

パイプヒーティングの構造設計に用いる コンクリート版の要素実験

吉武 勇¹・辻 和秀²・三村陽一³・山口哲矢⁴・浜田純夫⁵

¹正会員 博(工) 山口大学講師 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 株式会社エイトコンサルタント (〒700-0087 岡山県岡山市津島京町 3 丁目 1-21)

³正会員 修(工) 株式会社エイトコンサルタント (〒700-0087 岡山県岡山市津島京町 3 丁目 1-21)

⁴正会員 修(工) 株式会社まるせ 五日市工場 (〒731-5102 広島県広島市佐伯区五日市町石内 472)

⁵正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

パイプヒーティングに用いる(鉄筋)コンクリート版など、埋設するパイプが部材の構造特性に与える影響について、これまであまり検討されてこなかった。そこで本研究では、パイプヒーティングにおけるコンクリート版の構造設計の基礎データを資する目的から、主に静的圧縮試験および曲げ試験といった要素実験を通じて、その耐荷性能や破壊特性について実験的な検討を試みた。その結果、鋼製パイプはパイプヒーティングに適した材料であり、鉄筋と一緒に配置した場合においても、充分な曲げ耐力を確保できることが確認された。さらに、低い荷重レベルで付着切れが生じるパイプは構造部材として捉えず、鉄筋のみで曲げ引張荷重を負担させる構造設計法が妥当と判断された。

Key Words : pipe heating, structural design, compressive strength, flexural strength, bond strength

1. はじめに

冬期における積雪・凍結路面では、車輌のスリップ事故があとを絶たない。特に、橋梁上やトンネル出口部など、一般道路部との路面状態の格差が生じやすい箇所では、そのスリップ事故発生の危険性は極めて高いものである。

このような積雪・凍結路面状態を回避する手段として、現在多くの路面管理策が提案・実施されている。その中でも本研究は、地下水や地熱といった自然熱エネルギーを比較的容易に用いることができるパイプヒーティング方式に主眼をおいたものである。これまでの著者らの研究では、高い融雪効果を得るために適切なパイプ配置設計^{1),2)}や自然熱エネルギーの有効活用方法^{3),4)}、およびそのコストパフォーマンス⁴⁾を主な検討課題としてきた。

著者らの研究に限らず、冬期路面管理に関する研究の多くは、いかに(熱)効率的に融雪・凍結防止を行うか⁵⁾、あるいはそこに要する(熱)エネルギーを確保するか^{5),6)}について、重点的に検討が進められて

きた。しかしながら、パイプヒーティングの設計においては、その融雪・凍結防止効果に加えて、パイプを埋設した部材の耐荷性能を明らかにしておく必要があると考えられる。現在においても、パイプヒーティングは実用化されているにも拘わらず、埋設するパイプが耐荷性能に与える影響を検討した研究事例⁷⁾は少ないのが実状である。

そこで本研究では、パイプヒーティングにおける構造設計に関する基礎的データを資する目的から、実構造を模擬したパイプ埋設コンクリート供試体を作製し、コンクリート版(鉄筋コンクリート舗装版や床版など)が受ける荷重を考慮した要素実験を実施した。本論文は、これらの要素試験を中心に得た耐荷性能や破壊特性、およびそれに基づく設計の考え方について報告するものである。

2. パイプヒーティングにおける構造的課題

一般にパイプヒーティングでは、熱効率性やメン



写真-1 パイプヒーティングにおけるパイプ配置例

テナンスの観点から、アスファルト舗装よりも(鉄筋)コンクリート舗装が採用されることが多い。ここで通水用のパイプ(Φ20mm程度)は、上部鉄筋(D19相当)の上に配置するわけであるが、125~150mm間隔で配筋される鉄筋と鉄筋の間にパイプを配置すると、その下方までコンクリートを密実に充填することが困難となる。そのため、写真-1に示すように、パイプは上部鉄筋に沿わせて配置する必要も出てくる。この場合、パイプ間隔は上部の鉄筋間隔と同じ125~150mmとなる。ここで、既往の研究において、10°C程度のトンネル湧水を直接用い、150mm間隔(埋設深50~70mm)でパイプ配置した融雪実験から、29cm/dayの降雪量においても無雪状態にできる性能を有することを確認している³⁾。

ここで構造的観点から問題となるのは、パイプを鉄筋に直接沿わせて配置する時、パイプと鉄筋の界面が線接触状態となり、両者のコンクリートに対する定着性や曲げ耐力の低下が生じる可能性があることである。さらに、コンクリート表面近傍(埋設深50mm程度)にパイプ配置することが、耐荷性能を著しく低下させるものか否かといった課題も浮上することになる。

そこで本研究では、コンクリート版の耐荷性能を定量化するべく、パイプヒーティング用コンクリートについて圧縮・曲げ・曲げ付着の要素実験を行い、その結果を基に、パイプヒーティングの構造設計方法について検討を試みるものとする。

3. 圧縮荷重作用下における破壊特性

(1) 実験目的

一般にパイプヒーティングに用いるパイプは、その熱伝導性の高さから、鋼製パイプあるいは銅製パイプが採用されている。しかしながら、それらのパ

表-1 圧縮試験におけるパイプ諸元

パイプ種類	外径mm	内径mm	厚さmm	ヤング係数* N/mm ²
鋼製	21.8	16.0	2.9	206×10^3
銅製	16.0	14.0	1.0	120×10^3
シース	24.5	24.0	0.25	206×10^3
塩ビ管	26.0	19.8	3.1	3000
PC鋼棒	17.0	----	----	196×10^3

