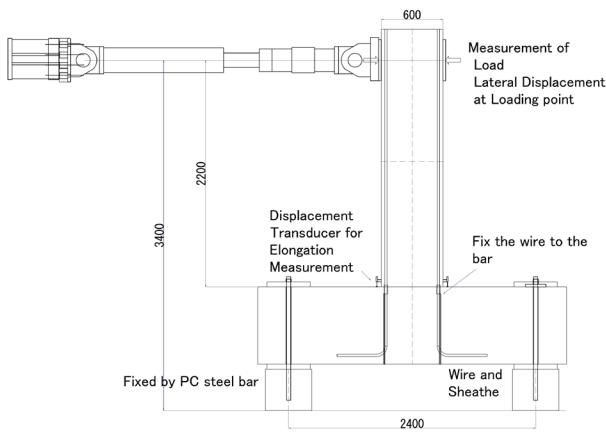


図-3 加力図

Fig.3 Specimen and loading actuator setup

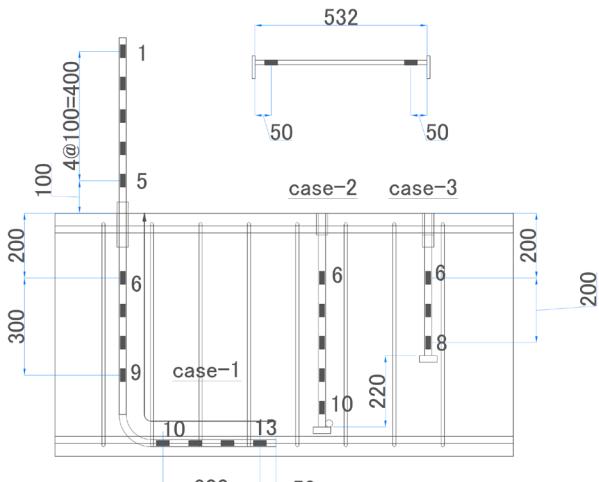


図-4 ひずみゲージ貼付位置

Fig.4 Setup of strain gage on rebars

3. 試験結果

3.1 水平荷重-変位関係

各ケースの水平荷重-変位関係の結果を図-5 に示す。降伏変位は各ケースで 1mm 以内の差異があったが、比較の分かり易さのためケース 1 と同様の 25.0mm で統一した。すべての試験ケースにおいて塑性率 5 において軸方向鉄筋の座屈・破断が生じ荷重低下を確認したため載荷を終了した。

各ケースの接合部斜めひび割れ発生荷重、最大耐力を表-4 に示す。最大耐力は塑性率 4 の負載荷側 1 サイクル目で確認されており、各ケースほぼ同様の値を示している。最終破壊状況として、ケース 2 における最終的な軸方向鉄筋の座屈状況を写真-1 に示す。せん断補強鉄筋が千鳥配置となっているため座屈区間は鉄筋毎に上下しているが、総じてせん断補強鉄筋 1 スパン (200mm) が座屈長となっている。これは各ケースにおいて同様である。スラブ軸方向鉄筋の座屈・かぶりコンクリートのはらみ出し・はく落は、各ケース塑性率 5 の繰返し 1 サイクル目に確認されている。これは荷重-変位関係にて荷重が低下するタイミング、および図-6 に示すようにせん断補強鉄筋の定着部付近に張り付けたひずみゲージの値が急伸するタイミングと一致している。今回利用したプレート定着型の機械式鉄筋定着工法は安定した横拘束効果を発揮していることが確認された。

以上の観点から、今回の条件においては、最大耐力や履歴曲線の観点からスラブ部材の耐震性能に大きな差異は生じないことが確認された。

表-4 各ケースの耐力結果一覧

Table 4 Horizontal capacity of each cases

	斜めひび割れ発生荷重		最大水平耐力
	正載荷	負載荷	
ケース 1	+560 kN	-503 kN	-942 kN
ケース 2	+682 kN	-691 kN	-963 kN
ケース 3	+398 kN	-362 kN	-941 kN



