

コンクリート充填角形鋼管を用いた合成壁の接合部載荷試験

Loading Tests of Joint Part of Composite Wall Using Concrete Filled Steel Tubes

黒川 幸彦 YUKIHIKO KUROKAWA

三上 博 HIROSHI MIKAMI

土木設計第一部 山地 斉 HITOSHI YAMAJI

土木設計第一部 松原 博 HIROSHI MATSUBARA

筆者らは、地下連続壁の芯材にコンクリートを充填した角形鋼管を用い、地中構造物の側壁の一部として本体利用する工法を開発した。今回、鋼管と RC 部から成る合成壁と RC 床版の接合構造の妥当性確認を目的として、函体隅角部を L 字型に切り出した縮小モデルを用いて載荷試験を行った。その結果、床版接合部の挙動は FEM 非線形解析結果とほぼ一致し、接合部の構造は妥当であることが確認された。

キーワード：地中連続壁，合成壁，角形鋼管，載荷試験

Authors have developed the construction method of an underground continuous wall using concrete filled square steel tubes for the wick member, and used a structural part of the underground structure. In order to confirm the joint structures of slab and wall, we performed loading tests by using L type model which the joint part were cut away. From the test results, behavior of joint part was almost corresponding to the FEM analysis, and it was confirmed that joint part has enough structural performance.

Key Words: Underground continuous wall, Composite wall, Square steel tubes, Loading test

1. はじめに

筆者らは、鋼製地中連続壁工法などの地下連続壁の本体利用工法に対して更なるコスト削減を目指し、HERT-Wall 工法（Hybrid Earth Retaining Tube-Wall Method）を開発した¹⁾。HERT-Wall 工法は、泥土モルタル固化壁やソイルセメント地下連続壁の芯材にコンクリートを充填した角形鋼管を用い、これを地中構造物の側壁の一部として本体利用して、掘削土量を低減しコスト削減を図る工法である。図-1に工法の概要を示す。

本工法は開削トンネルや立坑の構築方法として、大深度掘削や近接施工で高剛性の地下壁が必要となる場合、用地の制限により壁厚を薄くしたい場合などに有効である。構造的には、角形鋼管にコンクリートを充填し合成構造とすることで壁体の耐力を高めていること、P-T 型継手によって角形鋼管を連結しており、芯材に H 形鋼を用いた SMW 工法による本体利用工法などに比較して止水性に優れること、などが特徴である。

