

論文 パイプを埋設したコンクリート部材の曲げ・付着強度試験

三村陽一^{*1}, 辻 和秀^{*2}・吉武 勇^{*3}・浜田純夫^{*4}

要旨: パイプヒーティング機能を有する鉄筋コンクリート舗装版や床版では、上面の鉄筋に沿わせて配置する通水用パイプが構造的な弱点となる可能性を秘めている。本研究は、負曲げ荷重が作用するコンクリートはり部材を対象に、部材軸方向に沿わせて配置したパイプや鉄筋の付着強度特性、ならびに部材の曲げ耐力特性について実験的検討を試みた。その結果、パイプと鉄筋を重ねて配置したコンクリートはり部材においても、鉄筋単体を埋設した部材以上の曲げ耐力を有し、また鉄筋は降伏に至るほどの充分な定着性を確保できた。

キーワード: パイプヒーティング、負曲げ、曲げ付着、曲げ耐力

1. はじめに

比較的温暖な地域においても、山間部では冬季の深夜から早朝といった気温が低下する時間帯において、路面が積雪・凍結状態となるケースが多い。そのため、地盤からの地熱供給のない橋梁部あるいはトンネル出口部など、一般道路部との路面状態に格差が生じやすい箇所を中心に、車両のスリップ事故が多く発生している。

著者らは、路面状態の格差に起因した車両スリップ事故防止策のひとつとして、これまで地下水やトンネル湧水、地熱などの自然未利用エネルギーを利用したパイプヒーティングについて、その融雪能力や経済性の評価を行ってきた^{1)~3)}。これらの成果を踏まえ、パイプヒーティングの構造設計に関する基礎資料を得る目的から、近年では特に構造的耐久性に主眼をおいた実験的研究を進めている。これまでの研究では、圧縮力作用下にあるコンクリート部材に対して、通水用の埋設パイプの配置が圧縮破壊特性に及ぼす影響の評価を行っている⁴⁾。その結果、一般に使用される鋼製パイプは、パイプヒーティング用の埋設パイプとして適切な材料のひとつであることを示した。

ここで、パイプヒーティングに用いるパイプは、車両走行に対して直交するように配置されることが多く、その埋設位置(深さ)は上面側に配置される鉄筋上とされている。特に、十分な融雪効果が得られ、かつ密実なコンクリートの充填を可能にするためには、125~150mm 間隔で配置される上面の鉄筋に沿ってパイプを埋設する必要がある。この場合、パイプ配置により鉄筋の充分な付着が妨げられる可能性があり、部材の曲げ耐力ならびに付着強度の低下が懸念される。

そこで本研究では、パイプヒーティングの合理的な構造設計に関する基礎データを得るために、主に負曲げ荷重が作用するコンクリート舗装版あるいは床版を対象として、埋設パイプが部材の曲げ耐力・付着強度特性に及ぼす影響について実験的な検討を試みた。

2. 実験方法

2.1. 実験供試体

本研究の曲げ・付着試験で使用する供試体は、100×100×700mm の角柱状であり、対象構造物の鉄筋コンクリート舗装版および床版の1/2 スケールモデルに相当する。また、負曲げ荷重を

*1 株式会社エイトコンサルタント 事業本部 修(工) (正会員)

*2 株式会社エイトコンサルタント 事業本部 (正会員)

*3 山口大学 工学部 社会建設工学科 講師 博(工) (正会員)

*4 山口大学 工学部 社会建設工学科 教授 Ph. D. (正会員)

受ける各供試体には下面(負曲げのため、実際は上面側)より 15mm および 25mm の位置にパイプと鉄筋をそれぞれ埋設した。さらに、曲げ付着試験用の供試体では、曲げ試験とほぼ同形状であるが、さらに等曲げ区間に $60 \times 60 \times 100\text{mm}$ の切欠きを設けている。供試体概略図ならびに鉄筋およびパイプの配置位置をそれぞれ図-1、図-2 に示す。図-2 に示すように、パイプと鉄筋を有する供試体では、パイプと鉄筋を重ね合わせて埋設した。また、比較用として同箇所に鉄筋のみあるいはパイプのみを埋設した供試体をそれぞれ作製した。