写真-1 スラブ部材の塑性ヒンジ（ケース 2）

Photo.1 Plastic hinge of slab part (case-2)

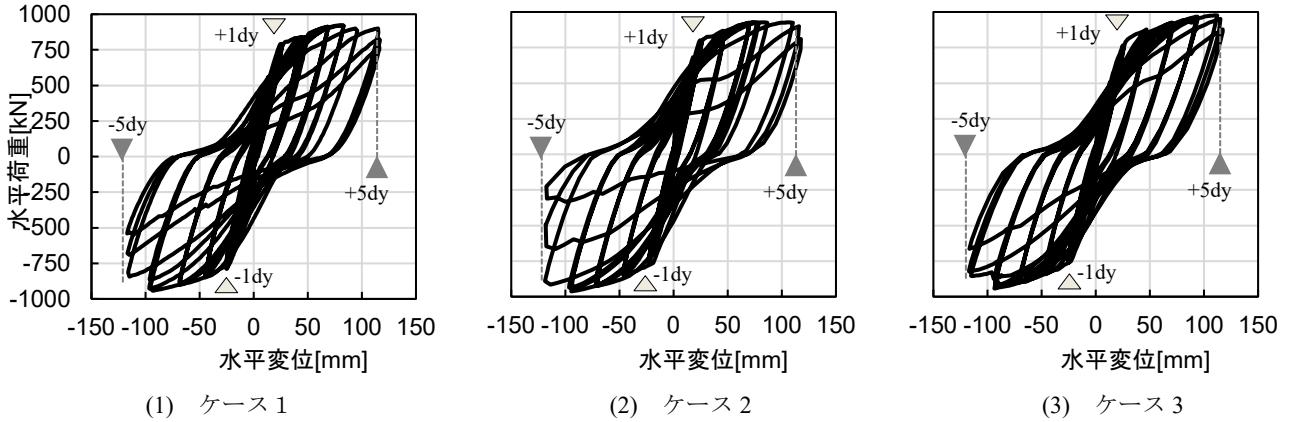


図-5 水平荷重-水平変位関係
Fig.5 Horizontal load - displacement relationships

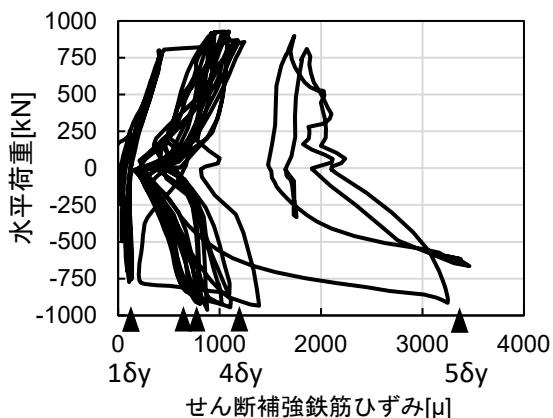


図-6 水平荷重-ひずみ関係（ケース2）
Fig.6 Horizontal load – strain relationship (case-2)

3.2 接続部の斜めひび割れ発生荷重

前節の表-4 で示した通り、接合部の斜めひび割れ発生荷重は定着長に対して大きく変動しており、定着長が短いケース3はケース1と比較して約60%，ケース2と比較すると約50%まで低下している。

デジタル画像相関法により計測された塑性率 1 繰返し 1 サイクル目の最大主ひずみ分布を図-7 に示す。各

ケースにおいて全て等しいファセット間距離および平均化計算をしているため、同じひび割れ幅では同程度のひずみ値を示している。

耐力が等しいケース 1, 2 ではひび割れの分布が等しく、接続部のせん断ひび割れは定着部（半円形フックの折り曲げ部付近、ケース 2 では定着プレート付近）にかけて進展している。一方でケース 3 では圧縮端から進展するひび割れは定着プレートまで進展し、そこを起点として壁部材の固定端を目指すように進展している。ひび割れ形状からは、スラブの軸方向鉄筋を避けるように進展しているためせん断補強鉄筋としては機能しておらず、ひび割れ方向が変わり抵抗する面積が減少したことで斜めひび割れ発生荷重が減少したと考えられる。

