

論文

[2015] ボックスジベルのせん断疲労強度に関する研究

正会員○松下博通(九州共立大学工学部)

正会員 久野公徳(ピー・エス・コンクリート(株))

高取 広(ピー・エス・コンクリート(株))

1、まえがき

既設鋼道路橋の床版コンクリートの損傷、劣化に対する補修補強工法として、プレキャストコンクリート床版を用いた全面打ち替え工法がある。この工法では、プレキャストコンクリート床版と鋼桁との結合方法として、ボルト締めやバネ締結法によるものが多いが、不陸調整に多くの労を要する。

著者等は、ネジ式によって不陸調整ができ、鋼桁とプレキャストコンクリート床版との結合は溶接によるとしたボックスジベルを開発し、その性能や合成効果について検討した結果、静的荷重に対しては十分な合成効果を有することを報告した¹。しかし、ボックスジベルを用いる場合、締結ボルトによる場合と比較して、せん断力の伝達が複雑であり、しかも、ジベル断面に等せん断応力として作用しないなど、局所的な応力集中があること、鋼桁との結合方法が溶接によることなどにより、繰返し荷重による破壊に対する安全性が重要であり、この点について検討しなければならない。

このため、本研究は、押し抜きせん断タイプのモデル供試体により、ボックスジベルの静的せん断試験および疲労試験を実施し、最大耐力、使用性および疲労破壊に対する限界状態におけるせん断耐力あるいはせん断強度を明らかにしようとしたものである。

2、試験供試体

ボックスジベルは、図-1に示すように、プレキャスト床版に埋め込まれた外筒部に、現場で、ネジ式により内筒部を取り付け、不陸調整した後に、内筒部下端を鋼桁に溶接結合するものであり、これにより、床版と鋼桁を一体化する。実施工では、コンクリート床版と鋼桁との間に無収縮モルタルを注入するが、床版と鋼桁の間に作用するせん断

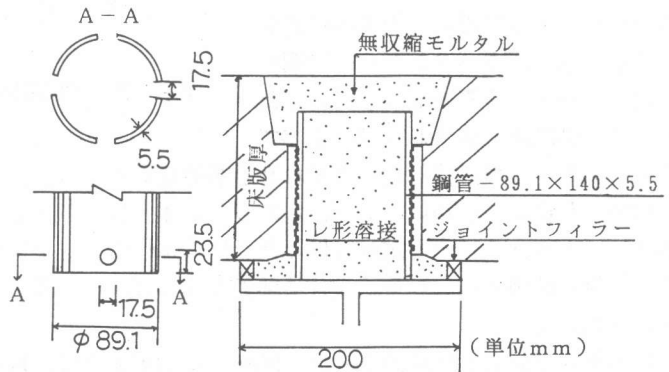


図-1 ボックスジベルの形状および結合方法

力は、充填モルタルの付着力を無視して、すべてジベルで負担するように設計する。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和材
20	7.0±1.5	2.0±1.0	38.7	38.0	174	450	632	1236	4.5

早強ボルトランドセメント

細骨材(表乾比重=2.51 FM=2.94)

粗骨材(表乾比重=3.01 FM=6.75)

使用混和材…マイティ150

道路橋示方書²によれば、ジベルの一本当たりのせん断耐力は、ジベルの種類や形状により、ジベル自身のせん断強度あるいはコンクリートの割裂強度や支圧強度から定まる。ボックスジベルの場合、コンクリートの支圧強度からせん断耐力が定まる形状ではあるが、床版コンクリートは高強度であり、ジベルの外筒部周囲をスパイラル筋などで補強する方法を採用するため、これまでの試験結果¹からは、ジベル一本当たりのせん断耐力は、ボックスジベル自身のせん断耐力から定まっている。

このことより、本試験では、ボックスジベルのみのせん断耐力を直接求めることを目的とした。すなわち、供試体は、図-2に示すような、押し抜きせん断タイプとし、供試体に加わるせん断力を、すべてボックスジベルのみで負担するように、H形鋼とコンクリート間に発泡スチロールをはさんでコンクリートを打設し、両者の付着をきるとともに、ボックスジベル周囲をD13のスパイラル筋で補強した。したがって、供試体の破壊形式は、すべてボックスジベルの溶接部近傍のずれせん断破壊であった。

