

# 論文 外殻鋼材で拘束された鉄筋コンクリート部材の力学的性状に関する実験的研究

山口 泰男\*1・笹谷 輝勝\*2・和気 輝幸\*3・芳川 宗義\*4

**要旨:** 本報は、アンダーパス構築時の円形鋼管を加工した鋼製エレメントをせん断補強鋼材およびコンクリート拘束材とし、鉄筋を軸方向鋼材とした鉄筋コンクリートはり部材の力学的性状を実験的に検討した結果である。実大の 1/3 模型のはり試験体 2 体に正負交番载荷を実施し、初期剛性、ひび割れ発生状況、曲げ耐力を同耐力の鉄筋コンクリートはりと比較検討した。その結果、初期剛性、曲げ耐力が従来の鉄筋コンクリートはりと同等であり、耐震性能に優れていることがわかった。

**キーワード:** 外殻鋼材, 円形鋼管, 複合構造, 力学的性状

## 1. はじめに

現在、人口増加と都市部の過密化による用地不足や施工中の既存交通機能保持、周辺環境への配慮などから非開削工法による新設施設の地下化の必要性が増してきている。

現状では、道路下、鉄道軌道下に地下構造物を構築する場合の非開削工法として、シールド工法以外にMMST工法、URT工法、HEP&JES工法などが採用されている。これら外殻先行型の工法は、地下水がある場合、補助工法が必要となる。

著者らは、地下水・礫対応型の非開削工法として、推進工法による掘削と圧入した鋼材を鉄筋コンクリートで連結し地下構造物を構築する工法の開発を進めている。本報は、本工法の連結部の初期剛性、曲げ耐力およびひび割れ性状を検討するために実施した実験結果である。

## 2. 工法概要

外殻鋼材を構造物構築時の山留め材、または型枠および構造物とする工法が数多く開発

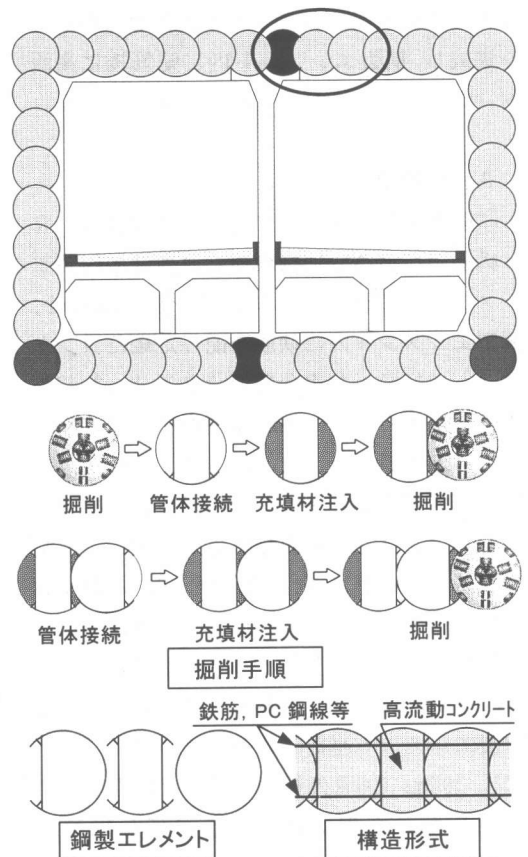


図-1 工法概要

- \*1 (株)フジタ土木本部営業部 工修 (正会員)
- \*2 (株)フジタ技術センター土木研究部 工修 (正会員)
- \*3 (株)フジタ土木本部生産技術部
- \*4 日本大学生産工学部 土木工学科

されている。多くの工法は、オーガーまたはシールド機を使用して掘削し、矩形外殻鋼材どうしを連結治具、PC鋼材またはPC鋼材を鉄筋代替としたRCで連結している。

本工法は、図-1に示すような構造物外殻部に沿って複数の鋼製エレメントを推進工法により施工し、鋼製エレメントをRCにより相互に連結して外殻部躯体を構築した後、内部土砂を掘削する工法である。本工法は、玉石混じり礫層対応の推進機を使用することにより、数mから数十mの土被りの高透水、崩壊性地盤での施工が可能という特徴を有する。また、構造躯体は、同外径の円形エレメント、片側・両側欠円エレメントの組合せで外殻部を構成し、鋼製エレメント内に配筋後に高流動コンクリートを打設する複合構造である。

