

## 論文 自動溶接したボックスジベル合成桁の曲げ特性

久野 公德\*<sup>1</sup>・松下 博通\*<sup>2</sup>・佐川 康貴\*<sup>3</sup>

**要旨：**プレキャストコンクリート床版と鋼桁の結合には一般的にスタッドが用いられるが、鋼桁と床版とを結合する際、不陸調整に多くの労を費やしている。本研究ではネジ式により不陸調整が容易に行えるよう新たに開発したボックスジベルをずれ止めとして使用した合成桁供試体を作製し、曲げ載荷実験を行い、合成効果の検討を行った。その結果、スタッドを用いた場合に比べ、作用せん断力の増加に伴う合成効果の低下は大きい、適切な配置により、スタッドを用いた場合と同程度の合成効果が得られることが分かった。

**キーワード：**ずれ止め、ボックスジベル、スタッド、弾性合成

### 1. はじめに

鋼道路橋における鉄筋コンクリート床版は交通量の増加や車両の大型化に伴い、損傷事例が数多く報告されており、全面打ち換えを余儀なくされるものも多い。一方では省コスト化、施工の簡略化、構造物の高耐久化が求められており、新設の鋼道路橋床版の工事においてプレキャストコンクリート床版を採用する事例が増加している。

プレキャスト床版と鋼桁との結合には一般的にスタッドが用いられているが、プレキャスト床版を鋼桁上に据え付ける際、不陸調整に多くの労力を費やしているのが現状である。また、高い合成度を得るためにスタッドの本数を多くすると、プレキャスト床版の箱抜き孔の個数が増え、プレキャスト床版の断面剛性が低下し、輸送中に破損等のトラブルが発生する可能性がある。

これらの問題を解決するため、著者らはネジ式で不陸調整が容易に行え、群配置したスタッドの代替えが可能なボックスジベルを開発した。既に押抜きせん断型の供試体を用い、静的

および疲労載荷時におけるボックスジベルのせん断特性を実験的に確認している<sup>1)2)</sup>。本研究ではずれ止めとしてスタッドおよびボックスジベルを用いた合成桁モデル供試体を作製し、静的曲げ載荷試験を行い、合成効果に関する検討を行った。また、ボックスジベルの配置方法を変化させ、配置方法の違いによる合成効果の違いを比較した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 ボックスジベル

ボックスジベルは写真-1に示すように外筒部と内筒部から成る。外筒部と内筒部はネジ式に



写真-1 ボックスジベル (左:外筒部, 右:内筒部)

\*<sup>1</sup> (株)ピー・エス 九州支店 土木技術部長 工修 (正会員)

\*<sup>2</sup> 九州大学大学院教授 工学研究院 建設デザイン部門 工博 (正会員)

\*<sup>3</sup> 九州大学大学院助手 工学研究院 建設デザイン部門 修士 (工学) (正会員)