作製した供試体は10体であり、このうち5体(S-1~5)は静的荷重試験に、残りの5体(D-1~5)は疲労試験に供した。供試体作製コンクリートの配合は、通常のプレキャスト部材に使用されている、設計基準強度500kgf/cm²の表-1に示す配合のものである。

3、試験方法

静的荷重試験および疲労試験は、図-2に示すように、H形鋼断面中心に偏心が無いよう加えた軸方向荷重により、ボックスジベルにせん断力を与える方法とした。

今、中心軸方向荷重P(tf)により、ボックスジベル一本に加わるせん断力の大きさS(tf)は、 $S = P/2$ であり、これにより、ボックスジベルに加わる平均せん断応力度 τ_s は、せん断破壊する内筒部の断面積 $A_s (=14.45\text{cm}^2)$ より、次式で求まる。

$$\begin{aligned} \tau_s \text{ (kgf/cm}^2\text{)} &= S/A_s = P/2A_s \\ &= 69.2 \times S \text{ (tf)} = 34.6 \times P \text{ (tf)} \end{aligned}$$

静的荷重試験は、その荷重履歴を、0→20tf→0→40tf→0→60tf→0→最大荷重とし、静的破壊荷重 P_u (tf)を求めるとともに、図-2に示したように、1/100mm目盛りのダイヤルゲージにより、荷重-貫入量曲線を求め、この結果より、ジベルのずれ量を算定した。

疲労試験は、繰返し荷重の最小荷重を静的破壊荷重の10%、最大荷重を静的破壊荷重の36、

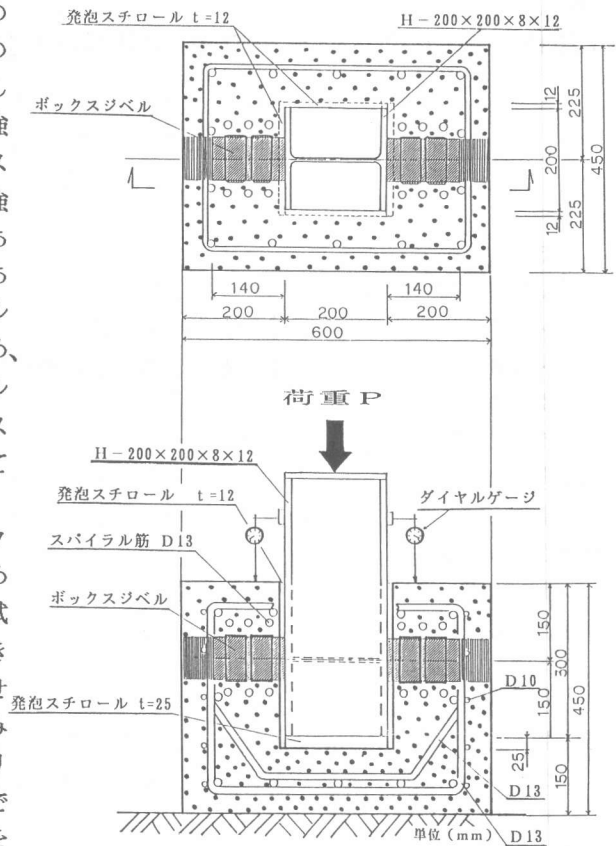


図-2 供試体の形状寸法と荷重方法

42、45、48%とした正弦変化繰返し荷重（繰返し速度 150回/分）を加え、ジベルが疲労破壊するまでの繰返し回数（疲労寿命）を求めるとともに、高感度型変位計により、荷重繰返しによるジベルのずれ量の変化を、繰返し荷重の最大荷重時および最小荷重時に測定した。なお、ジベルの疲労破壊は、ジベルのずれ速度が大きくなり、繰返し荷重を保持できなくなったときとした。