### 3. 試験体

試験体形状を図-2に示す。試験体は、RC構造であるNo.1試験体と同外径の円形エレメントと片側欠円形エレメントを組合せ、鋼製エレメント内に鉄筋を配した後にコンクリートを打設した複合構造であるNo.2試験体の各1体である。試験体規模は、想定実構造物の1/3縮尺とした。エレメント形状は、掘削時の鋼製エレメントの座屈防止、主筋のかぶりコンクリート剥離防止を考慮し、鋼製エレメントの厚さ(t)と外径(D)との比およびライズースパン(ライズf/外径D)比を既往の知見<sup>1)・2)</sup>から $t/D \geq 1/100$ 、 $f/D \geq 1/10$ となるよう鋼製エレメントを選定し、鋼製エレメント連結部の部材せいがNo.1と同じ400mm(鋼管外径の2/3)となるように計画した。主筋は省力化を目指し鋼種をSD390とした。No.1はRC理論により曲げ降伏先行型となるようせん断補強筋を配置したが、No.2は片側欠円鋼管の隔壁がせん断補強筋の機能を負担するものとし、支点部以外はせん断補強筋を配置していない。試験体に使用した材料の素材試験結果を表-1に示す。

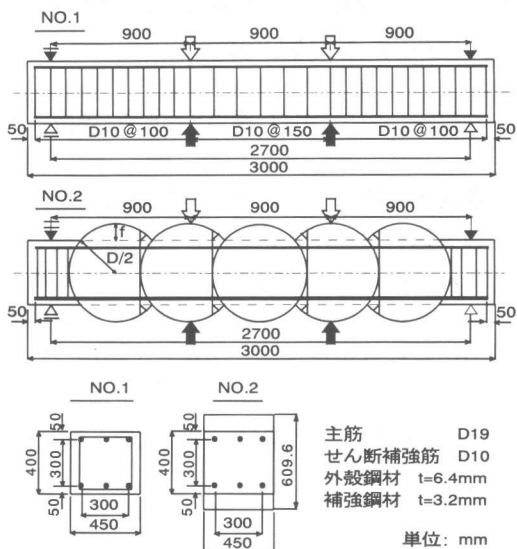


図-2 試験体

表-1 素材試験結果

#### a)鉄筋

鉄筋径	種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 ( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
D10	SD295	395	562	1.86	14.7
D19	SD390	441	638	1.90	14.5

#### b)鋼材

種類	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 ( $\times 10^5$ N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
補強材	3.2	344	472	2.00	33.0
外殻材	6.4	326	472	2.00	40.0

#### c)コンクリート

試験体	養生	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
No.1	封かん	43.5	3.35	3.08	0.20
No.2	封かん	44.3	3.44	3.12	0.20

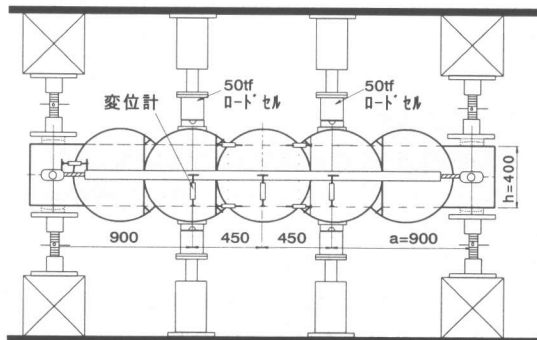


図-3 加力方法

#### 4. 実験方法

加力方法および加力サイクルを図-3, 4に示す。加力はいずれも  $a/h = 2.25$  とした2点荷重による正負交番の曲げ実験であり, 鋼製エレメント連結部の性状および隔壁の性状を確認できるよう荷重位置を設定した。

加力は, 荷重制御でひび割れ発生, 弾性域(主筋降伏の80%ひずみ)を正負1回, 主筋降伏ひずみを正負3回載荷した後, 変位制御で主筋降伏時の部材角の倍数で正負交番載荷を行い, 破壊が確認されるまで載荷を行った。なお, 変位制御は載荷点の変位で行った。