ここで用いたパイプは、前報⁴⁾の成果を踏まえた鋼製パイプであるが、1/2 スケール供試体のため、実構造(外径 20mm 程度)のほぼ 1/2 にあたる SGP-6A(外径 10mm)とした。パイプの断面寸法を表-1 に示す。また、鉄筋は 1/2 スケールを考慮して(実構造 : D19 程度)、横ふし型異形鉄筋 D10(SD295A)を用いたことから、曲げ付着試験における鉄筋の定着長は約 32D(D : 鉄筋径)となった。

本研究では、曲げ荷重を受ける各部材の応力状態を確認するため、図-1 に示すように、供試体中央軸の載荷面側(コンクリート上面)、鉄筋およびパイプ側面 2 箇所ずつにひずみゲージを貼付した。なお、図-1 中にはひずみゲージ(鉄筋・パイプ)貼付箇所について、曲げ付着試験用の供試体のみ示しているが、曲げ試験供試体についても同様に、鉄筋およびパイプの供試体中央部にひずみゲージを貼付している。

2.2. 実験方法

本研究では、図-3 に示すように負曲げ荷重の作用するコンクリート部材を模擬すべく、スパン長 450mm、等曲げ区間 100mm にて曲げ付着試験および曲げ試験を行った。載荷は油圧式万能試験機(MAX: 980kN)を用い、ロードセル(容量: 100kN)によって載荷荷重を測定した。また、供試体の両端面には変位計(精度: 1/1000mm)を設置することで、鉄筋およびパイプのすべり量の測定を試みた。なお、鉄筋とパイプの双方

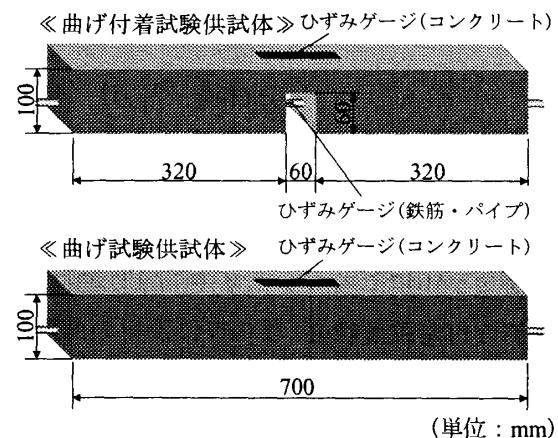


図-1 供試体概略図

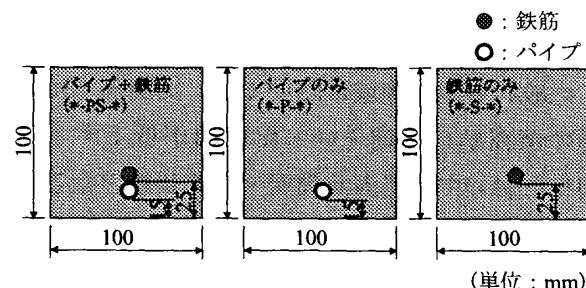


図-2 鉄筋およびパイプの配置箇所
(曲げ付着・曲げ試験共通)

表-1 パイプの断面寸法

規格	外 径	内 径	肉 厚
SGP-6A	10mm	6mm	2 mm

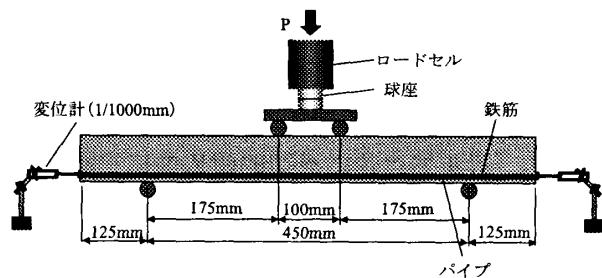


図-3 載荷状況

を埋設した供試体では、鉄筋端部に変位計の取り付けを行った。全ての計測は鉄筋ひずみで制御するものとし、基本的に鉄筋ひずみ約 50×10^{-6} 増加に応じて実施した。