*規格値

表-2 コンクリートの材料および配合条件

水セメント比 W/C	55%	-----
細骨材率 s/a	45%	-----
スランプ Sl	12cm	-----
空気量 Air	4%	-----
単位水量 W	165kg/m ³	水道水
単位セメント量 C	300kg/m ³	OPC, $\rho = 3.14 \text{ g/cm}^3$
単位細骨材量 S	819kg/m ³	海砂, $\rho = 2.60 \text{ g/cm}^3$
単位粗骨材量 G	1040kg/m ³	碎石, $\rho = 2.70 \text{ g/cm}^3$
混和剤 Ad	0.01C	高性能減水剤

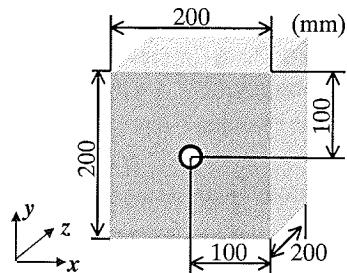


図-1 圧縮試験に用いた供試体模式図

イブ剛性の相違が、コンクリート版においてどのような影響があるものか充分に知られていない。

そこで本章では、コンクリート版として最も基本的な耐荷性能のひとつである圧縮荷重作用下において、コンクリートの耐荷性能に及ぼすパイプの剛性の影響を実験的に調べることとした^{8),9),10)}。この成果を基に、パイプヒーティングの埋込部材として、適切な材料の絞り込みを行うものとする。

(2) 実験供試体

本研究では、パイプ剛性の相違がコンクリート要素の破壊特性に与える影響を明らかにするため、パイプ類を中心とし、埋設した200×200×200mmのブロック状供試体を作製した(図-1参照)。なお、耐荷性能の基準値を求めるため、パイプ類を埋設しない供試体(以下、プレーンと略す)も同時に作製した。

ここで埋設するパイプは、一般に入手が容易なものとし、前述の鋼製パイプ、銅製パイプに加え、比

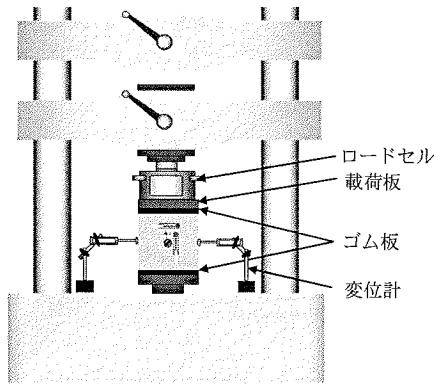


図-2 圧縮試験の模式図

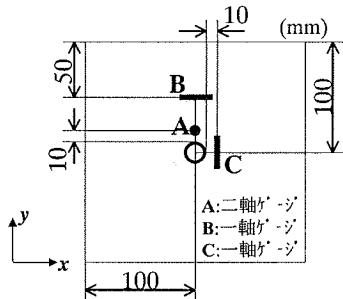


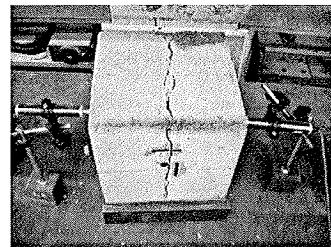
図-3 圧縮試験におけるひずみゲージ貼付箇所

較用として中空材料の塩化ビニールパイプ(以下、塩ビ管)およびPC用シース、またパイプ形状ではないが、PC鋼棒のような密実材料も埋設し、耐荷性能を実験的に確認した。ここで、表-1に示すように、各パイプ類は一般市販品の中から選択したものであり、パイプ径、肉厚等はそれぞれ異なるものである。しかしながら、後述するように、本研究で用いたパイプの形状の影響は試験結果に大きく反映されるものでなく、むしろパイプ剛性が及ぼす影響が大きいと判断されたため、パイプヒーティング用材料の選定のためには、適切な範囲内にあるものと考えている。

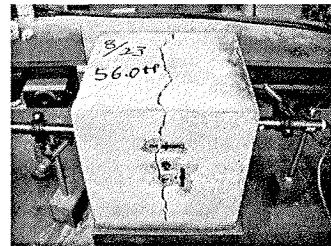
先述のように、パイプヒーティングに用いる舗装構造として、(鉄筋)コンクリート舗装が採用される。これは通常のアスファルト舗装に比べ、舗装版のたわみ変形性が小さく、内在するパイプの損傷を抑制できることから、長期的な耐久性を得るために必然的な構造と考えられる。そこで本研究では、標準的なコンクリート版を模擬するため、表-2に示す一般的な材料および配合(W/C=55%, C=300kg/m³)のコンクリートを作製した。

(3) 実験方法

本研究では、図-2に示すように油圧式万能試験機



A) プレーン供試体



B) 銅製パイプ供試体



C) 破断面

写真-2 圧縮試験後の供試体破壊状況

(Max:980kN)を用いて圧縮載荷試験を行った。その際、供試体と鋼製の載荷板(200×200×25mm)間に生じる端面摩擦の影響をできるだけ小さくするため、両者間に10mm厚のゴム板を挿入し載荷を行った。これは、一般的な(圧縮)載荷試験に比べ、本研究で用いたブロック状の供試体では、幅と高さの比が1.0と小さいため、端面摩擦の影響が無視できず、平面的に広いコンクリート版における破壊挙動を模擬するための手段である。さらに、パイプヒーティングに用いるコンクリート版では、一般にゴムタイヤ等を介して車輌荷重を受けることから、載荷板と供試体間にゴム板を介在する本載荷試験方法には、このような応力状態を模擬する目的も含まれている。

