論文 コンクリート充填鋼製エレメントと RC 床版接合部の交番載荷実験

小泉 秀之*1·森山 智明*2·福島 啓之*3

要旨:本研究は,線路下等にボックスカルバートを構築する際,上下床版は RC 部材,側壁はコンクリート 充填鋼製エレメントを使用した場合の接合方法について,実験的な評価を試みたものである。接合部の定着 方法および RC 床版の主鉄筋比,有効高をパラメータに実験した結果,接合部の強度,せん断ひび割れ性状 および変形特性を把握し,コンクリート充填鋼製エレメント内部にU型鉄筋を用いて途中定着する構造の場 合,せん断ひび割れに対する補強効果により,目標とする変形性能を有することが確認できた。 キーワード:コンクリート充填鋼製エレメント,鉄筋定着,せん断ひび割れ強度,補強効果

1. はじめに

線路下等に地下構造物を構築する場合,開削工法の1 つとして、コンクリート充填鋼製エレメントを仮土留め に用いて, そのまま本体構造物の側壁に利用する方法が 考えられる (図-1)。このようなケースにおいて上下床 版をRC構造とする場合,RC床版と鋼製エレメント部材 を結合する方法として、エレメント内部にプレート等を 溶接し補強する方法などが挙げられる¹⁾。しかしながら, この方法では、現地狭隘箇所での溶接作業となるため、 施工性・安全性・品質確保を考えると、より簡便な定着 方法が必要となる。内部スペースが限られた鋼製エレメ ントにおける簡便な定着方法として,定着板やU型鉄筋 を用いて鋼製エレメント内部に鉄筋を途中定着する方 法が考えられる。U型鉄筋を用いた構造とは、予め鋼殻 に鉄筋が貫通する孔を設けておき、U型に加工した鉄筋 を鋼製エレメント内に配置し,機械式継手等を用いてRC 部材の主鉄筋を定着させるものである(図-2)。本研究 は、定着板あるいは U 型鉄筋を用いた定着方式を有する 接合部に繰り返し荷重が作用した場合の変形性能を明 らかにすることを目的として,正負交番載荷試験に基づ いた検討結果を報告するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状を図-3 に示す。試験体は計4体とした。 実構造物では、断面850×850mmの鋼製エレメントが用 いられており、試験体は実物の3/4縮小モデルを想定し、 隅角部を取り出した形状である。RC床版の断面は、650 ×650mm(幅B×断面高H)または650×850mmとし、 側壁のコンクリート充填鋼製エレメント部材を模した 鋼殻コンクリートの断面は、650×650mmとした。鋼殻 コンクリートは、基本的な耐荷機構を確認するため、エ *1 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所品川工事区

*1 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所品川工事区 助役 工修 (正会員)
*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター 課長 工博 (正会員)
*3 東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所工事管理室 主席 工修 (非会員)



図-1 鋼製エレメント-RC 床版併用構造物の例



レメント間継手は設けていない。鋼殻コンクリート接合 部には、鉄筋を貫通させる孔を設け、RC 床版の主鉄筋 は、機械式継手を使用せず、予め鋼殻組み立て時にU型 に加工した鉄筋を隅角部内に配置した。試験体のコンク リートは、RC 床版および鋼殻を倒した状態で一括打設 した。鋼殻コンクリートの鋼板は、実構造物のRC 床版 と鋼殻コンクリートとの曲げ耐力比を考慮して、厚さ 9mm とした。試験体諸元(実験変数)を表-1 に示す。 接合部の鉄筋定着方法、RC 床版の主鉄筋比および有効 高をパラメータとした。

L-1・L-2 は、接合部内に定着板を用いて定着し、RC 床版の曲げ耐力を変化させた。定着長は、鉄筋径によら ず 485mm とした。L-3 は、隅角部内の鉄筋を曲げ半径 200mm(約 10 ϕ (ϕ は鉄筋径))のU型に加工し定着し



図-3 試験体配筋概要

た。L-4 は, RC 上床版厚が側壁より大きい場合を想定し た試験体である。RC 床版断面高 850mm とし, 鋼殻コン クリートの補強鋼板間隔も同様に 850mm とした。L-3・ L-4 とも, 隅角部内の鉄筋折り曲げ位置までの距離は, 280mm とした。RC 床版と鋼殻コンクリートの曲げ耐力 を比較すると, L-1 は実構造物の RC 床版スパン 8.0m 程 度, L-3・L-4 はスパン 10.0~12.0m 程度を想定した曲げ 耐力比とし, いずれも RC 床版先行降伏となるよう鋼材 を配置した。L-2 は鋼殻コンクリートの引張鋼板が先行 降伏となるよう鋼材を配置した。