#### 5. 実験結果および考察

##### 5.1 実験結果

曲げモーメントと部材角の関係を図-5, 加力終了時のひび割れ発生状況を図-6, 実験結果一覧を表-2に示す。計算値は, 材料の非線形性を考慮したファイバーモデルによるNo.1試験体(RC部材)の解析値である。

また, No.2試験体のひび割れ発生耐力は, 鋼製エレメントとコンクリートとの付着ひび割れが発生した荷重を曲げモーメントとして表示したものである。

No.1試験体は,  $31.8\text{kN}\cdot\text{m}$  で中央に曲げひび割れが発生し, その後は曲げ区間, せん断区間ともに広い範囲でひび割れが発生した。最大耐力は  $153.5\text{kN}\cdot\text{m}$  (正加力時)であった。

これに対し, No.2試験体では, 最初に  $30.0\text{kN}\cdot\text{m}$  でせん断区間の鋼製エレメント隔壁部にコンクリートとの付着ひび割れが発生した。以降, 全区間にわたり鋼製エレメントとコンクリートとの境界に沿ってひび割れが進展した。これは, 鋼材とコンクリート間の付着強度がコンクリートのせん断強度に比して小さいことによるものと考えられる。

曲げ区間のひび割れについては, その殆どが加力点内側の欠円部に発生し, 中央のエレメント部に発生したのはわずかであった。中央のエレメントは,  $116\text{kN}\cdot\text{m}$  付近で鋼管両サ

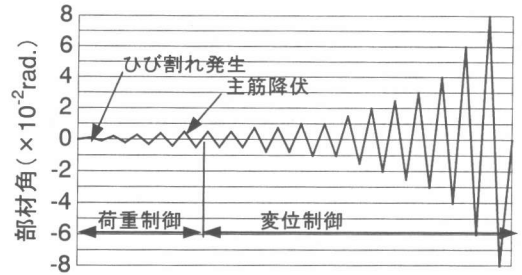


図-4 加力サイクル

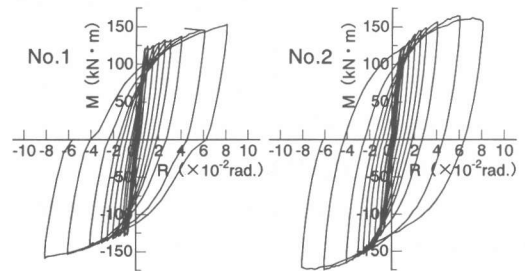


図-5 曲げモーメントと部材角の関係

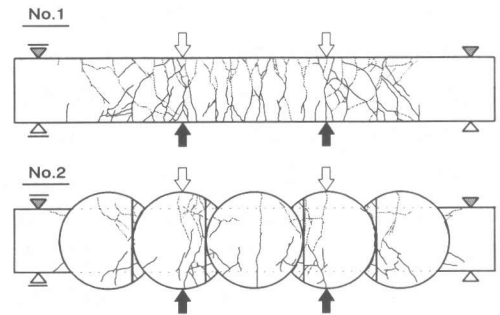


図-6 ひび割れ発生状況(加力終了時)

表-2 実験結果一覧

試験体	加力	ひび割れ耐力			
		Mcr (kN·m)	Msy (kN·m)	Mmax (kN·m)	
No.1 (RC)	正	実験値	31.8	121.8	153.5
		計算値	35.9	123.9	133.6
		実/計	0.88	0.98	1.15
	負	実験値	35.3	126.2	158.1
		計算値	35.9	123.9	133.6
		実/計	0.98	1.02	1.18
No.2 (複合)	正	実験値	30.0	121.8	162.5
		計算値	-----	123.9	133.6
		実/計	-----	0.98	1.22
	負	実験値	26.5	119.2	173.8
		計算値	-----	123.9	133.6
		実/計	-----	0.96	1.30

注) No.2のひび割れ耐力は, 鋼材とコンクリートとの付着ひび割れ発生荷重

イドに曲げひび割れが発生し、145kN・m 時に鋼管中央部にひび割れが発生した。よって、変形量は鋼管内部のひび割れ幅より連結部の目開きが卓越し、エレメント連結部に集中した。最大耐力は 162.5kN・m (正加力時) と No.1 試験体を上回る耐力を有し、変形性能にも優れていることが確認できた。