ここで供試体表面には、パイプ近傍を中心に2種類のひずみゲージをX-Y方向に貼付し、コンクリートの変形挙動に対するパイプの影響を調べた。図-3に示すようにパイプ直上の10mm位置に、二軸ひずみゲージ(検長:5mm)を貼付し、載荷に伴うひずみ変化あるいはパイプを起点としたひび割れの有無を確認した。また、パイプ側部10mm位置および供試

表-3 圧縮試験における破壊荷重と平均応力

供試体	破壊荷重(kN)				応力 [*] N/mm ²
	1	2	3	Ave.	
プレーン	647	698	---	672	16.8
PC鋼棒	617	601	623	614	15.3
鋼製	619	632	594	615	15.4
銅製	549	539	523	537	13.4
塩ビ管	531	558	510	533	13.3
シース	494	468	498	487	12.2

*破壊時の平均載荷応力

プレーンの圧縮強度に対する比(%)

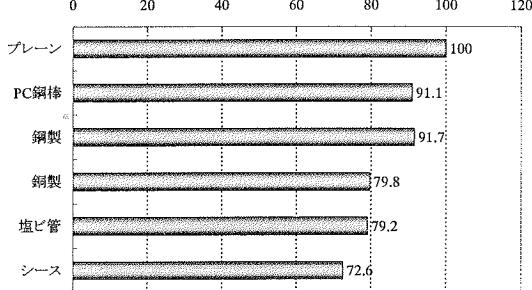


図-4 圧縮試験における強度比率

体上表面から 50mm 位置にも、それぞれ y 方向、 x 方向に一軸ひずみゲージ(検長 : 30mm)を貼付した。

当試験において想定する破壊挙動は、パイプを起点としたひび割れによる供試体中央断面部の破壊である。ここで、パイプ寸法に対して供試体寸法が過度に小さい場合、側面方向へのパイプの変形に起因した破壊挙動を示す可能性がある。そこで、採用した供試体寸法が、妥当な寸法であるかを確認するため、供試体側面部には 1/1000mm 精度の変位計を設置し、載荷に伴う供試体側面部のはらみ変形量を計測した。結果的には、いずれの供試体においてもはらみは全く生じず、本研究で作製した供試体寸法であれば、埋設パイプの影響は、側面部にまで達せず、妥当な供試体寸法であったものと判断される。

(4) 実験結果と考察

a) 破壊状況

破壊状況の一例としてプレーンおよび銅製パイプ供試体のひび割れ状況を写真-2 に示す。写真-2 の A), B)に示されるように、パイプの有無に係わらず供試体のほぼ中央断面に大きな貫通ひび割れが生じ、割裂型の脆性的な破壊に至った。また破壊後の破断面に着目すると、C)の例のようにパイプを含む供試体では、いずれもパイプの破損は生じず、パイプ界面部でのコンクリートの剥離破壊が確認された。

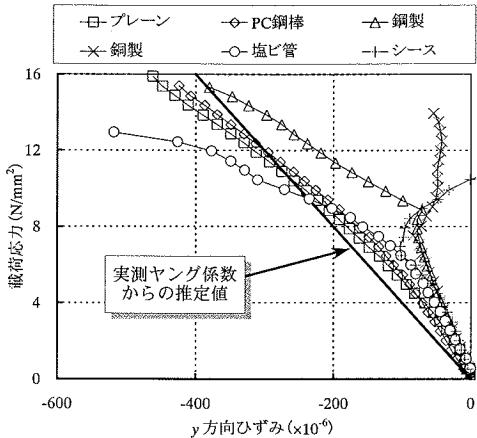
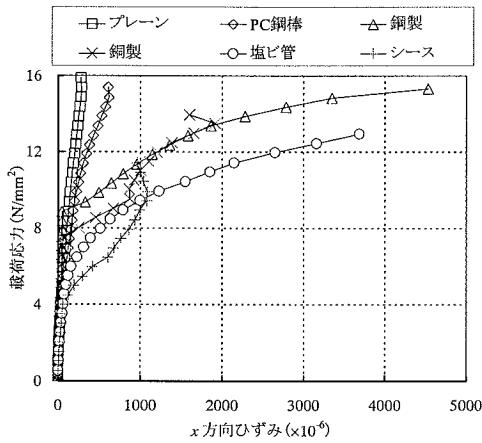
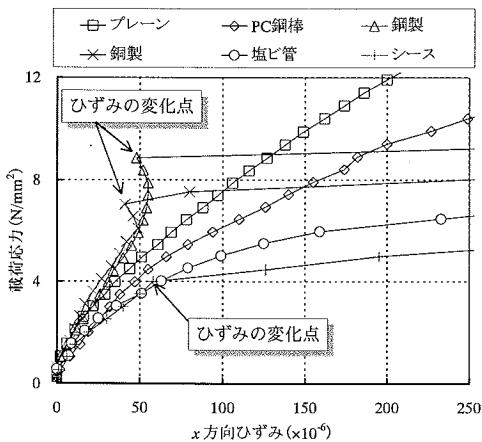


図-5 圧縮試験における y 方向ひずみ(パイプ上 10mm)



