

論文 複合アーチ材と鋼吊材の接合構造に関する研究

竹市 八重子*1・大庭 光商*2・斉藤 恭之*3・大郷 貴之*4

要旨: 本研究は、複合ランガー橋のアーチ材と吊材の接合構造の構築を目的とし、異なる接合構造にて、部分模型実験を行ったものである。実験の結果、アーチ材が吊材からの引抜き力を受け、引抜きせん断破壊する際の応力伝達機構が明らかとなった。接合構造としては、吊材先端部に定着プレートを取り付けた構造が優れた応力の伝達機構を示すことが確認され、その場合の引抜きせん断耐力の設計式を提案した。

キーワード: 複合ランガー橋、接合構造、引抜きせん断破壊、コンクリート充填鋼管

1. はじめに

鉄道橋が河川等を横断する立体交差化事業では、桁下空頭の制限を受けることがあり、下路桁形式の橋梁で計画されることが多い。しかし、通常の下路桁形式の橋梁は経済性、景観上の点から必ずしも好ましい構造形式とはいえない。そこで、補剛桁を下路桁形式としたランガー橋が採用される場合がある¹⁾。ランガー橋は、アーチ材は軸圧縮力が卓越する部材であることから RC 部材、吊材はアーチ材と補剛桁を連結する引張部材であるため PC 部材として設計されるのが一般的である。筆者らは、アーチ材と吊材に、角型鋼管を用いることを提案した²⁾³⁾。角型鋼管を使用する利点として、軸方向引張力が卓越する吊材を鋼部材にすることにより軽量化が図れることやアーチ材施工時の型枠・支保工の省略、簡素化が可能になることが挙げられ、その結果工期が短縮され、トータルコストとして経済的になる場合がある。

アーチ材は角型鋼管にコンクリートを充填した複合部材、吊材は鋼部材、補剛桁は PC 部材で構成される複合ランガー橋（図-1）では、特に吊材からアーチ材への応力伝達を確実に行うことが重要となる。また施工においては吊

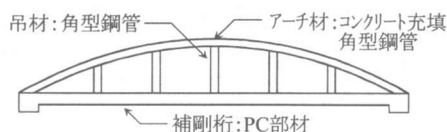


図-1 複合ランガー橋概要図

材のアーチ材への容易な接合構造が望まれる。

本研究では、アーチ材が複合部材および RC 部材の場合における吊材とアーチ材の定着機構を部分模型実験により、明らかにするものである。またその結果より、それぞれのアーチ材構造に対する接合部の設計法についても検討を行う。

2. 実験概要

2. 1 吊材のアーチ材への接合構造

本実験で用いた吊材とアーチ材の接合構造の模式図を図-2 に示す。吊材のアーチ材との接合構造は、引抜き抵抗の向上を期して、図-2 (a) に示すように吊材先端部に定着プレートを取り付け、プレートの支圧により引抜き抵抗を得る構造（以下、フランジタイプ）と、(b) の吊材に水平鉄筋を配置し、この水平鉄筋により引抜き抵抗を得る構造（以下、水平鉄筋タイプ）の2種類とした。

*1 東日本旅客鉄道（株） 東北工事事務所 工事管理室 課員 工修（正会員）

*2 東日本旅客鉄道（株） 東北工事事務所 山形工事区 区長（正会員）

*3 国土庁 計画・調整局 総合交通課 工修

*4 東日本旅客鉄道（株） 東北工事事務所 東北・北課 課員 工修

表-1 実橋と試験体の断面寸法および応力度関係

	鋼管寸法 $B \times H \times t$ (mm)		σ_o (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_g (N/mm ²)
	アーチ材	吊材			
実橋	900×850×16	800×600×16	12.9	12.5	12.7
試験体	250×450×2.3	200×200×12	23.0	2.4	12.7