2.3. 実験項目

本研究では、コンクリート、鉄筋、パイプの基本的な強度特性試験を行うとともに、パイプ

および鉄筋を埋設したコンクリート部材の曲げ付着試験(各1体、計3体)ならびに曲げ試験(各3体、計9体)を実施した。以降の図表において用いる記号を表-2にまとめて示す。

2.4. 配合条件および使用材料

本研究では、鉄筋コンクリート舗装版あるいは床版等を対象としていることから、W/C=55%の一般的なコンクリート配合とした。用いた材料は、普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³)、北九州若松産海砂(密度2.6g/cm³)および山口県宮野産の安山岩碎石(密度2.7g/cm³)である。また、セメント質量に対して1%相当量の高性能減水剤を添加した。本研究で用いたコンクリートの配合条件を表-3に示す。

3. 実験結果および考察

3.1. 材料の諸物性

本研究では、いずれの試験もコンクリート材齢28日以降に行っている。試験時におけるコンクリートの各強度試験ならびにヤング係数試験の結果を表-4に示す。さらに表-4には、鉄筋およびパイプ単体で行った両引き試験によるヤング係数ならびに降伏ひずみの測定結果を併記している。なお、パイプは明確な降伏点が確認されなかったため、表中に示すヤング係数は応力-ひずみ関係の線形性が成立した範囲(パイプひずみ0~1000×10⁻⁶)から得られた値である。

3.2. 曲げ付着試験

曲げ付着試験における鉄筋およびパイプのひずみ挙動ならびに上面側コンクリートのひずみ挙動をそれぞれ図-4~6に示す。

図-4に示すB-S供試体の鉄筋ひずみ(B-S-S)は、降伏ひずみ1700×10⁻⁶に到るまで載荷荷重に対しほぼ線形的に増加するものであった。また、同一荷重作用下にあるB-S供試体の鉄筋ひずみ(B-S-S)に比べ、B-PS供試体の鉄筋ひずみ(B-PS-S)が約30%程度小さいものであった。これは、鉄筋直下にあるパイプが曲げ応力による鉄筋の変形を下面から一部補強したものと考

表-2 記号一覧

埋設材	曲げ付着試験 	曲げ試験 <F>
パイプ+鉄筋 <PS>	B-PS-*	F-PS-*
鉄筋 <S>	B-S-*	F-S-*
パイプ <P>	B-P-*	F-P-*

*コンクリート(C) or 鉄筋(S) or パイプ(P)

表-3 配合条件

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	C	W	S	G	Ad
55	300	165	819	1040	0.01C

表-4 材料の諸物性

コンクリート	圧縮強度	43.3 N/mm ²
	曲げ強度	5.8 N/mm ²
	割裂引張強度	3.4 N/mm ²
	ヤング係数	42 kN/mm ²
鉄筋	ヤング係数	210 kN/mm ²
	降伏ひずみ	1700×10 ⁻⁶
パイプ	ヤング係数	197 kN/mm ²
	降伏ひずみ*	(1000×10 ⁻⁶)

※参考値

えられる。

一方、図-5に示すB-P供試体におけるパイプひずみ(B-P-P)では、B-S-Sと同様に載荷荷重に対しほぼ線形的に増加するものの、500×10⁻⁶超で一旦ひずみの増進が停滞した。このパイプひずみ増進の停滞は、パイプ~コンクリート間の付着切れが生じたものと推察される。また、以降の加力により載荷荷重10kN程度になるとパイプひずみが急激に増加し、それ以上の加力は行えなかった。

ここで、図-6に示すB-P供試体のコンクリートひずみ(B-P-C)に着目すると、パイプ付着による曲げ剛性効果が小さいため、他の供試体に比べ非常に低い荷重レベルからコンクリートひずみが増加したことが分かる。そのため、切欠き部上部にあるコンクリート部位まで引張応力が作用し、切欠き隅角部から両載荷点に向かってひび割れが発生・進展するものであった。

