

2. 送出し工法における橋桁の安定性に関する研究

高梨成次*, 大幢勝利*

2. Study on Stability of Bridge Girder in Launching Method

by Seiji TAKANASHI* and Katsutoshi OHDO*

Abstract; The launching method is one of the construction method used to erect a bridge girder. In this method, a bridge girder is placed on a launching apparatus, and it is moved into a prescribed position by the launching apparatus or other equipment. The advantages of this method are that a large-sized crane is not required, and a bridge girder can be installed in a short time. The disadvantages of this method are that a working area is required for the adjacent to the construction site, and also that a large patch load occur onto the bridge girder during the launching operation. Since this load disappears when the bridge is completed, it may not be taken into consideration at the design stage. If a bridge girder's web plate is damaged due to this load, the stability of the bridge girder may be lost, and it may collapse. Therefore, in this study a reproduction test was carried out using a launching apparatus that is commonly used in construction sites and a full-scale bridge girder model.

The test was carried out for the following purposes:

1. To clarify the stress state in the web plate of the bridge girder during the launching operation.
2. To clarify the influence caused by the eccentricity occurring between the bridge girder and the launching apparatus.
3. To confirm the validity of the methods of reinforcing the web plate against the construction loads.

The test results were evaluated based on the magnitude of the stress generated in the web plate. The stress was calculated from the strain that was measured by a three-axis rosette gauge attached to the web plate of the bridge girder.

The findings obtained from the test were as follows:

1. The effect of eccentricity occurring between a bridge girder and a launching apparatus cannot be eliminated in actual construction sites. As the test result showed, the stress of the web plate increased with the occurrence of eccentricity. In particular, when the launching apparatus was misused, the stress increased noticeably, and the risk of damage to the bridge girder became extremely high.
2. Several reinforcement methods for the bridge girder's web plate against a construction load have been proposed. In this test, the validity of three typical reinforcement methods was investigated. The strength of the bridge girder increased by 15% when the simplest reinforcement method was employed. However, it increased by only 25% even when the most complicated method was employed.

Keywords; launching method, construction loads, eccentricity, reinforcement method

* 建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

1. はじめに

鋼橋の架設工法の一つに送り出し工法¹⁾がある。本工法の基本的な手順は、予め地組した橋桁を駆動装置によって移動させ、所定の位置に据付けるというものである。本工法は、橋桁本体や揚重機等を架設地点へ搬入するための経路に制限を受ける場合の他、施工時間を短縮させる必要がある場合に採用されることが多い。送り出し架設中に送り出される橋桁の下面は、履带式駆動装置等の支持装置によって支持されることが一般的である。そのため、橋桁の下面には局部的に圧縮力が作用する²⁾。これに対し、橋梁が完成した時には、そのような圧縮力は作用しないため、設計用荷重として考慮されないことがある。しかしながら、送り出し架設中に、局部的な圧縮力によって腹板が座屈すると、製品としての価値が損なわれるだけでなく、橋桁の安定性が失われ、転倒等の災害が発生する危険性が高くなる。そのため架設時には、圧縮応力による橋桁腹板の座屈^{3), 4)}に対して十分に注意しなくてはならない。

この履带式駆動装置の芯が橋桁の芯である腹板と一致していれば、橋桁に想定以上の過大な応力が発生することはないと考えられるが、現実的にはそれらが完全に一致することはない。そのため、履带式駆動装置には橋桁の芯との許容偏心距離が設定されていることが多い。

本研究では、実際に橋梁架設現場で使用されている支持装置を用いた実験により、架設時に橋桁に生じる応力を確認すると共に、橋桁と履带式駆動装置の偏心が橋桁の腹板応力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。また、施工時荷重によって橋桁に過大な応力が発生することが予見されている場合には当然、橋桁は補強される。代表的な補強方法は3種類あり、既に多くの現場で採用されている。しかしながら、その補強効果に関する検証は、解析的検証が主であり、実験的検証は、ほとんど行なわれていない。そこで、それら補強効果による

耐力上昇を実験的に確認することも研究の目的とした。

2. 試験体及びデータ計測

実験で使用した橋桁モデルをFig. 1に示す。橋桁モデルのせいは1900mm、幅は350mm、スパンは実験に応じて異なったので、その都度明示することにする。橋桁の腹板には完成時の応力を想定して鉛直プレートと水平プレートによる補強を行なった。この補強プレートは、慣例に従い腹板の片側面にのみ取り付けられた。加力点は載荷装置の都合により、橋桁の上面とした。そのため、Fig. 1は通常の橋桁の上下が反転していることになる。上下を逆にして加力を行うため、橋桁の自重はキャンセルされるが、橋桁の自重に対して十分に大きな荷重を載荷したために、自重の影響は無視できるものと考えた。また、加力点は、スパンの中央とし履带式駆動装置を介して行なった。

実験で使用した履带式駆動装置（シンクロジャッキ）の一例をFig. 2に示す。実験で使用した履带式駆動装置は、A社製とB社製の2種類とした。両装置とも共通して、許容荷重は2500kN、履带式駆動装置と橋桁の接触面の大きさは縦断方向670mm、横断方向300mm、装置の芯と橋桁の芯の許容偏心距離は50mmである。そのため、実験で再現した装置の芯と橋桁の芯の偏心距離は50mmを上限とした。本研究の目的は、先に記した通り、送り出し作業中の腹板の応力状態を明確にすることであるため、Fig. 3に示すように、3軸のロゼットゲージで腹板のひずみを測定した。貼付位置は、上端から3段目までは縦方向は150mm間隔、横方向は100mm間隔とし、4段目の横方向は100mm間隔としたが縦方向は200mm間隔とした。5段目以降は縦方向、横方向共に200mm間隔とした。そのように貼付したロゼットゲージのひずみ値の各成分をFig. 4のように定義すると、最大主応力又は最小主応力は式(1)によって求めることができる。

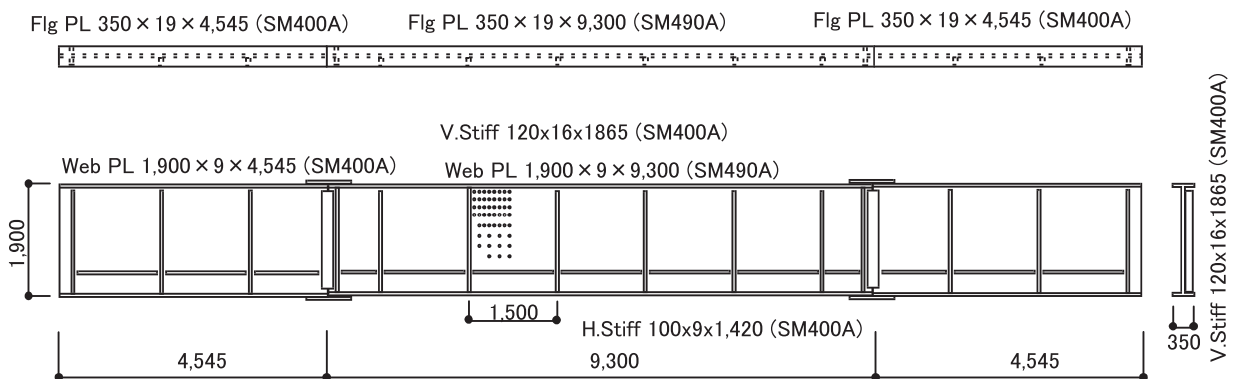


Fig. 1 Bridge Girder Model.
橋桁モデル

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \left[(1+\nu)(\varepsilon_a + \varepsilon_c) \pm (1-\nu) \times \sqrt{2\{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2\}} \right] \quad (1)$$

E : 縦弾性係数 (kN/mm^2)
 ν : ポアソン比
 式中±で
 +ならば最大主応力
 -ならば最小主応力

3.1 加力点における鉛直補剛材の有無の影響

送り出し工法では、橋脚等に設置された履带式駆動装置上を橋桁が移動していくため、橋桁のあらゆる部分が支点となり、履带式駆動装置による反力を受けることになる。そこで、最も極端な事例として、鉛直補剛材が有

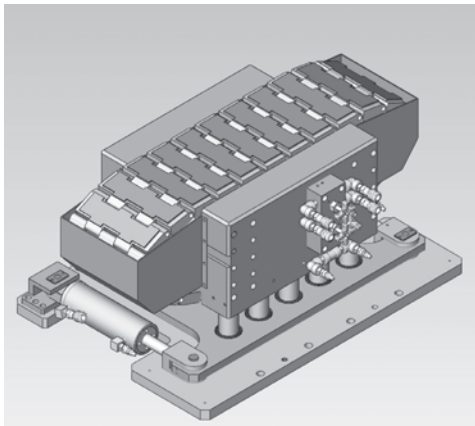


Fig. 2 Synchronized Jack.
シンクロジャッキ (履带式駆動装置)