静的荷重試験および疲労試験の貫入量の測定値には、H形鋼の軸方向弾性変形量が含まれるため、ボックスジベルのずれ量は、貫入量の測定値からこのH形鋼の軸方向弾性変形量を差し引いて算定した。

なお、本試験では、H形鋼とコンクリートの間に5mm厚の発泡スチロールをはさんで付着をきり、モルタル充填を施していないため、ずれ量の測定値は、実構造物のずれ量とは異なる。このため、ずれ量の測定結果は絶対的なものではなく、同一ずれ量に対する荷重の大きさや荷重繰返し回数を比較するための指標としての測定値である。

4、静的荷重試験結果と考察

静的荷重試験による供試体の破壊は、ボックスジベルの溶接部における、内筒部の変形をともしせん断ずれ破壊であった。静的荷重による荷重-ずれ量曲線のうち、S-4 供試体の測定結果を図-3に示す。他の供試体についても同様の傾向であった。載荷重によりボックスジベルが降伏した

ときには、荷重-ずれ曲線の勾配が大きく変化すると考えられたが、試験結果からはこの急変化点を明瞭に定めることはできない。

これらの測定結果より、ジベルのずれは、 $P = 20tf$ ($\tau_s = 700 \text{ kgf/cm}^2$) 程度までは、ほぼ弾性的な挙動を示し、その時のずれ量は0.05mm程度である。

$P = 20tf$ 以上の荷重に対しては、ずれ量の増加速度が大きくなり、 $P = 40tf$ ($\tau_s = 1400 \text{ kgf/cm}^2$) 付近で、ずれ量は0.4mm程度になる。さらに、 $P = 45tf$ 以上では、ずれ量の増加速度は著しく大きくなり、荷重-ずれ量曲線は次第に横軸に平行に近い曲線となり、ずれ量が5~10mmの間で最大荷重（静的破壊荷重）を示し、その後は、ずれ量の増加に対して荷重は減少する曲線となる。

また、荷重-ずれ量曲線より、荷重を20tf、40tf、60tfの大きさから除荷した時の、各荷重載荷時におけるずれ量と除荷時の残留ずれ量の関係を図-4に示す。載荷時のずれ量が

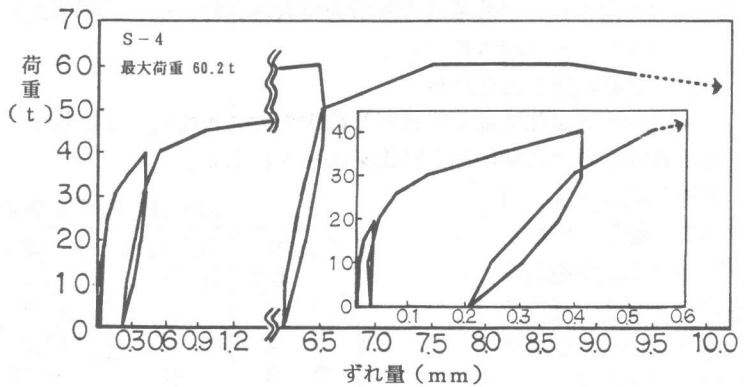


図-3 荷重-ずれ量曲線の測定結果 (S-4 供試体)

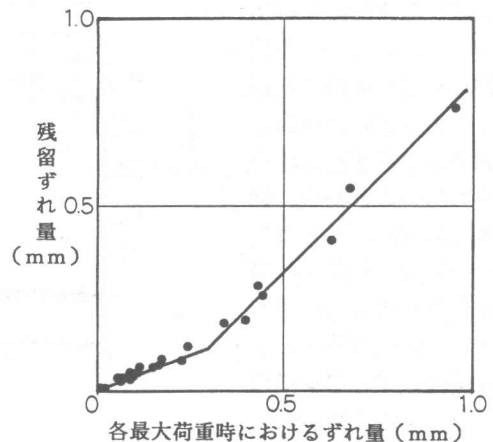


図-4 載荷時ずれ量と残留ずれ量の関係

大きくなると残留ずれ量も大きくなっているが、載荷時のずれ量が 0.3mm 以下の場合、除荷時のずれ量は、載荷時のずれ量のほぼ 1/3 である。しかし、載荷時のずれ量が 0.3mm を越えると、残留ずれ量が急激に増大し、載荷重時のずれ量のうち、0.3mm を越えるずれ量については、すべて残留