使用材料の特性値を表-2に示す。L-2は, RC 床版の 曲げ耐力を向上させるため, SD490を使用し, それ以外 は SD345を使用した。

2.2 載荷方法と計測方法

載荷試験は, 側壁部材となる鋼殻コンクリートを台座 に固定し, RC 床版に水平載荷する事で隅角部の挙動を 確認した(図-3)。実構造物の接合部周辺のモーメント 状態を再現する試験方法としては, 柱, 梁両端部間を油 圧ジャッキで結ぶ方法²⁾や, 多ヒンジラーメン構造とす る³⁾ことで, 柱部材と梁部材に対して, 各スパンに応じ たせん断力を発生させる方法も考えられるが, 今回は, RC 床版のパラメータによる影響比較を主目的とし, 鋼 殻コンクリートを固定する載荷方法とした。また耐震検 討では, 地盤の変形に伴う側壁の層間変形角による評価

表-1 試験体諸元

		側壁				
試験体	有効高 d _s (mm)	主鉄筋	鉄筋比 p _s (%)	定着	RC床版 終局曲げM (kN・m)	接合部 補強鋼板間隔 S(mm)
L-1	580	D19×6	0.46	定着板	354.6	650
L-2	580	D29×7	1.19	定着板	1248.3	650
L-3	580	D22×6	0.62	U	483.6	650
L-4	780	D22×6	0.46	U	667.4	850

表-2	使用材料-	一覧
-----	-------	----

鋼材材料	4	鉄筋径 (鋼板厚) (mm)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 ×10 ⁵ (MPa)	
	SD345	D19	371	1.94	
床版主鉄筋	SD345	D22	383	1.92	
	SD490	D29	531	1.94	
床版せん断補強筋	SD345	D16	374	1.90	
側壁鋼板	SM400A	(t=9)	240^{*}	1.96	

※0.2%オフセット値による降伏強度

を行うため⁴⁾, 鋼殻コンクリートを加力する方がより現 実に近いが,同じ変形角を発生させる場合,RC 床版を 加力した方が,主鉄筋の発生ひずみが大きく,より危険 側の変形となる。載荷高は RC 床版結合部より 1750mm の位置とした。載荷方法は,正負交番載荷とし,RC 床 版の変形角が 1/200 となる変位(8.8mm)を1 δ とし,1, 2,3,4,5,6,7,8,10,15 δ を1回ずつ繰り返し行った。加 力方向は,隅角部が閉じる方向を正,開く方向を負とし た。なお,RC 床版,鋼殻コンクリートともに,部材へ の軸力は与えていない。

計測方法は, RC 床版の水平変位を変位計で計測し, RC 床版の主鉄筋ひずみ, 鋼殻コンクリートの引張鋼材 ひずみ,および接合部中央位置のコンクリートひずみを, ひずみゲージにより計測した。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ・破壊性状

各試験体の接合部周辺のひび割れ状況を図-4 に示す。 図中番号は,接合部におけるひび割れ発生順序を示す。 本実験で確認されたひび割れおよび破壊形式を3種に分 類し,以下に損傷過程を示す。

(1) RC 床版部破壊(L-1)

第1サイクル正負交番載荷時,RC床版に曲げひび割 れが発生した。次に接合部のRC床版圧縮部と対角とな る鋼殻隅角部を結ぶ線に沿った方向(図-4(a)中,負載 荷では1,正載荷では2の方向)にせん断ひび割れが発 生した。その後はRC床版基部の塑性化が進行し,接合 部におけるせん断ひび割れ開口幅の拡大は比較的小さ い。最終的にRC床版基部の被りコンクリートの剥落と 主鉄筋の座屈により水平荷重が低下する破壊形式であ る。RC床版の曲げ耐力が比較的小さい場合に生じた。

(2) 鋼殻コンクリート鋼材の破断(L-2)

第1 サイクル正負交番載荷時, RC 床版に曲げひび割



れが発生した。また第1サイクルの負側載荷時ならびに 第2サイクルの正側載荷時,接合部内の引張鉄筋に沿っ たひび割れが発生した(図-4(b)中,1・2)。次にL-1同 様,RC床版圧縮部と対角となる鋼殻隅角部を結ぶ線に 沿った方向にせん断ひび割れが発生した。その後は接合 部のせん断ひび割れの開口幅が拡大するとともに,引張 鉄筋に沿ったひび割れが伸展した(写真-1(a))。最終的 には,接合部の鋼殻コンクリート引張鋼材が降伏・破断 することにより水平荷重が低下する破壊形式である。RC 床版が曲げ降伏しない場合に生じた。