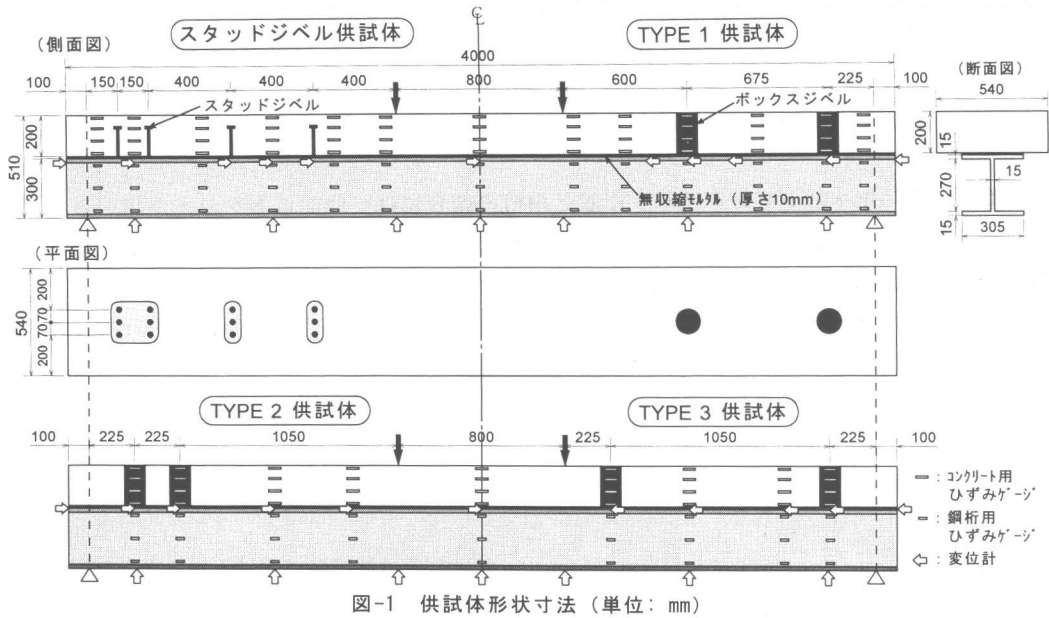


図-1 供試体形状寸法 (単位: mm)

より結合するため、ネジ山の重なり程度によって床版設置高さを任意に調節できる。外筒部の周囲に丸鋼を溶接しており、コンクリートとの付着の向上を図っている。また、内筒部にはコンクリート床版と鋼桁との一体化を図るために注入する無収縮モルタルの吐出孔を設けている。

ボックスジベルを用いた合成桁の作成の流れは以下の通りである。まず、型枠に外筒部を固定し、コンクリート床版の打設を行う。次に、鋼桁上に運搬し、内筒部をねじ込むことにより不陸調整を行った後、内筒部下端と鋼桁とを結合する。ボックスジベルと鋼桁とを結合する方法として溶接による方法やボルト締結による方法が考えられるが、本研究では押抜きせん断試験で良好な結果を得た MIG 自動溶接による方法<sup>3)</sup>とした。最後に、床版と鋼桁との隙間に無収縮モルタルを注入し、両者を一体化させる。

著者らの実験<sup>2)</sup>においてせん断力-ずれ量関係におけるずれ量の急激な増加が始まる(ずれ限界)荷重は 263kN であった。土木学会構造物設計指針 PART B (合成構造物)<sup>4)</sup>ではスタッドの水平せん断強度  $Q_u$  およびずれに対する

限界強度  $Q_c$  (kgf/本) を次式で与えている。

$$Q_u = 130 D_s^2 \sqrt{f'_{cd}} \quad (H/d \geq 5.5) \quad (1)$$

$$Q_c = 0.5 Q_u \quad (2)$$

$D_s$  はスタッドの直径 (cm)、 $H$  はスタッドの高さ (cm)、 $f'_{cd}$  はコンクリートの設計圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>) を示す。本実験で用いたスタッドは  $\phi 19\text{mm} \times 170\text{mm}$  の頭付きスタッドであり、 $f'_{cd}$  を 50N/mm<sup>2</sup> とすると式(1)、式(2)より  $Q_c$  は 5.25tf/本 (=51.4kN/本) となり、本研究ではボックスジベル 1 本はスタッド 6 本に相当するものとした。

## 2.2 供試体

各供試体の形状寸法およびジベルの配置位置を図-1に示す。供試体の断面はジベル溶接位置で水平せん断力が最大になるように、合成断面の図心位置がコンクリート床版と鋼桁の境界面に一致するように決定した。コンクリート床版には桁軸方向鉄筋として D13 をかぶり 50mm で 8 本を、帯鉄筋として 200mm 間隔で D10 を配置した。また、ボックスジベルの周囲を D13 のスパイラル鉄筋で補強した。コンクリートの設計基準強度は 50N/mm<sup>2</sup> とした。載荷

試験時における圧縮強度は  $62.1\text{N/mm}^2$ 、弾性係数は  $30.4\text{kN/mm}^2$  であった。

スタッドジベルは1列に3本ずつ配置し、水平せん断力が大きくなる桁端部に密に配置した。ボックスジベルは各供試体について4本ずつ配置した。TYPE 1はスタッドジベル供試体（以下、スタッド供試体）と同等のずれ止め作用が得られるようにジベルを配置した。TYPE 2はジベルを桁端部に2本ずつ配置したもの、TYPE 3はスパン内でほぼ等間隔となるようにジベルを配置したものである。