注) 使用状態時におけるアーチ材断面の応力を以下のように示す。

σ_o : 上縁応力, σ_u : 下縁応力, σ_g : 図心位置応力

表-2 試験体諸元一覧

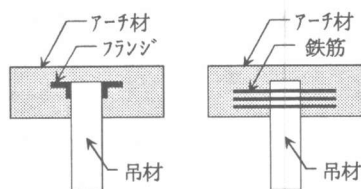
試験体名	アーチ材 構造	接合構造	軸圧縮応力 (N/mm ²)
C11	RC タイプ	フランジ	0
C12		フランジ	8
C22		水平鉄筋 A (6-D25, 600mm)	8
C31		水平鉄筋 B (4-D19, 1000mm)	0
C41		水平鉄筋 B (4-D25, 1000mm)	0
A11	コンクリート	フランジ	0
A32	充填鋼管	フランジ	2
A42	タイプ	フランジ	8

2. 2 試験体諸元

試験体は実験設備の載荷能力により、アーチクラウン部を模したT字形状の部分縮小モデルとした。表-1 に実橋と試験体の断面寸法および応力度関係を示す。試験体は、定着部の破壊形式として、吊材による引抜きせん断破壊がアーチ材の曲げ破壊やせん断破壊よりも先行することを目的に設計し、吊材のアーチ材に対する埋込み長を 200mm とした。また試験体の応力度は、使用状態時におけるアーチ材図心位置での曲げによる応力度が実橋と等しくなるようにするとともに、フランジ下のコンクリートの支圧応力度が実橋と同程度になるように、フランジ寸法を 55×150×16mm と定めた。

表-2 に試験体諸元一覧、図-3 に試験体寸法および配筋の一例を示す。パラメータは、アーチ材構造 (RC タイプ・コンクリート充填鋼管タイプ (以下、充填鋼管タイプと略)), 接合構造 (フランジタイプ・水平鉄筋タイプ), アーチ材軸圧縮応力の 3 種類とし、計 8 体の試験体を製作した。

材料強度および材質は、アーチ材のコンクリート強度を 40N/mm²、鋼管は材料入手の関係上 SS400 (A11) と SPHC 材 (A32・A42) とした。鉄筋は SD345 で、材料強度は引張試験を行って

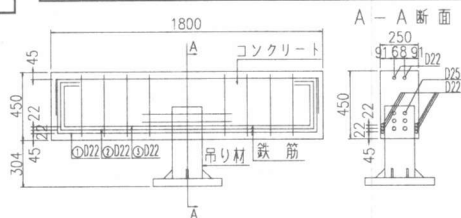


(a) フランジタイプ (b) 水平鉄筋タイプ

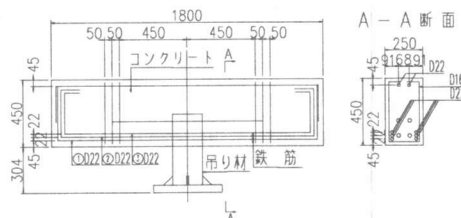
図-2 吊材の接合構造

表-3 材料試験結果

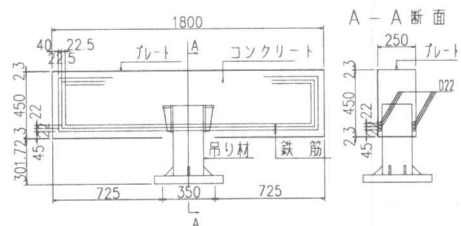
試験体名	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	鋼管/鉄筋	
		降伏強度 (N/mm ²)	ひずみ (μ)
C11	40	411	2000
C12			
C22			
C31	41	363	2100
C41			
A11	43	372	1800
A32	40	211	1200
A42			



(a) RC 水平鉄筋 A タイプ



(b) RC 水平鉄筋 B タイプ



(c) 充填鋼管フランジタイプ

図-3 試験体形状例

求めた。表-3 に材料試験結果を示す。なお、RC タイプの降伏強度および降伏ひずみは、スターラップに用いた鉄筋の結果を示す。

2. 3 載荷方法

実験は図-4 に示す載荷装置により、吊材定

着部が引抜き破壊するまで、変位制御によりアクチュエータで吊材に荷重を加えた。

ひずみゲージは、充填鋼管タイプでは鋼管の側面部表面に3軸型ひずみゲージ、底面部中央（アーチ軸方向）に1軸ひずみゲージを、RCタイプではスターラップに1軸ひずみゲージを取り付けた。なお、アーチ材を縦にした部材の上・下端には、摩擦拘束をなくするためにテフロンシートを挿入した。