することを示している。実構造物で、床版と鋼桁の間に大きな残留ずれ量を示すことは、合成効果に変化することを示すものであり、載荷時のずれ量が 0.3mm となる時の荷重の大きさは、静的な荷重を受ける場合の合成機能上の一つの限界荷重と考えられる。

以上より、ずれ量が 0.05mm と 0.3mm になる荷重は、構造的には、ボックスジベルの合成挙動が変化する、ある種の限界荷重と考えられる。これらの限界荷重の大きさを各供試体の荷重-ずれ量曲線の測定結果から求め、破壊せん断力とともに表-2 に示す。これらの結果より、各限界荷重および破壊せん断耐力の大きさは、鋼材の降伏点から求める耐力に比較してかなり小さいことが示されている。

5、疲労試験結果および考察

D-1~5 供試体に加えた繰返し荷重の大きさを表-3 に示す。また、D-2 供試体の繰返し回数-ずれ量曲線の測定結果を図-5 に示す。

繰返し回数-ずれ量曲線は、繰返し回数 1 回目の平均荷重載荷時を零点として、最大荷重時と最小荷重時のずれ量の変化を示したものである。最大荷重時と最小荷重時のずれ量の差は、ジベルの弾性的な挙動に依存するが、この大きさには繰返し荷重による変化は認められないことから、繰返し荷重によるずれ量の変化は、残留ずれ量の変化によるものである。最大荷重時と最小荷重時のずれ量を平均して、平均荷重載荷時のずれ量とし、この変化を図-6 に示す。い

表-2、静的載荷試験結果一覧

供試体 番号	ジベル一本当たりのせん断力の大きさ (tf)		
	ずれ0.05mm	ずれ0.3mm	破壊荷重
S-1	12.9	20.3	30.9
S-2	9.4	17.8	33.6
S-3	8.3	21.0	27.5
S-4	11.0	18.3	30.1
S-5	13.0	20.2	32.9
平均	10.9 (750)	19.5 (1350)	31.0 (2150)

()内は、平均せん断応力度 (kgf/cm²)

表-3、疲労試験結果一覧

供試体 番号	最大荷重 比 (%)	繰返し回数 (×10 ⁴)		
		N _{0.3}	N _{1.0}	N _u
D-1	36	91.8	125.9	140.0
D-2	42	13.3	21.6	25.45
D-3	45	0.62	3.95	10.54
D-4	48	5.08	10.24	10.45
D-5	48	2.82	5.65	7.21

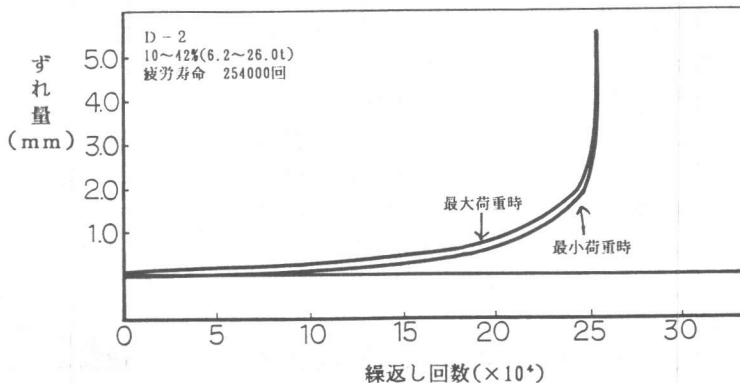


図-5 繰返し回数-ずれ量曲線 (最大、最小荷重時)

ずれの供試体も、繰返し初期から繰返し回数比（疲労寿命に対する繰返し回数）が70%程度までは、繰返し回数に比例してずれ量が増大しており、繰返し回数比70%でのずれ量は1.0mm程度である。繰返し回数比が70%を越えると、ずれ速度（荷重繰返し1回によるずれ量の増大量）が増大

