

# 論文 プレキャスト部材の突合せ接合についての力学挙動に関する検討

本田 智昭\*1・古市 耕輔\*2・吉田 健太郎\*3・中川 雅由\*4

**要旨:** シールドセグメントの継手に用いられる突合せ構造で、設計用値である回転ばね定数に対して、betongelenkeの理論値の妥当性を検討するため、軸力とスパンをパラメータとした軸力導入曲げ試験を実施した。その結果、継手面の接触面積やスパンが回転ばね定数に及ぼす影響、また理論式において仮定している圧縮応力の影響範囲について確認した。

**キーワード:** シールドトンネル, 突合せ構造, 回転ばね定数, セグメント, 継手構造

## 1. はじめに

プレキャスト部材の接合構造は、大きく分けると、モルタルやエポキシ樹脂などを継手部に充填(または塗布)するウェットジョイントと、乾いたコンクリート面同士を突合せて、ボルトや締結金具を用いて接合するドライジョイントの2つに分けることができる。現在、橋梁などでは前者が、シールドトンネルでは後者が、一般的に用いられている。ウェットジョイントは、応力伝達時の均一性の高さが長所であるが、ドライジョイントに比べ、接合作業が煩雑であることが短所となっている。そこで、筆者らはシールドトンネル工法で継手構造として用いられているドライジョイントのひとつ「突合せ構造」に着目した。

突合せ構造は、シールドトンネル工法では通常セグメント本体を梁、継手部を回転ばねとした「梁-ばねモデル」として設計を行う。その際、回転ばね定数は、一般的にLeonhardt(レオンハルト)のbetongelenkeの理論<sup>1)</sup>を基に、桁高や桁幅などの継手部の寸法と作用軸力によって決まると考えられている。

筆者らは過去に、回転ばね定数について軸力をパラメータとした実験を行い、理論値に比べ実験値が低くなることを確認している。<sup>2)</sup> その原因については、突合せ面の接触状況が理想状態

とは異なるためであると推察したが、その理由の詳細は明らかになっていなかった。

そこで、今回、軸力導入曲げ試験を実施し、作用軸力や継手面の精度の影響、また圧縮応力の影響範囲について検討を行ったので報告する。

## 2. 目的

betongelenkeによると図-1の幾何学的関係から、継手部の回転角 $\theta$ は次式で与えられる。

$$\theta = \frac{\Delta S}{r} = \frac{1}{r} \cdot S \cdot \frac{\sigma_R}{E_0} \quad (1)$$

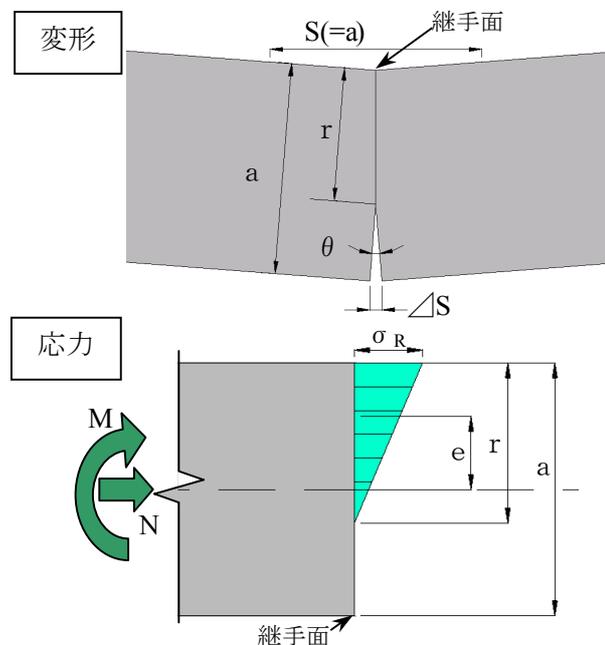


図-1 継手の変形と応力分布

\*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造・材料グループ研究員 工修(正会員)

\*2 鹿島建設(株) 技術研究所技術戦略室上席研究員 工修(正会員)