載荷は2点載荷とし、ジベル位置のずれ量が所定の値（0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0mm）に達すると除荷し、再び載荷するという静的繰返し載荷を行った。変位計は図-1に示す位置に配置し、たわみおよびコンクリート床版と鋼桁のずれ量を測定した。また、コンクリート床版側面および鋼桁ウェブにひずみゲージを貼付し、各荷重におけるひずみを測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 破壊荷重

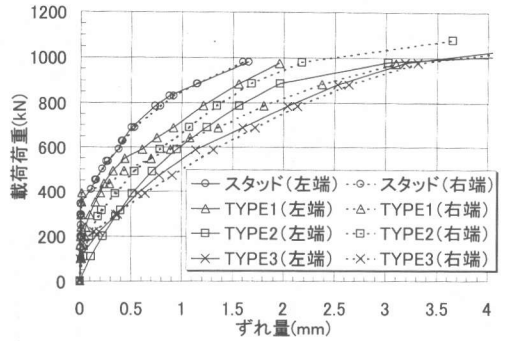
ボックスジベル、スタッドジベルいずれのジベルを用いた供試体も鋼桁降伏後、コンクリート床版が圧縮破壊を起こした。各供試体の破壊荷重を表-1に示す。表-1より、ボックスジベルを用いた桁はスタッドジベルを用いた桁と同等の耐力を有していると言える。また、ボックスジベルの配置方法の違いによる破壊荷重の差はほとんど無い。

#### 3.2 ずれ量

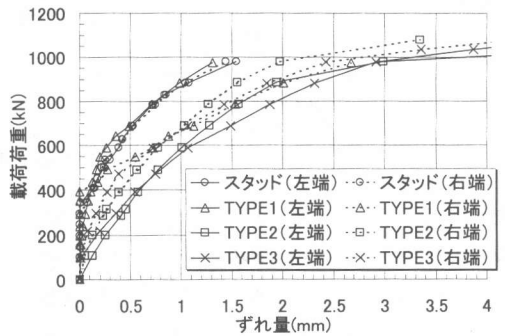
各供試体の桁端部およびスパン中央から1000mmの位置における荷重とずれ量との関係をそれぞれ図-2に示す。スパン中央から1000mmの位置はTYPE 1における内側のジベルの配置位置に相当する。同荷重におけるずれ量を比較すると、スタッド供試体が最も小さく、400kNまではほとんどずれが発生していない。ボックスジベルを配置した供試体では供

表-1 各供試体の破壊荷重 (kN)

スタッド供試体	ボックスジベル供試体		
	TYPE 1	TYPE 2	TYPE 3
1140	1140	1108	1130



(a) 桁端部



(b) スパン中央より1000mm

図-2 載荷荷重とずれ量の関係

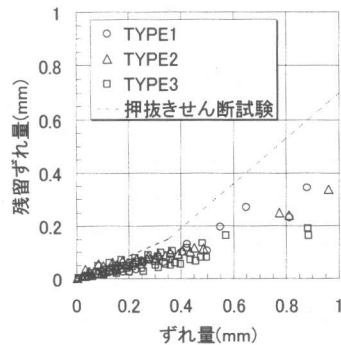
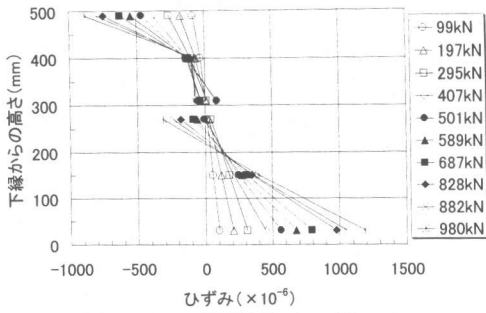