接合部にせん断ひび割れが発生した後の挙動は全てのケースで類似しており、降伏変位・荷重に明確な差異は確認されていない。またスラブ軸方向鉄筋の座屈までの加力において、接合部の破壊による耐力の低下は、今回の定着形状・定着長の条件では生じなかった。

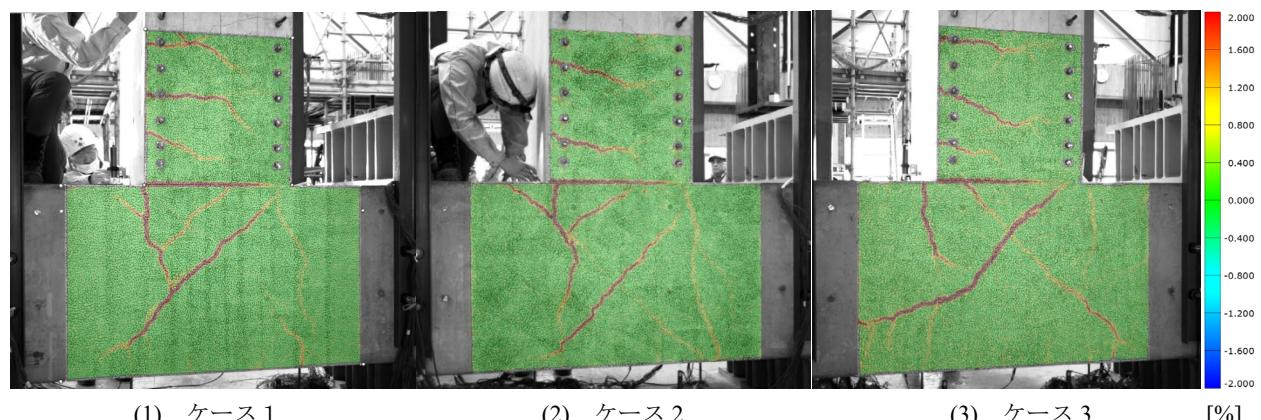


図-7 最大主ひずみ分布（塑性率 1 繰返し 1 サイクル）
Fig.7 Max principal strain distribution at 1dy-1cycle

3.3 軸方向鉄筋の伸び出し

ワイヤーにより計測されたスラブ部材の軸方向鉄筋の接続部位置での伸び出し発生荷重および伸び出し量を表-5に、水平荷重-伸び出しの関係を図-8に示す。塑性率1までにおいては荷重-伸び出し関係に大きな差異は確認されなかつたが、繰返し載荷を続けるにつれ、ケース3では他の2ケースと比べて伸び出しが大きくなっている。座屈が発生した塑性率5繰返し2サイクル目まで伸び出しは漸増し、繰返し3サイクルでは破壊がスラブ部材で生じているために、伸び出しは増加しなかつた。また負載荷側（水平荷重マイナス、計測鉄筋が圧縮側）となる際にも伸び出しの残留が大きい。

ケース1とケース2では、ケース2が塑性率5まですべての塑性率で小さい伸び出しを示している。また

表-5 軸方向鉄筋の伸び出し発生荷重・伸び出し量

Table 5 Elongation at particular load steps

	発生荷重	塑性率1	塑性率5
ケース1	375 kN	1.002 mm	4.002 mm
ケース2	312 kN	0.802 mm	2.758 mm
ケース3	360 kN	1.334 mm	8.762 mm