3. 実験結果および考察

3. 1 破壊性状および終局耐力

実験結果一覧を表-4に示す。破壊形式は、全ての試験体において、想定どおり引抜きせん断破壊にて終局をむかえた。図-5に、破壊面の角度および引抜きせん断耐力算定範囲の定義を示す。表中の実測値①は、アーチ材がRCタイプのものでは、破壊面を横切るスターラップのひずみ、充填鋼管タイプでは、鋼管側面のひずみから算定した引抜きせん断耐力である。また実測値②は、充填鋼管タイプに関して、フランジ先端部から先のアーチ材のみで引抜きせん断力を負担したと仮定した場合の引抜きせん断耐力である。

(1) RCタイプ

<フランジタイプ>

フランジタイプの損傷の傾向としては、引抜きせん断ひび割れが、C11では221kN、C12では418kNで発生した。さらに、そのひび割れは吊材上端部に進展し、吊材上端部付近のひび割れ幅が大きくなり、C11では418kN、C12では737kNで破壊に至った。

図-6に各試験体の終局時における破壊面、図-7にスターラップ（鋼管）の終局ひずみとアーチ材中心からの位置の関係を示す。C11の破壊面の角度は、約30°でその範囲は800mmであり、アーチ材中心から250mmの位置のスターラップ（<250>と表記、以下同）が、終局時には降伏ひずみに達していた（図-7）。

一方、軸応力を付加したC12は、破壊面の角

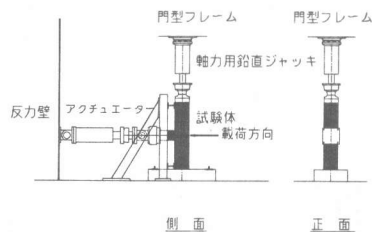


図-4 載荷方法

表-4 実験結果

試験体名	斜めひび割れ発生荷重(kN)	終局荷重(kN)	実測値①(kN)	実測値②(kN)	破壊面	
					角度(°)	範囲(mm)
C11	221	418	438 (1.05)	—	30	800
C12	418	737	730 (0.99)	—	25	1100
C22	431	619	309 (0.50)	—	19	1000
C31	175	178	0	—	36	1000
C41	196	197	0	—	31	1050
A11	302	690	—	498 (0.72)	45	810
A32	324	755	656 (0.87)	588 (0.78)	40	850
A42	377	734	731 (1.00)	624 (0.85)	39	900

注1) () は実測値/終局荷重を示す。

注2) 斜めひび割れ発生荷重は、RCタイプでは吊材上端部に斜めひび割れが発生した荷重、充填鋼管タイプでは鋼管のひずみ値から推測した荷重。

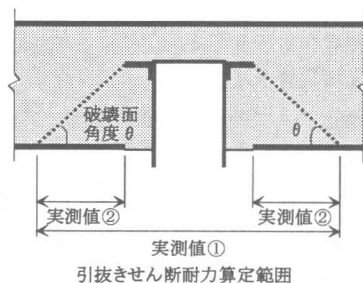


図-5 破壊面角度と引抜きせん断耐力算定範囲の定義

度が約25°でその範囲は1000mmであり、<400>のスターラップまでが終局時には降伏ひずみに達していた。また、C11とC12を比較すると、軸圧縮応力が付加されることにより、破壊面の角度は小さくなり、今回の軸応力範囲では終局耐力が大きくなることが確認された。