合成壁の曲げ試験²⁾、施工性試験³⁾などを実施して、構造上、施工上問題ないことを確認しているが、本稿では角形鋼管と RC 部材の合成壁と RC 床版との接合

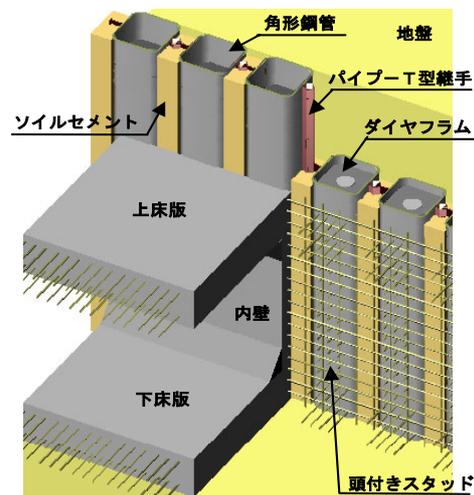


図-1 工法概要図

構造の妥当性、および耐震性能確認を目的として実施した接合部載荷試験について報告する。

2. 載荷試験概要

(1) 試験体および試験ケース

接合部載荷試験に用いた試験体は、実構造物を 1/2 に

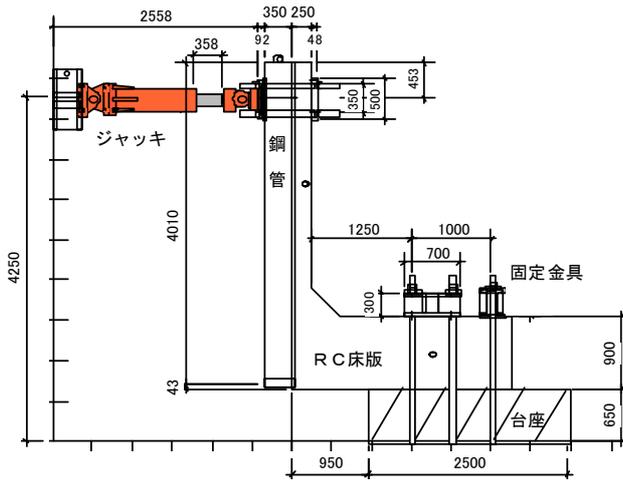


図-2 試験体形状および載荷装置

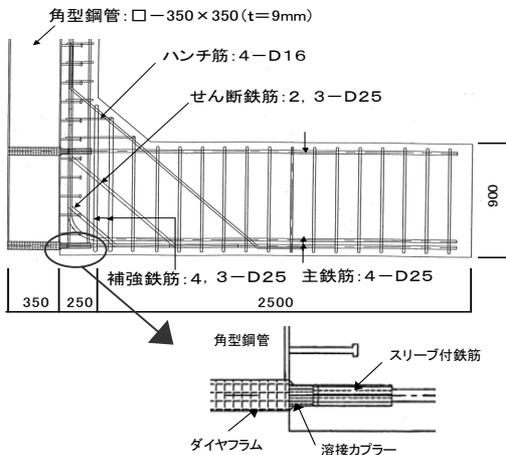


図-3 接合部構造詳細 (CASE4)



写真-1 載荷試験状況 (CASE4)

縮小し接合部付近をL字型に切り出したモデルとした。

試験体の形状を図-2に示す。角形鋼管に□-350×350 (t=9mm) を用い、RC部材厚さは合成壁部が25cm、床版部は90cmである。試験体断面幅は鋼管の配置ピッチを考慮した有効幅49cmとした。RC部と鋼管の接合面のシアコネクタは「各種合成構造指針同解説(日本建築学会)」に示された完全合成梁のスタッドコネクタの

表-1 試験体諸元一覧表

項目	CASE 1	CASE 3
概要		
	CASE 2	CASE 4
鋼管	□-350×350 t=9mm (BCR295)	
コンクリート	早強 24N/mm ² (RC部、鋼管充填コンクリート共)	
主鉄筋	合成壁	D13@5本
	床版上部	D22@4本
	床版下部	D25@4本 (ケース2=2段配置)
補強筋	なし	ケース3=D16@8本 ケース4=D25@5本(斜)、7本(直)
スタッドジベル	頭付きスタッド φ13mm (L=80mm) 3列 150mmピッチ	
鉄筋結合方法	上部=曲上げ定着	上部=曲上げ定着、or溶接カプラー
	下部=溶接カプラー継手	下部=溶接カプラー定着
載荷方法	1方向載荷	正負交番載荷

規定に従い、頭付きスタッドφ13を配置した。

載荷試験はRC床版主筋端部の定着方法、補強筋の有無などをパラメータとし、表-1に示す4ケースを実施した。CASE1,2では床版主筋の定着方法の妥当性確認を、CASE3,4は床版接合部の補強筋配置方法、および耐震性能確認を主目的とした。

CASE4の接合部構造詳細を図-3に示す。床版主筋は機械式継手(溶接カプラー)によって鋼管と結合した。主筋位置に合わせ鋼管に配置したダイヤフラムに溶接カプラーを工場溶接しておき、掘削後ネジ鉄筋を取付ける方法である。この方法と他の方法(鋼管と結合せず曲上げ定着のみ)についてCASE3,4で妥当性を確認した。

RC 函体隅角部については、「道路橋示方書・同解説コンクリート橋編(日本道路協会)」に、節点部に曲げモーメントが作用する場合の補強筋配置方法の規定がある。合成壁にそのまま適用される規定ではないが、隅角部に生じる引張応力に対してどの程度の補強が妥当かを確認することとした。