\*3 鹿島建設(株) 東京支店(正会員)

\*4 鹿島建設(株) 土木設計本部プロジェクト設計部シールドグループ長 工修(正会員)

また (1) 式で示される圧縮応力の影響範囲  $S$  は、セグメントの桁高（シールドセグメントの場合、ほぞ幅） $a$  と同等であると仮定した上で、力の釣合条件から継手の回転ばね定数  $K_\theta$  として (2) 式を導いている。

$$K_\theta = \frac{M}{\theta} = \frac{Ne}{\theta} = \frac{9a^2bE_0}{8} m(1-2m)^2 \quad (2)$$

ここで

- $K_\theta$ : 回転ばね定数
- $M$ : 曲げモーメント
- $N$ : 軸力 ( $= \frac{\sigma_R r b}{2}$ )
- $\Delta S$ : 圧縮縁変形量
- $\sigma_R$ : 圧縮縁応力度
- $r$ : 圧縮力の作用範囲
- $a$ : セグメント桁高 (ほぞ幅)
- $b$ : セグメント桁幅 (ほぞ長さ)
- $E_0$ : コンクリートの弾性係数
- $S$ : 圧縮応力の影響範囲
- $e$ : 荷重偏心量 ( $= \frac{M}{N} = \frac{a}{2} - \frac{r}{3}$ )
- $m$ : 荷重偏心率 ( $= \frac{e}{a}$ )

この理論式において、実験時の影響や仮定が含まれるのは以下の3点である。

- ・セグメント桁高 (ほぞ幅) :  $a$
- ・セグメント桁幅 (ほぞ長さ) :  $b$
- ・圧縮応力の影響範囲 :  $S$

セグメント桁高およびセグメント桁幅は、継手面の接触面積を指しており、全面で接触しない場合には実際の桁高および桁幅よりも小さくなるのが考えられる。また圧縮応力の影響範囲は、桁高と同等 ( $S=a$ ) とする根拠が不明確である。

本検討ではこれらの実験時の影響および仮定の妥当性について、実験値と理論値を比較することにより検討することとした。

### 3. 試験条件

#### 3.1 試験パラメータ

表-1 に試験パラメータを示す。導入軸力2水準は、導入軸力の違いによる継手面の接触状態への影響を確認するため設定した。またスパン

3水準は、等曲げ区間を600mmで一定とし、せん断スパンの違いによる回転ばね定数への影響を確認するため設定した。

#### 3.2 試験体形状

図-2 に試験体形状を示す。試験体は、桁幅400×桁高200mmのRC構造のピース2体を突合せた形状とした。主筋にはD16-SD295を3本配置し、また終局時にせん断破壊が先行しないよう、せん断補強筋としてD13-SD295を100mm間隔で配置した。

2体の接合面は、突合せ継手の理論上の状態に近づけるため、先に製作したピースの継手面を型枠代わりとするマッチキャスト方式によって製作し、面同士の不陸を可能な限り少なくした。また接合面にせん断キーや付着突起などは設けていない。表-2 に荷重材齢におけるコンクリートの材料物性、表-3 に鉄筋の材料物性を示す。

#### 3.3 荷重方法

本試験は、試験体に軸力を導入した状態で

表-1 試験パラメータ

試験ケース名	軸力 (kN)	幅 (mm)	厚さ (mm)	スパン (mm)	等曲げ区間 (mm)
A1	600	400	200	1600	600
A2				2000	
A3				2400	
B1	1600				
B2	2000				
B3	2400				

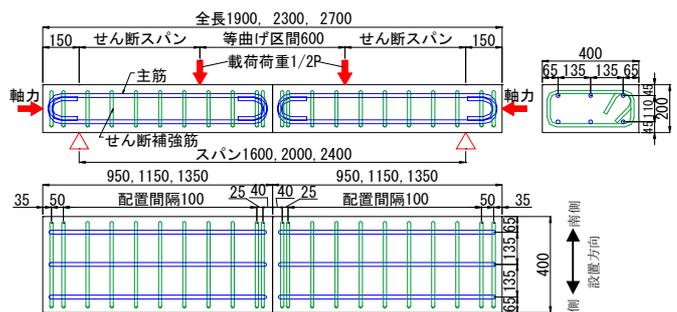


図-2 試験体形状

表-2 コンクリートの材料物性

	A1	A2	A3	B1	B2	B3
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	34.3	39.8	43.4	37.8	41.4	43.9
ヤング係数(kN/mm <sup>2</sup> )	29.7	31.3	32.3	30.2	31.4	31.6

