

## (47) 外ケーブルを用いた単純箱桁橋の連続化工法における定着部・偏向部の 応力性状と耐久性について

Stress behavior and durability at anchorage and deviator of external cables composite  
box girder bridges after connected simple supported system

江頭 慶三\* 竹原 和夫\*\* 南 敏和\*\*\* 松井 繁之\*\*\*\* 栗田 章光\*\*\*\*\* 宮本 文穂\*\*\*\*\*

Keizo Egashira, Kazuo Takehara, Toshikazu Minami, Shigeyuki Matsui, Akimitsu Kurita, Ayaho Miyamoto

\* (株) ハルテック 技術本部 設計部 (〒551-0020 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

\*\*JIP テクノサイエンス (株) (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 2-12-11)

\*\*\*神鋼鋼線工業 (株) 開発本部 開発部 (〒660-0091 兵庫県尼崎市中浜町 10-1)

\*\*\*\*工博, 大阪大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

\*\*\*\*\*工博, 大阪工業大学 工学部 都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

\*\*\*\*\*工博, 山口大学工学部 知能情報システム工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常磐台 2-16-1)

The retrofitting method of existing simple supported girder bridges to continuous girder bridge system is very useful for decrease of traffic vibration and noise, remission from maintenance of expansion joints, improvement of earthquake resistance and so on. Especially, the longitudinal prestressing by external cables at the intermediate supports with the slab connection and the existing steel box girder connection using steel-concrete composite member, improve the durability of the reinforced concrete slabs and the load-carrying capacity of the steel box girder connection. This paper reports about the continuity method of the box girder connection and the full scale model test results concerning the stress behavior and durability at the anchorage and deviator of external cables in the continued existing simple supported box girder. The test results are compared with the values by FE analysis and discussed.

*Key Words:* external tendon, retrofit to continuous steel box girder, anchorage, deviator

### 1. はじめに

既設鋼上部工の耐震補強として、単純桁橋の主桁相互を橋脚上で連続させる工法がある(本来は伸縮装置を撤去し、走行性の向上と振動・騒音の軽減や維持管理業務の低減を目的としていたことから、ノージョイント工法ともいう)。この工法は鋼I桁で採用されることが一般的であり、代表的な施工例として図-1に示すように、隣接

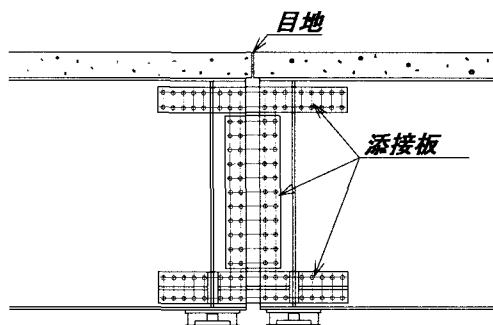


図-1 鋼I桁橋の連結構造例

する相互の主桁腹板だけを添接板で接合する構造がある。しかしながら、適用範囲が限られており、断面積の大きなフランジを有する箱桁橋では添接板断面が大きくなることが予想され、困難を伴うと考えられる。そこで、既設鋼単純箱桁橋を連続化するために、コンクリートを活用した新しい工法を考案し、実験および解析により、その適用性について検討を行った。

なお、このような構造では、主桁は連続するものの、2つの弾性支承で支持され、活荷重作用に対しては完全な連続桁の挙動とは一部異なることから、この部位を連結構造と称することとする。

### 2. 外ケーブルを用いた箱桁橋の連結構造と検討課題

筆者らはこれまでに、図-1に示す鋼I桁の連結構造のさらなる合理化を目的に、外ケーブル補強を併用した工法を提案し、検討を行ってきた<sup>1)</sup>。さらにコンクリートを一部充填する複合構造との組み合わせにより、鋼箱桁橋の連結構造が可能と考え<sup>2,3)</sup>、図-2に示すような単純