A) 終局ひずみ挙動



B) 初期ひずみ挙動

図-6 圧縮試験における x 方向ひずみ(パイプ上 10mm)

b) 破壊荷重

表-3に各供試体の破壊荷重(最大荷重), および破壊時における断面平均の載荷応力を示す。同表に示すように, 各供試体の載荷荷重 468~698kN, (平均) 載荷応力 $12.2\sim16.8 \text{ N/mm}^2$ で破壊に至り, 本研究で行った範囲内では, パイプ類を内在しないプレーン供試体が最も高強度であった。なお, 別途実施した(鋼製)パイプかぶり 50mm における同様の実験^{9),10)}によると, 破壊荷重は 600~605kN(平均 15.1 N/mm^2) であり, パイプかぶり 100mm の結果に対してひび割れ発生状況もほぼ同様であったことから, ゴム板を介して載荷した本研究では, パイプかぶりによる耐荷性能の差異は大きなものではないといえる。

ここで, プレーン供試体の破壊荷重を基準にとった際の, 各供試体の破壊荷重の比(強度比率)を**図-4**に示す。この図によると, パイプを内在した供試体はプレーンの破壊荷重に対して, 10~30%程度の強度低下であり, 採用したパイプの中で最も剛性の低いシースを含む供試体が最弱のものであった。また, 密密な PC 鋼棒を有する供試体においても, プレーンに比して 10%程度の強度低下となり, 鋼製パイプとほぼ同程度の強度性状を示した。これは, より剛な PC 鋼棒では, パイプ近傍のコンクリートの変形性能に追従できず, 両者間の相対的な応力負担の相違によって, 微細なひび割れが生じやすく, 結果的に強度低下をもたらしたものと推察される。

c) 破壊に至るまでのひずみ挙動

二軸ひずみゲージを用いて求めたパイプ直上 10mm 位置(**図-3**の A 点)の y 方向, x 方向ひずみを**図-5**, **図-6**にそれぞれ示す。

図-5に示す y 方向ひずみは, いずれの供試体においても, 後述する x 方向ひずみ変化点が生じる載荷応力($4\sim9 \text{ N/mm}^2$ 程度)まで, 別途試験で求めたヤング係数(40 kN/mm^2)の計算値より小さいものであった。これは, パイプ横 10mm 位置にある y 方向ひずみ(**図-3**の C 点)においても同様の傾向であり, 載荷応力に対してほぼ線形的なひずみ挙動を示した。

ここで, **図-6**の A)に示す x 方向ひずみに着目すると, プレーンおよび PC 鋼棒といった空洞部を含まない供試体では, 明確なひずみの変化点はなく, 載荷応力に応じて増加するものであった。これに対し各種パイプを埋設した供試体では, 同図の B)に示すように比較的低い載荷応力レベルで, 急激にひずみが増加する変化点がみられた。このようなひずみ挙動の変化は, パイプ近傍を中心とした局所的な微細ひび割れの発生を示す現象であり, その変化点における荷重(載荷応力)は, 先述の破壊荷重が低い順, すなわちシース→塩ビ管→鋼製パイプ→鋼製パイプ

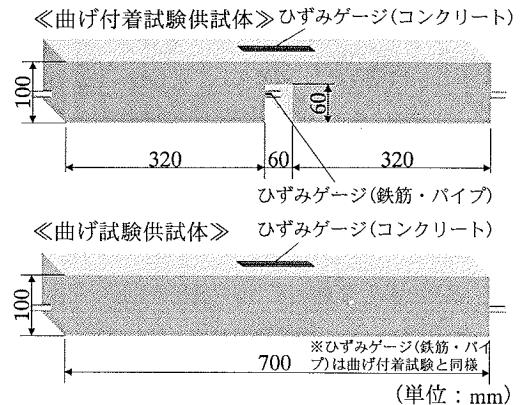


図-7 曲げ付着試験・曲げ試験用供試体

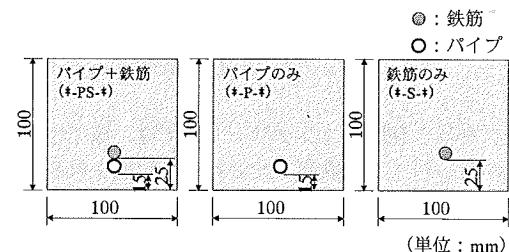


図-8 曲げ付着試験・曲げ試験におけるパイプ埋設位置

の順に並ぶものであった。

これらの結果から, パイプヒーティングにしばしば用いられる鋼製パイプを埋設した供試体は, 局所的なひび割れ発生荷重も高く, パイプを設けないプレーン供試体に比べても 10%程度の強度低下にとどまったことに加え, その熱伝導性・融雪能力も比較的高いことから³⁾, パイプヒーティングには適した材料のひとつと結論づけられる。上記結果を踏まえて次章においては, 曲げ荷重作用下における鋼製パイプを埋設した梁供試体の曲げ耐力および付着強度を中心とした実験的検討を試みる。

4. 曲げ荷重作用下における付着・破壊特性

(1) 実験目的

弾性支承上にある舗装体の設計などにおいては, 曲げ耐力の評価が必要とされる。パイプヒーティング機能を有するコンクリート版では, 上面近傍に加熱用のパイプが密に(125~150mm 間隔)配置されるため, 特に負曲げ応力が作用する場合において, 埋設するパイプがコンクリート版の曲げ耐力へ与える影響を求める必要がある。さらに, パイプヒーティ

表-4 パイプ・鉄筋の諸元

種類	規格	径	ヤング係数	降伏ひずみ
パイプ	SGP-6A	外径：10mm 内径：6mm	197 kN/mm ²	1000 $\times 10^{-6}$
鉄筋	D10 SD295	径：9.53mm 周：30mm	206 kN/mm ²	1800 $\times 10^{-6}$

網掛部：実測値

表-5 曲げ付着試験・曲げ試験供試体の記号

埋設材	曲げ付着試験 < B >	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)