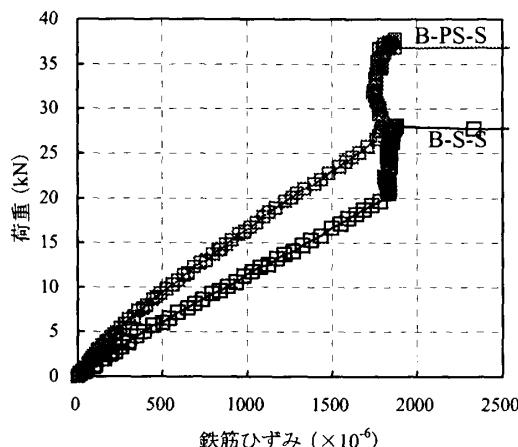


図-4 鉄筋のひずみ(曲げ付着試験)

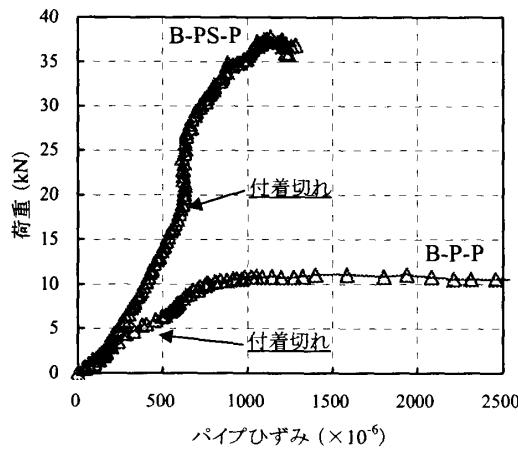


図-5 パイプのひずみ(曲げ付着試験)

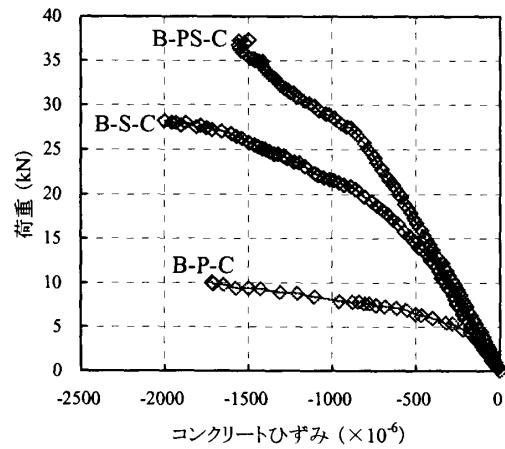
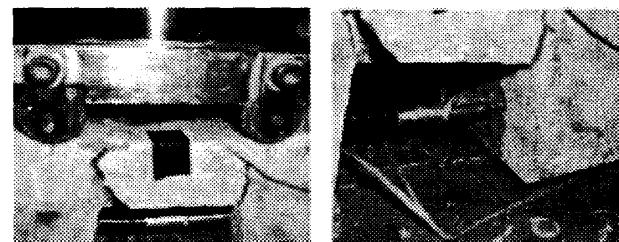
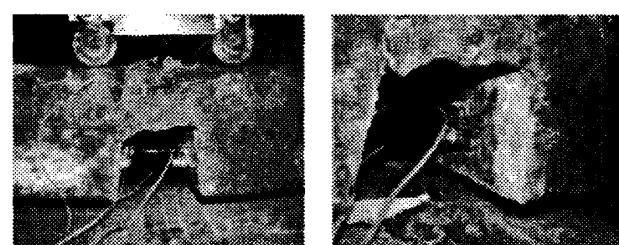


図-6 コンクリートのひずみ(曲げ付着試験)

これにより、載荷点をヒンジ支点とした曲げモーメントが付加作用することで、載荷荷重10kN以降において、パイプひずみは急増したものと推察される。



1) 破壊形態
2) 切欠き部
写真-1 B-P 供試体の破壊形態



1) 破壊形態
2) 切欠き部
写真-2 B-PS 供試体の破壊形態

表-5 付着強度・最大付着応力

	定着長 mm	ひずみ × 10 ⁻⁶	付着強度 N/mm ² 最大応力 N/mm ²
パイプ	320×2	577	0.57
鉄筋	320×2	1833	2.86 ($f'_{bd}=3.45^{**}$)

$$**f'_{bd}=0.28 f'_{ck}^{2/3}$$

写真-1～2にB-P供試体およびB-PS供試体の破壊形態を示す。B-P供試体は切欠き上部コンクリート隅角部に大きなひび割れを伴う曲げ破壊が確認され、終局的にパイプは20mm程度のすべりが生じた。また、写真-2に示すように、鉄筋を有するいずれの供試体も、その破壊挙動は、付着切れを伴うことなく鉄筋ひずみが降伏した後、上部コンクリートが圧壊するものであった。