CASE1,2は隅角部に補強筋を配置しない場合、CASE4が道路橋示方書に基づき計算上必要となる補強筋量を配置した場合、CASE3が必要量の約1/2の補強筋を配置した場合である。また、CASE1で常時土圧作用時に床版に発生する軸力を想定して、床版部に一定の緊張力を導入した。載荷試験状況(CASE4)を写真-1に示す。

(2) 載荷方法

載荷方法はCASE1,2が1方向載荷、CASE3,4は変位制御による正負交番載荷とした。

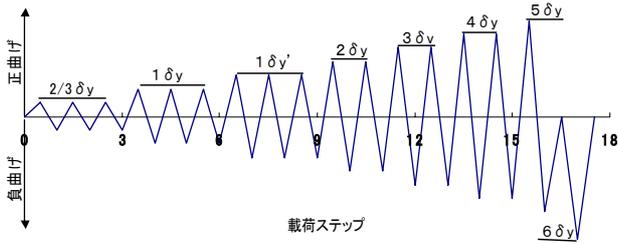


図-4 載荷サイクル図 (CASE4)

載荷方向は試験体が閉じる方向を正方向 (+), 開く方向を負方向 (-) とした。1 方向載荷は正方向のみに試験体の破壊まで載荷, 正負交番載荷については, 負方向載荷時に合成壁主筋が降伏した時 (鉄筋の降伏ひずみは材料試験結果から 2100μ とした) の変位を基準変位量 δ_y として繰返し載荷を行った。例として, CASE4 の載荷サイクルを図-4 に示す。

(3) 評価方法

試験体の降伏荷重, 終局荷重, および荷重-変位関係は, 2次元 FEM 非線形解析により求めて, 解析値と計測値を比較することにより妥当性を評価した (解析コード; WCOMD)。解析に用いた材料特性は鋼管, 鉄筋, コンクリートとも材料試験結果による。

FEM 非線形解析は鉄筋降伏以降の挙動も追跡可能であることから採用したが, CASE1,2 については鋼管を鉄筋に置き換えた形の非線形フレーム解析 (解析コード; Say-NAP) も併せて行い結果を比較した。部材の降伏までは両解析結果ともほぼ同じ値であるが, 終局荷重は FEM 解析結果がやや大きめの値となった。

3. 試験結果及び考察

(1) 試験結果 (荷重値)

設計上ほぼ同じ耐力を合成壁と RC 床版部に持たせているが, 試験の結果, 主筋の降伏はおおむね床版部で先行した。降伏荷重, 終局荷重の計測値を解析値 (FEM 解析結果) と対比したものを表-2 に示す。

全般に変位量は計測値の方が大きい, 降伏荷重, 終局荷重とも CASE1,2,4 については解析値と計測値がほぼ等しい結果となっており, 設計上合成壁を RC 部材として扱っても問題ないと考えられる。

CASE3 については床版上部主筋の曲上げ定着が有効でなく, 負方向載荷時, 主筋降伏前に RC 部材と鋼管の接合部で破壊した。ただし, 正方向の載荷は接合部の破壊後も継続し終局荷重が解析値とほぼ同等であることを確認した。

表-2 試験結果一覧表

CASE	載荷方向	解析結果	合成壁部 (kN)		RC床版部 (kN)		備考	
			降伏荷重Py	終局荷重Pu	降伏荷重Py	終局荷重Pu		
1	+	解析値	375	535	371	441	床版部に緊張力 N=1400kN 導入	
		計測値	降伏せず		380	426		
2	+	解析値	375	535	340	430		
		計測値	降伏せず		345	433		
3	+	解析値	380	—	350	430	負方向載荷時に、接合部で鉛直方向の割裂ひびわれを生じ、破壊に至る	
		計測値	降伏せず		300	459		
3	-	解析値	100	—	130	—		
		計測値	115 (合成壁RC部破壊)					
4	+	解析値	380	537	400	469		
		計測値	降伏せず		439	476		
4	-	解析値	208	351	190	223		
		計測値	194	終局に至らず	198	276以上		