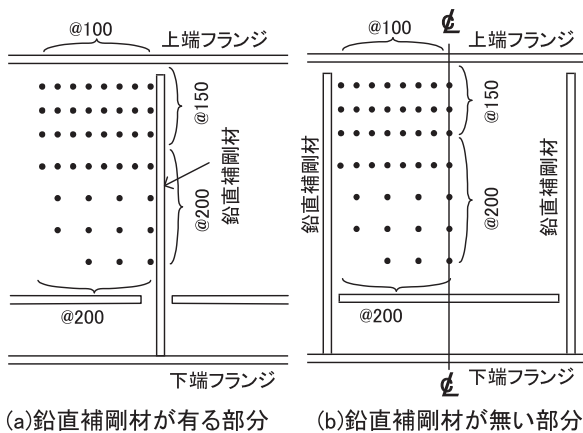


Fig. 3 Position of Strain Gages.
ゲージ貼付位置

る部分又は鉛直補剛材が無い部分に加力した場合における腹板の応力状態を調べるための実験を実施した。加力状況をFig. 5に示す。

実験中は、常に加力荷重と各部のひずみデータをモニターしていた。装置等の遊びの影響を受け難くするために極力大きな荷重で実験結果を評価する必要があったが、腹板各部のひずみ値が最大で800マイクロを超えない範囲で加力を行なった。そのため、各実験における載荷荷重の値は必ずしも等しくはならなかった。そのため、腹板の最小主応力の値を加力荷重で除した値として評価することにした。便宜上、本論中では、それを基準化応力と呼ぶことにする。単位は $(kN/mm^2)/kN$ となる。

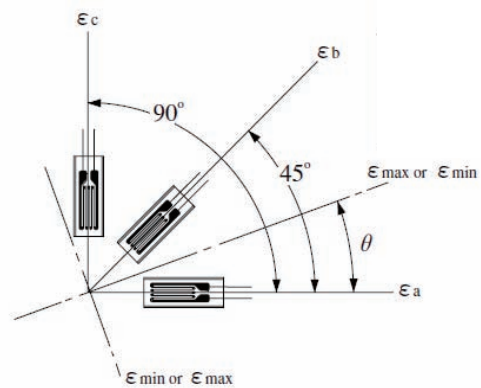


Fig. 4 Symbol of Strain.
ひずみ成分の記号

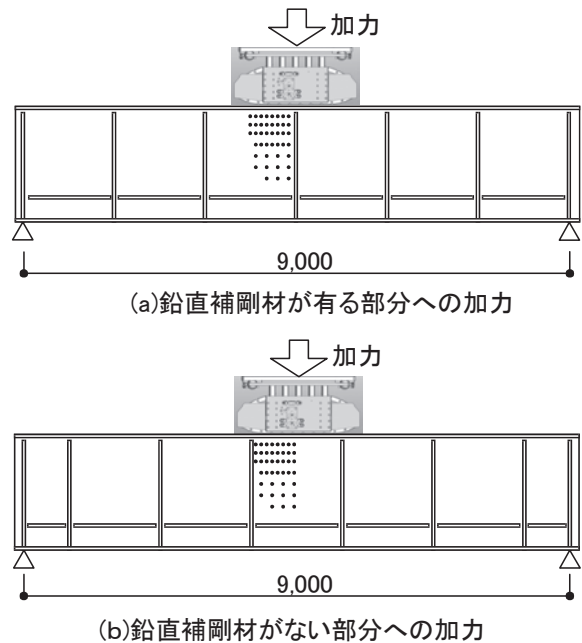


Fig. 5 Test Girders.
加力状況

Fig. 6に腹板の基準化応力を示す。A社製及びB社製の装置を使用した場合に共通して、鉛直補剛材が有る部分に加力した場合には、鉛直補剛材に沿って(図中右端)橋桁の下方まで応力が大きくなっていることが分かる。

これに対して、鉛直補剛材が無い部分に加力した場合には、腹板の上端フランジ直下で、鉛直補剛材間の中央部分の応力が著しく大きくなっていることが分かる。その他の部位に関しては、A社製の装置を使用した場合には、上端フランジ近傍かつ鉛直補剛材近傍(図中左端)の応力が大きくなる傾向にあった。B社製の装置を使用した場合には、鉛直補剛材間の中央の位置(図中右端)で、上端フランジから離れた位置においても応力が大きくなる傾向にあった。いずれにおいても、載荷点から下方に0.45m程度までの腹板の応力が大きくなっており、それよりも離れた部位の応力は小さくなっていることが確認できる。このことにより、フランジから0.45m程度以内の範囲が危険断面位置であろうと推定することができる。

これらの結果から、鉛直補剛材が無い部分への載荷で

は、鉛直補剛材が有る部分への載荷と比較して、腹板に発生する最大応力が大きくなることが分かった。そのため、作業時荷重に対して、特に配慮しなくてはならないのは、鉛直補剛材が無い部分が履带式駆動装置上を通過する時であることが分かった。

3.2 履带式駆動装置の偏心による影響

先に記した通り、橋桁の送り出し作業中に履带式駆動装置の芯と橋桁の芯が完全に一致することは無いと言える。そのため、履带式駆動装置の両メーカー共に、その偏心距離を許容し、上限を50mmとしている。装置が橋桁に対して偏心載荷となる場合の概念図をFig. 7に示す。実験では、偏心が無い場合を基本として、Fig. 7(b)に示したように、装置が鉛直補剛材が無い側に偏心した場合と、鉛直補剛材が有る側に偏心した場合の条件について実験を実施した。偏心量はメーカーによって上限と決められた50mmと、その半分である25mmとした。橋桁及び加力方法はFig. 5で示した通りとした。

実験で使用した装置は、A社製とB社製の2種類であ

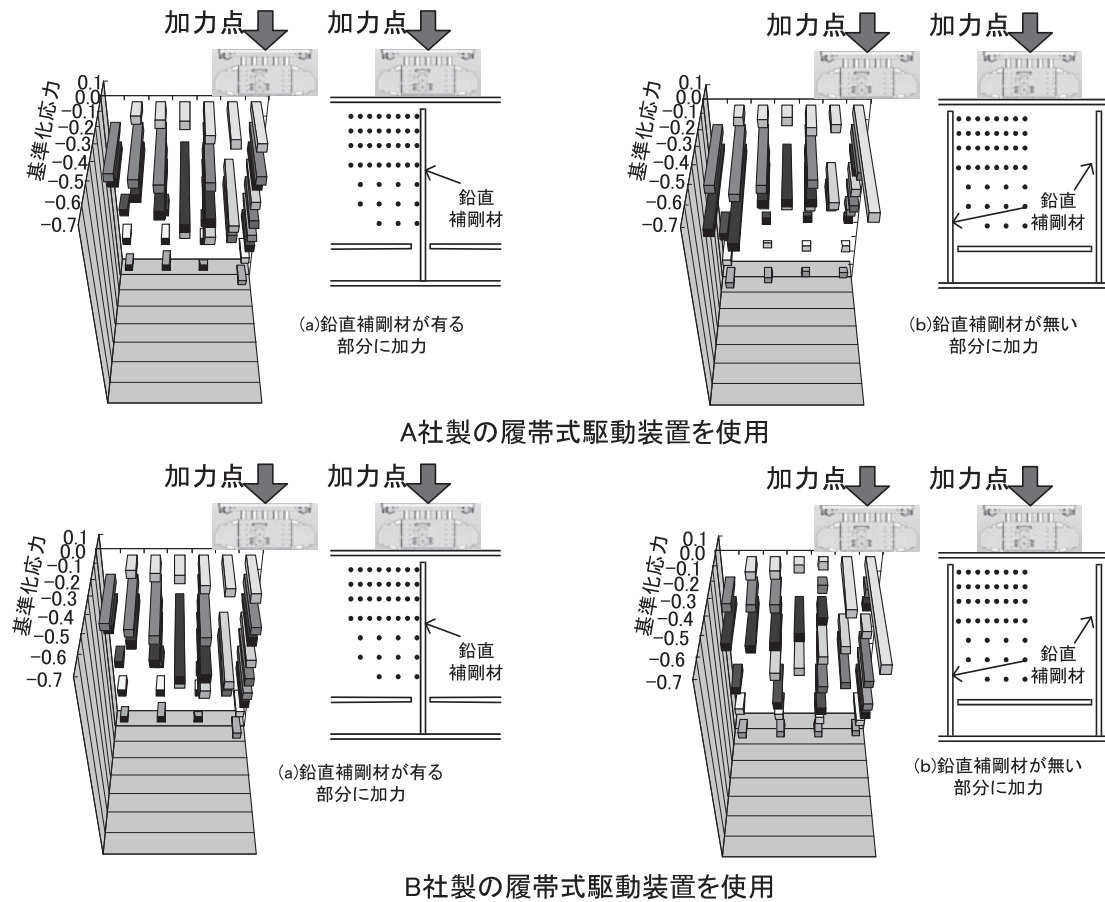


Fig. 6 Distribution of the Normalized Stress.
基準化応力の分布

るが、これらの装置には、複数本のジャッキが組み込まれている。A社製とB社製の特徴的な違いは、Fig. 7 (a)中に示したA側ジャッキとB側ジャッキの連動性に関することである。

A社製ではそれらのジャッキは、連動した状態で使用することが基本となっており、B社製ではそれらのジャッキは独立して使用することが基本となっている。ただし、両装置とも、それらのジャッキを連動させる、あるいは独立させるかの選択は可能であり、バルブの開閉により、極めて簡単にそれらの状態を切り替えることができる。基本と異なる使用方法をした場合には、その装置にかかっている荷重を読み取り難くなるという欠点があるが、読み取れないわけではない。

Fig. 8 (A社製の装置を使用)とFig. 9 (B社製の装置を使用)に鉛直補剛材が有る部位に履带式駆動装置がある場合の腹板の基準化応力を示す。Fig. 10 (A社製の装置を使用)とFig. 11 (B社製の装置を使用)に鉛直補剛材が無い部位に履带式駆動装置がある場合の腹板の基準化応力を示す。これら一連の実験において、データの計測に不備が発生したケースがあった。しかし、それら一部のデータに欠損があっても全体的な特性を評価するのに支障をきたすものではなかった。