伸び出しの残留の観点では、塑性率5においてケース1が1.5mm以上の伸び出しの残留が発生しているのに対し、ケース2ではその25%程度である0.4mm程度の残留しか生じていない。デジタル画像相関法による塑性率5繰返し2サイクル目の最大主ひずみ分布の図-10に示す。スラブ部材はコンクリートのはく落が進んでおり、一部箇所は相関計算がなされていない。ケース1、2の接合部はこのタイミングにおいても類似のひび割れ形状を示している。塑性率1から比較すると、特に定着具周辺や壁部材に埋め込まれている軸方向鉄筋部のひび割れは変化していない。

一方でケース3では塑性率1から見られた斜めひび割れのほかに、定着具から試験体外方向に進展するひび割れが発生し、これが壁部材を固定している上端に向かって進展している。このひび割れは塑性率3から確認されており、定着部からのコーン状ひび割れが試験体表面にも貫通したものである。定着長が短い場合には、このようなひび割れが発生し、伸び出しの残留、接合部のひび割れ幅の増加が生じている。

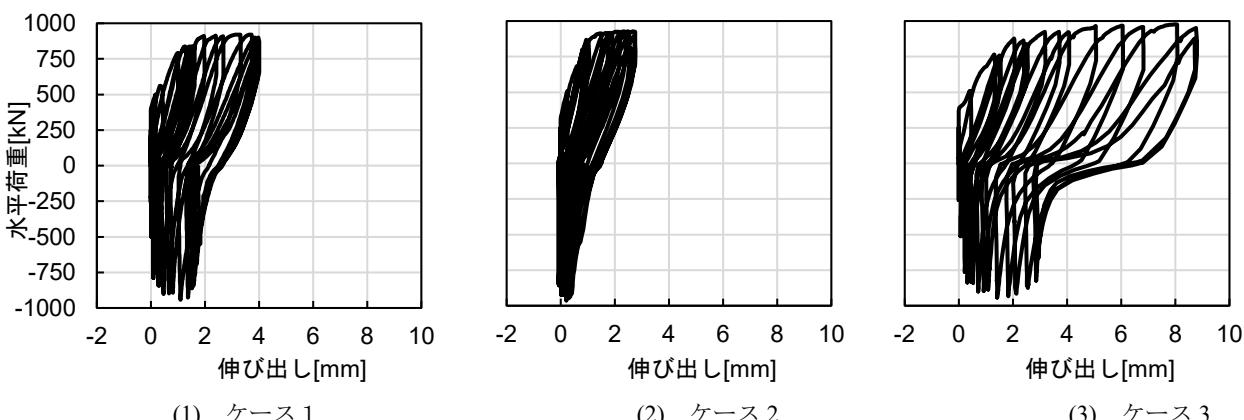
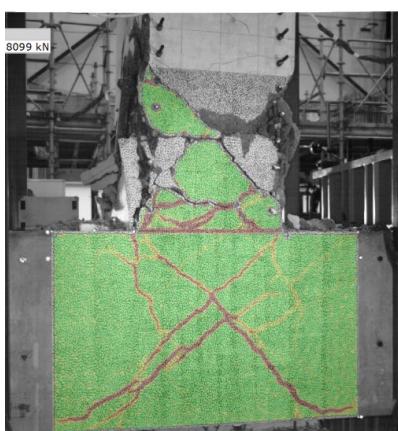
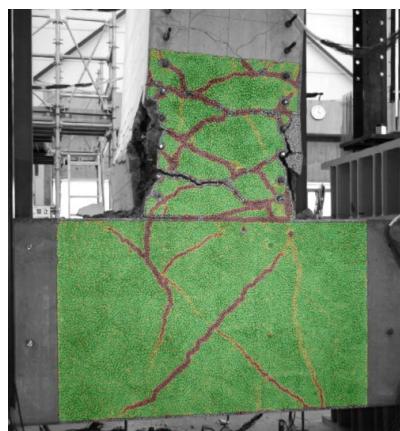