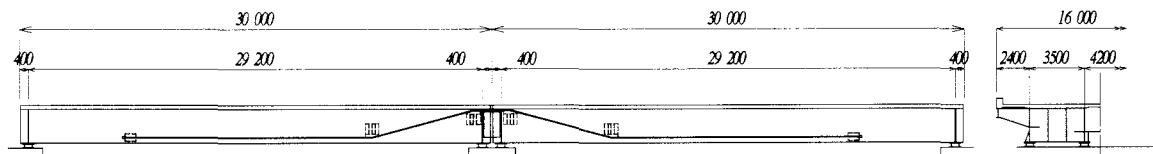
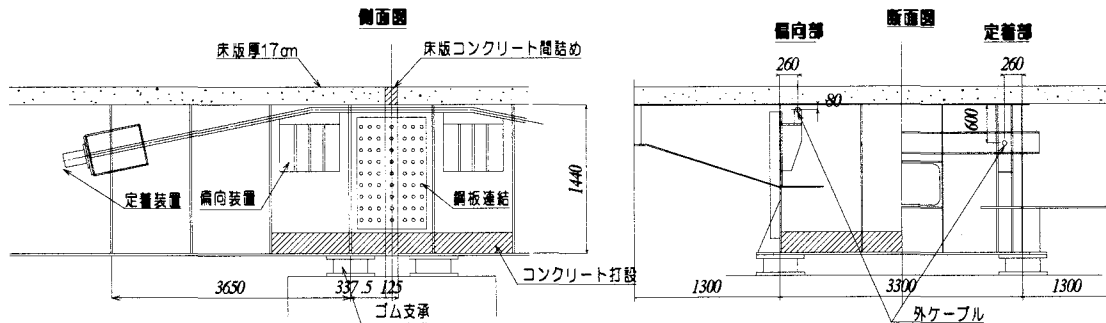
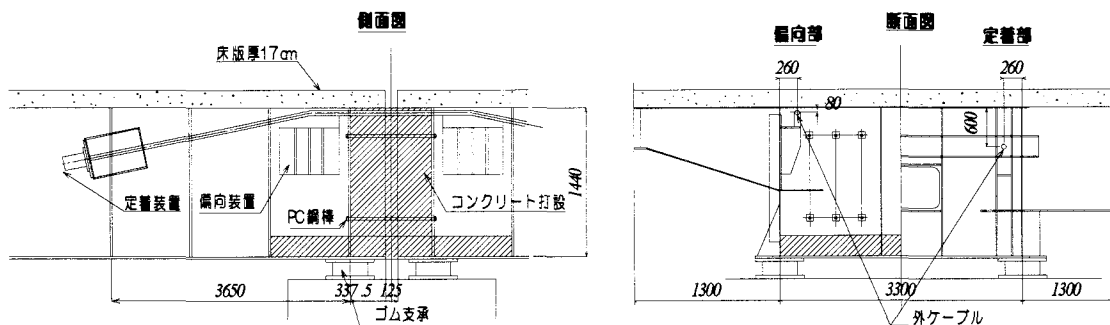


図-2 対象橋梁



a) ウェブ添接・上下床版連結構造



b) コンクリート充填連結構造

図-3 連結構造詳細

合成箱桁橋を検討モデルとして、2つの構造を考案した。

図-3 a) に示すウェブ添接・上下床版連結構造は、桁端部の腹板のみ鋼板を用いてボルト接合し、連結部の下フランジと床版目地部にコンクリートを打設することにより連結するものである。目地部は無筋であるため、外ケーブルによるプレストレスを併用して曲げモーメントに抵抗する構造である。また、下フランジ側にはスタッドが溶植され、コンクリートとその内部の鉄筋により応力の伝達を期待している。

図-3 b) に示すコンクリート充填連結構造は支点上ダイヤフラム間にコンクリートを充填し、その間の鋼桁腹板、支点上ダイヤフラムおよび下フランジに溶植されたスタッドを通して応力伝達を行う構造である。充填されたコンクリートによる応力伝達を確実にすること、およびコンクリートの曲げひび割れに対処するために、外ケーブルと組み合わせて PC 鋼棒 (32φ) を上下段各 6 本ずつ配置し、プレストレスの導入を行っている。

ところで、外ケーブルを配置するために、鋼 I 桁の場合では腹板を挟んで両側に定着用のブラケットやサドルを含む偏向装置ブラケットを配置することができる。箱桁の場合も可能であるが、場合によっては張出側のブ