偏心に関しては、Fig. 7 (b)のように装置が、鉛直補剛材が無い側に偏心した場合をB側偏心と呼び、逆に鉛直補剛材が有る側に偏心した場合をA側偏心と呼ぶことにする。また、A側ジャッキとB側ジャッキを連動させた場合には「オープン」、独立させた場合には「カット」と表示することにする。

Fig. 8とFig. 10あるいはFig. 9とFig. 11を比較すると、履带式駆動装置と橋桁の偏心の有無に関わらず、Fig. 6で示した偏心が無い場合の結果と同様に、履带式駆動装置が、鉛直補剛材が有る部分にある場合よりも鉛直補剛材が無い部分にある場合の方が腹板の応力は、大きくなることが確認できた。

Fig. 10及びFig. 11より、履带式駆動装置と橋桁に偏心がある場合には、偏心が無い場合に比べて腹板の応力が大きくなっていることが分かる。特に、横断方向のジャッキのバルブが開いている「オープン」の場合には、最大応力が、偏心が無い場合の2倍程度になることもある。これに対し、横断方向のジャッキのバルブを閉めることによって、腹板の応力増加は抑制され、最大でも1.2倍であった。

偏心の影響により、腹板には鉛直力と同時に曲げモーメントが発生する。その影響により、A側に偏心した場合にはフランジ直下の1段目の応力が小さくなり、2段目以降の応力が大きくなった。これとは反対に、B側に偏心した場合にはフランジの直下の1段目の応力が大きくなり、2段目以降の応力が小さくなった。

Table 1及びFig. 12に各条件における腹板の最大基準化応力を、Table 2に偏心があることによって変化する腹板の基準化応力を偏心が無い場合を基準とした比率を示す。

履带式駆動装置と橋桁の偏心によって、橋桁の腹板に過大な応力が生じることが分かった。そこで、このように履带式駆動装置と橋桁が偏心している場合に履带式駆動装置に生じる反力を測定した。測定は、Fig. 13に示すように1枚の履帯板のA側とB側にロードセルを設置することによった。このようにロードセルを橋桁と履帯板が接する7枚全ての部位に設置した。Fig. 14にロードセルによって得られた反力分布を示した。ここでは、全てのロードセルの値の合計が1.0となるように基準化して示した。

偏心がない場合には、横断方向の反力分布は、ほぼ均等に分布している。しかし、縦断方向の分布は必ずしも均等とはなっていないことが分かった。これは、ジャッキ等の設置位置に依存するためと考えられる。一方、偏心がある場合には、偏心している反対側の反力、つまり橋桁の中央部に当たる腹板に近い側の反力が大きくなっていることが分かる。その傾向は横断方向のジャッキのバルブが閉じている場合の方が大きい。そのため、フランジのA側端部、あるいはB側端部に掛かる荷重が小さ

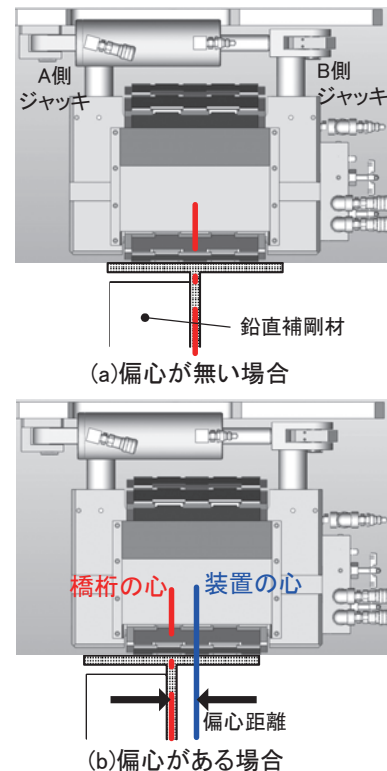


Fig. 7 Eccentric of Bridge Girder and Synchronized Jack. 橋桁と履带式駆動装置の偏心

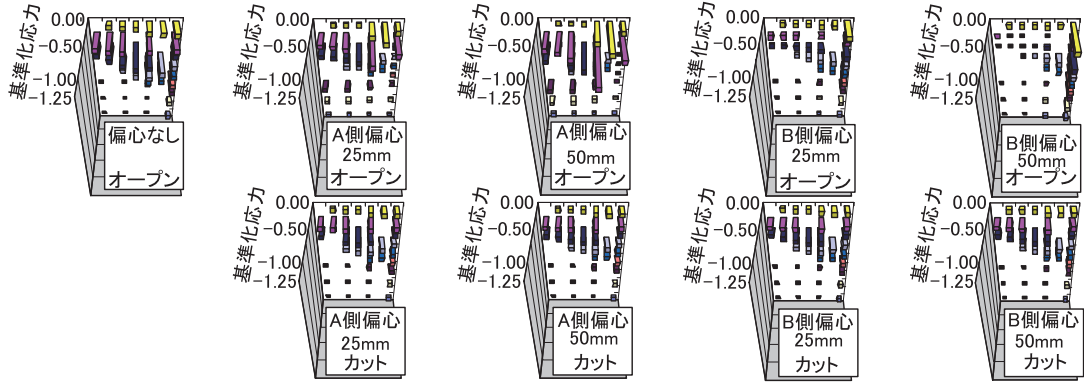


Fig. 8 Distribution of the Normalized Stress (Synchronized Jack Type A, on the Vertical Reinforcement).
基準化応力の分布 (A社製装置使用-鉛直補剛材が有る部分に加力)

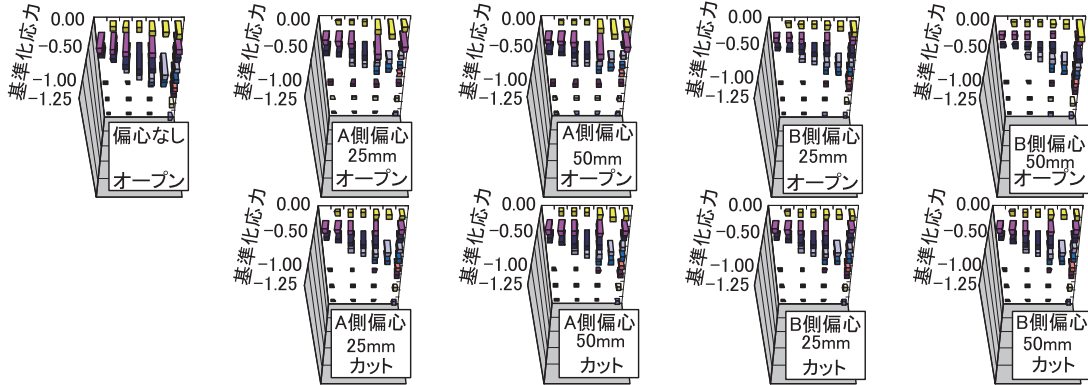


Fig. 9 Distribution of the Normalized Stress (Synchronized Jack Type B, on the Vertical Reinforcement).
基準化応力の分布 (B社製装置使用-鉛直補剛材が有る部分に加力)

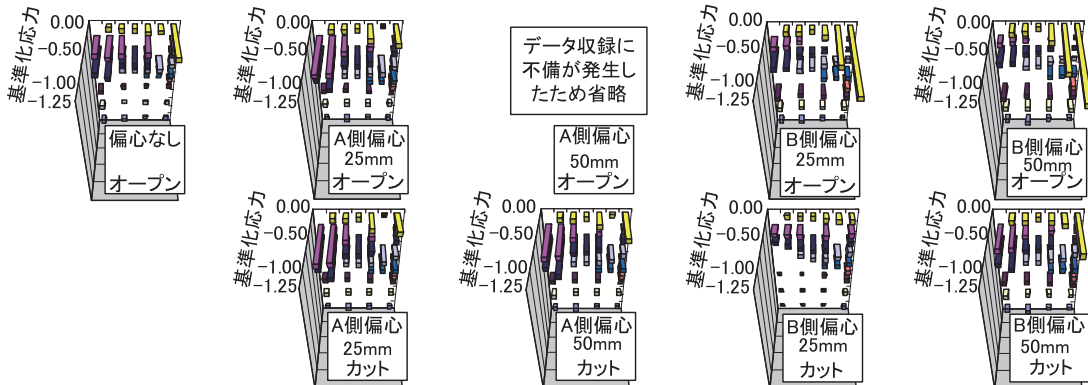


Fig. 10 Distribution of the Normalized Stress (Synchronized Jack Type A, on the Normal Web Plate).
基準化応力の分布 (A社製装置使用-鉛直補剛材が無い部分に加力)

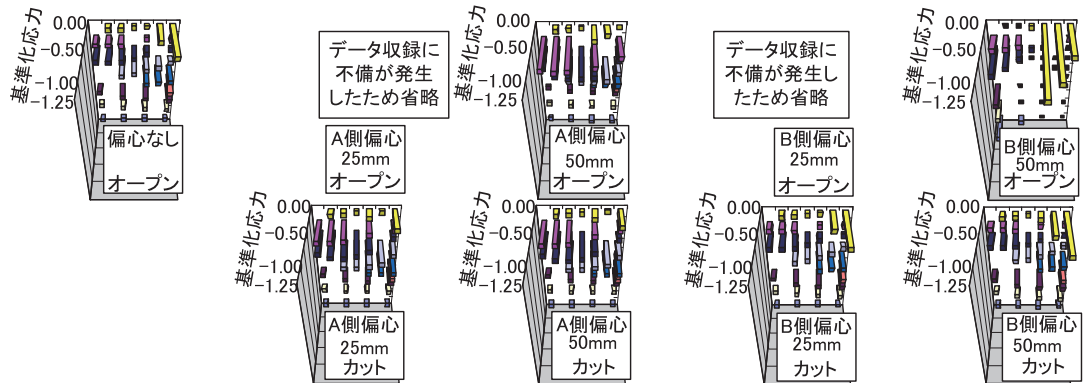


Fig. 11 Distribution of the Normalized Stress (Synchronized Jack Type B, on the Normal Web Plate).
基準化応力の分布 (B社製装置使用-鉛直補剛材が無い部分に加力)