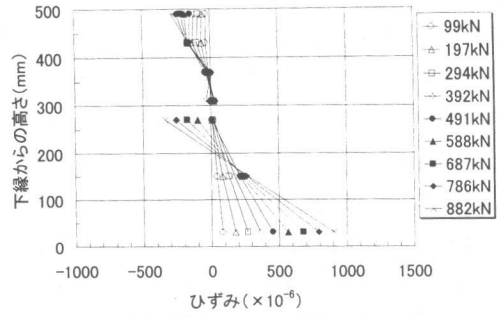
図-3 ずれ量と残留ずれ量の関係

試体の左右で挙動が異なっているものの、およそTYPE 1, TYPE 2, TYPE 3の順で同荷重時のずれ量が小さく、合成効果が高いことが分かる。

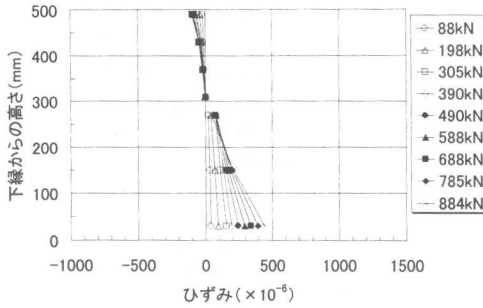
繰返し載荷における除荷直前のずれ量と除荷



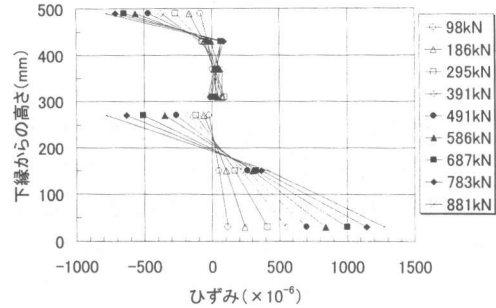
(a) スタッド供試体 ( $x=-700\text{mm}$ )



(b) TYPE 1 ( $x=-1000\text{mm}$ )



(c) TYPE 2 ( $x=-1450\text{mm}$ )



(d) TYPE 3 ( $x=-625\text{mm}$ )

図-4 ジベル配置断面のひずみ分布

後に残留したずれ量（残留ずれ量）との関係を図-3に示す。図中には押抜きせん断試験で得た関係を併せて示している。押抜きせん断試験<sup>2)</sup>では、ずれ量 0.3mm（ずれ限界）までは残留ずれ量がずれ量の約 30%であり、それ以降はずれ量と残留ずれ量との関係が 45 度の勾配を持つ直線で表され、新たなせん断力によって生じたずれが全て残留する結果であった。しかしながら本実験において桁供試体に適用した場合、ずれ量が 0.3mm を越えても残留ずれ量はずれ量の約 20%に留まっている。これは、鋼桁が弾性域内にあり、除荷時に復元力が働き、ジベルのずれを戻す作用が生じるためであると考えられる。

### 3.3 ひずみ分布

図-4に各供試体のジベル配置位置の断面におけるひずみ分布を示す。なお、各供試体ともスパン内側のジベル位置とした。スタッド供試体は 295kN までは鋼桁とコンクリートのひずみが直線分布であるが、それ以降はずれが生じている。TYPE 1 は 491kN 以降ずれが生じてい

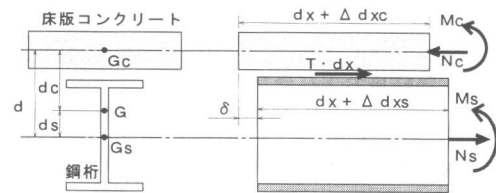


図-5 弾性合成の原理

る。TYPE 2 はひずみがほぼ直線分布であり、ボックスジベルより内側において鋼桁とコンクリート床版の境界に大きなずれが発生したものと考えられる。TYPE 3 は 98kN 時に既に鋼桁-コンクリート間にずれが生じており、結合度が小さいと言える。

## 4. 弾性合成理論による検討

### 4.1 基礎方程式

鋼桁とコンクリート床版は本来断続的に結合されているが、弾性合成桁の基礎方程式を導くにあたり、均等に連続して結合したものと仮定し、図-5に示す長さ  $dx$  の微小要素を考える。この弾性結合のパネ定数（以下、「せん断剛性」）