### 5.2 初期曲げ剛性

曲げモーメントと加力点の部材角の包絡線を図-7に示す。No.2 試験体の初期曲げ剛性は、エレメント連結部の部材せいおよび鉄筋量を同じとすれば鉄筋降伏まで RC 部材と同等であることが確認された。

### 5.3 耐力と変形性能

降伏耐力は、両試験体ともに部材角 0.5/100rad. 時に発生しており、No.1 が 121.8 ~ 126.2kN・m, No.2 が 119.2 ~ 121.8kN・m であり、計算値とよく一致している。

最大耐力は、No.1 ではひび割れが分散し、曲げ降伏後せん断ひび割れが加力点に向かって進展したため、降伏耐力以降耐力が漸増した。そのため、表-2には部材角 8/100rad. 時の耐力を表示した。これに対して、No.2 試験体は、正負とも部材角 6/100rad. 時に連結部の隔壁鋼板と鋼管エレメントとの間に充填されたコンクリートが正負交替変荷によってブロック状に破壊し最大耐力となった。実験値は計算値の 1.22 ~ 1.30 倍であった。

No.2 試験体はエレメントを連結している部材せいを No.1 試験体と同一にしているため連結部以外のかぶりが大きく、また、エレメントのはり上下部が円形となっているためコンクリートの剥離および圧壊を防ぐ拘束効果が No.1 試験体に比べて大きい。図-5に示すエネルギー吸収能の大きい紡錘形の変形曲線となっている。図-8は加力点位置の部材角と外殻鋼材連結部の開き角の比率である。部材角に占める開き角の比率は主筋降伏時で約 50%, 最大耐力時で約 90% であり、連結部に変形が集中していることがわかる。

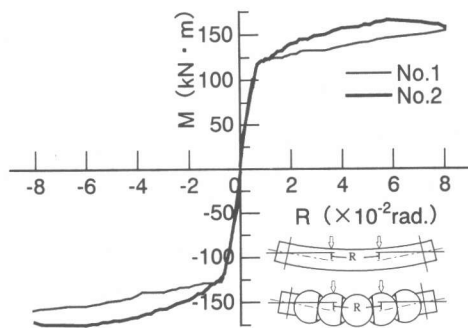


図-7 曲げモーメントと部材角の包絡線

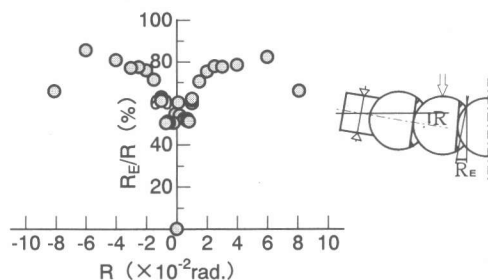


図-8 全体部材角と外殻鋼材開き角の比率

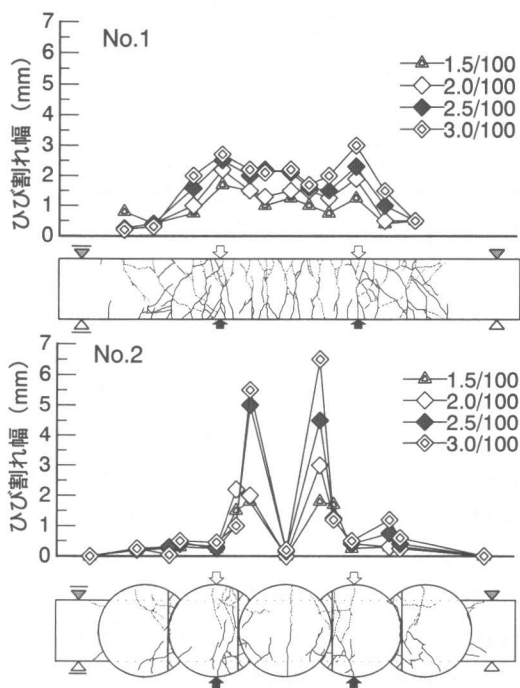


図-9 ひび割れ幅分布

### 5.4 ひび割れ幅の検討

図-9は正加力時の部材角 $3/100\text{rad.}$ までのひび割れ幅の分布である。No.1試験体は、曲げ区間のひび割れ幅が部材角の増加に伴い増加し、部材角 $3/100\text{rad.}$ での加力点のひび割れ幅は約 $3\text{mm}$ である。これに対し、No.2試験体は曲げ区間の連結部のひび割れ幅のみが増加し、同部材角でのひび割れ幅は左右の連結部で各々 $5.5\text{mm}$ 、 $6.5\text{mm}$ であり、No.1試験体の約3倍のひび割れ幅となっている。