くなる分、橋桁に発生する曲げモーメントが小さくなる。その結果、偏心の影響が小さくなることが分かった。

A社製の装置では、A側ジャッキとB側ジャッキを連動させる「オープン」の状態で使用することが標準である。これに対し、B社製の装置では「カット」の状態で使用することが標準となっている。しかしながら、B社製

の装置を使用する場合においても、履带式駆動装置の位置決め等の際に、A側ジャッキとB側ジャッキの連動バルブを「オープン」にすることがある。そのような作業をした後に、送り出し作業を行う場合には、当該バルブを閉め忘れないように注意する必要がある。しかしながら、最も重要なのは、送り出し作業時には履带式駆動装

Table 1 Maximum Normalized Stress.
最大基準化応力

加力部位	バルブ	A社製装置使用					B社製装置使用				
		偏心なし	A側偏心 25mm	A側偏心 50mm	B側偏心 25mm	B側偏心 50mm	偏心なし	A側偏心 25mm	A側偏心 50mm	B側偏心 25mm	B側偏心 50mm
鉛直補剛材 が有る部分	オープン	-0.48	-0.61	-0.94	-0.32	-0.55	-0.48	-0.45	-0.45	-0.21	-0.33
	カット	-	-0.30	-0.28	-0.28	-0.26	-	-0.27	-0.30	-0.27	-0.28
鉛直補剛材 が無い部分	オープン	-0.61	-0.74	-	-1.15	-1.25	-0.61	-	-0.64	-	-1.20
	カット	-	-0.75	-0.70	-0.60	-0.72	-	-0.49	-0.52	-0.67	-0.79

Table 2 Ratio of Stresses.
基準化応力の比率

加力部位	バルブ	A社製装置使用					B社製装置使用				
		偏心なし	A側偏心 25mm	A側偏心 50mm	B側偏心 25mm	B側偏心 50mm	偏心なし	A側偏心 25mm	A側偏心 50mm	B側偏心 25mm	B側偏心 50mm
鉛直補剛材 が有る部分	オープン	100%	126%	195%	66%	114%	100%	93%	93%	44%	68%
	カット	-	63%	58%	59%	55%	-	55%	63%	56%	57%
鉛直補剛材 が無い部分	オープン	100%	122%	-	189%	204%	100%	-	105%	-	197%
	カット	-	123%	114%	98%	119%	-	81%	85%	110%	129%

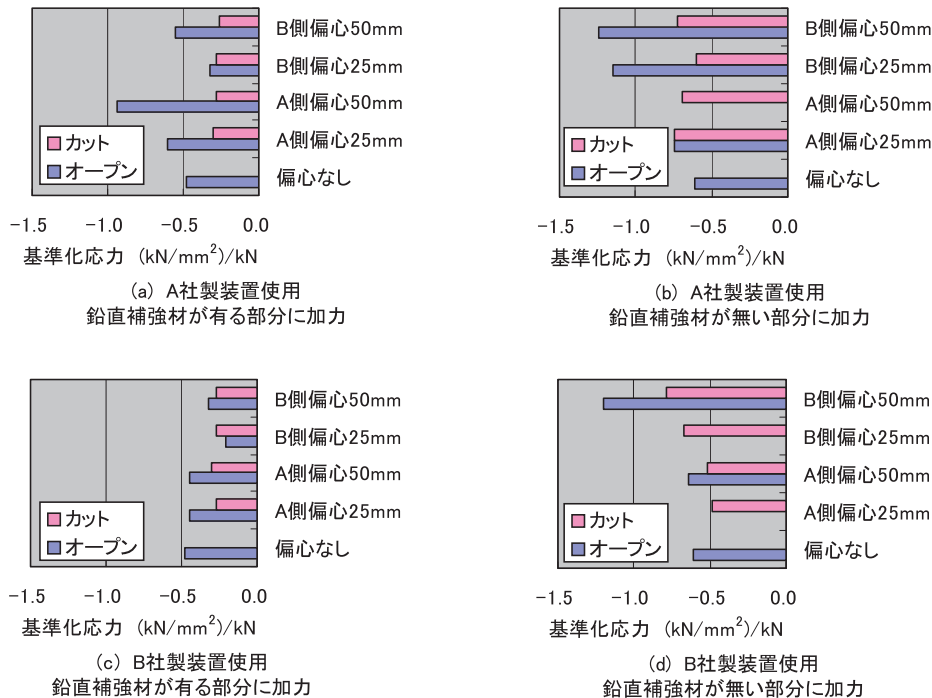


Fig. 12 Maximum Normalized Stress of web plate in each condition.
各条件における腹板の最大基準化応力

置と橋桁の偏心が無いように十分な管理を行なうことである。

3.3 施工時荷重に対する橋桁補強の効果

これまでに検討してきたような履带式駆動装置の偏心の影響による応力の増大に限らず、施工時荷重によって橋桁の補強が必要な場合がある。現時点においても幾つかの補強方法が提案されており、実用されている。これらの補強方法による効果を、弾性実験と弾塑性実験によって確認した。

本実験における履带式駆動装置はA社製の装置のみを用いた。

補強方法及び試験体をFig. 15に示す。Fig. 15 (a) は補強を行っていない場合の試験体である。これに関

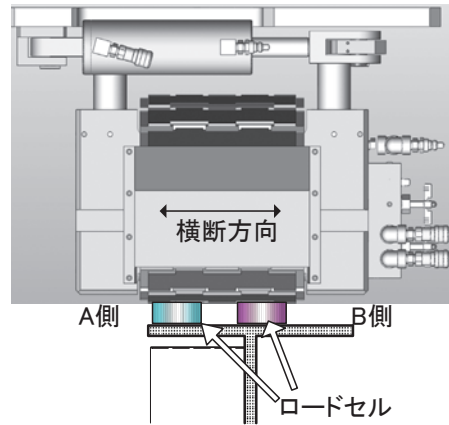


Fig. 13 Layout of the Loadcells.
ロードセルの設置状況

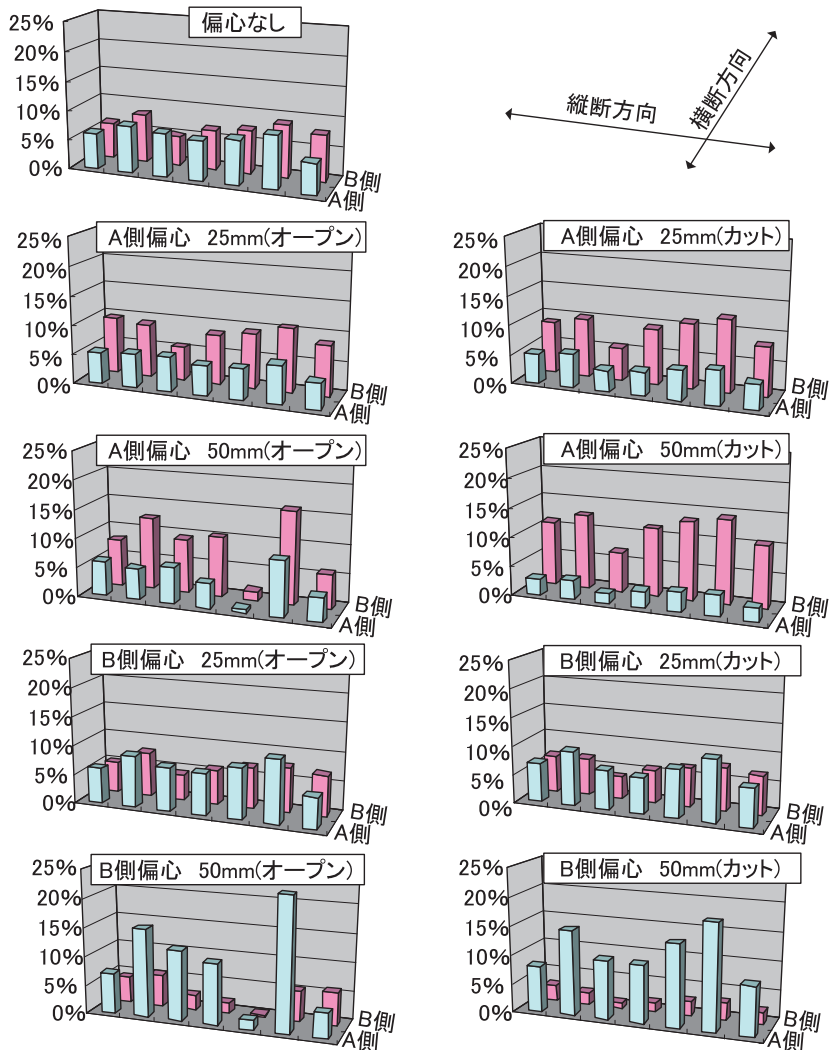


Fig. 14 Reaction of Synchronized Jack.
履带式駆動装置の反力の比率

れと同一桁の異なる部位に鉛直プレートによる補強を行なった試験体が Fig. 15 (d) である。これを「鉛直補強」と呼ぶ。実験の順序は「補強なし」を初めに行い、次いで「水平+鉛直補強」を行なった。スパン15mの「補強なし」試験体の実験結果が、Fig. 5 (a) で示したスパン長9mの試験体での実験結果と大きな差が無いことが確認された。さらに、応力状態も本設用の鉛直プレートで囲まれた範囲内に留まり、隣接する領域にまで影響が及ばないことが確認できたため、スパン長による影響が小さいと判断した。そのため、「水平補強」及び「鉛直補強」試験体はスパン長7.5mの桁とし、それぞれの補強部位を本設用鉛直プレートを紹介して隣接する腹板とした。