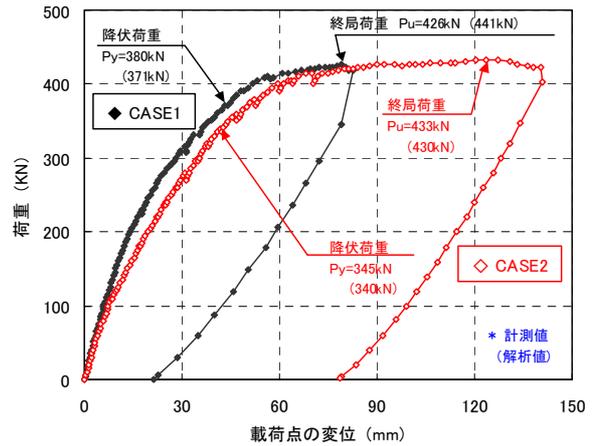


図-5 荷重～変位図 (CASE1,2)

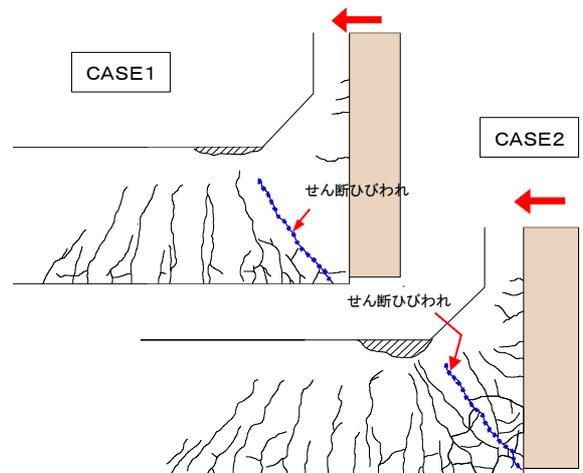


図-6 試験体の破壊形態 (CASE1,2)

(2) 荷重～変位の関係および破壊形態

a) CASE 1, 2

CASE1,2の荷重～変位の関係を図-5に示す。両者とも1方向載荷のみ行ったケースである。CASE1では床版部に一定の軸力 (1400kN, 変動3%以内) を導入しているが, 部材の耐力はCASE2とほぼ同等である。CASE2の床版下部主筋は2段配置で, 最下段は溶接カプラー継手, 2段目は曲上げ定着としている。

試験の結果, 表-2に示すように降伏荷重・終局荷重とも解析値とほぼ同等の結果が得られた。変位量の差は軸

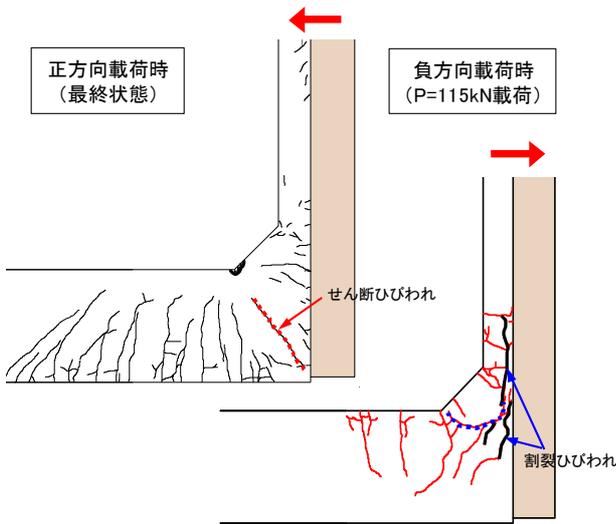


図-7 試験体の破壊形態 (CASE3)

