

並列連続曲線 I 桁の横ねじれ座屈に起因する終局強度特性と 終局強度に至るまでの非線形挙動に関する研究

橋梁工学分野 上野 慶太

1. まえがき

都市内の道路橋は、様々な平面線形の制約から、並列連続曲線 I 桁橋がしばしば用いられる。曲線 I 桁橋では、主桁の曲率に起因する、ねじれ変形を伴う横ねじれ座屈の発生が懸念される。しかし、我が国の道路橋示方書¹⁾には、曲線 I 桁の横ねじれ座屈に関して明確な規準が存在せず、その設計においては、直線 I 桁の横ねじれ座屈強度を準用しているのが現状である。

このような状況から、曲線 I 桁の横ねじれ座屈に関する様々な研究が行われてきたが、それらの多くは、桁全体から主桁 1 本、もしくは横桁、対傾構、および横構などで拘束されたパネルの一部を取り出した部分モデルを対象としたものがほとんどである。さらに、端部の境界条件には、単純支持あるいは固定支持といった理想的な境界条件を採用しており、実際の曲線 I 桁橋の横ねじれ座屈挙動を忠実に再現しているとは言い難い。本研究では、実際の曲線 I 桁橋の横ねじれ座屈特性を明確するために、3 本の主桁を有する 3 径間連続曲線 I 桁橋を対象とし、1 本主桁モデルと 3 本主桁モデルを作成して弾塑性有限変位解析を行う。特に、曲線 I 桁の中心角 ϕ と上フランジの幅厚比パラメータ R_{os} とを変化させて、横ねじれ座屈モードと横ねじれ座屈耐荷力とに着目する。最終的には、これらの解析結果を基に、曲線 I 桁橋の横ねじれ座屈耐荷力算定のための簡易モデルを提案し、その適用性を確認して、簡易モデルによる横ねじれ座屈耐荷力曲線を描く。なお、解析には、既開発の弾塑性有限変位解析プログラム、USSP を用いる。

2. 解析モデル

2.1 対象とする解析モデル

対象とする曲線 I 桁は、載荷実験用に製作された実橋の 5 分の 1 モデルである。図-2.1 に示す中央径間 L_1 (4,500mm) で側径間 L_2 (4,200mm) の 3 本の主桁を有する 3 径間連続曲線 I 桁とする。解析モデルを図-2.2 に示す。外桁 1 本を取り出し、モデル化したものを 1 本主桁モデル、対象の曲線 I 桁全体をモデル化したものを 3 本主桁モデルとする。両解析モデルにおいては、横ねじれ座屈を起こしやすくするために、あえて横構を考慮していない。また、解析では対称性を考慮し、着目する 3 径間連続曲線 I 桁の半分のみ (1.5 径間) を

解析対象とする。なお、3 本主桁モデルの解析は、282,882 自由度と大規模な解析となるので、日本原子力研究所の超並列計算機システム (MPP システム) を使用した。