シングを行う(鉄筋)コンクリート版では、施工性の観点から、パイプは鉄筋上を沿わせて配置されることもあり、鉄筋の付着耐力への影響、および両者を一線上に配置する際の破壊挙動も明らかにしなければならない。

そこで本研究では、負曲げ荷重が卓越する応力状態を対象として、同応力状態における埋設パイプの挙動を明らかにするため、①曲げ付着試験および②曲げ試験を実施した。特に、パイプ・鉄筋相互の付着耐力、および両者を一線上に配置したときの曲げ挙動について実験的な検討を試みた。

(2) 実験供試体

本研究における曲げ付着試験および曲げ試験では、パイプヒーティング用コンクリート版のおよそ 1/2 スケール(要素)として 100×100×700mm の角柱供試体を作製した。なお、これらの実験で用いたコンクリートは、前章の圧縮試験と同様の配合である。また、負曲げ荷重を想定した試験であることから、各供試体には下面より 15mm および 25mm の位置にパイプと鉄筋をそれぞれ埋設した。

ここで曲げ付着試験用の供試体は、曲げ試験とほぼ同形状であるが、等曲げ区間に 60×60×100mm の切欠き部を設けている。供試体概略図を図-7 に示すとともに、供試体断面における鉄筋およびパイプの配置位置を図-8 に示す。図-8 に示すように、パイプと鉄筋を有する供試体では、パイプと鉄筋を軸方向の一線上に重ね合わせて埋設しており、その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。以下では、各供

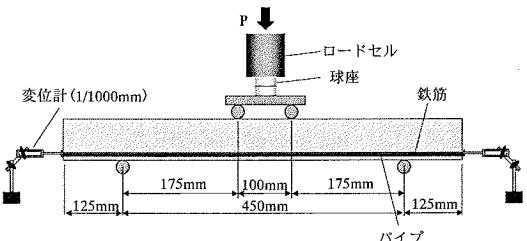


図-9 曲げ付着試験・曲げ試験における載荷方法

表-6 コンクリートの強度・ヤング係数

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

*100×100×700mm(曲げ試験と同条件)

試体について表-5 に示す記号を用いて略記する。

ここで図-7 に示すように、供試体の上面側中央にコンクリート用ひずみゲージ(検長：30mm)，鉄筋およびパイプの側面 2箇所ずつに鉄筋用ひずみゲージ(検長：3mm)をそれぞれ貼付した。

本実験は 1/2 スケール要素モデルに設定したことから、パイプ外径 φ20mm 程度、鉄筋 D19 相当の実構造に対して、ほぼ 1/2 にあたる SGP-6A(外径 10mm)の鋼製パイプ、および横ふし型異形鉄筋 D10(SD295A)を用いた。本実験で使用したパイプおよび鉄筋の諸元を表-4 に示す。なお、曲げ付着試験における鉄筋の定着長が 320mm と鉄筋径(D10)の約 32 倍に相当するため、既往の付着試験¹²⁾で提唱されている定着長 25D(D:鉄筋径)以上を確保している。

(3) 実験方法

本実験では、負曲げ荷重の作用するコンクリート部材を模擬するため、図-9 に示すようにスパン長 450mm、等曲げ区間 100mm の 2 点支持 2 点載荷法を用い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。また各供試体の両端において、突出した鉄筋端面に 1/1000mm 精度の変位計を設置することで鉄筋のすべりを計測した。しかしながら、後述するように鉄筋は付着破壊(以下、「付着切れ」と称す)が生じる前に、降伏点に至ったことから、鉄筋のすべり量はほとんど検出されなかった。

(4) コンクリートの強度特性

本研究では、いずれの試験もコンクリート材齢 28

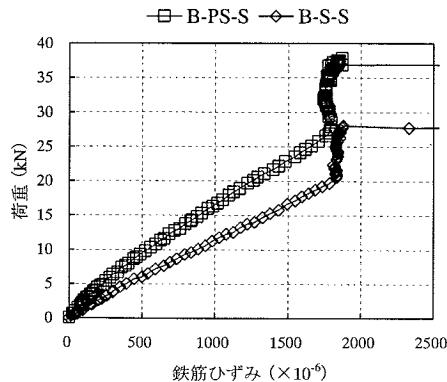


図-10 鉄筋のひずみ(曲げ付着試験)

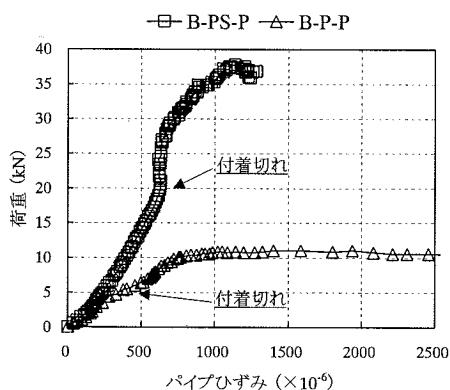


図-11 パイプのひずみ(曲げ付着試験)

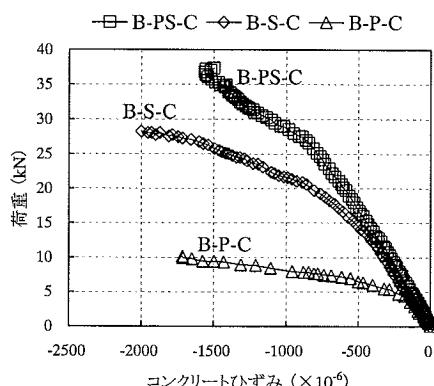


図-12 コンクリートのひずみ(曲げ付着試験)

