

(4) 線路下横断構造物建設のためのパイプビーム工法

※1 高瀬 幸紀 ※2 後藤 芳顕 ※3 山下 彰彦 ※4 飯田 毅

1. はじめに

パイプビーム工法は既設鉄道・道路下の土被りの少ない所に地下道等を建設するための工法である。本工法では、従来二次的な防護工として用いられていた小径パイプルーフを大径鋼管ビーム材に変え、さらにこれらを強度・剛性が期待しうる継手で相互に連結して形成される鋼管を主ばりとした面構造ルーフを支保工として用いることに特徴がある。このように本工法は、従来二次的構造であったパイプルーフを主構造として用いるので経済的である。また、一般に、掘削全長を支保するので、一括した機械掘削と、コンクリートボックスの施工が可能となり、工期が短縮できる。さらに、鋼管ビーム材相互が継手で連結されているので、活荷重に対するルーフの剛性が大きく、列車走行に悪影響を及ぼすことが少ない等の利点を有している。

本論文では、本工法の特長、従来工法との比較、また継手で連結された水平鋼管ビーム材の解析法および本構造物固有の設計法、さらに現場実測による実構造物の挙動について概説する。

2. 工法の概要

(1) 工法の特長

パイプビーム工法とは、先ず鋼管ビーム材を水平に、連続的に地盤中に圧入し、その鋼管の両端部を受桁で支えること

により、既設の構造物の仮受けを行い、その後鋼管ビーム材相互の継手部をモルタルグラウトし連結する。こうしてできた鋼管ビーム材直下を機械掘削し、現場打ちコンクリートにより構造物を施工する方法で、以下の特長がある。図1に工法の概要を示す。

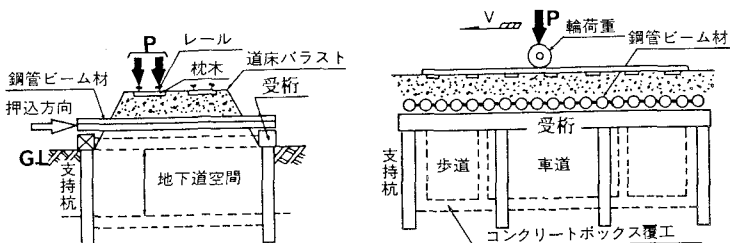


図 1 パイプビーム工法概略

※1 住友金属工業㈱ 鉄構技術部 副主任部員

※2 名古屋工業大学 土木工学科 講師

※3 日本国有鉄道 東京第三工事局 補佐

※4 住友金属工業㈱ 中央技術研究所 副主任研究員

表1 パイプビーム工法の構成

項 目	種 類
鋼管の連結型式	一文字型
	門型
側壁構造	パイプビーム
	その他土留構造
スパン	単スパン (25m以内)
	支持工 or 段階施工による数スパン
反力壁	盛土区間 盛土 or 反力杭
	平坦区間 立坑土留壁
受 桁	鋼製
	場所打ちコンクリート
支持杭	鋼製
	場所打ちコンクリート杭

(3) 施工の順序

施工の順序は手待ち、手戻りのないよう施工条件を十分把握して計画する必要がある。パイプビーム工法における標準的な施工フローを、平坦区間に施工する門型構造を例にとり図2に示す。

また施工順序を図3に示す。

(4) 鋼管ビーム材の連結型式および適用スパン

鋼管ビーム材の連結型式には、一文字型と門型がある。この鋼管ビーム材の連結型式は、確保できる用地の広さ、土留壁の止水性の問題および工事の経済性等から決定される。一文字型とは、鋼管ビーム材を1列に並べた型式であり、この型式を採用する場合は、線路下部の土留壁としては、親杭・横矢板工、鋼矢板工、さらにはアースアンカー工などを採用する必要がある。門型型式とは読んで字のごとく、土留壁にもルーフ部と同様鋼管ビーム材を使用し、鋼管ビーム材を門型に配列する型式である。一文字型および門型型式の概要を図4、図5に示す。さらに各々の型式で施工された工事の状況を写真1、写真2に示す。

適用スパンについて検討すると、土被り厚さ、路線数にもよるが、一般に20m～25m以内であれば単スパン、それ以上の場合は支保工を用いるか、段階施工を実施することにより本工法の適用が可能となる。これは現有の押管機がルーフ部でφ1200mm、側壁部でφ1000mmまでの鋼管しか押管できないこと、また線路下構造物の施工位置に制限があるなどの理由による。段階施工の計画例を図6に示す。