<水平鉄筋タイプ>

C22では、431kNで上段から中段の水平鉄筋にかけて斜めのひび割れが発生した。その後、

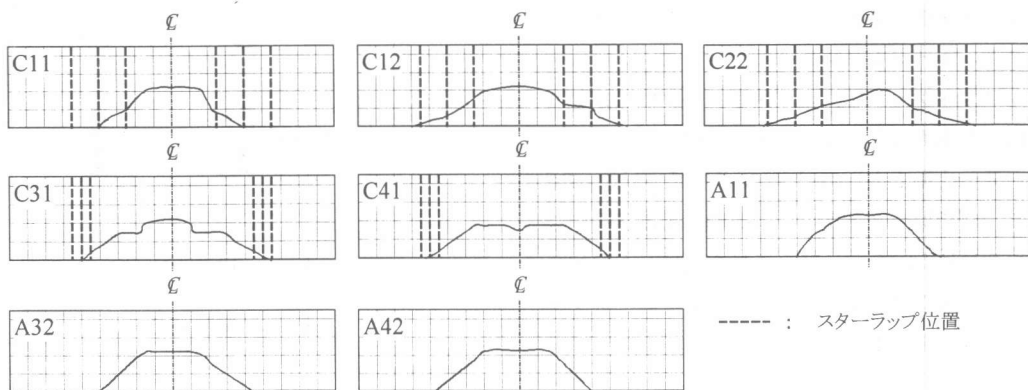


図-6 終局破壊面

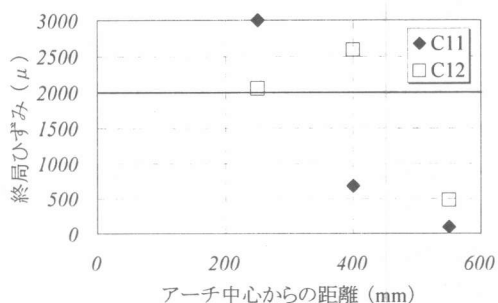
この斜めひび割れが進展し、619kN で破壊に至った。水平鉄筋タイプの接合構造では、水平鉄筋に沿ってひび割れが広がる傾向がみられた。

また、スターラップを破壊面と交差しないように配置した C31 では、175kN でコンクリートに斜めのひび割れが入るとほぼ同時に最大荷重に達した。しかし、その後も大きな荷重の低下は認められず、耐力をほぼ維持し続けたまま、大きな変形性能を示した。また、C41 は C31 と比較し、水平鉄筋のせん断方向の抵抗力が大きいためやや耐力はあがるものの、C31 とほぼ同様の破壊過程を示した。

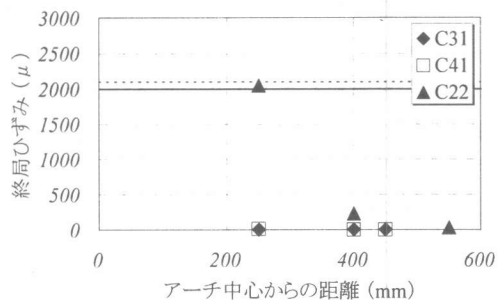
(2) 充填鋼管タイプ

充填鋼管タイプの損傷進展状況は、アーチ材底板の鋼管欠損部で吊材外周に沿ったひび割れが発生し、底面の鋼管とコンクリートの境界部に間に亀裂が生じた。さらに荷重を付加すると、鋼管側面、底面が膨らみ、A11 では 690kN、A32 は 755kN、A42 は 734kN で各々破壊に至った。軸応力の終局耐力に及ぼす影響は、今回の作用軸応力範囲 (0~8N/mm²) では、2N/mm² 程度で耐力の増加は頭打ちになる傾向が認められた。

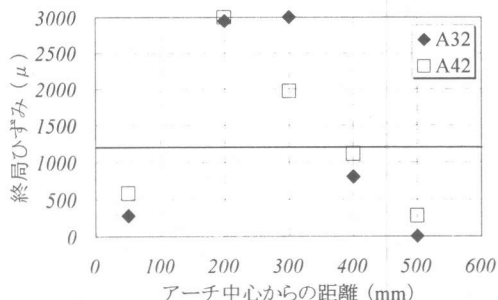
実験終了後、鋼管を撤去した観察では、破壊面の形状は RC フランジタイプと同様、フランジの先端からアーチ材底面に向かい、その破壊面角度は軸応力が大きくなるにつれて小さくなる傾向が確認された (図-6)。また図-7 より、破壊面領域において、鋼管欠損部分の側面ひずみは降伏に至らないが、その他の側面、底面と