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の試験結果を表-6に示す。なおここで用いたコンクリートは、前章の圧縮試験と同配合であるが、打設時期や試験材齢が異なるため、先述のコンクリートのヤング係数(40kN/mm^2)に比べ若干の差異がみられる。

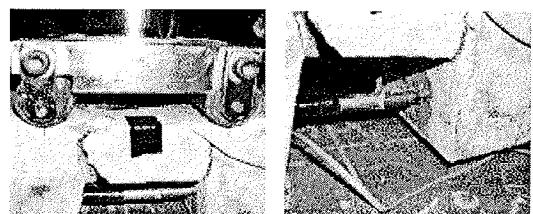


写真-3 曲げ付着試験における終局破壊状況

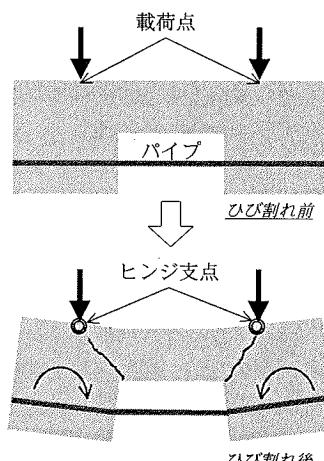


図-13 ひび割れ発生後のモーメントの付加作用

(5) 曲げ付着試験の結果と考察

a) 曲げ付着破壊挙動

曲げ付着試験において、鉄筋単体やパイプ単体を埋設した供試体(以下、それぞれB-S, B-P), あるいはパイプと鉄筋の双方を重ねて埋設した供試体(以下、B-PS)の鉄筋、パイプ、コンクリートの各ひずみ挙動を図-10~12に示す。

図-10に示すB-S供試体の鉄筋ひずみ(B-S-S)やB-PS供試体の鉄筋ひずみ(B-PS-S)は、降伏ひずみ 1800×10^{-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B-PS供試体では、鉄筋直下にあるパイプが、主に引張力を負担する鉄筋を下面から一部補強する役割を果たすことから、降伏ひずみ時の荷重で比べると、B-S-Sに比べB-PS-S

表-7 付着強度・最大付着応力

	定着長 mm	ひずみ $\times 10^{-6}$	付着強度 N/mm ² 最大付着応力 N/mm ²
パイプ	320×2	577	0.57 ^{*1}
鉄筋	320×2	1833	2.86 ($f'_{bd}=3.45$ ^{*2})

*1 付着切れ時のパイプ応力から換算

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

が約30%程度大きいものであった。

一方、図-11に示すB-P供試体におけるパイプひずみ(B-P-P)は、荷重レベルが低い範囲内では、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、荷重だけが増加する現象が得られた。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。

なお一軸引張加力と異なり、曲げ荷重を与える本実験方法では、付着切れが生じた後もパイプは引き抜くことなく、部材に作用する曲げ荷重に応じてパイプ等は引張応力を負担することとなる。付着切れ以降の加力から載荷荷重10kN程度になると、パイプは降伏ひずみ 1000×10^6 に達し、パイプのひずみが急増したことから、それ以上に荷重を上げることができなかった。

ここで、図-12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・進展し、終局時には20mm程度のパイプのすべりが確認された(写真-3 A)参照)。このことから、図-13の模式図に示すように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以後において、パイプひずみは急増したものと推察される。

なお、写真-3 B)に示すB-PS供試体など、鉄筋を有する供試体では、付着切れを伴うことなく鉄筋ひずみが降伏した後、上部のコンクリートが圧壊するものであった。そのため、本実験において鉄筋の付着強度は求まらないが、本研究で採用したような32D程度以上と充分な定着長を確保できれば、パイプと一線上に重ねて配置した場合においても、静的荷重に対し充分な(鉄筋の)定着性を確保することができる。

b) 曲げ付着耐力

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-7に示す。

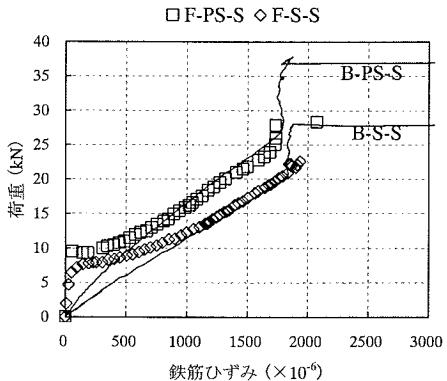


図-14 鉄筋ひずみ(曲げ試験)

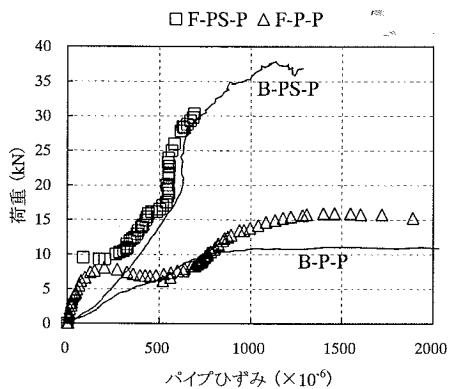


図-15 パイプひずみ(曲げ試験)

す。なお先述のように、鉄筋を有するB-PS供試体およびB-S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、表-7では鉄筋降伏までに生じた最大付着応力を示す。また参考値として、コンクリート標準示方書¹³⁾に記載される付着強度推定式に基づいて、コンクリートの圧縮強度から求まる付着強度(f'_{bd})を併記する。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～コンクリート間に付着切れ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-7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の一部として考えることは適切ではなく、あくまでも路面加熱用の部材として考えることが適切であろう。また、構造部材として鉄筋のみで考えた場合において