表-3 鉄筋の材料物性

	弾性係数 kN/mm <sup>2</sup>	降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	降伏ひずみ × 10 <sup>-6</sup>
主筋 D16-SD295	183	344	496	1880
せん断補強筋 D13-SD295	181	344	491	1900



としてケース A1 の曲げモーメントと試験体中央の鉛直変位の関係を示す。なお、これ以降曲げモーメントは、継手面に作用する曲げモーメントとして、鉛直载荷による曲げと試験体の変形に伴う P- $\delta$  効果による曲げを加えた、補正曲げモーメントを用いることとする。

力学的には、スパンが異なっても作用曲げモーメントが変わらないため、A・B 各シリーズ内では、耐力は同等であると考えられるが、試験結果では、A・B シリーズともにスパンが大きくなる程、最大曲げモーメントが小さくなる傾向となった。

図-6 に各ケースのひび割れ図を示す。スパンが大きくなる程、試験体下面のひび割れが少なくなる傾向が見られた。ただし、終局状態は全て継手面の圧縮縁コンクリートの圧壊であった。

## 4.2 コンクリートひずみ

### (1) ひずみ分布

図-7 に例としてケース A1 および A3 の上面コンクリートひずみの幅方向の分布図を示す。なお曲げによる影響のみを確認するため、軸力導入によるひずみは除外した。

上面のコンクリートひずみは、目離れ発生前においては、継手面からの距離の違いによるひずみの差がほとんど無く、目離れ発生後または一般部ひび割れ発生曲げモーメント付近から、徐々にひずみに差が表れる傾向を示した。

継手面から同距離のひずみを比較すると、試験体中央部に比べ、試験体端部ではひずみが小さくなっている。これは、継手面が均一に接触していないためと考えられる。この傾向は、図-7 に示した A1, A3 以外のケースでもほぼ同様に見られており、マッチキャストで製作した場合でも、収縮などにより面の不陸が生じていると考えられる。

スパンの違いによる影響は、A1 と A3 のひずみ分布からも示されるように、スパンに比例して目離れ発生後におけるひずみが大きくなる傾向が確認された。

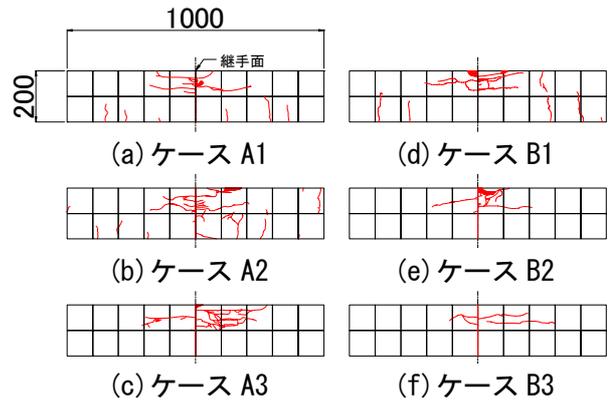
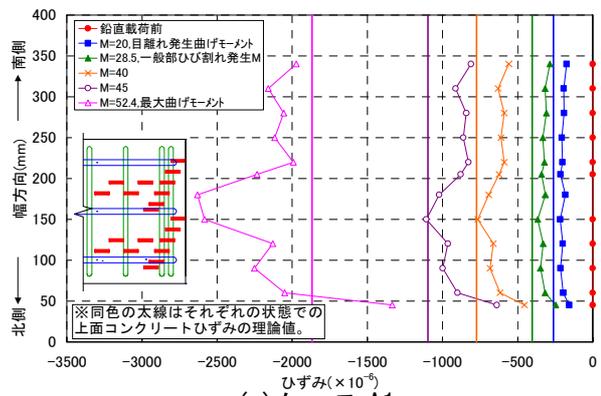
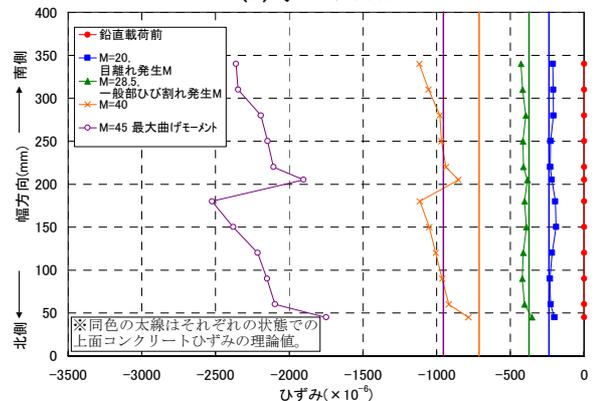