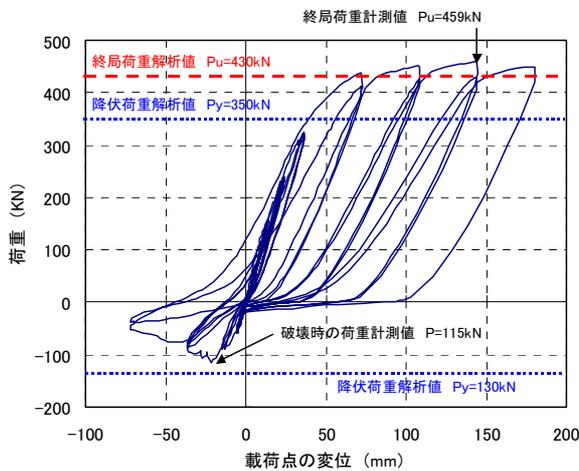


図-8 荷重～変位図 (CASE3)

力導入による差と考えられる。図-6に試験体の破壊形態を示す。試験体床版下部に最初のひびわれが発生した後、次第にひびわれが増加・伸展し、最終的には床版上面・ハンチ端部でコンクリートが圧壊するという破壊形態となった。CASE1でひびわれ発生量が少ないのは軸力導入の効果と考えられる。合成壁部では鋼管側にひびわれが一部生じるがほとんど増加せず、床版の破壊後も合成壁主筋の降伏はみられなかった。図に点線で示す試験体端部からハンチ端に延びるひびわれはCASE1で335kN載荷時、CASE2で280kN載荷時に生じたもので曲げの作用する節点部に生じるせん断ひびわれと考えられる。やはり、RC床版接合部には何らかの補強が必要であると判断された。

b) CASE 3

図-7に試験体の破壊形態を示す。CASE3では正負交番載荷を行ったが、先に述べたように、負方向に115kN載荷した時(降伏荷重解析値は130kN)、接合部に縦方向の割裂ひびわれを生じ破壊した。破壊以前90kN載荷の

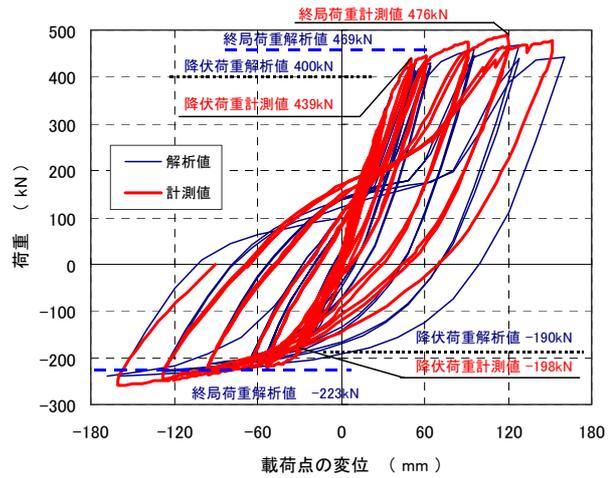


図-9 荷重～変位図 (CASE4)

段階で、床版上部主筋の曲上げ加工部に沿ってひびわれが生じており(図-7右図に点線で示す)、主筋とコンクリートの付着が切れた後に破壊に至ったものと考えられる。

図-8にCASE3の荷重～変位の関係を示す。割裂ひびわれ発生後も正方向の繰返し載荷を継続し(負方向は荷重0とした)、床版上面コンクリートが圧壊した段階で載荷試験を終了した。正方向載荷時の破壊形態は他のケースとほぼ同じで、試験体端部からハンチ端に延びるせん断ひびわれは310kN載荷時に生じた。これは、床版隅角部に補強筋を配置しなかったCASE1,2と大差ない結果であった。

c) CASE 4

CASE4は床版の上下部主筋とも溶接カプラー継手により鋼管と結合し、床版隅角部には道路橋示方書の規定に基づく必要量の補強筋を斜め45°(開口方向に対応するもの)および鉛直方向(開口方向に対応するもの)に配置している。図-9にCASE4の荷重～変位の関係を示す。