ここで、パイプおよび鉄筋のひずみとヤング係数から推定される付着強度・最大付着応力を表-5に示す。なお表-5において、鉄筋を含む供試体では、最大荷重時においても鉄筋の付着切れが生じていないため、鉄筋降伏までに生じた最大付着応力を示すとともに、参考値としてコンクリートの圧縮強度から求まる付着強度を併記する。また、パイプの付着強度は、荷重

増加に対してひずみ増進がみられなくなった時点で、パイプ～コンクリート間にすべりが生じたものと考え、その時のひずみから推定される引張応力(引抜き力)を基に算定した。

表-5に示す結果より、異形鉄筋に比べ低剛性で円滑な形状のパイプでは、その付着強度は鉄筋の最大付着応力に比べても20%程度にすぎず、曲げ応力を受ける際にもパイプ自体が負担できるのは、ごく小さい(曲げ)応力レベルであることが予想される。このことより、路面加熱用のパイプを構造部材として考えることは事実上不可能であり、構造部材としては鉄筋のみで捉えることが適切と思われる。また、先述のように、鉄筋とパイプを重ねて配置したB-PS供試体においても、鉄筋ひずみ(B-PS-S)は降伏点にまで達したことから、曲げ荷重作用下では両者を重ねて配置しても構造部材として考える鉄筋の極端な付着強度低下はないものと判断される。

3.3. 曲げ試験

図-7～8に曲げ試験における各供試体(F-PS, F-S, F-P)の鉄筋ひずみおよびパイプひずみをまとめて示す。なおこれらの図には、比較のため曲げ付着試験で得られた各ひずみ挙動も併記している。

図-7に示す鉄筋ひずみによると、等曲げ区間のコンクリート下面にひび割れが発生する極低い荷重レベル(約10kN以下)までは、曲げ付着試験における鉄筋ひずみよりも小さいものであったが、ひび割れ発生後の挙動は、概ね曲げ付着試験で得られた挙動特性に近似するものであった。曲げ付着試験と同様に、鉄筋とパイプを重ねて配置したF-PS供試体では、鉄筋ひずみ(F-PS-S)が鉄筋単体のもの(F-S-S)よりも最大30%程度小さく、鉄筋直下のパイプによる引張応力の一部負担効果が再度確認された。

また、パイプのひずみを示す**図-8**によると、鉄筋ひずみと同様にコンクリートのひび割れまでは小さいものであるが、ひび割れ発生以後では、曲げ付着試験におけるひずみ挙動に漸近

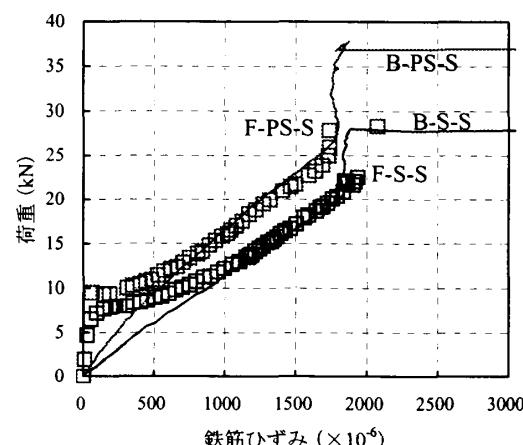


図-7 鉄筋ひずみ(曲げ試験)

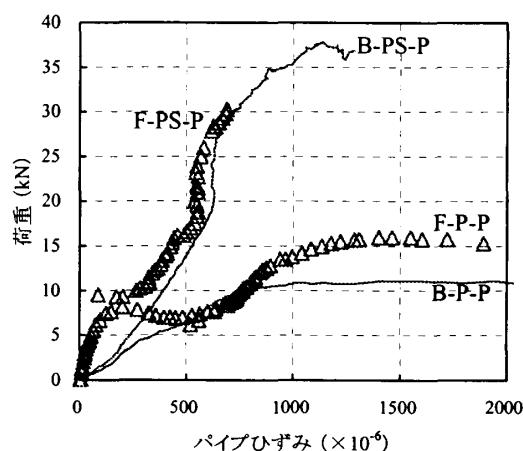


図-8 パイプひずみ(曲げ試験)