図-8 各試験ケースにおける水平荷重-伸び出し関係

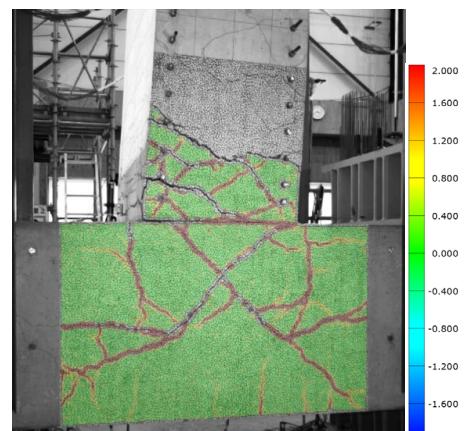
Fig.8 Horizontal load - elongation relationships



(1) ケース1



(2) ケース2



(3) ケース3

[%]

図-9 最大主ひずみ分布（塑性率5繰返し2サイクル）

Fig.9 Max principal strain distribution at 5dy-2cycle

4. 非線形有限要素法による接合部斜めひび割れ発生の再現

前章の結果において、今回の試験体の定着形状・定着長の差異では耐震性能に影響は与えなかったが、接合部に発生するせん断ひび割れおよび鉄筋の伸び出しは大きく異なっていた。本章では数値解析より再現する。機械式鉄筋定着工法の解析としてはメゾスケール（mm スケール）まで、つまり鉄筋の節形状までを再現した高詳細幾何モデルを用いた有限要素法¹²⁾（以下、FEM）や剛体ばねモデル解析^{13,14)}に基づく定着性能の検証が行われている。要素試験レベルにおいては、これにより付着-定着機構の詳細な再現が可能と報告されている。一方で部材規模への適用事例はなく、多大なモデル化コストと計算不可が発生するものと想定される。そこで本研究では鉄筋をトラス要素としてモデル化し、鉄筋の付着すべりモデルにおいて定着部をすべり固定とするモデル化を実施した。これにより大幅なモデル化コスト・計算コストを低減している。

4.1 モデル化

ソフトウェアは汎用有限要素法ソフトウェアである diana (ver.10.5) を用いた。解析は 2 次元で実施し、コンクリートは分散ひび割れモデルの一つである Total Strain Crack Model¹⁵⁾とし、引張側に対して破壊エネルギーを考慮した示す 2 直線モデル、圧縮側に対して圧縮破壊エネルギー¹⁶⁾を考慮した放物線モデル、せん断伝達関数について軟化を考慮した接触密度関数¹⁷⁾とした。鉄筋はトラス要素でモデル化し、スラブ軸方向鉄筋のみコンクリートとの付着を島ら¹⁸⁾が提案する付着応力-すべり-鉄筋ひずみ関係を考慮し、先述した通り定着部をすべり固定とした。壁部材の鉄筋およびスラブ部材のせん断補強鉄筋はトラス要素の埋め込みモデルとした。解析で用いたモデル・メッシュ図、境界条件

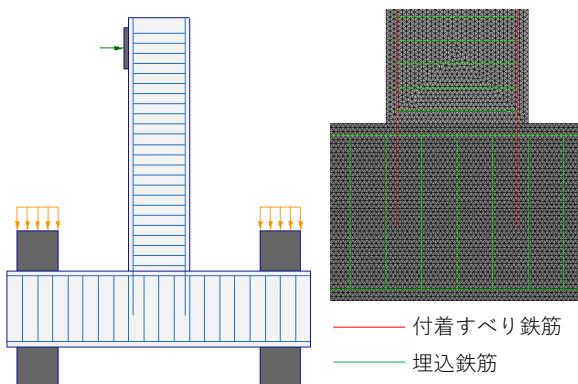
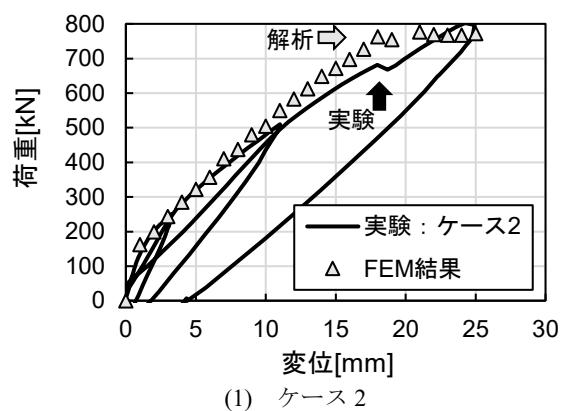