(a) RC フランジタイプ



(b) RC 水平鉄筋タイプ



(c) 充填鋼管フランジタイプ

図-7 スターラップおよび鋼管の

終局ひずみとアーチ材中心からの位置の関係

もに降伏に至る傾向を示した。

3. 2 応力伝達機構

図-8 に、引抜きせん断力 V とスターラップおよび鋼管の負担せん断力 V_s の推移関係を示す。ここで、スターラップまたは鋼管が負担するせん断力は、それぞれ破壊面を横切るスターラップ、鋼管のひずみ値より算出した。ただし、充填鋼管タイプについては、フランジ先端部から先のアーチ材のみで引抜きせん断力を負担すると仮定した。

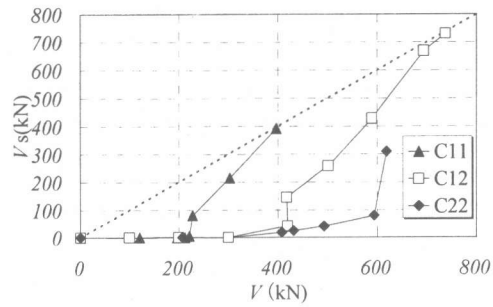
(1) RC タイプ

フランジタイプは、C11 が 220kN 付近、C12 が 420kN 付近でスターラップのひずみが急激に増加しており (図-8 (a))、これは斜めせん断ひび割れ発生荷重とほぼ対応している。一方、水平鉄筋タイプでは、フランジタイプと比較し、ひび割れ発生とスターラップの負担せん断力の増加に明確な関係は認められなかった。

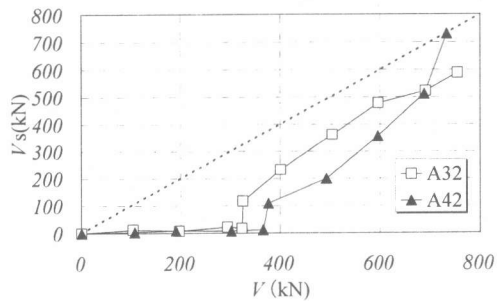
つまり、フランジタイプの接合構造では、斜めせん断ひび割れ発生時までは主にコンクリートがせん断力を負担するが、ひび割れ発生以降はスターラップに荷重が移行し、最大荷重はスターラップのみで負担すると考えられる。一方、水平鉄筋タイプは、ひび割れ発生時までは、主にコンクリートと水平鉄筋のせん断方向の抵抗により荷重を負担するが、ひび割れ発生後はコンクリートの負担分は低下し、水平鉄筋とスターラップとがせん断力を負担する。しかし、フランジタイプと比較し水平鉄筋の剛性がないため、スターラップに伝達できる荷重が小さく、早期に終局に至ると考えられる。よって、アーチ材の接合構造としては、水平鉄筋タイプよりフランジタイプの方が応力の伝達機構が優れているといえる。

(2) 充填鋼管タイプ

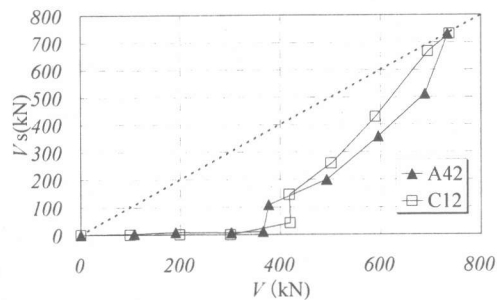
充填鋼管タイプでは、斜めひび割れ発生までは、充填されたコンクリートが応力を負担するが、斜めひび割れ発生以降は、急激に鋼管へ負担せん断力が移行する傾向を示した図-8 (b)。また、応力の伝達機構を同軸応力下の RC タイ



(a) 接合構造の影響 (RC タイプ)



(b) 軸圧縮応力の影響 (充填鋼管タイプ)



(c) アーチ材構造の影響

図-8 スターラップと鋼管の負担せん断力の推移

プと比較すると、図-8 (c) より、ほぼ同じ傾向を示すことが認められた。

4. 設計引抜きせん断耐力の算出

実験結果より、吊材のアーチ材への接合構造は、フランジタイプの方が水平鉄筋タイプと比較し、優れていることが確認された。そこで、フランジタイプの接合構造に対する設計式を提案する。応力の伝達機構として、アーチ材が充填鋼管タイプ、RC タイプともに、コンクリートに斜めせん断ひび割れ発生後、主として鋼