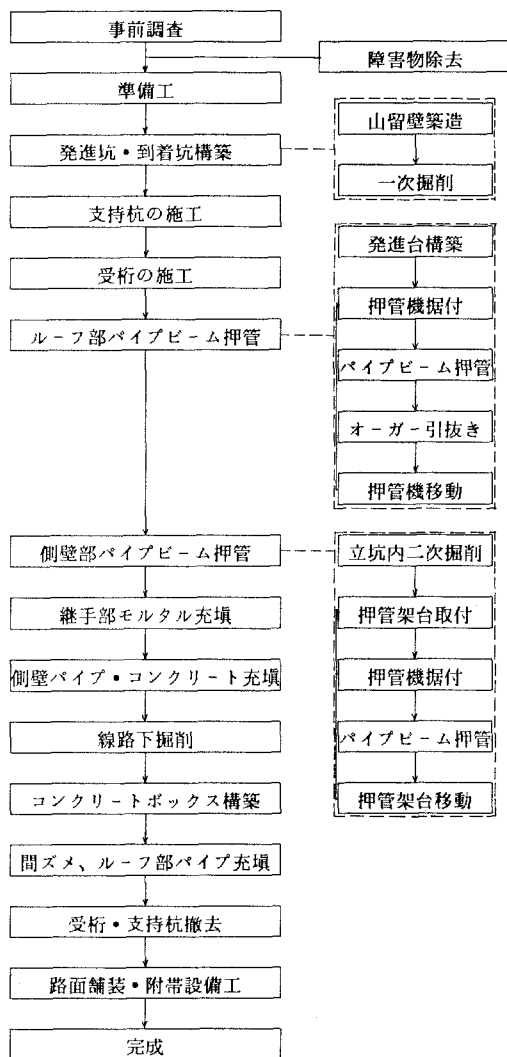
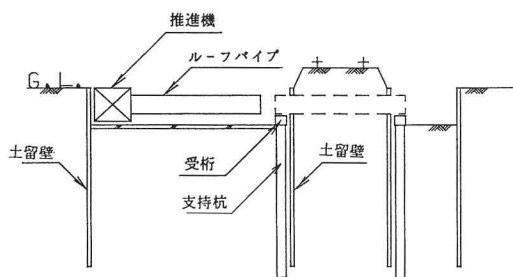


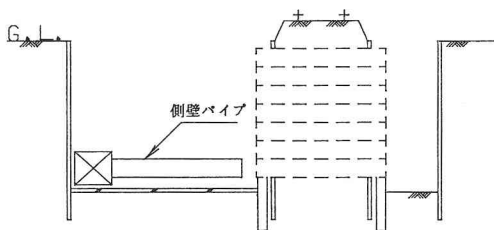
図2 パイプビーム工法の標準的施工フロー

(5) 継手形状

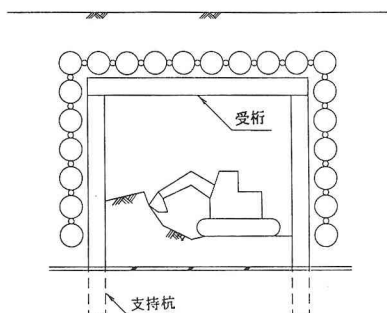
本工法に使用される代表的な継手形状と継手試験によるばね定数および強度を表2に示す。設計に用いる場合は所定の安全率を考慮して検討する必要がある。継手間隔としては、施工性を考慮して決定されるが、90mm～120mm位が一般的である。



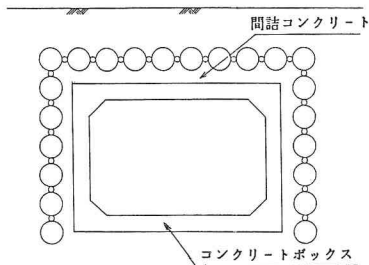
- ①土留壁施工
- ②立坑一次掘削
- ③支持杭・受桁の施工
- ④ルーフパイプ推進