負方向載荷時はまず合成壁主筋が降伏するが、その直後に床版上部主筋が降伏し、以後は床版部の破壊のみが進行する形となった。正方向載荷時は439kN(解析値400kN)で床版主筋が降伏し、4δ_y載荷時に床版上面でコンクリートが圧壊した。終局荷重は476kN(解析値469kN)であった。以後は負方向載荷のみ繰返したが載荷荷重の上限値は装置の制約のため確認できなかった。

試験結果から、荷重～変位の関係はFEM解析結果とほぼ一致しており、本構造は合成壁としての耐力を満足するとともに一体性に問題はないと判断される。また、地中構造物であることを考慮すれば4δ_y載荷時(終局時)の合成壁の変形角 $\theta = \tan^{-1}(128/2700) = 2.7^\circ$ は充分余裕のある数値であり、本構造は充分な耐震性を有すると判断される。

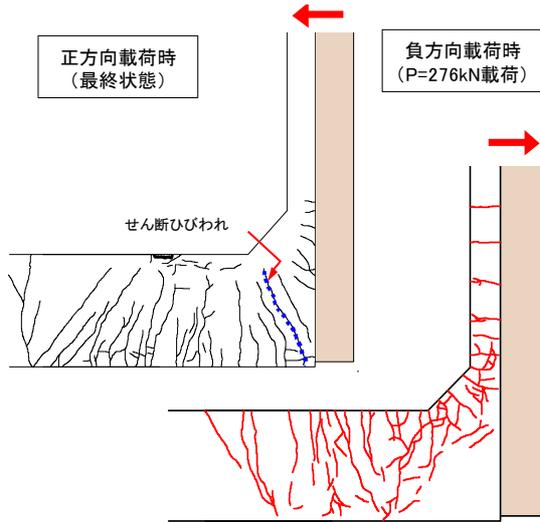


図-10 試験体の破壊形態 (CASE4)

図-10に試験体の破壊形態を示す。正方向載荷時は他のケースと若干異なりハンチ端から約1m離れた試験体の固定部付近でコンクリートが圧壊した。また、試験体端部からハンチ端に伸びるせん断ひびわれは402kN載荷時に生じており、主筋の降伏とほぼ同時であることから補強筋が有効に働いたものと考えられる。負方向載荷時はハンチ付近からひびわれが生じ、RC部材の場合とほぼ同様な破壊形態を示しているが、明確なせん断ひびわれは確認できなかった。

(3) RC部材鉄筋の挙動

a) 床版下部主筋

正方向載荷時の床版下部主筋D25について降伏時のひずみ分布 (CASE2,4) を図-11に示す。2段配筋の場合を比較したもので、図中の計測位置は鋼管接合面からの距離を示す。破壊形態の相違によって降伏が始まる地点は異なるが、ハンチ部 (0~0.6m区間) を除き機械継手による1段目主筋と曲上げ定着による2段目主筋はほぼ同じ挙動を示しており、主筋の定着結合方法は両者とも妥当であると考えられる。したがって、2段配筋の場合、部材中心側の主筋は鋼管と結合せず曲上げ定着のみであっても問題ないと判断される。

b) 床版上部主筋

床版上部主筋の降伏時のひずみ分布を図-12に示す。

負方向載荷時のCASE3,4を比較したものでCASE3が曲上げ定着、CASE4が機械継手のケースである。CASE3で上部主筋のひずみは鋼管側ではほとんど増加しておらず、単鉄筋のみで曲上げ定着した場合はコンクリートとの付着切れが生じたことがわかる。CASE4では、正方向載荷時と同様に梁区間 (0.6~1.5m) でほぼ同時に降伏に達しており、機械継手による結合であれば問題ないと