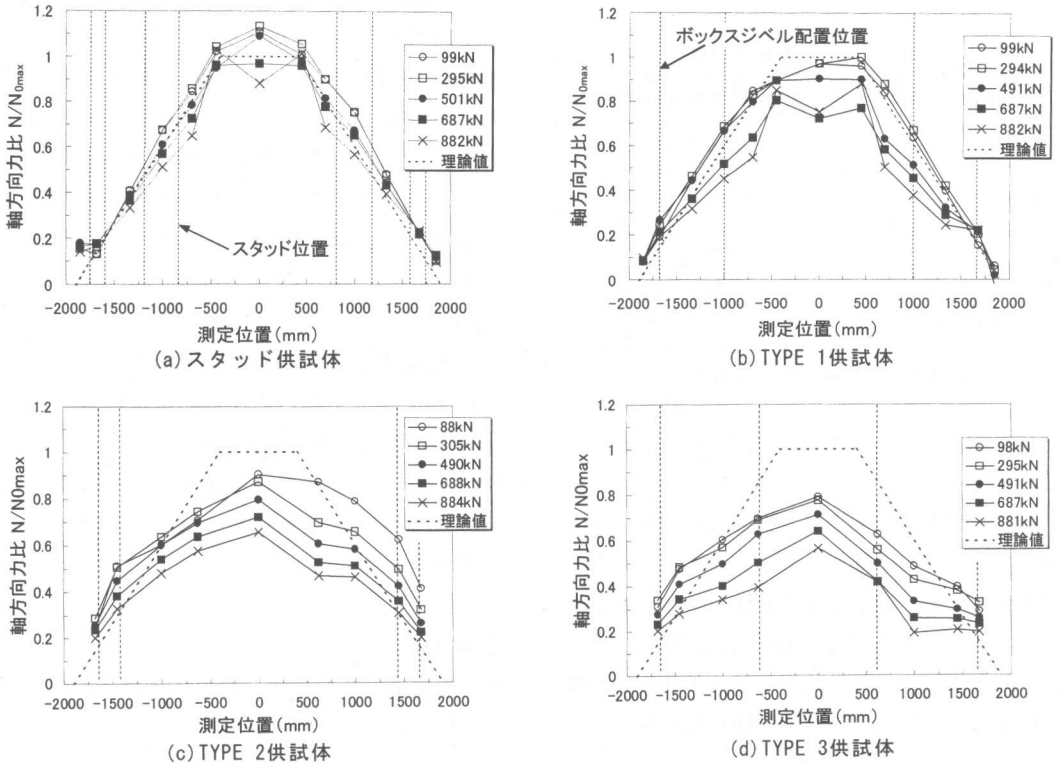


図-6 軸方向力比の分布

を  $C$ 、位置  $x$  における水平せん断力を  $T$ 、ずれを  $\delta$  とすると、式(3)が成り立つ。

$$\delta = T/C \quad (3)$$

また、変形の適合条件、水平方向の力の釣り合い、および鋼桁とコンクリートの曲率が等しいという条件を用いると軸方向力  $N$  に関する以下の微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \omega^2 N = -\mu M \quad (4)$$

ここで、

$$\omega^2 = \left( \frac{1}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} + \frac{d^2}{E_s I_s + E_c I_c} \right) C \quad (5)$$

$$\mu = \frac{d}{E_s I_s + E_c I_c} C \quad (6)$$

$E$ 、 $A$ 、 $I$  はそれぞれ弾性係数、断面積、断面二次モーメントを表し、添え字の  $s$ 、 $c$  はそれぞれ鋼桁、コンクリート床版に関する値であることを示す。また、 $d$  は鋼桁の図心とコンクリート図心との距離(図-5)である。式(4)を解く