(3) 掻き出し定着破壊(L-3, L-4)

第1サイクル正負交番載荷時,RC床版にひび割れが 発生した。L-3では第2サイクルの正側・負側載荷時に, L-4では第2サイクルの負側載荷時に,それぞれ接合部 内の引張鉄筋に沿ったひび割れが発生した。次にL-1同 様,RC床版圧縮部と対角となる鋼殻隅角部を結ぶ線に 沿った方向にせん断ひび割れが発生した。繰り返し載荷 に伴い,複数のせん断ひび割れが発生するとともに,引 張鉄筋に沿ったひび割れが伸展した。この結果,これら のひび割れ面に囲まれた領域が塊状のままにRC床版圧



写真-1 接合部破壊状況(10δ終了時)

縮部支点を中心とする回転変形を起こす破壊形式(掻き 出し定着破壊)となった(写真-1(b))。接合部内の引張 鉄筋を U 型に折り曲げて定着した試験体において生じ, 接合部内の鉄筋折り曲げ以降の定着距離を伸ばした L-4 でも同様な破壊形式であった。

3.2 荷重-変形角関係

各試験体の RC 床版水平荷重-変形角曲線を図-5 に 示す。正載荷(隅角部が閉じる方向)を+,負載荷(隅 角部が広がる方向)を-とした。横軸の変形角は,RC 床版の載荷点水平変位を載荷スパン(載荷点〜鋼殻コン クリート部材中心位置)で除している。RC 床版基部が 降伏した L-1,L-3,L-4の荷重-変形角曲線には,RC 床 版基部の主鉄筋降伏荷重(Pys)を記載した。試験体は, RC 部材のL字形柱梁接合部の実験結果^{2),5)}と同様,いず れも逆S字型の履歴ループを描いている。

- (1) 接合部内に定着板を用いて定着した L-1, L-2 では, せん断ひび割れ発生時,一時的に水平荷重が低下し, 載荷を継続すると水平荷重が回復する現象が見られ た。L-1 では負載荷側で 184.0kN からΔ28.4kN, 正載 荷側で 229.9kN からΔ52.4kN 低下した。L-2 では,正 載荷側で 320.4kN からΔ73.1kN, 負載荷側で 193.5kN からΔ31.6kN 低下した。一方,接合部内にU型鉄筋 により定着した L-3, L-4 では,せん断ひび割れ発生 時に明確な耐力低下は生じなかった。接合部内の U 型鉄筋がせん断ひび割れに対して補強効果を発揮し たものと推定される。
- (2) 正載荷側では、RC 床版の曲げ耐力の違いに関わらず、 せん断ひび割れが発生し荷重低下する場合、その後 も 250kN 程度の耐力を保持する傾向が見られた。こ れは接合部のせん断ひび割れ発生後の保有耐力であ



ると推定される。L-1 では, RC 床版の曲げ耐力がこ れと同程度であったため,他の試験体と比較して正 載荷側の変形性能が高い結果となった推定される。

(3) 正負の水平荷重を比較すると、正載荷側の最大荷重 が大きい傾向が見られた。一方、負載荷側ではせん 断ひび割れ発生荷重は小さいが、ひび割れ発生後の 荷重低下率は小さい傾向が見られた。

3.3 荷重一変形角曲線包絡線

L-1~L-3の荷重-変形角曲線包絡線を図-6に示す。 横軸は変形角,縦軸は実験でのRC床版水平荷重を降伏 荷重で除している。L-1では,RC床版の曲げ耐力が相対 的に小さく,RC床版端部で塑性ヒンジが形成されたた め,正載荷側で変形角0.06 ラジアン(1/15)以上確保し ている。L-3では,変形角0.02 ラジアン(1/50)以上確 保している。線路下等の地下ボックスカルバートでは, 軟弱地盤でない一般的な地質条件において必要とされ る変形性能の目安は,L2地震に対して層間変形角1/100 程度である⁴⁾。これを考慮すると,L-1,L-3では,これ を満足する結果であった。一方,L-2のようにRC床版 の曲げ耐力が大きい場合,接合部のせん断耐力が不十分