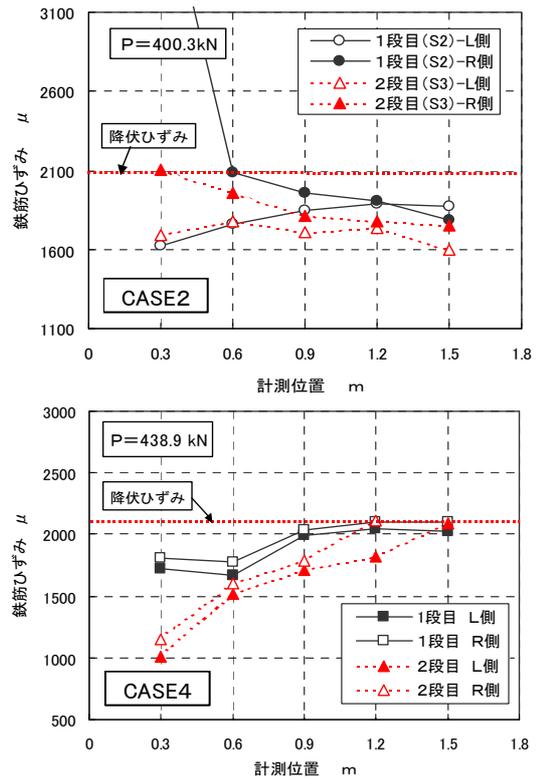


図-11 床版下部主筋のひずみ分布

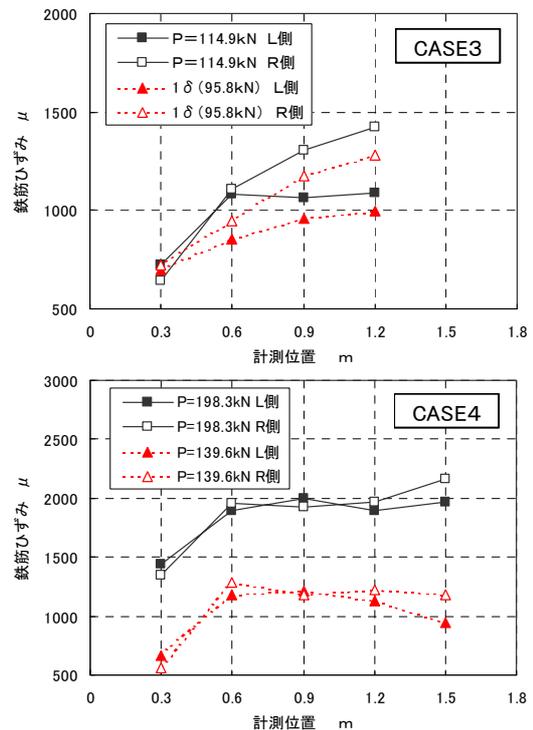


図-12 床版上部主筋のひずみ分布

考えられる。

c) 補強筋

正方向載荷時に補強筋量による効果の差をCASE3,4で確認したが、斜方向の補強筋はどちらのケースでも降伏には達していない。一方、負方向載荷時に、鉛直方向に

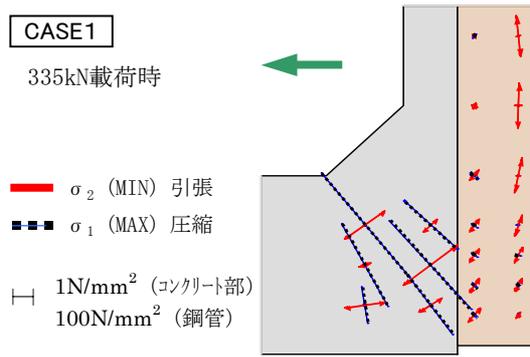


図-13 主応力図 (CASE1)

配置した補強筋のひずみ量は最大でも 200 μ 程度であった。合成壁部鋼管の比率が大きく、RC 部材が負担するせん断力が小さくなった可能性が考えられる。

(4) 合成壁の挙動

床版部の破壊が先行する破壊モードとなったため、鋼管は降伏せず、また、合成壁主筋についてもCASE4で一部降伏に達したのみであった。

図-13にCASE1について、335kN 載荷時の鋼管および床版接合部付近の主応力状態を示す。力の伝達は主筋継手部に集中することなく合成壁から床版部全体にスムーズに行なわれていることがわかる。