図-10 モデル図・メッシュ分割
Fig.10 FEM model and meshing

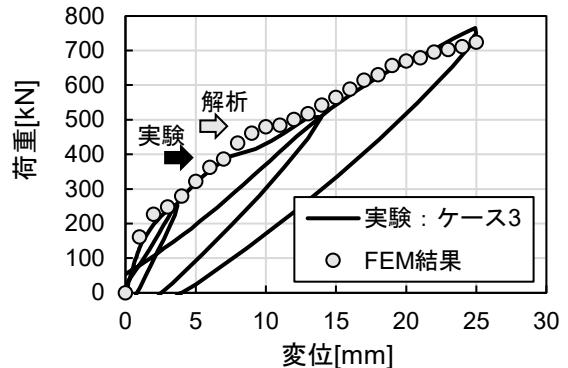
件、荷重を図-10 に示す。メッシュの代表長さは 20mm と設定し、3 角形 2 次要素を利用した。解析手法は割線剛性法、収束はつり合い力 0.1% とし、収束しない場合は残差力を次ステップに繰り越すものとした。加力プレートは線形弾性体でモデル化し、基部を 2 方向固定、上部に 12N/mm² の分布荷重を与える。加力は載荷プレートの中心に強制変位 25mm（各ケースの降伏変位）を 100 ステップ分割で与えている。解析対象としては接合部にせん断ひび割れが発生した荷重が明確に異なっているケース 2 とケース 3 とし、これらのケース間のモデルの差異はトラス要素の長さのみである。

4.2 解析結果

得られた解析結果として各ケースの荷重-変位関係と実験結果（塑性率 1 繰返し 1 サイクル正載荷まで）との比較を図-11 に示す。各ケースとも実験において接合部にせん断ひび割れが発生したタイミングで剛性が低下しており（図中の黒塗り矢印）、解析においても同様の事象（図中の白抜き矢印）を再現している。本解析において荷重変位関係は高い再現を達成している。