ラケットや横桁の添接部などが干渉し、箱桁の外側に外ケーブルを配置することが困難な場合がある。そこで図-3 のとおり、箱桁内部のみに外ケーブルを配置する構造とし、主桁腹板に対しては偏心配置とした。また、これらのブラケットは一般的に、施工性を考慮してコンパクトな形状とするために鋼材で構成され、さらに外ケーブルの緊張によりブラケットから主桁に集中的に力が作用するため、腹板には応力集中や局部座屈に備えた補強部材が加えられる<sup>4)</sup>。以上より、上記の構造案における定着部と偏向部およびその周辺部に着目し、ケーブル偏心配置や断面急変による局部応力の影響を調査し、設計に反映すべきであると考えられる。本稿では、これらの影響を実物大の模型実験と FE 解析により調査を行い、各部位の適用性について検討を行う。

### 3. 実験概要

実験は各連結構造の実物大の供試体を製作し、外ケーブルの緊張を行った後に活荷重に相当する荷重を載荷した。連結構造の試設計、載荷実験の詳細、および荷重載荷時の連結構造を含む全体の挙動については、文献 5)

にて別途詳細の報告を行っているので、これを参照されたい。なお、定着部、偏向部周辺の応力性状は各供試体で大きな差は生じなかったため、ここではウェブ添接・上下床版連結構造に着目して概略を紹介する。

### 3.1 実験供試体の概要

ウェブ添接・上下床版連結構造の供試体と荷重載荷状況を図4に示す。外ケーブルはSET260T (7S17.8) を使用し、緊張力は1本当たり1250kNとした。これは試設計により、活荷重載荷時に連結部床版コンクリート上面に引張応力を発生させないよう決定したものである。

また、図4に示すように、定着部側は偏心応力を減少させるために箱桁内部に横梁を設置し、これに外ケーブルを定着する構造とした。さらに箱桁の外側にも補強構造を設置した。そして、この横梁が設置される腹板の上方と偏向部のブラケットが設置される腹板の前後に3軸のひずみゲージを設置した。全て腹板の両面に貼付し、

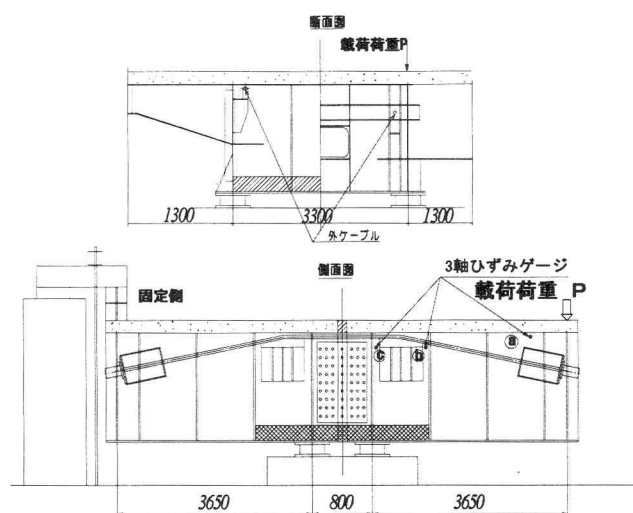


図4 供試体と荷重載荷状況  
(ウェブ添接・上下床版連結構造)

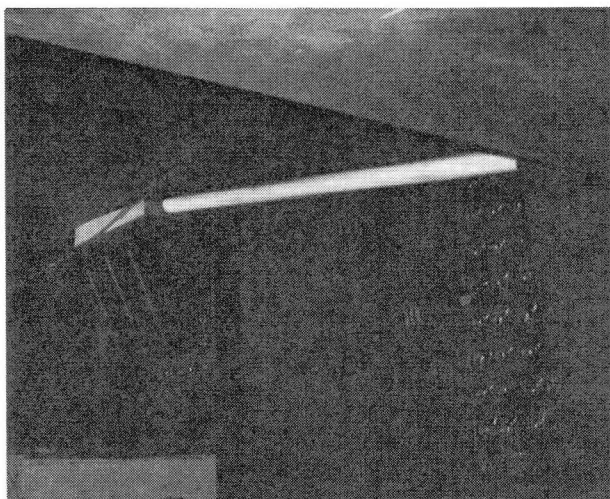


写真-1 偏向部とケーブルおよびサドル  
(MC ナイロン製)