2.2 材料定数と初期不整

解析で用いた鋼の材料定数を表-1.1 に示す。これらの値は、材料試験結果に基づいている。また、解析に用いた応力とひずみとの関係は、完全弾塑性を仮定している。

表-1.1 主桁および横桁の材料定数

主桁・横桁	σ_y (N/mm ²)	E (N/mm ²)	ν
フランジ	288.6	1.86×10^5	0.3
ウェブ	253.3	1.96×10^5	0.3

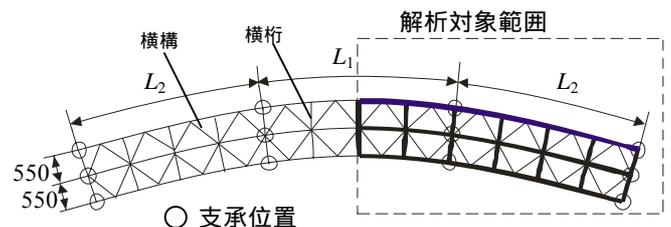
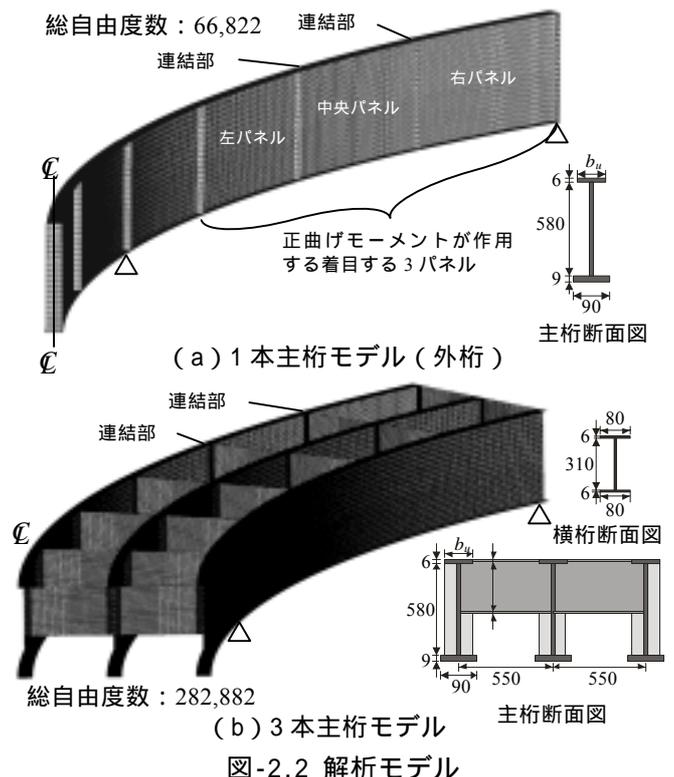


図-2.1 対象とする 3 本主桁の 3 径間連続曲線 I 桁



総自由度数：66,822

総自由度数：282,882

図-2.2 解析モデル

本解析で用いた4種類の初期たわみを図-2.3(a)~(d)に示す。それぞれ、順番に単純モード、固定モード、単純ねじりモード、および固定ねじりモードの初期たわみと呼ぶ。また、変位の大きさは、道路橋示方書¹⁾で定められている一般的な製作許容値を基に設定している。なお、残留応力を考慮する場合は、I桁断面の残留応力分布を図-2.4のように想定し、解析には、同図(b)に示すような簡素化した矩形分布を用いた。

2.3 荷条件と境界条件

荷条件は、図-2.5に示す架設時の死荷重を想定した等分布荷重とする。3本主桁モデルにおいては、各主桁の反力の影響線から得られる荷重を算出し、図-2.6に示すように、その荷重の割合でそれぞれの主桁に漸増荷重させる。次に、両モデルの境界条件をそれぞれ図-2.7に示す。なお、解析上の制約から面内回転はすべて拘束するものとする。さらに、桁断面における拘束は、橋軸方向をx軸とした局所座標系を用いて設定した。

2.4 解析ケース

解析ケースを表-2.1に示す。解析ケースは、上フランジの幅厚比パラメータ R_{os} を0.29, 0.36, および0.39の3ケースとし、曲線I桁の中心角 ϕ を(直線)~0.131(rad)の間で変化させた。さらに、4種類の初期たわみと残留応力を考慮したものと考慮していないもの2種類を設定した。ただし、1本主桁モデルの解析結果より、単純モード初期たわみで残留応力を考慮した場合の耐荷力がもっとも小さいことから、3本主桁モデルでは、このケースのみを対象としている。なお、解析ケース名の付け方を注釈に示す。

ルでは、このケースのみを対象としている。なお、解析ケース名の付け方を注釈に示す。

3. 解析結果

3.1 横ねじれ座屈モード

図-3.1に中井ら²⁾の研究により得られた想定される一般的な横ねじれ座屈モードを示す。

曲線I桁の横ねじれ座屈モードを調べるために、正曲げモーメントが大きく作用する側径間の右側3パネルに着目し、その水平変位の変形状況を図-3.2に示す。縦軸は橋軸直角方向の水平変位を示している。ここで、横ねじれ座屈モードを数値的に評価するために、座屈モード指数、Lateral torsional Buckling Index (L.B.I.)を式(1)のように定義する。L.B.I.が1.0に近いほど単純座屈モードとなり、0に近いほど固定座屈モードとなる。各記号は、図中に示す。