履带式駆動装置の偏心による影響は、フランジの直下が最も顕著であろうと推測されたため、フランジの下面から30mm下方の腹板の両面に3軸ロゼットゲージを貼付した。このフランジ直下のロゼットゲージのみを腹板の両面に貼付した。3軸ロゼットゲージ貼付位置をFig. 16に示す。

補強方法の違いによる腹板の応力を偏心が無い場合について比較検討した。各条件におけるフランジ直下の基準化応力をFig. 17に、フランジ直下を除いた部分における腹板の基準化応力をFig. 18に示す。

フランジ直下の基準化応力に関しては、「補強なし」に比べて、「水平補強」では、最大応力で42%の応力しか発生しておらず、腹板の応力を抑制する効果が高いことが確認できる。これに対して、「鉛直補強」では、鉛直プレート近傍で応力が1.4倍になった。このことから、鉛直プレート近傍では、局所的な損傷が発生する危険性があることが分かる。

「水平+鉛直補強」に関しては、それらの効果が合わさった結果となった。

フランジ直下を除いた腹板全体の基準化応力の分布については、全ての試験体に共通して履带式駆動装置に近いほど応力が大きくなっている。特に「補強なし」について顕著である。これに対し、「水平補強」では水平補強材とフランジで囲まれた領域全体にほぼ均等に応力が分

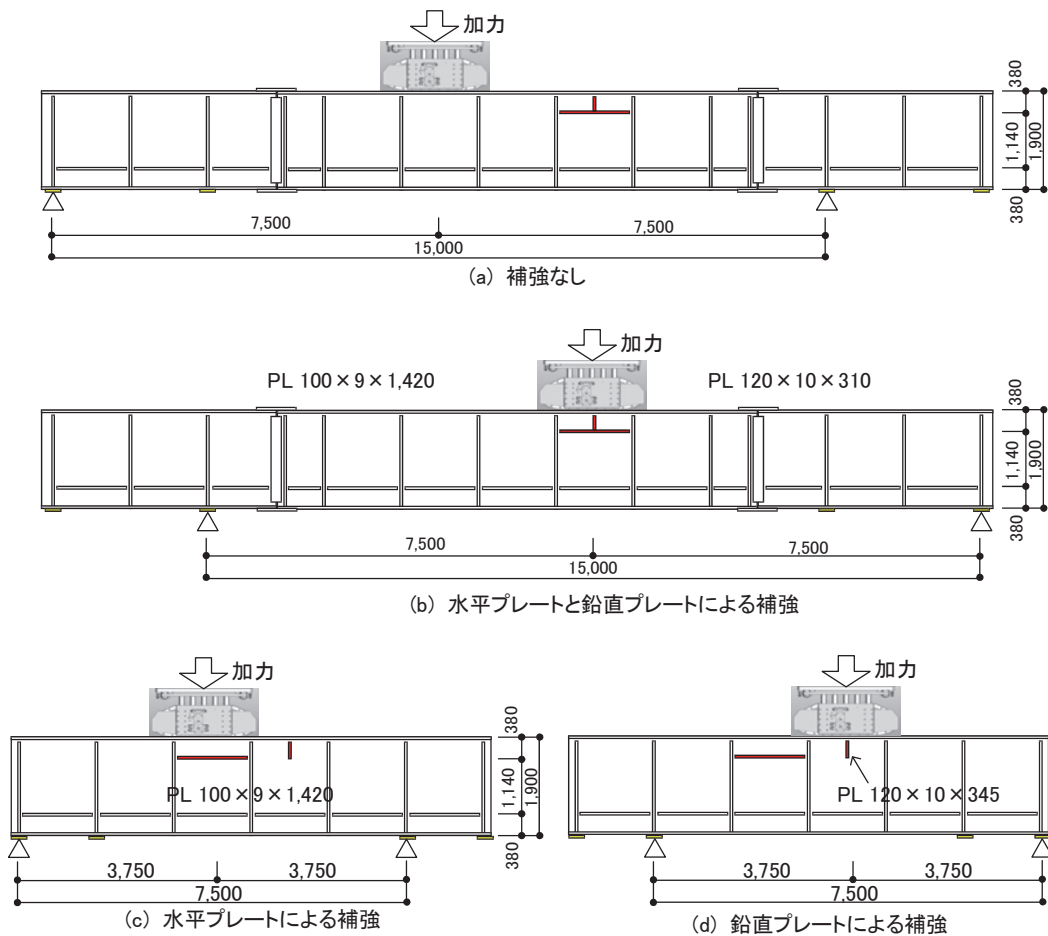


Fig. 15 Test girders of different reinforced type.
補強タイプ

布しているため、効率的に応力が分配されていると考えられる。

「鉛直補強」では、鉛直プレートに沿って応力が大きくなっていることが確認できるが、最大応力に関しては「補強なし」に比べ、抑制されていることが分かる。

「水平+鉛直補強」では、鉛直プレートと水平プレートの交点近傍の応力が著しく大きくなっているため、局部的に損傷が発生する危険性があることが分かった。しかしながら、この応力の大きさは「補強なし」の場合の最大応力とほぼ同じであることから、本補強方法が有効でないことを示すものではない。他の部位においては、応力は有効に抑制されている。

全ての補強条件の各偏心条件において、応力が最も大きくなった部位は、殆どの場合フランジ直下であった。そのため、以降の検討は、フランジ直下の応力に限定して行なうことにする。

Fig. 19～Fig. 22に全ての試験体に対する履带式駆動装置の偏心による影響を示す。これらから、補強の有無あるいは補強方法に関係なく、履带式駆動装置と橋桁が

側に偏心した場合に顕著である。それぞれの基準化応力の最大値をそれぞれの偏心なしと比較すると、「補強なし」では2.8倍、「水平+鉛直補強」では5.8倍、「水平補強」では7.4倍、「鉛直補強」では1.8倍となった。このように、偏心が無い場合に比べて著しく大きな応力となることが

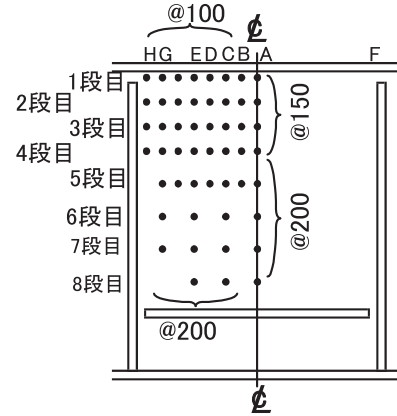


Fig. 16 Position of Strain Gages.
ゲージ貼付位置

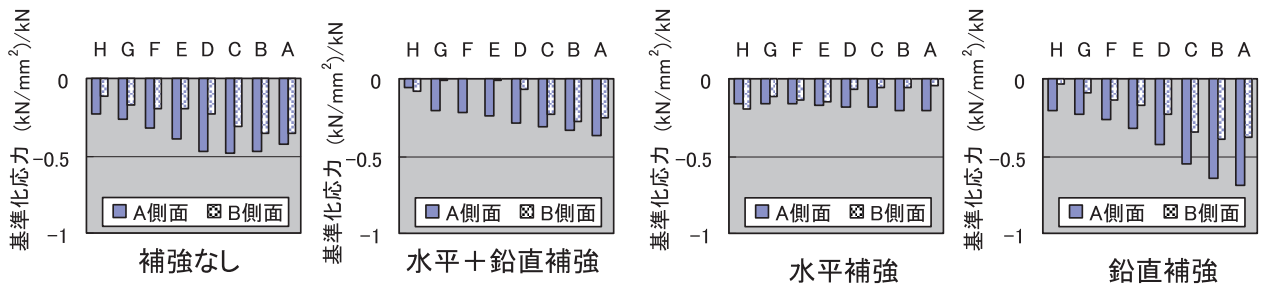


Fig. 17 Stress of the Web Plate without Reinforcement.
偏心がない場合のフランジ直下の基準化応力

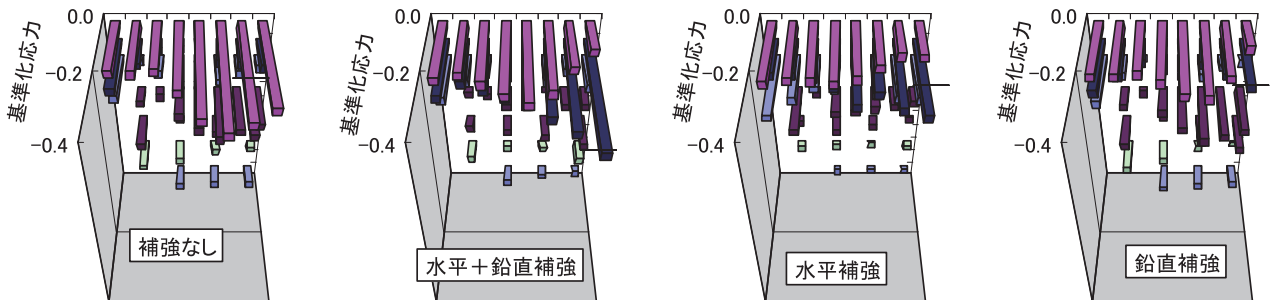


Fig. 18 Stress of the Web Plate without Reinforcement.
偏心がない場合の腹板の基準化応力 (フランジ直下は含まない)