(1) ケース 2



(2) ケース 3

図-11 解析結果（水平荷重-変位関係）

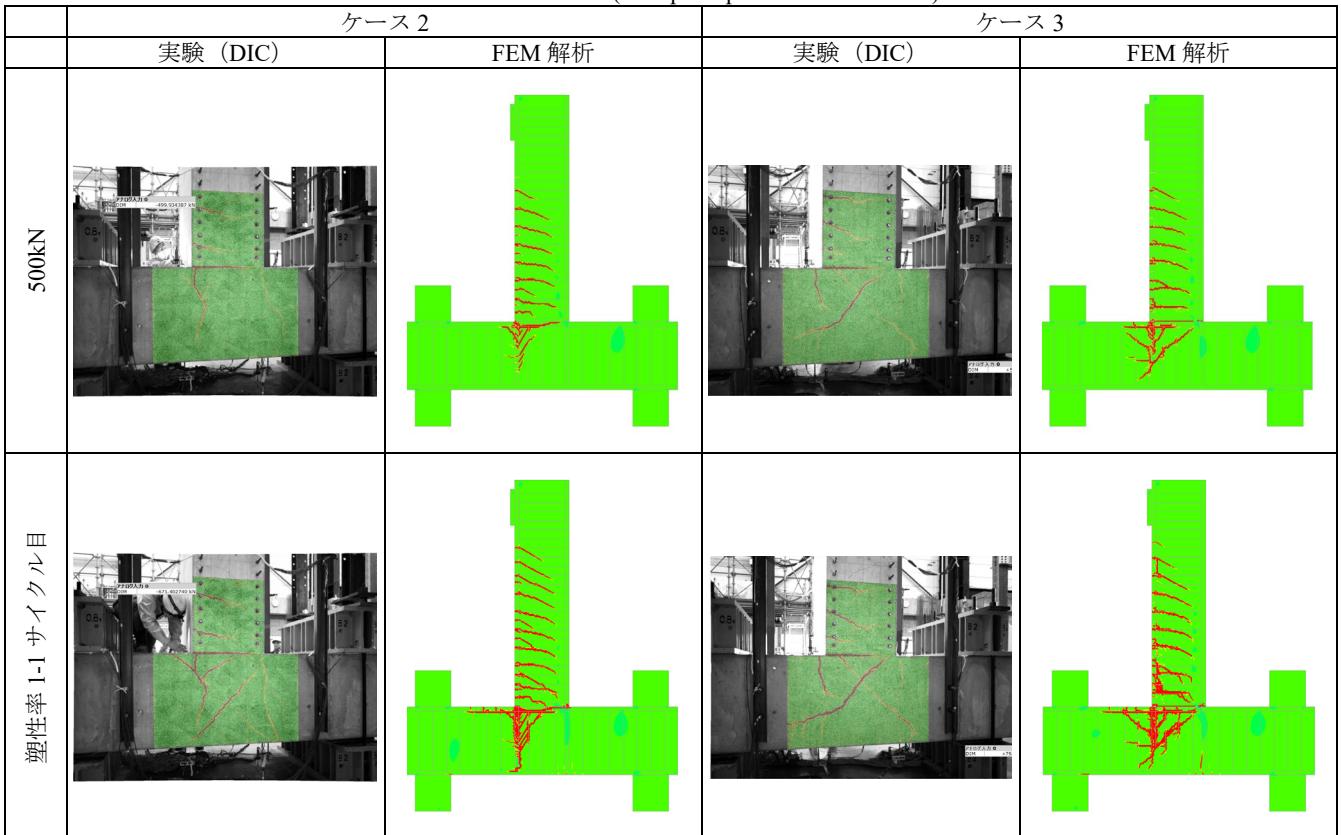
Fig.11 FEM result (horizontal load-displacement relationship)

表-6 解析結果（斜めひび割れ発生荷重）

Table 6 FEM result (shear cracking load)

	実験結果（再掲）	解析結果
ケース 2	+682 kN	-691 kN
ケース 3	+398 kN	-362 kN

表-7 解析結果（最大主ひずみ分布）
Table 7 FEM result (Max principal strain distribution)



方で接続部のせん断ひび割れが発生した耐力に関しては、表-6 に示す通り定着長が短くなることせん断ひび割れ耐力の低下を定性的に再現しているが、定量的には各ケースで耐力を 10~20%過大に評価している。1 点考えられる理由として、2 次元解析で端部すべりを固定として表現しているが、このモデルでは奥行き方向に群として配置されている効果を再現できていないため、定着をやや強く表現していることが影響している可能性がある。これは今後の検討課題とする。

解析によるひび割れ性状としては、表-7 に最大主ひずみ分布を示す。なおコンターの幅を超える要素は、最大コンターの色で表現している。ケース 3 では軸方向鉄筋の定着部からスラブの圧縮縁に進展するせん断ひび割れが再現良く確認される。一方でケース 2 ではせん断ひび割れの進展が軸方向鉄筋の途中から発生しており、ひび割れ性状についてはやや異なった進展を示した。またケース 3 においても、定着部から図左の方向（壁部材固定部上端）に進展するひび割れも発生しているが、これがコンクリート表面で目視されたのは塑性率 3 の加力時である。DIC による計測が部材表面であり、2 次元解析では完全には再現できないため、今後は 3 次元解析においてひび割れおよび鉄筋伸び出し量の再現性を検討する予定である。