となるため, 接合部においては, RC 床版が先行降伏す る曲げ耐力比とする必要がある。

3.4 接合部鋼材のひずみ性状

L-1, L-3の接合部周辺の鉄筋, 鋼板におけるひずみの 推移を図-7,8に示す。横軸は発生ひずみ,縦軸は RC 床版水平荷重とし,正負5 δ 載荷終了時までをプロット した。鋼板のひずみは,鋼板上下面にひずみゲージを貼 り付け,曲げの影響を除外してある。

(1) 主鉄筋の引張ひずみは、負載荷側では、正載荷側と 比較して、発生ひずみが大きくなる傾向が見られた。



図-8 接合部鋼材ひずみの推移(L-3)

(主鉄筋 A, B)

- (2) U型鉄筋により定着したL-3の主鉄筋Cでは、せん 断ひび割れ発生前は、発生ひずみが小さく、せん断 ひび割れ発生時、鉄筋ひずみが増大する傾向を示し た。これは、せん断ひび割れに対して、接合部内の U型鉄筋が補強効果を発揮していると推定される。
- (3) 鋼板ひずみは,接合部内に定着板を用いて定着した L-1 では,正載荷側でせん断ひび割れ発生すること により,鋼板 b でひずみが大きくなる。鋼殻が接合 部の充填コンクリートに対して拘束効果を発揮し ていると推定される。

3.5 接合部の各部材に発生する応力の検証

接合部のコンクリートを圧縮斜材,主鉄筋および補強 鋼材を引張弦材と仮定したトラス機構を図-9に示す。 正載荷と負載荷では,コンクリートに発生する圧縮応力 の大きさは同様である。

L-3 における接合部の荷重 – 鋼材引張力曲線を図 – 10 に示す。横軸に RC 床版水平荷重,縦軸に主鉄筋と鋼材 の各サイクル最大荷重時の発生ひずみから算出した引 張力を正負 5 δ 載荷終了時までプロットした。主鉄筋は 接合部端部のひずみ結果を採用している。主鉄筋ならび に鋼殻の水平方向の補強鋼板の引張力(図 – 10 中,1・4) は図 – 9 のトラス機構で想定される引張力関係と概ね – 致する。一方,鉛直方向の補強鋼板(図 – 10 中,3・6) は、せん断ひび割れ発生前には、ほとんど引張力を受け 持たないが、せん断ひび割れ発生後、引張力が増大する 傾向が見られた。これは、接合部構造が、RC 床版主鉄 筋の発生応力をコンクリートの付着力を介して鋼殻の 引張鋼材に伝達させる構造でなく、鋼殻コンクリートが 接合部の変形を拘束しつつ、接合部全体で応力を伝達さ せる構造であると推定される。

3.6 接合部圧縮ストラットの特徴

RC 床版の断面高および接合部の補強鋼板間隔の異なる L-3, L-4 の接合部における最小主ひずみ(圧縮力)の 発生角度を図-11 に示す。発生角度は,接合部の中央付近に3軸に貼り付けたコンクリートゲージより算出し,





第1サイクル正負載荷時をプロットしている。水平から 半時計回りを正とした。正側・負側とも RC 床版圧縮鉄 筋位置から対角の鋼殻コンクリート隅角部を結んだせ ん断ひび割れ面の角度と概ね一致する結果となった。

L-1, L-3 および L-4 の接合部における最小主ひずみ(圧 縮力),最大主ひずみ(引張力)と RC 床版の水平荷重と の関係を図-12,13 に示す。各主ひずみは,接合部の中 央付近に3軸に貼り付けたコンクリートゲージ測定結果 より算出し,第2サイクル正載荷側までをプロットして いる。RC 床版高が 850mm の L-4 では,RC 床版高が 650mm の L-1, L-3 と比較して,同じ水平荷重時に接合 部に発生するひずみが小さい。また最小主ひずみ,最大 主ひずみの勾配は,図-11 における最小主ひずみの発生 角度 θ に対して,概ね 1/cos θ に比例する傾向となった。 3.7 接合部強度

実験結果一覧を表-3 に示す。表中の変形角は、荷重 が繰り返し載荷により、降伏荷重まで低下した際の変形 角である。負載荷側は4試験体とも繰り返し載荷により 降伏荷重まで低下しておらず、便宜上、15δ負載荷時の 変形角を記載した。4 試験体でコンクリート圧縮強度が 異なるため、コンクリート圧縮強度f。を21N/mm²に補 正したせん断ひび割れ荷重値を併記した。鋼殻コンクリ ートのせん断ひび割れ強度は、f。の1/2 乗に比例するこ とが報告^のされており、今回は1/2 乗に比例させた。試 験体形状が同様なL-1、L-2、L-3 を比較すると、L-3 が 正負側ともせん断ひび割れ発生荷重が大きい。梁形状の