も、偏心があることによって腹板の応力が大きくなる
ことが分かる。それぞれの最大応力をそれぞれの偏心なし
と比較すると、「補強なし」では1.1倍、「水平+鉛直補強」
では1.4倍、「水平補強」では1.1倍、「鉛直補強」では0.8倍

となった。この結果によれば、横断方向のジャッキのバ
ルブを閉めた場合においては応力の増加を一定割合以下
に抑えられているが、このような使用方法を推奨してい
る訳ではない。基本は、履带式駆動装置と橋桁の偏心が

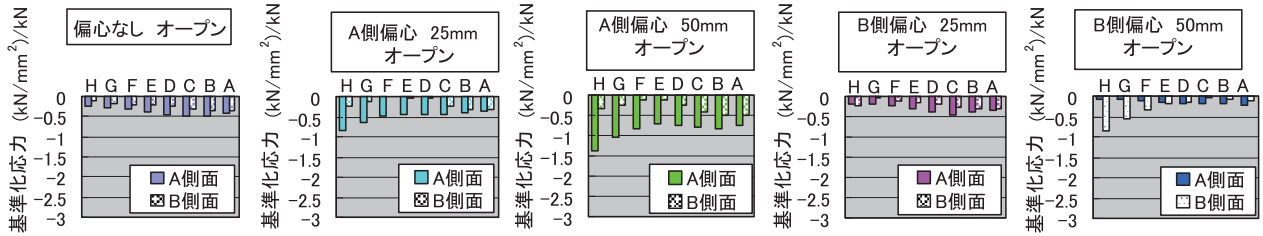


Fig. 19 Stress of the Web Plate without Reinforcement (valve open).
「補強なし」(バルブ: オープン)

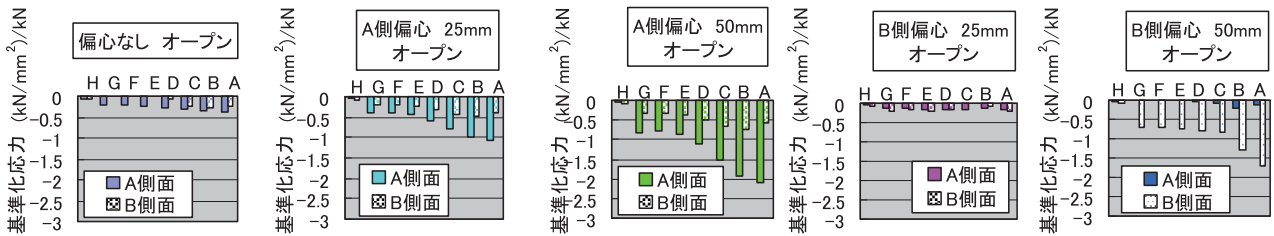


Fig. 20 Stress of the Web Plate with Horizontal and Vertical Reinforcement (valve open).
「水平+鉛直補強」(バルブ: オープン)

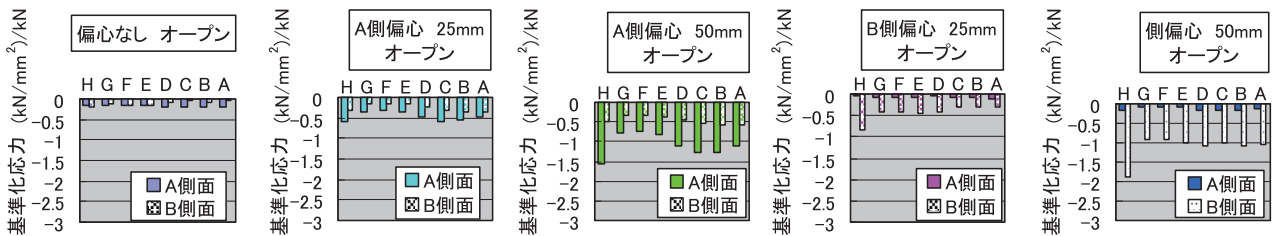


Fig. 21 Stress of the Web Plate with Horizontal Reinforcement (valve open).
「水平補強」(バルブ: オープン)

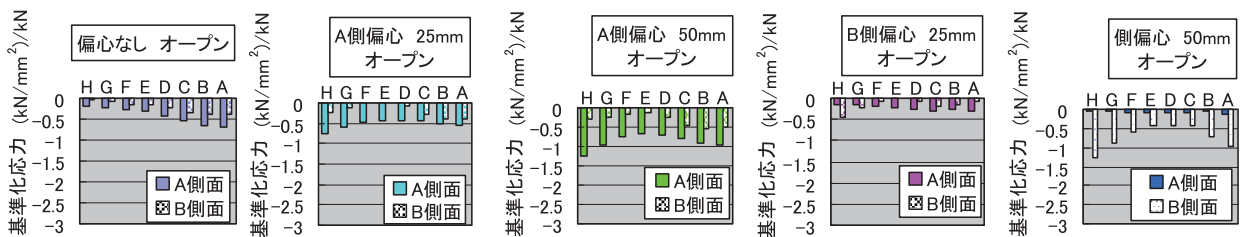


Fig. 22 Stress of the Web Plate with Vertical Reinforcement (valve open).
「鉛直補強」(バルブ: オープン)

無いように管理すべきである。

最後に、偏心の影響を定量的にTable 3, Table 4及びTable 5に示す。Table 3には、各種の補強が施された橋桁で、各偏心状況下で発生した基準化応力の値を示す。

Table 4には、「補強なし」橋桁で、偏心が無い状態を基本として、その状態で発生した最大の基準化応力に対する、各種の補強が施された橋桁の各偏心条件下で発生した最大の基準化応力の割合を示した。Table 5には、各

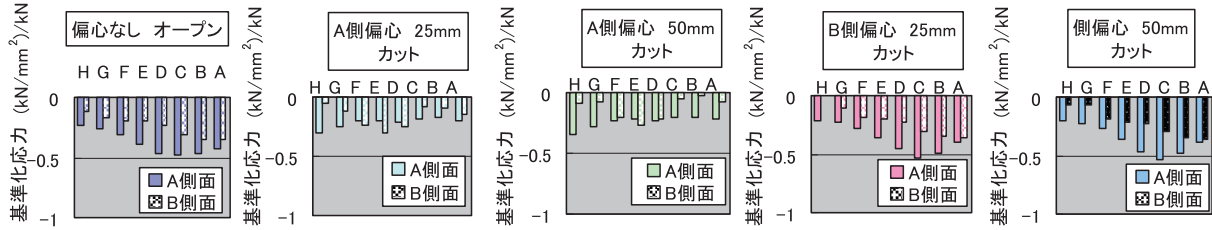


Fig. 23 Stress of the Web Plate without Reinforcement (valve cut). 「補強なし」(バルブ:カット)

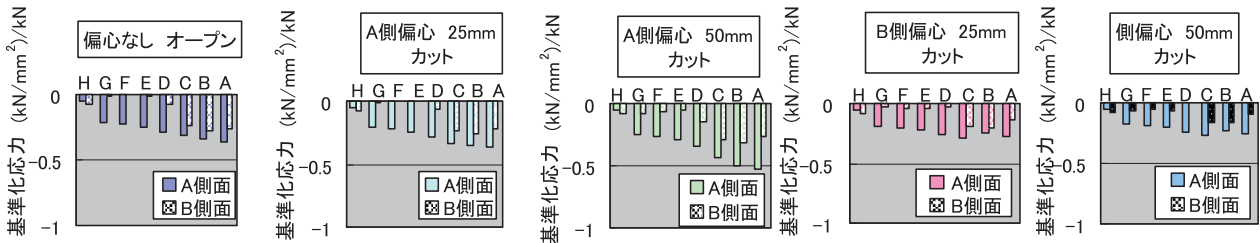


Fig. 24 Stress of the Web Plate with Horizontal and Vertical Reinforcement (valve open). 「水平+鉛直補強」(バルブ:カット)

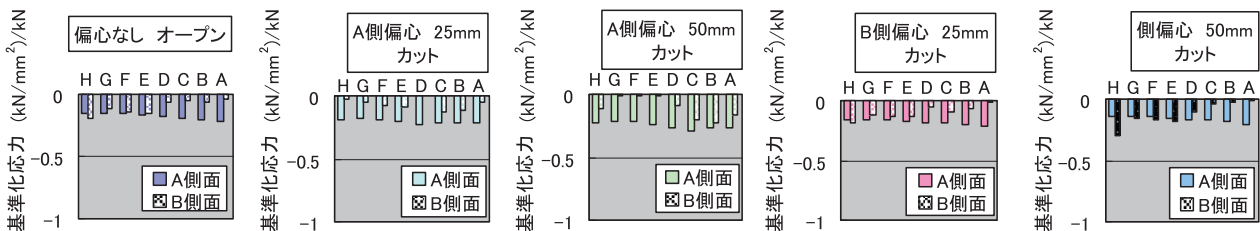


Fig. 25 Stress of the Web Plate with Horizontal Reinforcement (valve open). 「水平補強」(バルブ:カット)