これら検討により、2 次元 FEM で定着長を変化することで接続部のせん断ひび割れ耐力を定性的に示すことができ、適切な安全率を考慮することで定着長の設計が FEM で可能となる可能性が示された。

5. まとめ

壁-スラブ接合部において機械式鉄筋定着工法をスラブの軸方向鉄筋に用いた部材実験および数値解析により耐震性能を検証した。以下にその内容を示す。

- (a) 設計指針の基づき設定された定着長を持つ機械式鉄筋定着工法は、高密度に配筋された場合であっても良好な定着を示し、標準フックよりも小さい伸び出しであった。また部材の耐震性能も同様であった。
- (b) 設計指針よりも短い定着長を設定した機械式鉄筋定着工法は、標準フックや設計上必要となる定着長を有する機械式鉄筋定着工法に比べ、降伏後の伸び出し量が顕著に大きくなかった。部材の耐震性能には明確な差異はなかったが、伸び出しの影響で接合部の残留変位が大きくなる傾向があり、適用には注意が必要となる。
- (c) 2 次元の非線形有限要素法により接合部の耐力

を検討したところ、適切に定着機構をモデル化することで、定着長の違いによる接合部のせん断ひび割れ耐力の差異を表現できることを確認した。一方でその耐力の定量的な再現や、ひび割れ性状に関してはまだ改善すべき点あり、今後は3次元の有限要素法との比較を進める。また計算コスト低減のため2次元解析で定着長の設計を試みる際には、適切な安全率を設定する必要があることを確認した。

謝辞

本研究はシンガポール工科大学教授の ChiewSinPing 博士に実験計画および評価方法に関して助言いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：機械式鉄筋定着工法の配筋設計ガイドライン，2016.7
- 2) 国土交通省：コンクリート生産性向上検討協議会，https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000079.html (2024.6 確認)
- 3) (一社) 土木学会：コンクリート標準示方書，2023.3
- 4) (一社) 土木学会：コンクリートライブラリ 156 鉄筋定着・継手指針[2020年度版]，2020.3
- 5) (財) 土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書「Head-bar」，1999.9
- 6) 吉田昂平，山本悠人，畠明仁，村田裕志，藍谷保彦：SD490Head-bar の適用範囲拡大に向けた取り組み，大成建設技術センター報，No.56-19，2023.
- 7) (一財) 土木研究センター：建設技術審査証明報告書「Head-bar」，2022.12
- 8) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II コンクリート橋・コンクリート部材編，2017.11
- 9) (公財) 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），2023.1
- 10) (国研) 土木研究所：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン（案），土木研究所資料第4023号，2006.8
- 11) 山本悠人，村田裕志，畠明仁：デジタル画像相関法を用いたRCはり部材の損傷評価の試み，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，2019.7
- 12) 山本悠人，村田裕志，河村圭亮，畠明仁：引抜き実験とメソスケール解析による機械式鉄筋定着工法の定着性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.2，pp.715-720，2024.
- 13) Hayashi, D. Nagai, K. Liyanto, E.: Mesoscale Analysis of RC Anchorage Performance in Multidirectional Reinforcement Using a Three-Dimensional Discrete Model, Journal of Structural Engineering 2017.3
- 14) 井熊晃司，山本佳士，中村光，三浦泰人：RBSM-FEM 結合解析手法による異形鉄筋の付着機構のメソスケールシミュレーション，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.541-546，2018.
- 15) Selby, R., and Vecchio, F. Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02, Univ. Toronto, dept. Civil Eng., Toronto, Canada, 1993.
- 16) Nakamura, H. Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.
- 17) Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003.
- 18) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシブ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, p.165-174, 1987.2