- ⑤立坑二次掘削
- ⑥側壁パイプ推進
- ⑦継手モルタル充填
- ⑧側壁パイプコンクリート充填



⑨線路下掘削



- ⑩コンクリートボックス構築
- ⑪間詰、ルーフ部パイプコンクリート充填
- ⑫舗装、附帯工

図3 パイプビーム工法の施工順序概略図

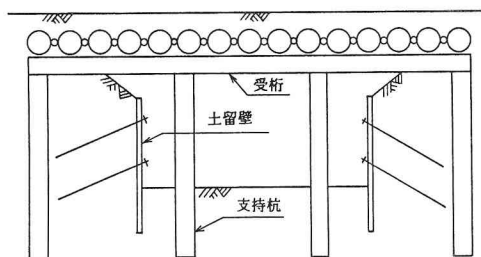


図4 一文字型式

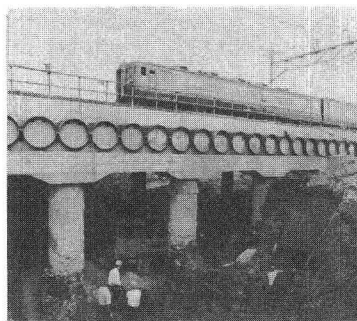


写真1 一文字型式

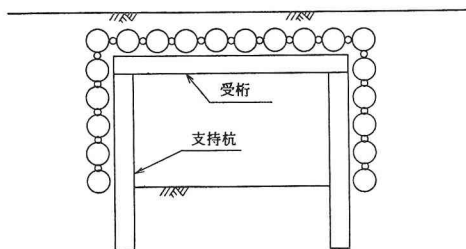


図5 門型

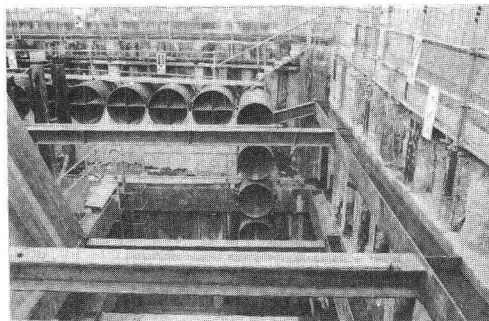
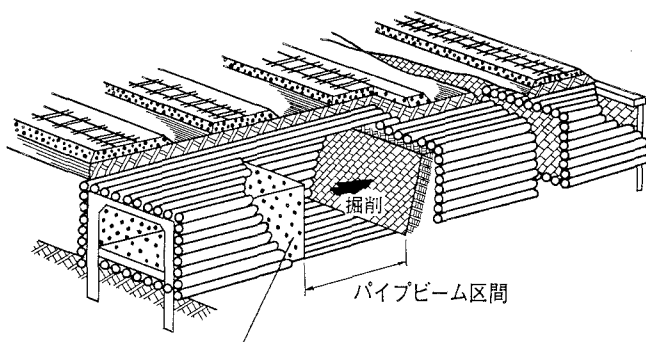


写真2 門型



完成したコンクリートボックス

図6 段階施工計画例

表2 継手形状、継手強度、ばね定数

継手形状 継手強度、ばね定数 継手間隔		L-T型	L-L型	L-O型	C-O型
90mm	k_{vj} (kg/cm ²)	3450	7640	5880	3130
	q_{vmax} (kg/m)	543	1248	537	370
120mm	k_{vj} (kg/cm ²)	2890	9170	3358	1680
	q_{vmax} (kg/m)	507	1515	338	333

表3 各種施工法の比較

条件		工法	パイプ ビーム工法	フロンテ ジャッキ 工法 ESA工法	URT工法 (下路桁形式) NNCB工法 PCR工法
地形・地盤条件	粘性土	N2以下	○	△ ⁽¹⁾	○
		N2～15	○	○	○
		N15以上	△ ⁽²⁾	△ ⁽³⁾	△ ⁽⁴⁾
	砂質土	N50以下	○	○	○
		N50以上	△ ⁽²⁾	△ ⁽³⁾	△ ⁽⁴⁾
	固結地盤・岩盤		×	×	×
構造条件	スパン	15m以下	○	○	○
		15m以上	○	○	△ ⁽⁵⁾
	横断延長	複線以下	○	○	○
		複線以上	△ ⁽⁶⁾	○	×
	土被り		約1.0m ⁽⁷⁾	約1.4m ⁽⁷⁾	0.2m
仮設・本設		仮設	本設	本設	本設
工期		○	△	○	
工費		○	△	△ ⁽⁸⁾	

3. 他工法との比較

線路下横断構造物の施工法としては、各種工法があるが、代表的な工法であるフロンテジャッキング工法、URT工法、NNCB工法等と本工法との適用土質条件、工期、工費等の比較を表3に示す。表3より本工法は他工法に比べ経済性、工期の面で優れている。しかし、土被りの非常に浅い所では使用出来ない点、仮設構造物としてしか使用されていない点など欠点もあり、本設構造物への適用などまだ改良の余地がある。