		正載荷側				負載荷側					
試験体	f' _c	層間変形角	降伏荷重	せん断ひび割れ 荷重(実験)	せん断ひび割れ 荷重 (補正)	最大荷重 (実験)	層間変形角	降伏荷重	せん断ひび割れ 荷重(実験)	せん断ひび割れ 荷重 (補正)	最大荷重 (実験)
	(N/mm^2)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
L-1	17.6	1/16	193.8	249.5	272.5	249.8	1/16	-182.3	-184.0	-201.0	-256
L-2	21.0			320.4	320.4	320.4			-193.5	-193.5	-303.4
L-3	22.0	1/42	267.3	319.7	312.4	322.3	1/16	-262.5	-263.1	-257.1	-311.1
L-4	22.8	1/35	347.0	440.4	422.7	440.4	1/16	-304.1	-291.7	-280.0	-381.6







図-13 荷重-最小主ひずみ関係

曲げ試験では、定着板とU型鉄筋による定着方法を比較 すると、U型鉄筋による定着の方が、せん断ひび割れ耐 力が大きいことが報告されている⁷⁾。今回の試験結果に おいても、U型鉄筋による定着による補強効果によりせ ん断ひび割れ発生荷重が増加したものと推定される。L-2 の正側のせん断ひび割れ発生荷重が比較的高いが、これ はせん断ひび割れが 2 δ で発生しているため、繰り返し 載荷による影響が小さいことが要因と考えられる。

4. まとめ

- (1) 今回の試験体緒元の範囲では、定着方法の違いによらず、RC 床版の曲げ耐力が大きいと、接合部のせん断ひび割れの進展により耐力が低下した。U型鉄筋により定着した試験体では、ひび割れ面に囲まれた領域が塊状のままに RC 床版圧縮部支点を中心とする回転変形を起こす掻き出し定着破壊となった。
- (2) 接合部内に定着板を用いて定着したケースでは、せん断ひび割れ発生時、一時的に水平荷重が低下する現象が見られたが、接合部内にU型鉄筋により定着したケースでは、その現象が見られず、接合部内の

U型鉄筋がせん断ひび割れに対して補強効果を発揮 したものと推定される。

- (3) L-1, L-3 およびL-4 では、変形角 1/50 以上確保できることが確認された。実構造物で想定される地下ボックスカルバートにおいて必要とされる変形性能の目安は、L2 地震に対して層間変形角 1/100 程度であり、RC 床版が先行降伏する曲げ耐力比の範囲であれば、これらの定着方法により、必要な変形性能を有することが確認できた。
- (4) 接合部は、充填コンクリートを圧縮斜材、鋼材を引 張弦材とするトラス機構が形成される。本接合方法 では、鋼殻コンクリートが接合部の変形を拘束しつ つ、接合部全体で応力を伝達させる構造となる。

参考文献

- 田崎和之,広沢規行,今福健一郎:鋼製連壁とコン クリート床版接合部の構造特性に関する実験的研 究,土木学会論文集, No.763, VI-63, pp.163-173, 2004.6
- 2) 崔 建宇,藤井 栄,渡辺史夫:L字形及びT字形 接合部のせん断耐力に及ぼす接合部の配筋ディテ ールの影響,コンクリート工学年次論文集,Vol.23, No.3, pp.397-402, 2001.7
- 3) 田畑 卓,西原 寛: RC 造ト・T・L 形柱梁接合部 のせん断および定着性状,コンクリート工学年次論 文集, Vol.23, No.3, pp.373-378, 2001.7
- 4) 耐震マニュアル, JR 東日本, p.94, 2004.12
- 5) 岡野 裕,向井智久,野村設郎: RC造L字形柱梁 接合部の破壊性状と補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.475-480, 2003.7
- 森山智明,石橋忠良,小林 薫:コンクリート充填 された鋼製エレメントはりのせん断耐力に関する 実験的研究,土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.15-28, 2006.2
- 7) 小泉秀之,森山智明,宇津木浩行,福島啓之:コン クリート充填鋼製エレメントと RC 部材の接合部の せん断性状,土木学会第65回年次学術講演概要集, V-090, pp.179-180, 2010.9