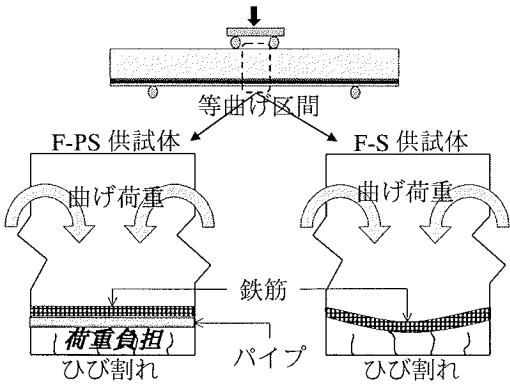


図-16 曲げ荷重下におけるパイプの荷重負担機能

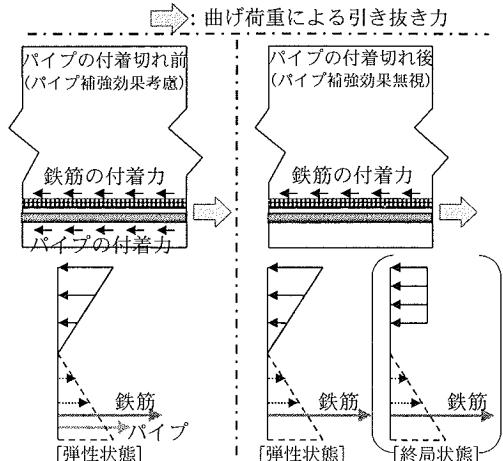


図-18 パイプと鉄筋を埋設した曲げ部材の応力状態

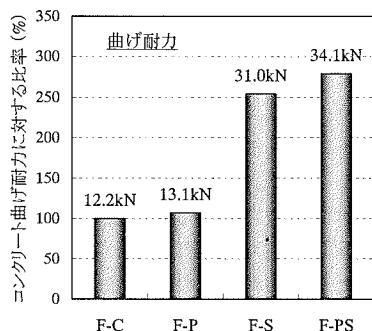


図-17 終局曲げ耐力の比較

も、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、充分な定着長を確保できれば鉄筋ひずみ(B-PS-S)は降伏点にまで達したことから、パイプ配置そのものが構造部材としての鉄筋の応力負担を阻害するものではない。むしろ、鉄筋の曲げ応力負担に対して、ある程度の荷重負担機能も有しており、必ずしもパイプ配置そのものが構造的な弱点にはならないものと考えられる。

(6) 曲げ試験の結果と考察

a) 曲げ破壊挙動

曲げ試験におけるF-PS, F-S供試体の鉄筋ひずみ(F-PS-S, F-S-S)を図-14に示すとともに、F-PS, F-P供試体のパイプひずみ(F-PS-P, F-P-P)を図-15に示す。なおこれらの図では、参考のために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-14に示す鉄筋ひずみ(F-PS-S, F-S-S)によると、等曲げ区間にあるコンクリート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(B-PS-S, B-S-S)よりも小さいものであったが、ひび割れ発生後は、両供試体

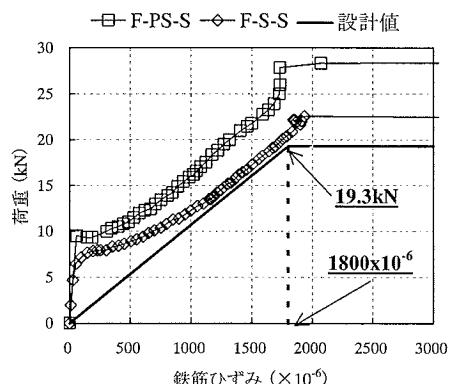


図-19 鉄筋ひずみにおける実験値と設計値の比較
(計算条件: 表-4, 表-6 の材料物性に準ずる)

とも概ね曲げ付着試験で得られた曲線状に漸近していくものであった。また、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)より最大30%程度小さく、鉄筋直下のパイプによる曲げ荷重の一部負担効果が確認された。これを模式的に表すと、図-16のようなものである。但し、後述するように、曲げ耐力に与える影響も小さく、このような荷重負担による効果はあまり大きいものではない。

また、図-15に示すパイプひずみによると、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曲線に漸近し、最終的にはパイプは降伏ひずみに達した。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、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ることから、曲げ荷重に対してパイプが直接的に引張力

を負担する能力は比較的低い荷重レベルに限られることが分かる。

b) 曲げ耐力

ここで、曲げ試験における各供試体(F-PS, F-S, F-P)の最終曲げ耐力を比較するため、コンクリート単体(F-C)の曲げ耐力を基準として、それぞれの曲げ耐力実験結果を図-17に示す。なお、図-17において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-17より、パイプと鉄筋の双方を埋設したF-PS供試体が最も高い曲げ耐力を有しており、それに3kNほど低い曲げ耐力で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る。このパイプによる荷重負担機能は、構造的には有利な点であるが、その能力も比較的小さいものと判断される。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。

これらのことから、図-18に示す模式図のうち、左図のような応力状態で設計するには、パイプの負担できる引張応力までの部材厚(パイプかぶり)が必要となり、結果的に部材厚が非常に厚くなるなど不経済となる。さらに自然熱エネルギーのみのパイプヒーティングでは、高い融雪効果が得られないことが予想される。したがって事実上のパイプヒーティングの構造設計においては、パイプは直接的に引張力を負担する構造部材としては取り扱わず、同右図のような適切な鉄筋配置によって応力負担する構造設計法が賢明と考えられる。