- (1)地盤の安定の検討 (2)パイプの推進可能なら○
 (3)けん引力の大きさ、水平ボーリングの精度を検討
 (4)エレメントの推進が可能なら○
 (5)連続梁等で検討
 (6)スパンが20mを超える場合は支保工または段階施工検討
 (7)パイプの径が600の場合
 (8)スパンが短い場合はフロンテより安い。

4. パイプビーム構造の解析法

(1) 解析法の概要

パイプビーム構造は、通常中空の鋼管より成るため、厳密には鋼管を円筒シェルとして局部応力を含め解析すべきであるが、このようにすると計算量が膨大になるので、ここでは構造特性を考慮して解析法の簡略化を計る。すなわち、列車荷重は枕木や地盤を介してかなり分散して鋼管に作用することや、使用される鋼管が通常 $r/t < 30$, $L/r > 25$ (r :半径, t :板厚, L :スパン長)であることから、鋼管のたわみ、軸方向応力、せん断応力に及ぼす断面変形の影響は小さいと

考えられるので、これらの物理量の算定には鋼管をはりとし²⁾³⁾たモデルを用いる。そして、鋼管の周方向応力については、上記のはりとしたモデルでは扱えないので、別途簡単なモデルを考えて算定する。

まず、鋼管をはりとするモデルは図6のように支持地盤を含め弾性基礎上のはりとし、これが継手をモデル化した分布ばねで長手方向に連結されたものとする。継手ばねとしては、分布せん断力を伝えるせん断ばね K_v とモーメントを伝える回転ばね K_M があるが、通常の継手では K_M の影響はほとんど無視できるので、 K_v のみを考慮する。

この K_v は、継手部分の変形に関する K_{vj} と継手の接合鋼管の局部変形によるばね K_{vp} が直列に連結したものから成る。一般に、継手接合部の鋼管の局部変形は小さく、鋼管のはりとしての応力や、変位に与える影響は無視できるが、継手による荷重分配作用に関して

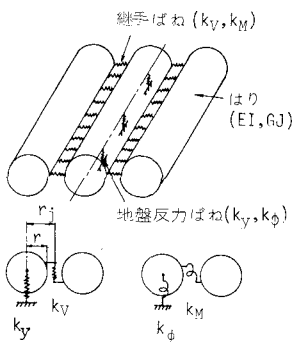
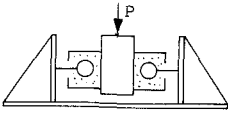


図6 鋼管をはりとする解析モデル

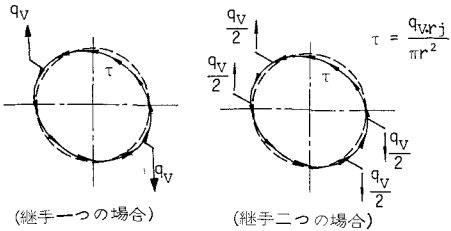
は継手自体の変形が小さいので、この局部変形は無視できない。したがって本モデルでは、鋼管を断面形状不変のはりとして扱う関係上、この局部変形は継手部分の変形とともに、継手ばね K_v の変形として考慮した。

K_{vj} 、 K_{vp} の具体的な評価法としては図7に示すように、モルタルとの複合構造物である継手部分の K_{vj} はせん断試験より、また鋼管の局

部変形を表す K_{vp} は、二次元のリングに均一な²⁾⁴⁾継手力²⁾⁴⁾を作用させること



a. K_{vj} の評価



b. K_{vp} の評価

図7 継手ばね定数の評価

によって評価する。以上の鋼管をはりとするモデルの解析手法としては、板殻理論との類似性に着目した有限帯板法と等価な手法をすでに提案し、妥当性についても検証している。

つぎに、周方向応力については、鋼管を円筒シェルとする厳密なモデルを有限帯板法により解析した結果をもとに簡易計算法を提案する。なお解析法の妥当性は図8に示す模型実験との比較から検討した。