板曲げの影響も測定できるよう配慮した。

偏向部は写真-1のようにブラケットの上方にMCナイロン製のサドルをボルトで固定した。サドルは半径4000mmのR加工が施され、ケーブルとの摩擦係数は0.3程度である。

主桁腹板には水平補剛材を追加し、定着部の局部補強を行った。

### 3.2 外ケーブル緊張と荷重載荷

約800kNまでケーブルを緊張した際、サドルのある部分でケーブルが音を発してすべりが生じる状況が起きた。このことから、ケーブルがうまくサドルの加工面となじんでいなかったことが推測された。なじみの調整もしくは摩擦係数の低減が施工の注意事項と考えられる。

次に、供試体の片側を固定し、反対側の腹板位置にジャッキにより最大650kN(左右両側で合計1300kN)の鉛直荷重を載荷した。

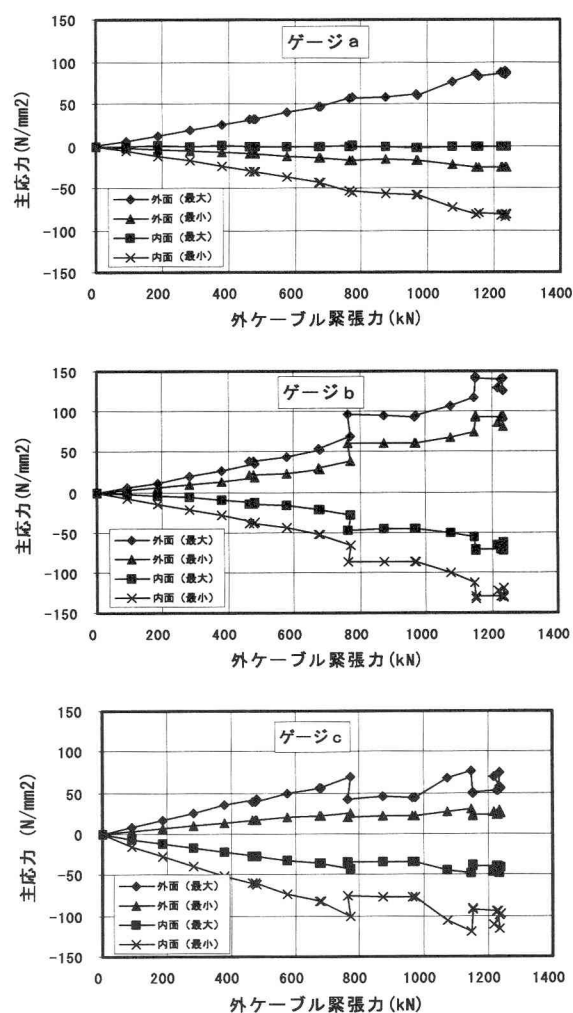


図5 外ケーブル緊張時の計測結果

### 3.3 計測結果

ひずみゲージの名称は定着部側より a, b, c とする。箱桁腹板の内側に貼付されたゲージを内面、外側を外面とする。主応力の計測結果を図-5 に示す。

腹板の表と裏で主応力の符号が逆になり、ほぼ絶対値が等しいことから、局所的な板曲げが発生していると考えられる。また、ゲージ b, c について、ケーブルの軸力が 800kN 付近で急激な変動が生じており、これが偏向部でのすべりによるものと考えられる。

次に荷重載荷時のひずみを図-6 に示す。横軸の載荷荷重は片側の反力計の値であるので、供試体にはこの 2 倍の荷重が載荷されている。ゲージ a の位置では荷重の増加に伴って線形的に応力が増加している。これは主桁作用の応力と考えられる。また、偏向部周りのゲージ b, c の位置では 800kN 載荷時から応力は小さいものの非線形性を示している。これは連結部床版が曲げによりひび割れたことに起因するものであり、腹板が降伏したのではない。