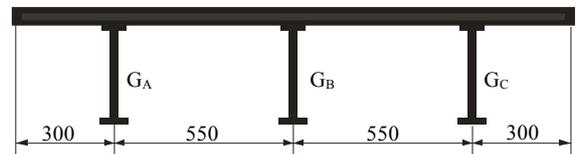


図-2.5 想定する死荷重

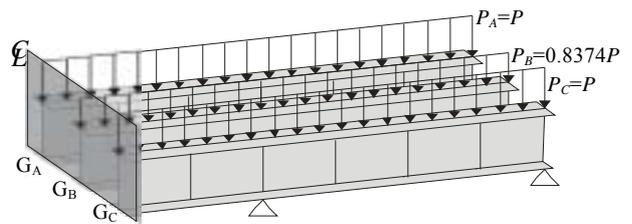
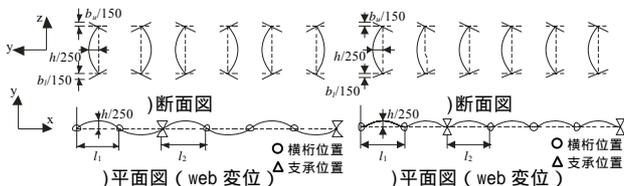
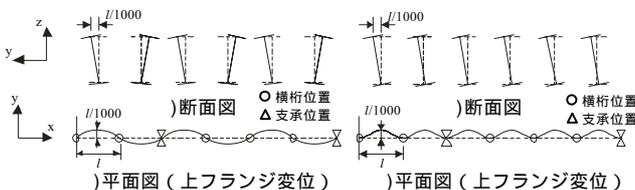


図-2.6 荷状況



(a) 単純モード

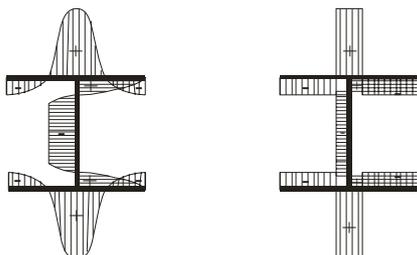
(b) 固定モード



(c) 単純ねじりモード

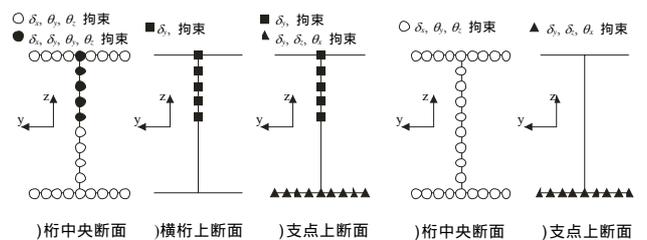
(d) 固定ねじりモード

図-2.3 初期たわみの種類



(a) 残留応力モデル (b) 解析用残留応力

図-2.4 残留応力分布図



(a) 1本主桁モデル

(b) 3本主桁モデル

図-2.7 各断面の境界条件

表-2.1 解析ケース

中心角 ϕ (rad)	曲率半径 R (m)	上フランジ幅 bu (mm)	初期たわみ	残留応力
0.131(131)	8	60(6) 70(7) 80(8)	単純モード(S) 固定モード(F) 単純ねじりモード(SR) 固定ねじりモード(FR)	考慮する(RS) 考慮しない(NS)
0.105(105)	10			
0.088(088)	12			
0.070(070)	15			
0.053(053)	20			
0.035(035)	30			
0.018(018)	60			
0.011(011)	100			
0.009(009)	120			
0.006(006)	180			
0.000(000)				

□は、3本主桁モデルで考慮した解析ケース

(注釈) 表中の()内は解析ケース名。

C(上フランジ幅) - (中心角) - (初期たわみ) - (残留応力)

(例) C7 131 FR RS

$$L.B.I._k = \frac{\theta_i}{\theta_{2k}} \quad (i=1,3 \quad k=L,R) \quad (1)$$

座屈モード指標 $L.B.I.$ と中心角 ϕ との関係を上フランジ幅ごとに図-3.3 に示す。1 本主桁モデル(1G)の場合、中心角が大きくなるとほぼ一定の割合で $L.B.I.$ が小さくなる傾向がある。また、残留応力を考慮しない(NS)のほうが、 $L.B.I.$ の数値が小さい。一方、3 本主桁モデル(3G)では、中心角が 0.02(rad)以上でほとんどゼロに近い値を示している。さらに、直線 I 桁でも 0.8 程度と単純座屈モードを示す 1.0 には届かない。これより、横桁の拘束が主桁の横ねじれ座屈挙動に与える影響は大きく、中心角の大きさに関わらず、固定座屈モードが発生しやすいことがわかる。なお、幅厚比パラメータと横ねじれ座屈モードとの相関もあまり認められない。