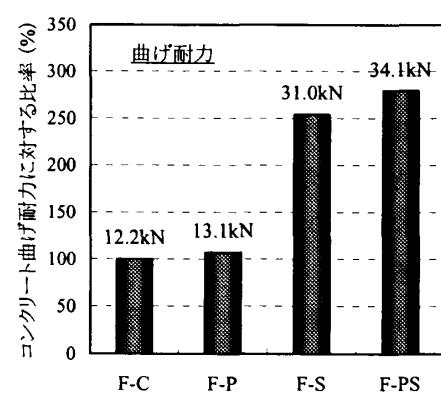


図-9 曲げ耐力の比較

していく傾向がみられた。全断面にコンクリートを有する(切欠き部を有さない)供試体を用いた曲げ試験においても、パイプ単体による補強効果はあまりみられず、曲げ付着試験と同様

に、約 500×10^6 超で先ず一旦付着切れが生じ、その後の載荷荷重によってパイプは降伏ひずみに達したものと推察される。

ここで、各供試体の終局曲げ耐力による比較結果を図-9に示す。なお、この図における基準耐力は、補強材を有さないコンクリート部材単体(F-C供試体)の曲げ耐力である。なお、各棒グラフ上の数値は、実験で得られた最大荷重を表している。

図-9 より、パイプと鉄筋の双方を埋設したF-PS供試体が最も高強度であり、それに僅かに劣ってF-S供試体が位置づけられる。両供試体間の耐力の差異が、曲げ耐力に対するパイプの寄与度と捉えられよう。また、パイプのみを埋設したF-P供試体では、F-PSやF-S供試体の曲げ耐力に比して、約40%ほどの曲げ耐力しかなく、補強材を有さないF-C供試体とほとんど差異はみられない。このことから、パイプヒーティングの構造設計において、直接的に引張力を負担する構造部材としてパイプを取り扱うことは困難であり、負曲げ荷重に対しては適切な上部鉄筋を配置する必要があるものと考えられる。

4.まとめ

本研究では、パイプヒーティングの構造設計に関する基礎データを得る目的から、主として負曲げ荷重を受けるコンクリートはり部材中のパイプと鉄筋の挙動について実験的検討を試みた。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 曲げ付着試験において、鉄筋は降伏したが、パイプは小さい荷重レベルからコンクリートとの付着が切れ、その付着強度は、鉄筋の最大付着応力の約20%以下であった。
- (2) パイプの付着強度は小さく、曲げ荷重下における構造部材としては適さないが、付着切れが生じた後も鉄筋の曲げ応力を一部負担できる能力を有した。
- (3) パイプと鉄筋を重ねて配置したコンクリー

ト部材は、鉄筋単体を埋設した部材以上の曲げ耐力を有し、鉄筋は降伏に至るほどの充分な曲げ・付着耐力を確保できた。

謝辞：実験およびデータ整理にあたり、山口哲矢氏(山口大学大学院)および西田滋氏(山口大学)に多大な御協力頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷本俊夫, 吉武 勇, 中村秀明, 谷 直彦, 浜田純夫：温水パイプによる橋梁床版の融雪・凍結防止システムに関する研究, 土木学会論文集, No.595/VI-39, pp.103-116, 1998.6.
- 2) 吉武 勇, 中村秀明, 谷本俊夫, 浜田純夫：温水パイプを埋設したコンクリート床版の融雪効果に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1075-1080, 1998.7.
- 3) 永井泉治, 吉武 勇, 中村秀明, 浜田純夫：山岳トンネルにおける湧水を利用した橋梁の融雪実験とその適用性, 土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.183-188, 2000.12.
- 4) 辻 和秀, 吉武 勇, 山口哲矢, 浜田純夫：圧縮力作用下にあるコンクリート舗装耐力への埋設パイプの影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp.1121-1126, 2003.7.