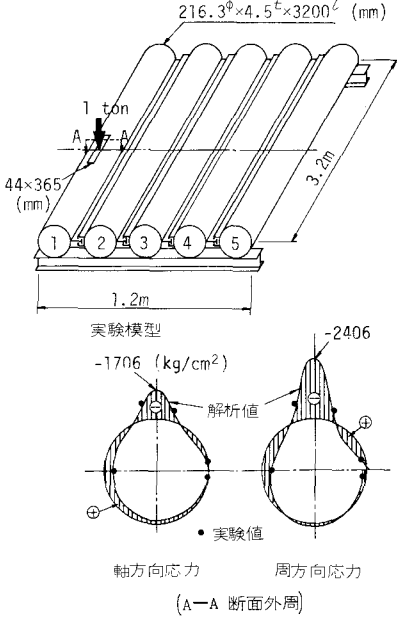


図8 局部応力に関する模型実験

この解析法を用いて、表4のように、継手の連結を考慮した場合と、これを無視した場合の応力分布を比較した結果、軸方向応力に比べ、周方向応力については差が小さいことがわかる。以上から周方向応力の簡易的な計算については、ほぼ妥当な安全側の値が得られるという理由から、継手の連結を無視した単一鋼管のモデルを用いる。

表4 継手の連結が周方向応力に与える影響

	単一鋼管	パイプビーム構造	
		No.1鋼管載荷	No.2鋼管載荷
周方向応力	-878 (kg/cm ²)	-845	-778
軸方向応力	-1090	-636	-592

2種類のパイプビーム構造について、現場実測を行い、構造解析法の妥当性を検証した。これらは、東北本線上富田、および関西本線泥堂における架道橋建設に用いられた図9、図10に示すパイプビーム構造で、前者は鋼管ビーム材を一字型、後者は門型に連結し、いずれも鋼管ビーム材両端をほぼ単純支持、回転固定としている。

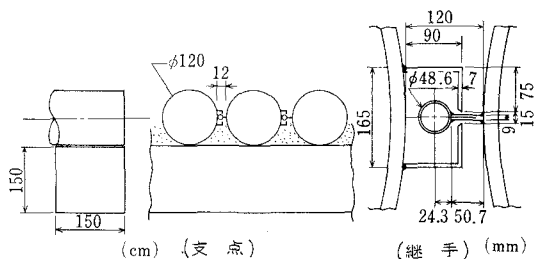
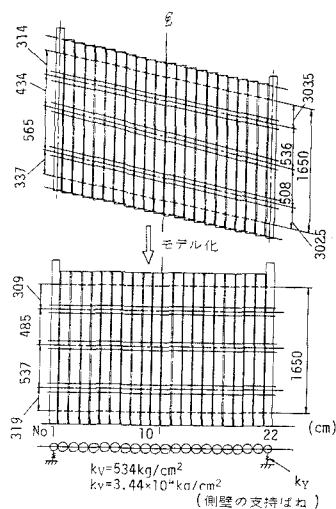


図9 上富田架道橋構造概要 (継手)

[illegible]

2000



b. 泥堂

— 36 —

すなわち、上富田の構造では地盤反力ばねの設定境界を管軸に平行に選び、泥堂の構造では鋼管の若干の斜め支持を無視している。上富田の構造における地盤反力ばねの設定は大胆と見えるが、本構造では大きな応力、変位の生ずる連結方向中央付近の重要な鋼管の値に対しては、ばねの設定位置およびばね定数の多少の変化は解析結果にほとんど影響を与えない。これは泥堂の構造における側壁鋼管によるルーフ鋼管の支持をモデル化した両端部のばね定数の設定に関しても同様である。列車荷重通過時のパイプビームのスパン中央の軸方向最大縁応力および変位に関して、実測値と解析値の比較を各構造について、それぞれ1例を図12、図13に示す。図中には参考のため継手の連結を無視した解析値も記入している。なお、走行荷重の衝撃係数は上富田での実測からすべて0.1以下であったため、実測値における動的増幅は無視した。

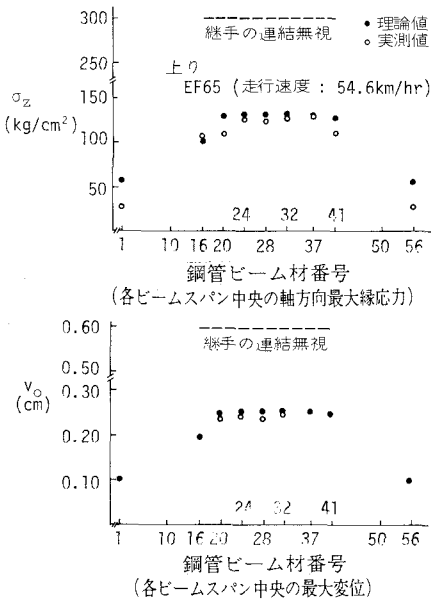


図12 上富田架道橋の実測値と解析値の比較

図12、図13から、実測値と解析値は良く一致しており継手による荷重分配作用は、ほぼ本解析法で評価しうる。周方向応力については、表5に上富田における実測値と円筒シェルモデルによる解析値の比較を示す。解析値は枕木からの荷重分散を45°と仮定したもので、実測値に比べ低目となる。荷重分散については、測定ケースが少いため妥当な仮定を提案することは困難であるが、安全側の検討を行うためには枕木の幅で等分布すると考えるのが良いであろう。