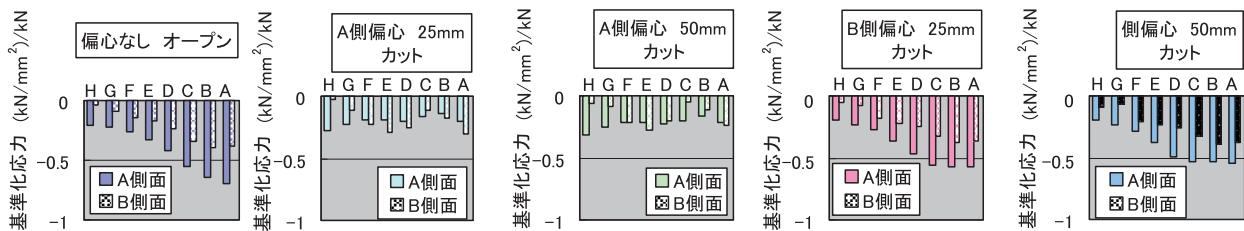


Fig. 26 Stress of the Web Plate with Vertical Reinforcement (valve open). 「鉛直補強」(バルブ:カット)

種の補強が施された橋桁で、偏心が無い状態を基本として、その状態で発生した最大の基準化応力に対する、同一補強が施された橋桁の各偏心条件下で発生した最大の基準化応力の割合を示した。

Table 4, Table 5に関しては、A側偏心の実験とB側偏心の実験で、基準化応力が大きかった方を代表とした。殆どの条件においてフランジ直下の腹板の応力が最大となるが、幾つかの条件においては、フランジ直下ではなく、2段目あるいは3段目の応力が最大となることがあった。Table 3～Table 5は、これらを含んだ最大の基準化応力の値を用いたものである。

Fig. 27～Fig. 30に腹板全体の基準化応力を示す。

3.4 補強種別による橋桁の最大耐力

強度が不足していると予測される橋桁の代表的な補強方法はFig. 15に示した通りである。これまでは、補強方法の違いが腹板の弾性応力特性に及ぼす影響を示した。ここでは、それらの補強方法の違いが橋桁腹板の耐力に及ぼす影響を実験的に明らかにする。実験の加力方法は、載荷荷重を徐々に増加させていき、荷重が上がらなくなった段階で加力を中止した。この時の荷重を最大耐力であると定義した。加力中は、加力点である上部フランジの鉛直変位の他、下部フランジの鉛直変位を計測した。

最大耐力の一覧をTable 6に示す。それぞれの補強方法によって、効果の程度は異なるものの、最低でも15%の耐力上昇が確認された。

Fig. 31に各補強方法による荷重と局部変形の関係を示す。図中横軸の局部変形とは、上部フランジの鉛直変位と下部フランジの鉛直変位の差分とした。

破壊形式は、全ての試験体に共通しており、最大耐力後には変形が急激に進行した。特に、水平補強材が含まれるものは、最大耐力後に急激に耐力が低下していることが確認された。

Photo. 1及びPhoto. 2に最大耐力時の変形状況を示す。Photo. 2より、フランジの変形が顕著であるのに対して、水平補強材はほとんど変形していない。このことから、損傷はフランジと水平補強材の間に集中していることが分かる。また、Photo. 1では、変形の集中度に関して断定することはできないが、これまでに示した腹板の応力分布から、Photo. 2同様に上端のフランジ近傍に集中していることが推測される。

Photo. 3に「補強なし」試験体において、最大耐力以降にさらに過大な変形を与えた場合の破壊状況を示す。これにより、履带式駆動装置近傍の腹板が円弧状に座屈することが分かった。この破壊形式によって、今回の実験で確認した補強方法はいずれも、この座屈した周辺の腹板を補強するものであり、補強方法の妥当性が確認で

Table 3 Maximum Normalized Stress.
最大基準化応力

バルブの開閉状況	偏心の状況	橋桁の補強種別			
		補強なし	水平+鉛直補強	水平補強	鉛直補強
オープン	偏心なし	-0.49	-0.37	-0.26	-0.69
	A側 25mm	-0.83	-1.08	-0.60	-0.76
	B側 25mm	-0.44	-0.29	-0.83	-0.44
	A側 50mm	-1.38	-2.10	-1.57	-1.23
カット	B側 50mm	-0.86	-1.70	-1.88	-1.26
	A側 25mm	-0.39	-0.36	-0.25	-0.37
	B側 25mm	-0.54	-0.32	-0.25	-0.57
	A側 50mm	-0.41	-0.52	-0.29	-0.39
	B側 50mm	-0.54	-0.30	-0.29	-0.55

Table 4 Ratio of Stresses.
基準化応力の比率 (対「補強なし」
かつ偏心なし)

バルブの開閉状況	偏心の状況	橋桁の補強種別			
		補強なし	水平+鉛直補強	水平補強	鉛直補強
オープン	偏心なし	100%	75%	54%	143%
	25mm	171%	221%	171%	156%
	50mm	283%	433%	387%	259%
カット	25mm	110%	74%	52%	117%
	50mm	111%	107%	60%	112%

Table 5 Ratio of Stresses.
基準化応力の比率 (対偏心なし)

バルブの開閉状況	偏心の状況	橋桁の補強種別			
		補強なし	水平+鉛直補強	水平補強	鉛直補強
オープン	偏心なし	100%	100%	100%	100%
	25mm	171%	294%	316%	109%
	50mm	283%	575%	717%	181%
カット	25mm	110%	99%	96%	82%
	50mm	111%	142%	111%	79%

Table 6 Maximum Strength.
最大耐力の比較

補強形式	最大耐力
補強なし	1115kN (100%)
水平+鉛直補強	1397kN (125%)
水平補強	1357kN (122%)
鉛直補強	1282kN (115%)

きた。

3.5 傾斜部の影響

橋桁部材の継手部分は高力ボルト接合とされることが少なくない。この場合には、フランジ部分もボルト接合とされるため、履带式駆動装置との接触面が、平坦ではなくなるため、履带式駆動装置の使用が困難になる。そのため、金属製のティーパを使用して、その部分を乗り越える対策が一般的に採用されている。その時の腹板に作用する影響を確認するための実験を実施した。使用した橋桁モデルのスパンは9mとし、履带式駆動装置はA社製の物を用いた。腹板のゲージ貼付位置はFig. 3 (b)と同じとした。通常そのような接合部の近傍には、鉛直補剛材が設置されるが、本実験では、ティーパの影響を

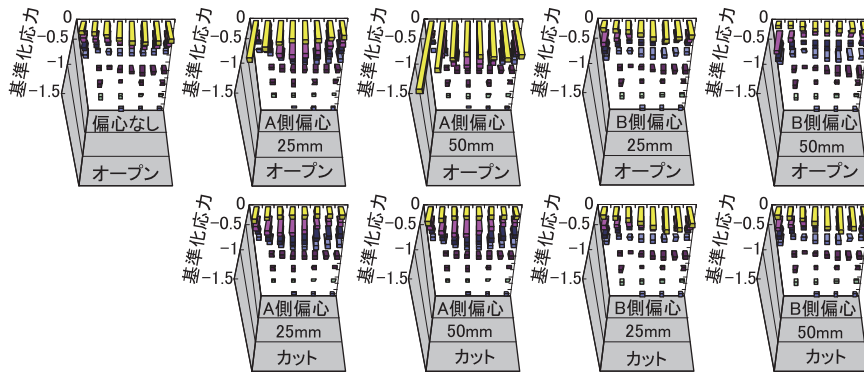


Fig. 27 Distribution of the Normalized Stress (without Reinforcement).
腹板の基準化応力 (「補強なし」)

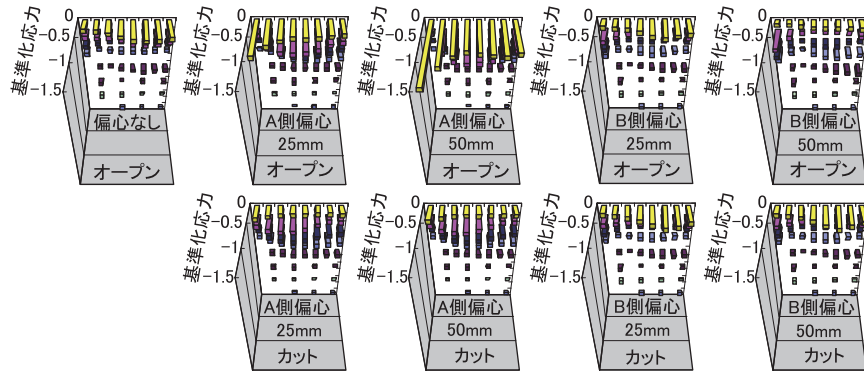


Fig. 28 Distribution of the Normalized Stress (with Horizontal and Vertical Reinforcement).
腹板の基準化応力 (「水平+鉛直補強」)

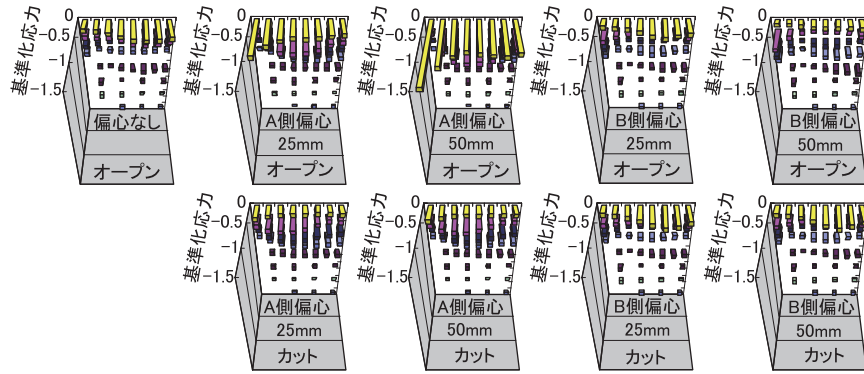


Fig. 29 Distribution of the Normalized Stress (with Horizontal Reinforcement).
腹板の基準化応力 (「水平補強」)