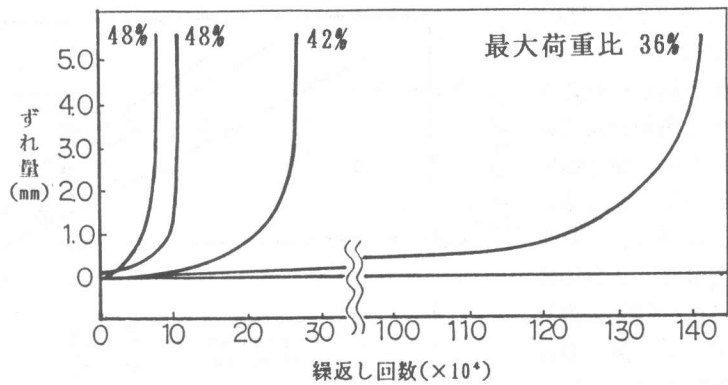


図-6 繰返し回数-ずれ量曲線（平均荷重時）

し、最終的には、ずれ量 2.5mm程度でジベルがずれせん断破壊した。繰返し回数比70%程度までのずれ速度と疲労寿命の関係は、図-7に示すように、高い相関性が認められ、ずれ速度が大きいものは疲労寿命が短くなっている。

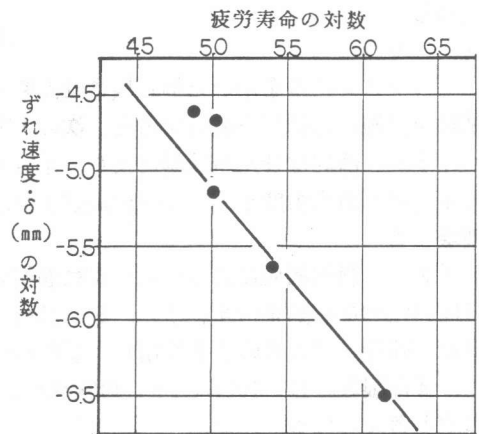


図-7 ずれ速度と疲労寿命の関係

前述したように、本試験で測定したずれ量は、実構造物のずれ量とは異なる。しかし、ボックスジベルを使用した構造物が繰返し荷重を受けるとき、たとえジベルが疲労破壊しなくても、ずれ速度が大きくなることは合成効果が変化することを示す。本試験では、ずれ量が 1.0mm以上で、ずれ速度が増大しており、ずれ量 1.0mm時の繰返し回数 $N_{1.0}$ は、繰返し荷重を受ける場合の一つの合成機能上の寿命（機能寿命）と考えられる。このため、繰返し回数-ずれ量曲線から $N_{1.0}$ を求めた。また、静的な荷重を受ける場合の限界状態とした、ずれ量0.3mmに達する時の繰返し回数 $N_{0.3}$ （ずれ限界寿命）も求めた。これらの結果も表-3に示す。

表-3の結果より、ずれ寿命 $N_{0.3}$ 、機能寿命 $N_{1.0}$ および疲労寿命 N_u に対するS-N曲線を、最大荷重比Sとの関係で求め、図-8に示す。

S-N曲線の回帰式および相関係数は次式の通りである。

・ ずれ寿命 $N_{0.3}$ に対して

$$\log N_{0.3} = 10.33 - 0.126S \quad (\text{相関係数 } r = 0.78)$$

・ 機能寿命 $N_{1.0}$ に対して

$$\log N_{1.0} = 9.79 - 0.106S \quad (\text{相関係数 } r = 0.89)$$

・ 疲労寿命 N_u に対して

$$\log N_u = 9.72 - 0.101S \quad (\text{相関係数 } r = 0.97)$$

これらの結果より、ボックスジベル一本当たりの 200万回最大疲労耐力は、ずれ寿命、機能寿命および疲労寿命に対して、静的破壊荷重の 32、33 および34%となり、最大疲労耐力