図-6 試験終了時の試験体側面ひび割れ図  
(各試験体の中央 1000mm の区間)



(a) ケース A1



(b) ケース A3

図-7 上面コンクリートひずみ分布

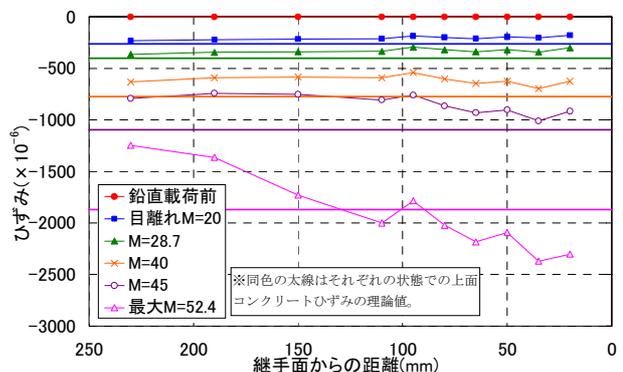


図-8 継手面からの距離とコンクリート  
上面ひずみの関係 (ケース A1)

## (2) 継手面からの距離とひずみの関係

図-8 に例としてケース A1 での継手面からの距離とコンクリート上面ひずみの関係を示す。なお曲げによる影響のみを確認するため、図-7 と同様、軸力導入によるひずみは除外した。またコンクリートひずみは、継手面から同距離ごとの平均値を用いた。

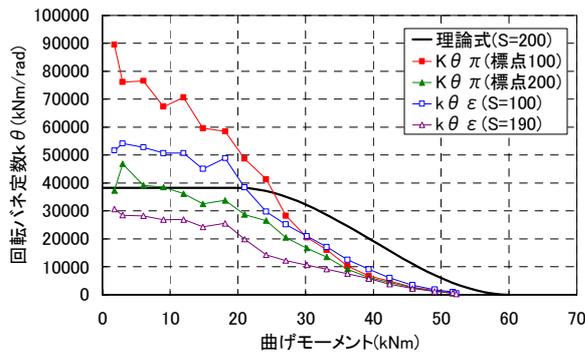
ケースごとに若干ばらつきの影響はあるが、継手面からの距離に対し、ほぼ線形にひずみが減少する傾向となった。また理論値と比較すると、一般部ひび割れ発生曲げモーメント付近まではおおそ近い値となったが、曲げモーメントの増加に伴い一致しなくなっている。

これは *betongelenke* の理論では、作用曲げモー

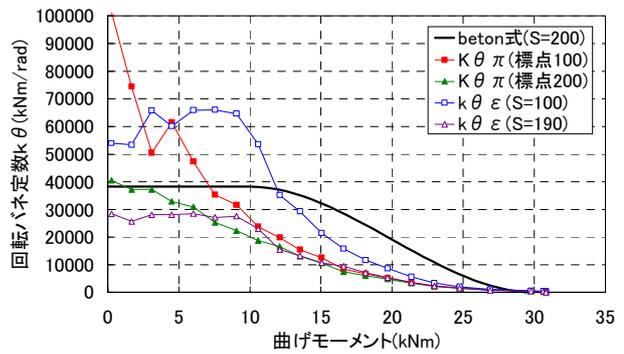
メントに関わらず圧縮応力の影響範囲  $S$  は、桁高と同一と仮定しているが、実現象では図-8 の傾向から見られるように作用曲げモーメントのレベルによって変化しているためと考えられる。