管およびスターラップが応力を負担することが明らかになった。そこで設計では、図-9に示すように破壊面を定着プレートから θ と仮定し、この範囲内の鋼管（充填鋼管タイプ）またはスターラップ（RC タイプ）が引張力を負担するとして、それぞれ引抜きせん断耐力 V_{sy} を以下のように算出することとした。

$$V_{sy} = 2 \cdot f_{sy} \cdot A_w \quad (1)$$

$$A_w = 2 \cdot S \cdot t \quad (\text{充填鋼管タイプ}) \quad (2)$$

$$A_w = 2 \cdot n \cdot A_s \quad (\text{RC タイプ}) \quad (2')$$

$$S = d / \tan \theta \quad (3)$$

ここに、

f_{sy} : 鋼管またはスターラップの降伏強度

S : 引抜きせん断力の負担長

d : 吊材の埋め込み長

A_w : 区間 S における鋼管またはスターラップの総断面積

A_s : スターラップ1本当たりの断面積

n : 破壊面を横切るスターラップの本数

t : 鋼管の厚さ

式(1)~(3)を用い、実験で得られた破壊面角度より算出した V_{sy} （計算値①）と破壊面角度 $\theta = 45^\circ$ とした場合の V_{sy} （計算値②）の一覧を表-5に示す。本手法により、 θ が実験値または 45° のどちらの場合においても、引抜きせん断耐力は安全側に評価することができ、安全率は1.01~2.25となった。計算値②の軸力を付加したC12, A32, A42では、せん断力の負担長の広がり considering していないため、やや精度は落ちるものの安全側の評価であり、一方軸力がない場合にはほぼ適切に評価できると考えられる。

よって、実用上は破壊面角度を $\theta = 45^\circ$ と仮定して引抜きせん断耐力を算出することにより、十分安全側の設計を行うことが可能であると考えられる。

5. 結論

複合ランガー橋における、アーチ材と吊材の定着部に関する部分模型実験により、以下の知

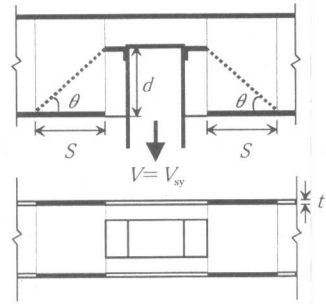


図-9 引抜きせん断耐力の概念図
(充填鋼管タイプの場合)

表-5 提案式による引抜きせん断耐力

試験体名	計算値① (kN) (θ :実験値)	計算値② (kN) ($\theta:45^\circ$)
C11	327 (0.78)	327 (0.78)
C12	653 (0.89)	327 (0.44)
A11	685 (0.99)	685 (0.99)
A32	462 (0.61)	388 (0.51)
A42	479 (0.65)	388 (0.53)

注) () は計算値と実験値の耐力比

見が得られた。

- 1) 複合ランガー橋における吊材のアーチ材への応力伝達機構および耐力が明確になった。
- 2) フランジタイプの接合構造は、水平鉄筋タイプと比較し、吊材からアーチ材への応力の伝達を確実に行うことが可能である。
- 3) アーチ材に軸力を付加すると破壊面の角度は小さくなり、耐力は上昇傾向を示すが、今回の実験では 2N/mm^2 の軸圧縮応力以上になると、耐力は頭打ちとなる傾向が認められた。
- 4) フランジタイプの接合構造の引抜きせん断耐力は、アーチ材がRCタイプ、充填鋼管タイプともに式(1)を用いることにより、安全側に評価することが可能である。

参考文献

- 1) 小林薫, 中山弥須夫: 武蔵五日市高架 PC ランガー橋の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol.38, No.5, pp.48-57, 1996.9
- 2) 大郷貴之, 斉藤恭之, 大庭光商: 弦材と吊材にコラム材を用いたランガー橋の継手部のFEM解析, 土木学会東北支部技術発表会概要, V-49, pp.624-625, 1999.3
- 3) 大郷貴之, 斉藤恭之, 岩田道敏: 複合ランガー橋の吊材定着部の実験, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp.825-830, 1999.10