ことにより軸方向力分布が得られる。

#### 4.2 軸方向力の算出

供試体に作用する軸方向力  $N$  を完全合成における軸方向力の最大値  $N_{0max}$  で除した値を軸方向力比 ( $N/N_{0max}$ ) とし、図-6に各供試体の軸方向力比の分布を示す。軸方向力の算出には鋼桁のウェブに貼付したひずみゲージの値を用い、断面内のひずみ分布が直線分布となるように近似直線を求めた上で算出した。

スタッド供試体は 501kN まで理論値にほぼ近い台形分布を示しており、それ以降軸力比の勾配が低下している。TYPE 1 は 491kN で供試体右側に軸方向力比の低下が見られ、687kN で供試体左側も軸方向力が低下している。スタッド供試体、TYPE 1 において、軸力比が低下してもスパン中央から 450mm の位置における軸方向力比はほとんど低下していないが、この位置は荷重点直下に近く、荷重荷重によるせん断面への支圧力が鋼桁とコンクリート床版との

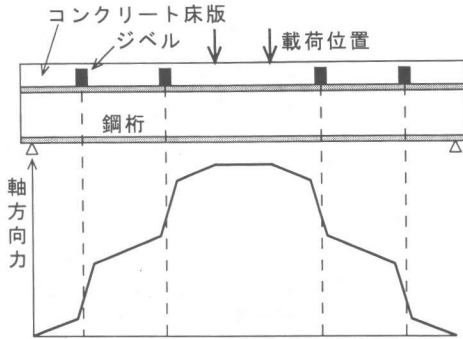


図-7 軸方向力分布模式図

ずれを拘束したことが原因であると考えられる。

一方、TYPE 2 および TYPE 3 は 100kN に達した時点で既に軸方向力比が低下している。TYPE 2 および TYPE 3 におけるスパン中央の軸力方向比はそれぞれ 0.90, 0.80 である。また、両者はスタッド供試体および TYPE 1 の軸方向力分布の変化と異なり、軸方向力分布が梁軸方向について一定の割合で低下している。

図-6における理論値は鋼桁とコンクリート床版が均等に連続して結合されていることを仮定しているが、実際には結合状態は桁軸方向に関して不連続であり、図-7に示すように模式化できる。すなわち、軸方向力の勾配が大きい箇所と小さい箇所とがある。前者はジベル配置位置、後者は鋼桁-コンクリート間の注入モルタルの付着によるものである。設計上は注入モルタルによる付着力は考慮されていないが、著者らの押抜きせん断実験において、注入モルタルによる水平せん断耐力の増加は無視できないものであるという結果を得ている。

以上より、集中荷重を受ける場合、ボックスジベルを桁端部に集中させたり、極端に配置間隔を広げたりするよりもせん断スパン内に均等に配置した方がずれ止め機能が有効に発揮できると言える。しかしながら、実構造物のように移動荷重を受ける場合の最適な配置間隔については検討が必要である。

## 5. 結論

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 鋼-コンクリート合成桁のずれ止めとしてボックスジベルを使用する場合、せん断力作用区間に均等に配置することで、より高い合成効果を得ることができる。桁端部に集中させ、極端にボックスジベル間の長さを大きくするとずれ止め効果が小さくなる。
- (2) ボックスジベルをせん断スパン内で等間隔に配置することにより、ずれ限界においてはスタッドを用いた場合とほぼ同等の合成効果が得られる。
- (3) ボックスジベルを桁に適用した場合の残留ずれ量は、押抜きせん断試験の場合の半分程度と少ない。

## 参考文献

- 1) 松下博通, 久野公德, 高取広: ボックスジベルのせん断疲労強度に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.101-106, 1990
- 2) 大島基義, 松下博通, 久野公德, 城隆史: MIG自動溶接によるボックスジベルのせん断剛性, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.834-835, 1996
- 3) 久野公德, 松下博通: プレキャストコンクリート床版と鋼桁の新しい結合方法, 橋梁と基礎, 1998年5月号, pp.17-25, 1998.5
- 4) 土木学会鋼構造委員会鋼構造終局強度研究小委員会合成構造の終局強度分科会: 鋼構造物設計指針 PART B (合成構造物), 構造工学シリーズ 9B, 1997.9