## 4.3 回転ばね定数

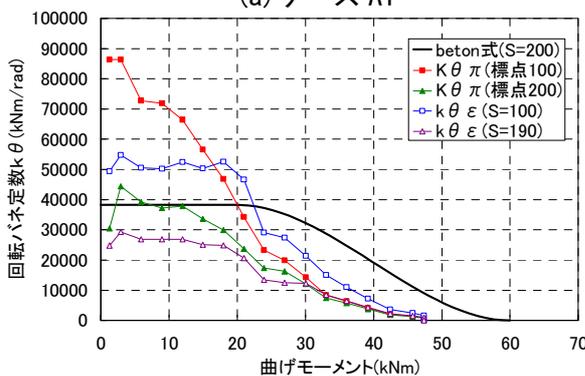
図-9 に各ケースの回転ばね定数と曲げモーメントの関係を示す。図-9 には *betongelenke* の理論式と、標点距離 100, 200mm のパイ型変位計の計測値（継手部目開き）から算出した回転ばね定数(以後  $k_{\theta\pi}$ ), およびコンクリートひずみから算出した回転ばね定数(以後  $k_{\theta\varepsilon}$ )を示した。なお、 $k_{\theta\varepsilon}$  を算出する際に、圧縮応力の影響範囲  $S$  は、継手面からひずみゲージまでの距離の 2 倍とした。これは前述のとおり、コンクリー



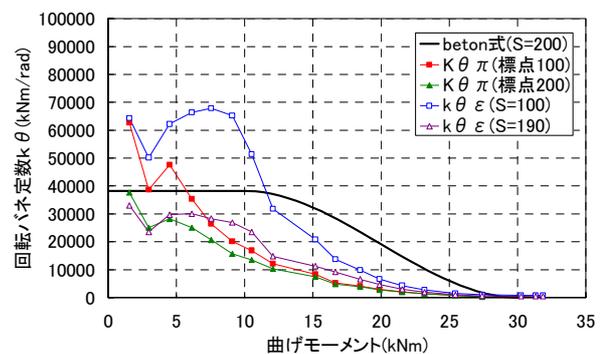
(a) ケース A1



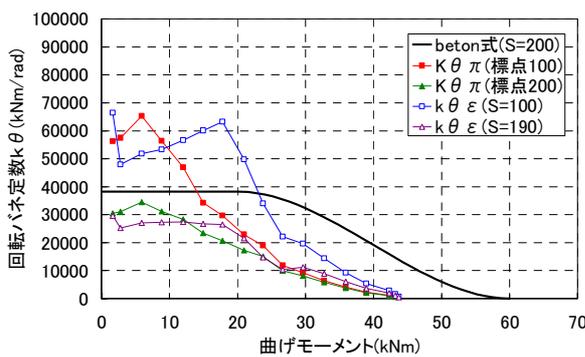
(d) ケース B1



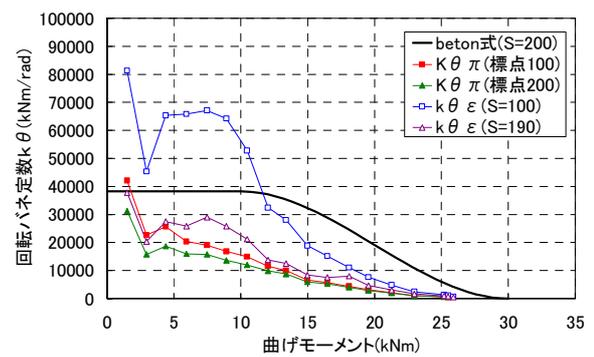
(b) ケース A2



(e) ケース B2



(c) ケース A3



(f) ケース B3

図-9 回転ばね定数と曲げモーメントの関係

トの上面ひずみが、継手面からの距離にほぼ線形に減少していることから、計測したひずみが、その計測位置の距離の2倍の範囲での平均値と見なすと考えたことによるものである。