3.2 横ねじれ座屈耐荷力

解析で得られた横ねじれ座屈耐荷力を上フランジ幅ごとに図-3.4 に示す。縦軸に終局曲げモーメントを降伏曲げモーメントで除して無次元化した耐荷力 M_u/M_y をとり、横軸に中心角 ϕ をとる。また、単純ねじりモード初期たわみで残留応力を考慮したケースと 4 章で検討する簡易モデルの結果も同時に示す。これらの図より、両モデルの場合も中心角が大きくなるにしたがって、耐荷力が低下する傾向があるが、3 本主桁モデルによる耐荷力は、1 本主桁モデルの解析結果、道路橋示方書の耐荷力、および中井らの研究²⁾により得られた耐荷力よりもかなり大きく、3 本主桁モデルによる耐荷力は、1 本主桁モデルのそれよりも 12.5% ~ 48.9% 増加している。これらの傾向は、幅厚比パラメータ R_{os} が異なっても同様である。

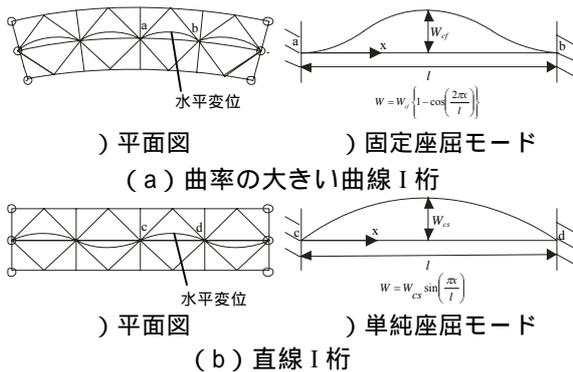


図-3.1 一般的な横ねじれ座屈モード

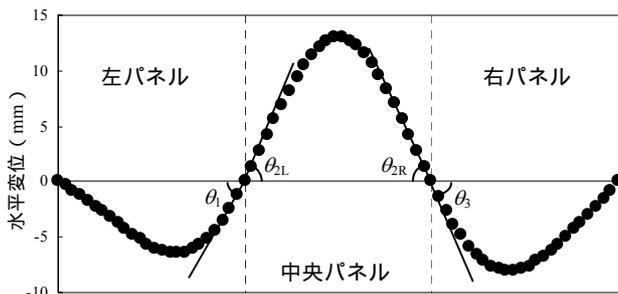