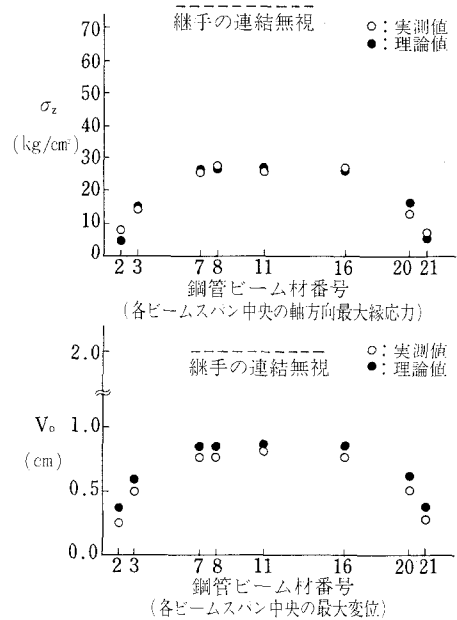


図13 泥堂架道橋の実測値と解析値の比較

表5 周方向応力に関する実測値と解析値の比較

(上富田架道橋)

列車	485系	EF81系
実測値	103 (kg/cm²)	137
計算値	60	85

5. 設計法

この種の構造物の設計指針としては、線路下横断構造物設計の手引きがあるが、これらは実質上継手による荷重分配作用を無視しているため、パイプビーム構造の設計にそのまま用いることはできない。したがって、ここでは継手の連結を考慮した場合のパイプビーム構造固有の設計法について概説する。

(1) 設計計算法

4、で述べた解析法のプログラムが完成しており、主としてこれにより計算を行う。鋼管のたわみ、軸方向応力、せん断応力、継手力、支点反力を計算するための鋼管をはりとす

るモデルによるプログラムは2種類のものから成り立っている。図14に示すように一つは鋼管ビーム材を一要素とするもので、単一スパンの両端単純支持回転固定の構造を対象としている。もう一つは、各鋼管ビーム材のスパン直角方向にとった帯状要素を一要素とするもので、鋼管ビーム材両端の支持条件を任意に扱える他、中間支点を設けた場合も解析可能である。ただいずれも、各要素は一様の物理定数をもつという制約がある。

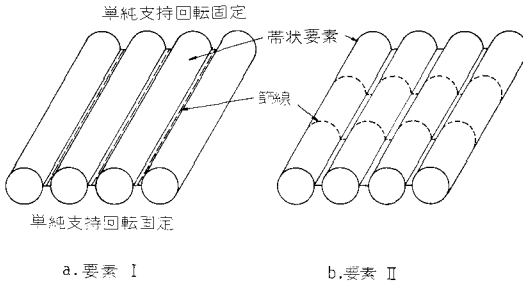


図14 有限帯状要素

(2) 鋼管ビーム材の設計

設計計算のためのモデルは、主として鋼管の断面変形が少いとしたはりのモデルを用いるため、鋼管ビーム材は、できるだけこの条件を満足するように設計する必要がある。コンクリートを鋼管ビーム材のスパン全長にわたって充填するときや、大きな荷重の作用点をダイヤフラム等で補剛する場合には、この補剛に対する設計さえ十分に行えば、はりとしての物理量の検討だけで良い。しかしながら、鋼管ビーム材を仮設材として用いるパイプビーム工法では、完成時まで補剛されることが少いので、周方向応力を含めた合成応力の照査も必要となる。この照査は、軸方向応力の最大値発生位置とともに、周方向応力の最大値が発生する鋼管ビーム材の活荷重作用点直下について行えば良い。

なお、周方向応力の算定時には、同じ単一円筒シェルのモデルにより算出される軸方向応力の分布形状を検討し、はりのモデルによる軸方向応力の算定法の妥当性を検討することも重要である。

(3) 継手の設計

継手の設計法とともに、設計計算に用いる継手ばね定数の評価方法についても述べる。

継手の設計は継手部分に対する設計と、継手の鋼管への接合部の設計とから成り立っている。継手部分の設計では、設計計算により、最大継手力 q_v を求め、これが継手内のモルタルも考慮して定めた継手力の許容値 q_{va} 以内になるように