その一例として、従来の構造設計法¹⁴⁾に基づいて求めた計算値(設計値)と実験値の比較を図-19に示す。なお、この設計値は、パイプを構造部材として取り扱わず、パイプを無視し鉄筋のみを補強材として考えている。この図より、設計値はF-S供試体の鉄筋ひずみ(F-S-S)に概ね整合しており、またF-PS供試体の鉄筋ひずみ(F-PS-S)は、設計値の約1.3倍に相当する余裕を有していることが分かる。

鉄筋の一線上にパイプを配置することは、鉄筋の付着耐力を阻害する弊害も考えられたが、実験的事実からはその影響は極端に大きいものではなく、むしろ曲げ耐力の向上に寄与する点など、構造的に有利となる面も窺えた。これらの実験的事実を勘案すると、静的加力試験のみを中心とした本研究の範囲内からではあるが、従来の構造設計法に基づいてパイプヒーティングの設計を行うことが妥当と判断される。今後は、交通荷重を考慮して、コンクリート

版の疲労特性を中心とした検討が必要と考えている。

5. まとめ

本研究では、従来あまり検討されてこなかったパイプヒーティングの構造的問題に対し、その構造設計に反映できるような基礎的データを資する目的から、実構造を模擬したパイプヒーティング用コンクリート版の要素実験を実施した。要素モデルを用いた静的加力試験を中心とする本研究の範囲内において、得られた結論を以下に要約する。

- ① 圧縮試験において、埋設パイプの剛性が圧縮耐力に与える影響は大きく、パイプの剛性低下に応じて耐荷性能が低下するものであった。いずれもパイプ界面部を起点としたひび割れの進展によって部材の割裂型破壊が生じた。
- ② 鋼製パイプは、プレーンに比べて10%程度の強度低下にとどまることなどから、パイプヒーティングには適した材料と判断された。
- ③ 曲げ付着試験において、鉄筋は降伏まで至るが、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。
- ④ パイプと鉄筋を一線上に重ねて配置したコンクリート部材においても、充分な鉄筋定着長を確保できれば、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。
- ⑤ 静的な曲げ荷重を受ける部材としては、早期に付着切れが生じるようなパイプを応力部材として捉えず、鉄筋のみで曲げ引張荷重を負担させる構造設計法が妥当である。

なお今後は、パイプヒーティングに用いるコンクリート版の合理的な設計法の構築に対して、曲げ疲労試験や輪荷重疲労試験等の構造実験やその他耐久性試験も行う必要があると考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、谷本俊夫博士、永井泉治博士(株式会社エイトコンサルタント)に多大なる協力を受けました。また、実験を行うにあたり、蛯谷裕至氏(現 山口大学大学院)、西田 滋氏(現 射水建設興業株式会社)をはじめとする山口大学工学部社会建設工学科施設材料学研究室の各位に御協力頂きました。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) 永井泉治, 吉武 勇, 仁尾彰一郎, 浜田純夫:パイプヒーティングによる路面融雪のためのトンネル坑内加温実験とコスト評価, 土木学会論文集, No.707/VI-55, pp.219-224, 2002.6.
 - 5) 例えば, 宮本重信:自然熱源による路面の融雪・凍結抑制システムに関する研究, 名古屋工業大学博士論文, 1999.
 - 6) 例えば, 福原輝幸, 谷本 智, 渡邊 洋, 大木政弘:熱交換掘削杭の採・放熱特性および地盤との長期熱的相互作用, 土木学会論文集, No.685/VII-20, pp.103-113, 2001.8.
 - 7) 例えば, 奥村 茂, 宮本重信, 堀川都志雄, 桜垣 豊, 松井繁之:凍結抑制型合成鋼床版の輪荷重下での疲労特性, 第2回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.143-148, 2000.12.
 - 8) 蛯谷祐至, 山口哲矢, 吉武 勇, 浜田純夫, 辻 和秀, 三村陽一:圧縮力作用下にあるパイプヒーティング舗装の破壊性状, 土木学会中国支部第55回研究発表会, V-10, pp.463-464, 2003.5.
 - 9) 山口哲矢:パイプヒーティングに用いるコンクリート版の構造設計に関する基礎的研究, 山口大学修士論文, 2004.3.
 - 10) 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.
 - 11) 三村陽一, 辻 和秀, 吉武 勇, 浜田純夫: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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.405-410, 2004.7.
 - 12) 山尾芳秀, 周 礼良, 二羽淳一郎:付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.343, pp.219-228, 1984.3.
 - 13) 土木学会コンクリート委員会:コンクリート標準示方書【構造性能照査編】), p.21, 2002.3.
 - 14) 加藤清志, 河合糸茲, 加藤直樹:鉄筋コンクリート工学, 共立出版, 1999.9.

(2004.3.3受付)

FUNDAMENTAL EXPERIMENT FOR STRUCTURAL DESIGN OF CONCRETE WITH HEATING PIPE

Isamu YOSHITAKE, Kazuhide TSUJI, Yoichi MIMURA,
Tetsuya YAMAGUCHI and Sumio HAMADA

Pipe heating system using natural energy is an effective method for snow melting and anti-freezing on the road. Although previous studies on the pipe heating have been made on the snow melting properties, little attention has given to structural properties. Especially, to know the influence of embedded pipe on the structural behavior of concrete slab is very important for its rational design. Thus, the compressive and flexural strength tests using elemental models were conducted in order to obtain the fundamental properties of concrete with heating pipe. This paper presents the experimental results and discussions for structural design of concrete slab for pipe heating.