図-3.2 $L.B.I.$ の定義

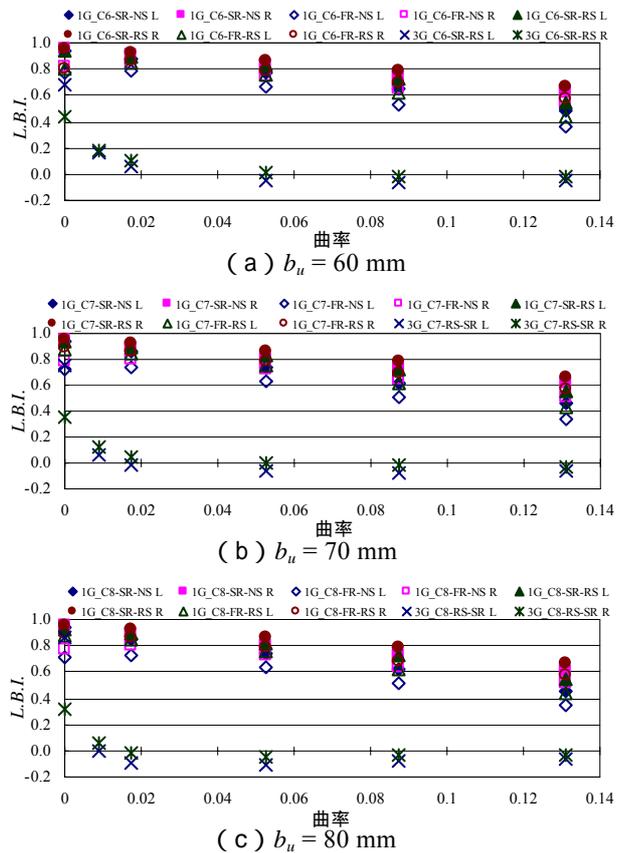


図-3.3 座屈モード指数 $L.B.I.$

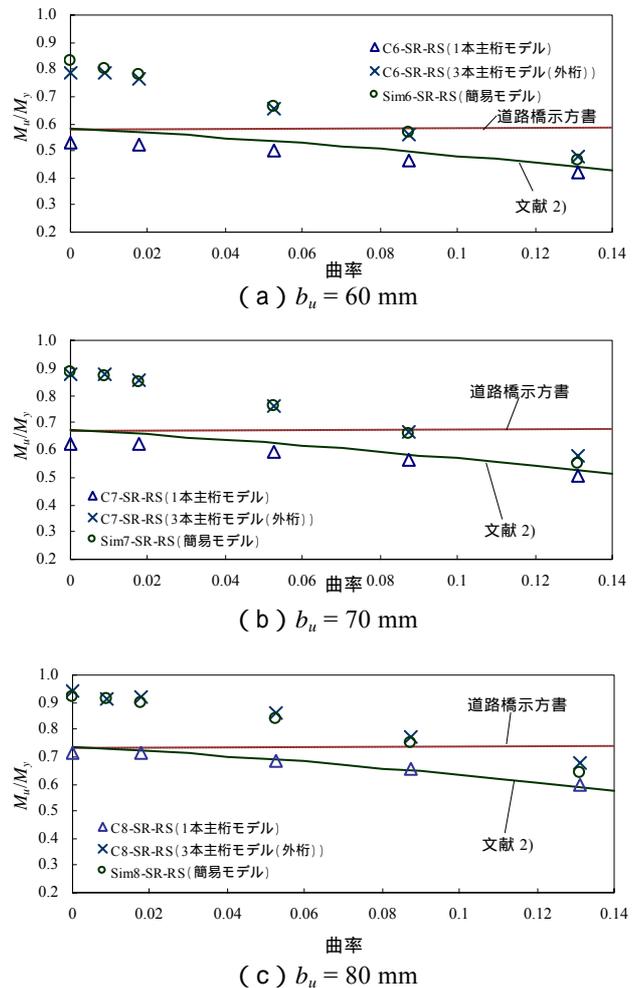


図-3.4 横ねじれ座屈耐荷力

このような耐力増加の原因として、まず、横桁による主桁と横桁連結部の回転拘束による横ねじれ座屈モードの固定座屈モード化が挙げられる。図-2.1に示した主桁と横桁の連結部、の回転角を1本主桁モデルと3本主桁モデルのそれぞれの場合で調べ、横軸に回転角、縦軸に荷重ステップをとり、C7-131-RS-SRとC7-000-RS-SRのケースをそれぞれ図-3.5に示す。同図では、終局時のステップを1.0としている。1本主桁モデルの場合、どちらの場合も0.4付近になると回転し始めるが、3本主桁モデルの場合、全く回転が見られない。このことから、実際の曲線I桁橋では、横桁設置位置で主桁は鉛直軸方向の回転が拘束され、固定座屈モードになりやすい。