すれば良い。 q_{va} は継手強度 q_{vmax} をもとに定められるが、実構造に関しては、継手へのモルタル充填が現場作業となり、モルタルの性能が施工条件で左右されるので、 q_{vmax} は、ばね定数 k_{vj} とともにその値を把握することは容易でない。したがって当面の実際的な方法としては、実験室内で製作した継手模型のせん断試験から得られる表2の値に適当な低減率を導入して q_{vmax} 、 k_{vj} を評価せざるを得ない。今後この問題は実構造の継手に関する試験データをさらに蓄積することで明らかにする必要がある。

鋼管と継手の接合部の設計は、継手の鋼管への溶接部と、接合部鋼管の局部応力に対するものである。溶接部に関しては、設計計算で得られた最大継手力 q_v を外力として図15のように算定される溶接部の単位長さ当りの断面力に対して設計する。

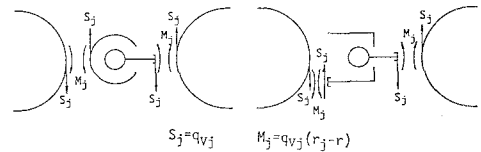


図15 溶接部に作用する断面力

接合部鋼管の局部応力に関しては、通常鋼管板厚が継手に比べ厚いことと、継手が鋼管の中立軸近傍に接合され、軸方向応力が小さいことから、この部分が継手部分より先に降伏することはないと考えられるので、この部分の応力照査はほぼ不要である。

もし、このような条件が満足されない場合には、図16に示すように鋼管を二次リングとするモデルに、最大継手力 q_v

および断面力変化分を外力として加えることで算定される周方向応力と、既知の軸方向応力との合成応力に対して検討する。

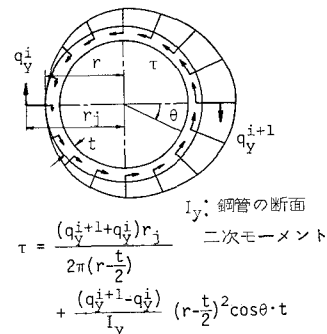


図16 継手接合部の鋼管の周方向応力の算定モデル

(4) 支点の設計

(1) の設計計算で評価される荷重分配作用が実構造でも生ずるためには、鋼管ビーム材両端の支点は、解析モデルの仮定を満足し、設計荷重に対し十分な強度を持つ必要がある。ここでは、支点部での鋼管の補剛がなされていることを前提に、架台による鋼管ビーム材の支持構造の設計について述べる。支持構造として、手引書には、両端を拘束する構造について示されているが、ここでは、パイプビーム構造に多く用いられている単純支持回転固定の条件をほぼ満足する構造について述べる。具体的な構造としては図17のように架台と鋼管ビーム材の間にコンクリートを充填するのが一般的であり実績もある。コンクリートの充填範囲は、設計計算法で得られる支点の鉛直反力 V とねじりモーメント反力 T の個々の最大値に対して応力分布を図18のような一般分布に仮定し、これらが許容値を満足するように決定する。

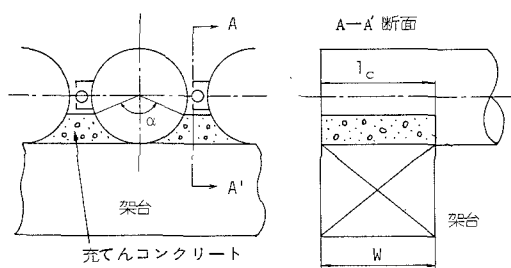


図17 支点構造

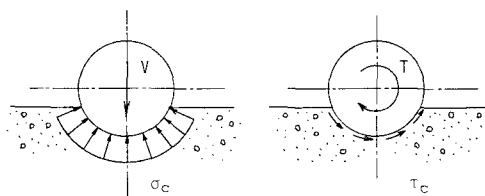


図18 支点応力分布の仮定

7. 今後の発展

本工法は、日本国有鉄道東京第二工事局と共同開発した工法であるが、線路下横断構造物の構築工法として東北本線矢板駅構内上富田架道橋に採用されて以来、昭和58年11月時点で4件目の牛久・荒川沖間架道橋が施工中であり、さらに58年度、59年度の架道橋工事として6ヶ所で本工法の採用が内定している。