(5) 頭付きスタッドの挙動

頭付きスタッド基部付近 (溶接面から 1cm の位置) でひずみを計測し、軸力と曲げ応力を求めた結果を図-14 (CASE4) に示す。頭付きスタッドはハンチ部 (ST-1) では大きな曲げ応力を生じているが、軸方向応力はほぼ 0 であり曲げのみ作用している状態であった。床版下端部 (ST-4) においては曲げ応力、軸方向応力とも最大で 200N/mm² 以上となった。床版下部に発生する曲げひびわれに該当する形で鋼管下部と RC 部材間に剥離が生じたことに対応していると考えられる。

4. おわりに

コンクリート充填角形鋼管を用いた合成壁の接合部載荷試験の結果から次のような知見が得られた。

① RC 床版接合部の挙動は FEM 非線形解析結果と一致する、② 4 δ_y の載荷まで終局に達しないことから、十分な耐震性を有すると考えられる。合成壁の曲げ載荷試験と今回の接合部載荷試験の結果から、本構造は鉄筋コンクリート構造物として設計可能であると考えられる。

また、接合部の構造詳細に関しては、③主筋と鋼管の溶接カプラーによる結合方法は有効である、④ 2 段配筋

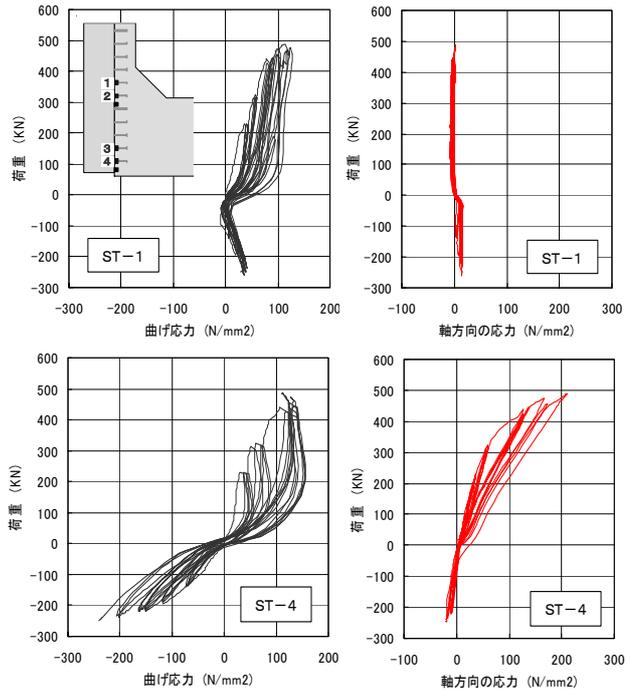


図-14 頭付きスタッドの応力状態 (CASE4)

の場合は一方の主筋は曲上げ定着でよい、⑤補強筋配置は道路橋示方書に示された曲げの作用する節点部の補強筋配置方法に従うとよい、ただし、開口方向に対する補強筋の妥当性は確認できず別途に検討する必要がある、などの知見が得られた。

今後、コストダウンの可能な本体利用連続壁工法として確立すべく、実用化に向けて更なる検討を進めたい。

謝辞：本研究を行うに当たり、解析などにご協力いただきました高知工科大学・島弘教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 印南・山地・諸田他：山留め壁の本体利用—コンクリート充填角形鋼管地下連続壁工法の開発—, 住友建設技報【土木編】121号, pp.15-22, 2003.1
- 2) 松原・黒川・山地：コンクリート充填角形鋼管を用いた合成壁の曲げ載荷試験, 第38回地盤工学研究発表会, pp.1743-1744, 2003.7
- 3) 諸田・二村・峯村他：コンクリート充填角形鋼管連続壁工法の開発と現場施工試験, 土木学会第57回年次学術講演会, pp.773-774, 2002.9
- 4) 黒川・山地・島他：コンクリート充填角形鋼管を用いた合成壁の接合部載荷試験, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.387-388, 2003.9