また、図-3.6に示すように、1本主桁モデルと3本

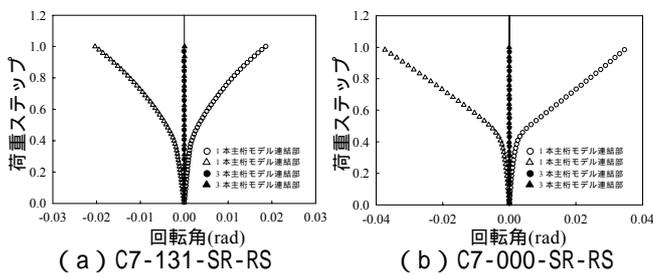


図-3.5 主桁と横桁の連結部の回転角

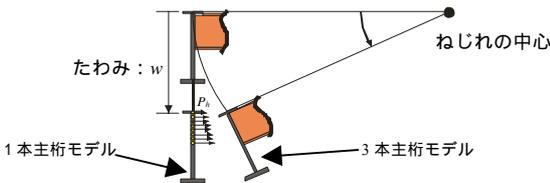


図-3.6 モデルによる曲線I桁のたわみの違い

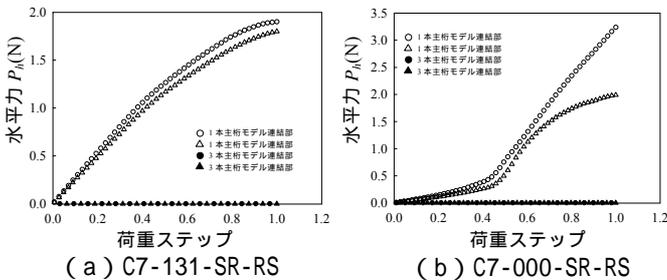


図-3.7 連結部に発生する水平力

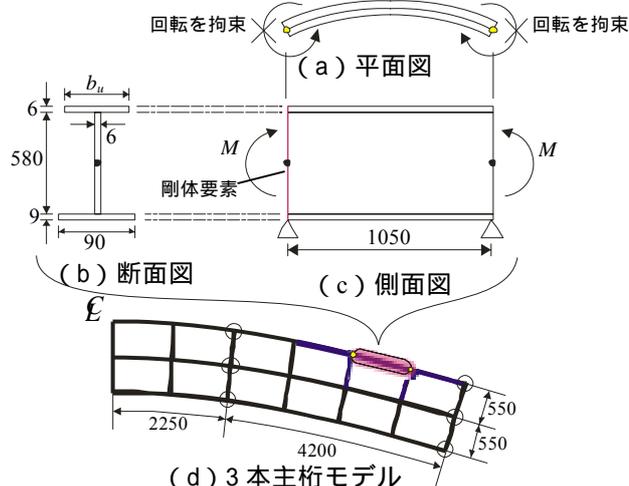


図-4.1 簡易モデルの適用 (単位: mm)

主桁モデルではたわみ波形が異なる。1本主桁モデルでは、横桁位置の橋軸直角方向の変位を拘束しているため水平力 P_h が発生する。しかし、3本主桁モデルでは、橋全体が回転するため水平力が発生しない。これらが、横ねじれ座屈モードや耐力にも影響していると考えられる。両モデルにおける水平力 P_h と荷重ステップの関係を図-3.7に示す。

4. 簡易モデルによる横ねじれ座屈耐力

これまで得られた解析結果を基に、実橋梁の横ねじれ座屈耐力算定のための簡易モデルを提案する。簡易モデルは、図-4.1に示すように、1パネルを取り出し、モデル全体に等曲げモーメントを作用させる。また、パネル端部では、鉛直軸方向の回転と橋軸直角方向の変位を拘束した固定支持条件とする。

解析結果を図-3.4に示す。同図より、簡易モデルによる耐力は、3本主桁モデルで得られた耐力とほぼ同じであることが確認できる。このことから、提案した簡易モデルと実曲線I桁での桁の挙動とはほぼ同様と考えられ、この簡易モデルを横ねじれ座屈耐力に対する、より合理的な設計に使用することができる。

5. まとめ

本研究により、得られた結果を以下に示す。

- 1) 3本主桁モデルの解析により、主桁と横桁の連結部で横桁が主桁のそり変形を拘束する力は大きく、横ねじれ座屈モードが固定座屈モードとなる傾向があることがわかった。
- 2) 3本主桁モデルの解析による耐力は、1本主桁モデルで得られた耐力よりも大きい。これは、横ねじれ座屈モードが固定座屈モードとなる傾向と、曲線I桁全体のたわみ波形の影響により、主桁と横桁との連結部に水平力が作用しないことが考えられる。
- 3) 3本主桁モデルの解析結果から、主桁のそりに対して、桁端部を固定支持とした簡易モデルを提案した。その結果、3本主桁モデルで得た耐力とほぼ等しいものとなった。これより、この簡易モデルを用いて、実際の横ねじれ座屈耐力に対して、より合理的な設計が可能である。
- 4) 今後の課題として、横ねじれ座屈パラメータや径間比、横桁の剛性などの各種パラメータを変えて追加解析を行い、今回得られた結果の適用性を検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 鋼橋編・丸善, 2002
- 2) Hiroshi NAKAI, Hisao KOTOGUCHI: A Study on Lateral Buckling Strength and Design Aid for Horizontally Curved I-Girder Bridges, Proc. of JSCE, No.339, pp.195-205, Nov.1983.