また、これまでの実績をふまえ、仮設構造物への採用を目的とした、継手の荷重分配を考慮した設計法が、昭和59年3

月に、日本国有鉄道構造物設計事務所より発表される予定である。

このように、仮設用としての本工法は、ほぼ技術的に確立したといえるが、さらに本工法を発展させるため、腐食に対する対策をほどこした継手形状の考案、継手に変わりせん断力を伝達する方法の検討を進め、永久構造物になっても、荷重分配が発揮され、経済的な設計が可能となるよう研究を進めていく予定である。

謝辞

本工法の開発および発展に多大の御尽力をいただいた、元日本国有鉄道東京第二工事局次長 日下部好男氏（現不動産建設 参与）はじめ、東京第二工事局の方々、日本国有鉄道構造物設計事務所地下構造 梅原主任技師はじめ構造物設計事務所の方々、日本国有鉄道 大阪工事局の方々、さらに、上富田架道橋、泥堂架道橋の工事を担当された西松建設㈱、鉄建建設㈱の方々に謝意を表する。

参考文献

- 1) 山下彰彦, 林雅博: 線路下横断構造物の選定, 鉄道土木, 24巻8号, 昭和57年8月
- 2) 山川純雄, 後藤芳願: 水平鋼管矢板構造の継手による荷重分配作用の解析, 土木学会論文報告集, 301号, PP1~12, 昭和55年9月
- 3) 後藤芳願: 水平鋼管矢板構造の継手による荷重分配作用, 東京大学学位論文, 1982年11月
- 4) 後藤芳願, 山下彰彦, 飯田毅: 水平鋼管矢板構造の荷重分配性状, 土木学会論文集 投稿中
- 5) 飯田堅雄, 石川幸司, 野崎哲男: パイプビーム工法による斜め架道橋の施工, 鉄道土木, 23巻, 5号, 昭和56年5月
- 6) 後藤芳願, 山下彰彦, 高瀬幸紀: 水平鋼管矢板構造の継手による荷重分配作用の現場実測, 土木学会論文集 投稿中
- 7) 新宅, 山下, 本田, 高瀬: 泥堂架道橋パイプビームの現場測定結果とその考察, 土木学会第58回年次学術講演会 III-110, 昭和58年9月
- 8) 構造物設計事務所: 線路下横断構造物の設計の手引・下路桁形式, 昭和56年6月
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 昭和55年2月

- 1 0) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，鋼鉄道橋，
昭和58年5月
- 1 1) 土木学会：コンクリート標準示方書解説，昭和55年
- 1 2) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・
同解説，昭和50年
- 1 3) 峯本，日下部，斎藤，中山：鉄道・道路の輪荷重を受
けるパイプビーム工法の実験（上，下），土木施工，
20巻4号，5号，昭和54年4月，5月

PIPE BEAM METHOD FOR CONSTRUCTING
STRUCTURES PASSING THROUGH UNDER RAILWAYS

Yukinori Takase*, Yoshiaki Goto**, Akihiko Yamashita***, Takeshi Iida****

Pipe Beam Method is a new tunneling method for constructing structures under railways without interrupting railway services. This method is best characterized by a large-diameter pipe beam roof used for supporting and shielding system. The pipe beam roof, supported at both ends of the pipes, are constructed by connecting the pipes over the full length with interlocking joint filled with mortar grouting after driving them horizontally below rails. The large diameter pipes are used for the pipe beam roof so that they may work not only as the main supporting system but also as the shielding system; the latter is the primary function of the customarily used small-diameter pipe roofs. Hence, the excavation or the construction of structures can be easily accomplished over all the span at a time by using machine. For these reasons, the cost and the period for construction are fairly reduced as compared with the customarily used method. In addition, the new method has the less bad effects on the moving train, since the rigidity of the pipe beam roof is improved by connecting the pipes over the full length by joint.

The purpose of this paper is to summarize the main results obtained in the development of the present new method. Firstly, the outline of this method is given, and the procedures, the applications, the types of interlocking joint and the comparison with the customarily used methods are described. Then a method of structural analysis is presented, especially considering the load distribution by joint in the pipe beam roof. The accuracy of this analysis are examined by model tests and field observations. Finally, the design method for the pipe beam roof is proposed, which takes into considerations all the results obtained from the numerical analysis, model tests and field observations.

* Assistant Staff Manager, Steel Structure Engineering and Consturction Department, Sumitomo Metal Industries, Ltd.

** Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Nagoya Institute of Technology

*** Vice-supervisor, Tokyo 3rd Construction Division, Japan National Railways

**** Research Engineer, Central Research Labolatories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.