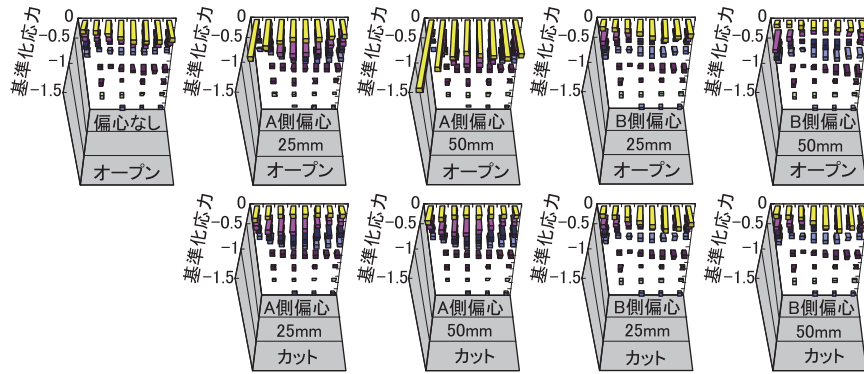


Fig. 30 Distribution of the Normalized Stress (with Vertical Reinforcement).
腹板の基準化応力 (「鉛直補強」)

最も顕著となるようにするため、鉛直補剛材が無い部分で行なった。

ティーパと履带式駆動装置の関係と、その時の腹板の基準化応力をFig. 32に示す。また、腹板に発生した最大の基準化応力をTable 7に示す。それぞれ、ティーパを使用しない場合の腹板の基準化応力と比較して示してある。これらの結果より、ティーパを使用することによって、最大基準化応力が30%以上、増大することが確認された。ティーパが履带式駆動装置の真下あるいは右端にある時には、ティーパが無い場合と比較して、鉛直補剛材の中央で、フランジ直下の応力が増大しており、その他の部位の応力は、同等あるいは減少している。これに対して、ティーパが履带式駆動装置の左端にある場合には、ティーパが無い場合と比較して、鉛直補剛材に近い側の応力が増大し、鉛直補剛材の中央でフランジ直下の応力は減少し、他の条件とは異なる応力特性となった。

4. まとめ

1. 送り出し作業中に履带式駆動装置が、鉛直補剛材が有る部分に接している場合よりも鉛直補剛材が無い部分に接している場合の方が腹板の応力は大きくなった。そのため、作業時荷重による影響に対して特に配慮しなくてはならないのは、鉛直補剛材が無い部分が履带式駆動装置上を通過する時であることが分かった。
2. 送り出し作業中に履带式駆動装置が接する部分の腹板の応力は大きくなるが、その範囲は装置から下方0.45m程度の範囲であり、それよりも離れた部位における応力は大きくはなかった。
3. 履带式駆動装置と橋桁に偏心がある場合には、橋桁の腹板の応力が著しく大きくなることが分かった。特に送出し装置を誤った使い方をしてしまった場合に

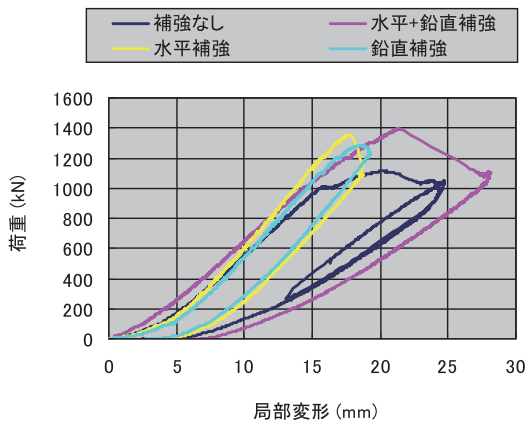


Fig. 31 Load-Deformation Curve.
荷重-局所変形関係

は、偏心が無い場合に比べて最大で2倍程度に応力が上昇した。送出し装置を正規の使用方法で使用した場合においても、腹板の応力は1.2倍程度に増大した。

4. 施工時荷重用の補強効果を確認するための実験によって、補強方法による効果の差を確認した。その結果、今回確認した補強方法によれば最低でも15%の耐力上昇が確認でき、最大で25%の耐力上昇が確認できた。
5. 破壊に至るまでの実験から、橋桁の破壊形状は、履带式駆動装置近傍の腹板の座屈によることが確認できた。同時に、その近傍を補強する補強方法の妥当性が確認できた。
6. 橋桁の継手部等においては、橋桁と履带式駆動装置の接触面にティーパを介することが一般的であるが、その場合には腹板の応力が30%以上、上昇することが分かった。

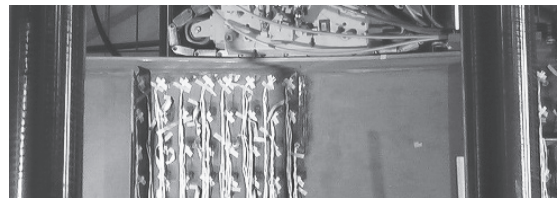


Photo.1 Destruction situation
(without reinforcement).
「補強なし」の最大耐力時破壊状況

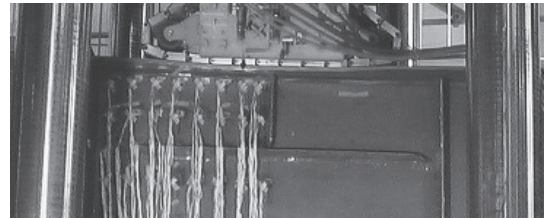


Photo.2 Destruction situation
(horizontal + vertical reinforcement).
「水平+鉛直補強」の最大耐力時破壊状況



Photo.3 Destruction situation
(Excessive deformation).
無補強部の最大耐力以降の過大変形状況

参考文献

- 1) わかりやすい鋼橋の架設Ⅱ－施工計画へのアプローチ, (社)日本橋梁建設協会
- 2) Shigeru Shimizu, Shigenori Horii, Shunya Yoshida, The Collapse Mechanisms of Patch Loaded Web Plates, J.Construct. Steel Research 14 (1989) 321-337
- 3) Shigeru Shimizu, The Collapse Behavior of Web Plates on the Launching Shoe, J.Construct. Steel Research 31 (1994) 59-72
- 4) 清水茂, 吉川, 送り支承上の腹板の座屈係数推定式, 鋼構造論文集, 第6巻第24号 (1999年12月)
(平成20年12月8日受理)

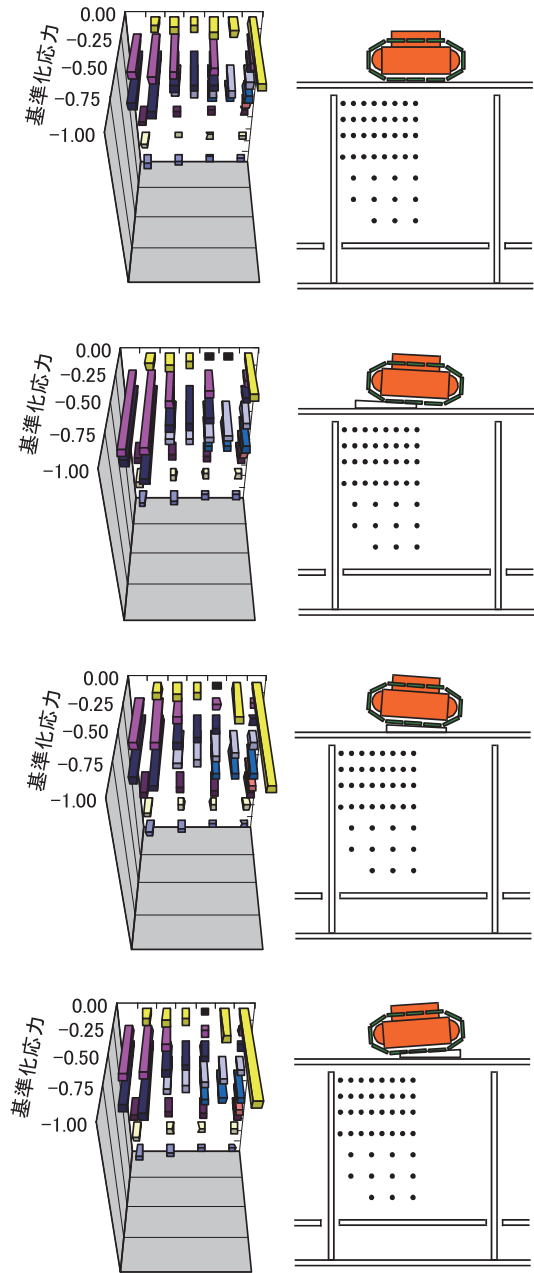


Fig. 32 Effect of slope on stress of bridge girder.
ティーパが橋桁の応力に及ぼす影響

Table 7 Maximum Normalized Strength.
最大の基準化応力一覧 ((kN/mm²)/kN)
ティーパの影響

ティーパの位置	基準化応力	
なし	-0.61	(100%)
右端	-0.79	(130%)
中央	-0.88	(145%)
左端	-0.81	(133%)