#### (1) $k_{\theta\pi}$ および $k_{\theta\epsilon}$ の傾向

$k_{\theta\pi}$  は、作用曲げモーメントの増加とともに減少しているのに対し、 $k_{\theta\epsilon}$  は継手面の目離れ発生までほぼ横ばいで、目離れ発生後から減少する傾向となった。この  $k_{\theta\epsilon}$  の傾向は、理論式の傾向とほぼ一致している。

#### (2) パイ型変位計の標点距離の影響

使用したパイ型変位計の標点距離の違いによって、 $k_{\theta\pi}$  は目離れ発生前までで2倍程度の差が表れており、その後作用曲げモーメントが増加するとともにその差は減少する傾向となった。これは、目離れ発生までは、曲げモーメントの増加に伴い下面のコンクリートひずみが減少するため、パイ型変位計の標点距離の差が算出値に影響するが、目離れ発生後は下面のコンクリートひずみは解放され、コンクリートひずみの影響が少なくなり目開きの影響が大きくなるため、標点距離の差による影響が少なくなるためと考えられる。

#### (3) スパンによる影響

A, B 各シリーズともに、スパンの増大に伴い、回転ばね乗数は  $k_{\theta\pi}$ 、 $k_{\theta\epsilon}$  ともに減少する傾向となった。これは前述のとおりスパンの増大に伴い、終局曲げモーメントが低下しているため、作用曲げモーメントに対して、回転ばね定数の値がシフトして低下している傾向と考えられる。

#### (4) 軸力による影響

A, B シリーズを理論式と比較すると、軸力の大きい A シリーズの方が回転ばね定数が大きくなる傾向を示した。これは軸力が高い程、継手面の接触状況が良くなるためと考えられる。<sup>3)</sup>

### 5. まとめ

本研究では、セグメントの「突合せ接合」を対象に、その設計用値である回転ばね定数について検討を行った。その結果を以下にまとめる。

(1) **betongelenke** の理論では、継手部の圧縮応力の影響範囲を桁高と同等であると仮定しているが、実際にはスパンや軸力、作用曲げモーメントによって、圧縮応力の影響範囲は変化しており、その仮定は実現象と一致しないことが認められた。

(2) 回転ばね定数は、目開き発生以後理論値に比べ実験値が小さくなる傾向が認められた。

(3) 回転ばね定数を実験により設定する場合、目開きの測定間隔や測定方法が影響することが確認された。

(4) 継手面の接触状況は、試験体レベルでマッチキャストによる製作を行っても、収縮などにより不陸が避けられないことが確認された。

### 6. 今後の予定

今回は、実験結果のみにより評価を行ったが、これだけで接合部の剛性評価手法を提案するには十分とは言えないため、今後は非線形 FEM 解析、および桁高をパラメータとした追加試験を実施する予定である。それにより、継手部の力学的特性を把握し、**betongelenke** の理論の適用性をより詳細に検討できるものと考えている。また、今回確認されたスパンの影響についても、解析との比較によりそのメカニズムを検討する予定である。

### 参考文献

- 1) Fritz Leonhardt, Horst Reimann : **Betongelenke, DER BAUINGENIEUR, VOL.41, pp49-56, 1966.2**
- 2) 松本清治郎, 古市耕輔, 桑原泰之, 藤野豊, 佐久間靖 : 突合せ構造をしたセグメントピース間継手の評価方法と設計手法に関する提案, トンネル工学研究論文報告集, Vol.10, pp.287-292, 2000.11
- 3) 藤沼聡, 尹度植, 小泉淳 : 軸力と曲げを受けるセグメント継手の回転ばねに関する実験的研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会, Vol.54, No.B, pp.200-201, 1999.08