図-10は負加力時のNo.1試験体の加力位置、No.2試験体の曲げ区間のエレメント連結部のひび割れ幅と部材角の関係である。主筋降伏( $0.5/100\text{rad.}$ )まではほぼ同じであるが、それ以降は図-9と同様にNo.2試験体の方がNo.1試験体の約3倍程度のひび割れ幅となっている。

図-11は、負加力時の試験体の全区間および曲げ区間のひび割れ幅の累計と加力点位置の部材角との関係である。丸印は曲げ区間、三角印は試験体全区間であり、塗りつぶしがNo.2試験体を表す。曲げ区間のひび割れ幅累計は主筋降伏( $0.5/100\text{rad.}$ )までは同じであるが、それ以降はNo.2試験体の方が大きい。しかし、試験体全区間では同じである。

### 5.5 主筋のひずみ分布の検討

図-12に正加力時の部材角 $1.5/100\text{rad.}$ までの下側主筋のひずみ分布を示す。No.1試験体は曲げ区間中央部の主筋が最初に降伏している。その後ひび割れの分散に伴い、加力点の主筋が降伏し、ひび割れ幅が増大していくに従い加力点位置の主筋のひずみが増大している。これに対し、No.2試験体は曲げ区間の鋼製エレメント連結部の主筋が最初に降伏し、その後加力点位置の主筋が降伏している。円形エレメント中央部にある主筋は図-6および図-9からもわかるように、ひび割れ発生とともに降伏のひずみに達するもののひび割れ幅が増大しないため最終加力時においても $0.3\%$ 程度のひずみ発生であった。

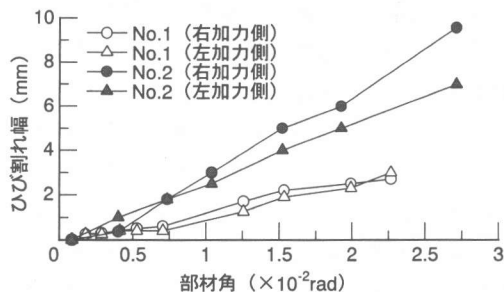


図-10 ひび割れ幅と部材角の関係

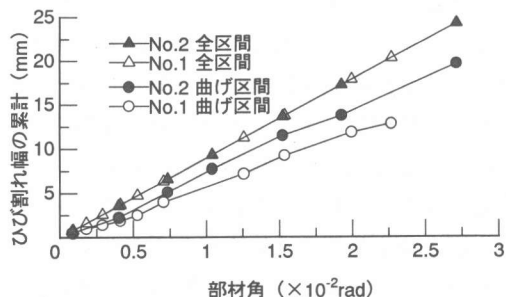


図-11 累計ひび割れ幅の比較

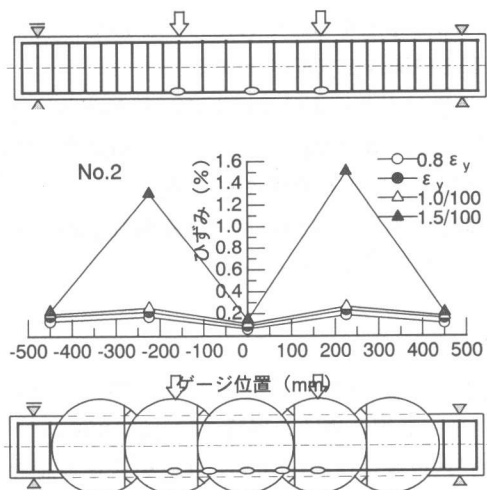
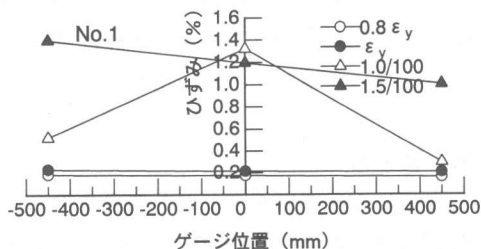