で 9.9、10.2 および 10.5tf になる。繰返し荷重の最小荷重が 10% であるため、疲労振幅耐力は、それぞれ、6.8、7.1、7.4tf になる。これを疲労振幅強度に換算すると、最小せん断応力度が 215 kgf/cm^2 の時で、470、490、510 kgf/cm^2 である。

6、まとめ

ボックスジベルを用いた押し抜きせん断タイプの供試体により、静的載荷試験および疲労試験を実施した結果を要約すると、次のとおりである。

(1) 静的なせん断試験により、ボックスジベルは、一本当たりのせん断力 S が 31tf (平均せん断応力度 $\tau_s = 2150 \text{ kgf/cm}^2$) で、溶接部近傍の、ジベル自身のずれせん断により破壊する。

(2) 静的載荷による荷重-ずれ曲線の挙動は、 S が 10tf ($\tau_s = 700 \text{ kgf/cm}^2$) までは、ほぼ弾性的な挙動を示す。また、 $S = 20\text{tf}$ ($\tau_s = 1400 \text{ kgf/cm}^2$) 以上では、載荷時のずれ量が、除荷してもそのまま残留し、ずれ量が急激に増大する。このことより、ボックスジベルの弾性限界は $S = 10\text{tf}$ ($\tau_s = 700 \text{ kgf/cm}^2$)、ずれ限界は $S = 20\text{tf}$ ($\tau_s = 1400 \text{ kgf/cm}^2$) 程度と考えられる。

(3) せん断疲労試験による繰返し回数-ずれ曲線より、繰返し荷重によるずれ量の変化は、残留ずれ量の増大によることが示された。また、繰返し回数比 70% までのずれ速度は一定で、この時のずれ速度と疲労寿命は相関性がある。

(4) 疲労破壊形式は、静的破壊形式と同様に、ボックスジベルの溶接部近傍のずれせん断破壊であった。ボックスジベル一本当たりの 200 万回最大疲労耐力は、繰返し荷重の最小荷重が 10% の時、最大疲労耐力で 10.5tf、疲労振幅耐力で 7.4tf (200 万回疲労振幅強度で 510 kgf/cm^2) である。構造的に、合成効果からずれ量が制限される時には、ボックスジベル一本当たりの 200 万回最大疲労耐力を 9.9tf、疲労振幅耐力で 6.8tf (200 万回疲労振幅強度で 470 kgf/cm^2) 程度まで低減すればよい。

[謝辞]

本試験実施にあたり、九州共立大学工学部技能員、安藤忠夫氏ならびに卒論生、東聡之君に労を頂いた。厚く御礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) 松下博通、別府英生、西山文生、鈴木広一：ボックスジベルを用いた鋼桁とプレキャスト床版との合成効果について、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻、第2号、1988
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編、昭和53年 1月

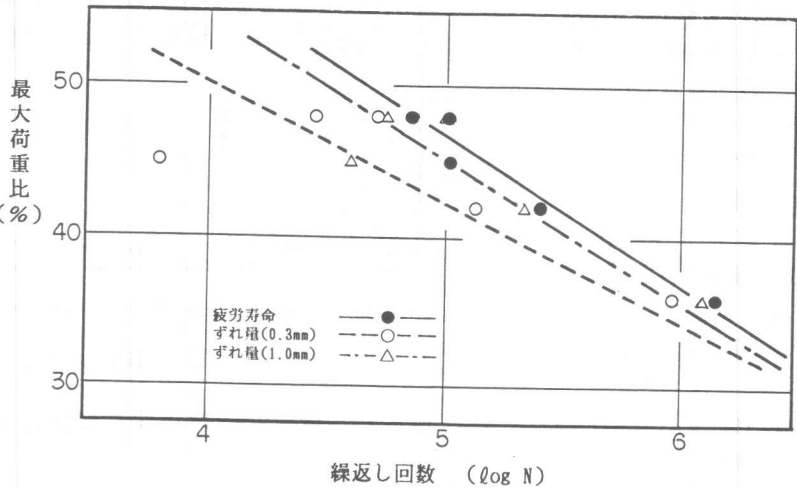


図-8 S - N 曲線