図-12 主筋のひずみ分布

### 5.6 鋼製エレメント隔壁の検討

図-13にせん断補強筋およびエレメント隔壁のひずみと部材角の関係を示す。隔壁に発生するひずみは同位置のせん断補強筋の約1/2であった。図-14に図-13のひずみをせん断力にして示す。実線は各々の作用せん断力である。せん断補強筋のせん断力負担は作用せん断力の約1/6であるのに対し、隔壁は連結部のコンクリートの破壊が進むに従って負担割合が増加し、コンクリートがブロック状に破壊した部材角6/100rad.では隔壁に大きなせん断力が作用している。

### 5.7 鋼製エレメントのひずみの検討

図-15に正加力時の鋼製エレメント各部のひずみと部材角の関係を示す。エレメント上面の測定位置全てに圧縮ひずみが発生している。エレメント下面の隔壁とエレメントと隔壁補強材が成す三角形部のL4とL7に引張ひずみが発生するが加力終了時においても降伏ひずみには至っていない。L3には降伏ひずみに近い圧縮ひずみが作用している。

## 6. まとめ

本実験によって以下のような知見を得た。

- ・初期に全ての隔壁鋼界面にひび割れが発生し、ひび割れはその殆どが加力点内側の欠円部に発生する。そのため、変形量は連結部の目開きが支配的となる。
- ・鋼管による拘束効果により、かぶりコンクリートの剥離が防止され、RC構造を上回る耐力と、変形性能を有する。
- ・鋼製エレメント隔壁は、せん断補強鋼材としての効果がある。

### 参考文献

- 1) 土木学会, 構造工学シリーズ 鋼・コンクリート複合構造の理論と設計, 1999.4
- 2) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼とコンクリートの複合構造物, 1998.7

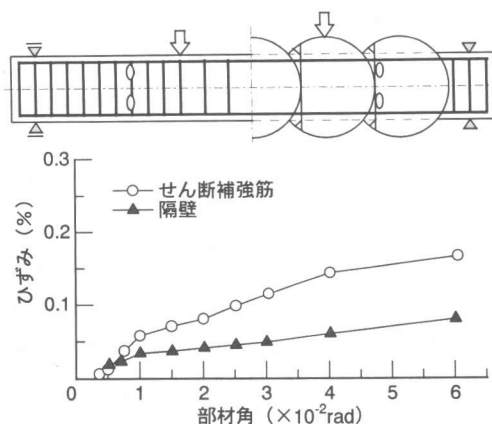


図-13 せん断補強筋および隔壁のひずみ

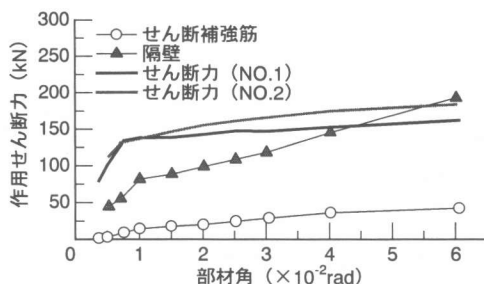


図-14 せん断補強筋および隔壁の作用力

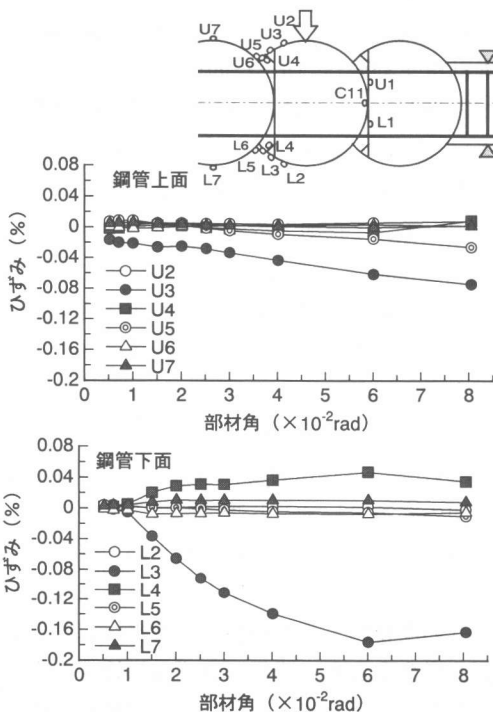


図-15 鋼製エレメントのひずみ