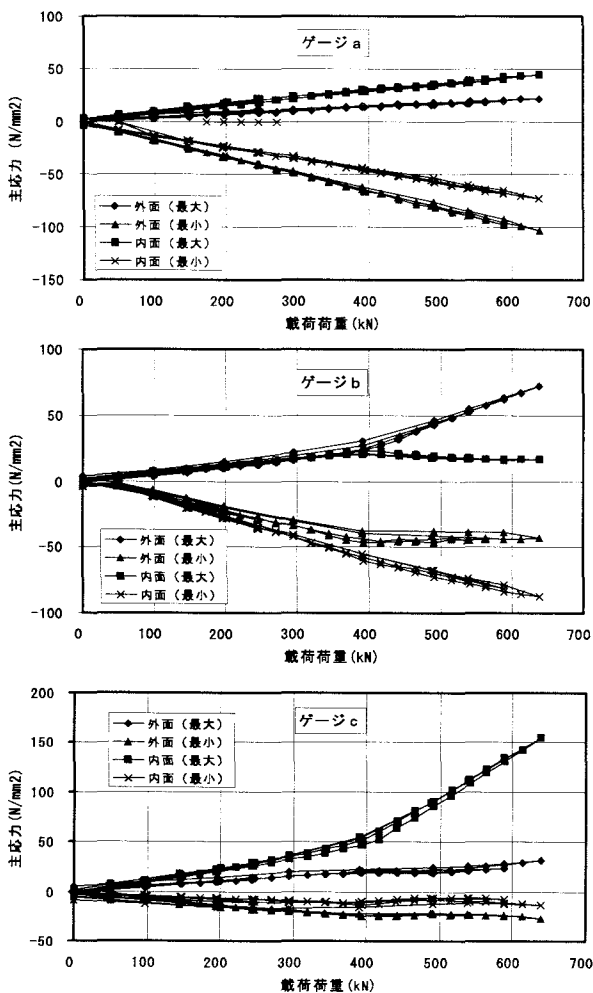


図-6 荷重載荷時の計測結果

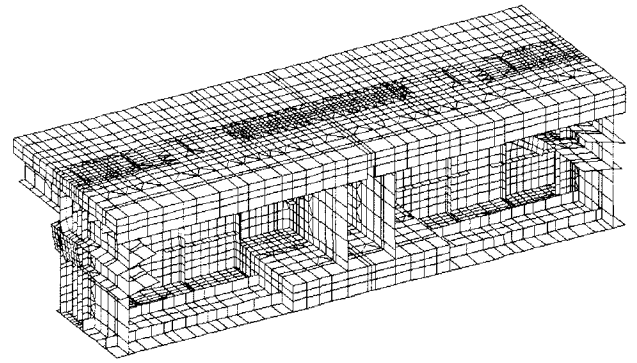


図-7 FE 解析全体要素分割図

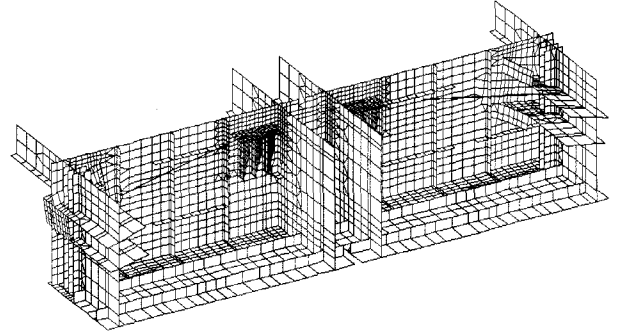


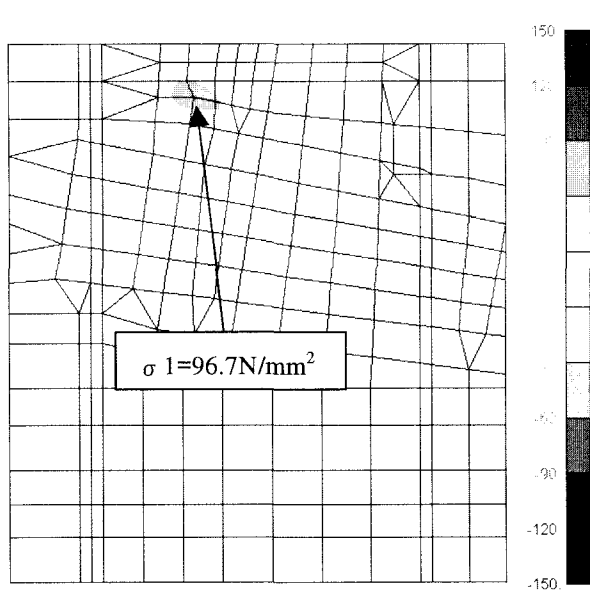
図-8 FE 解析要素分割図 (鋼桁部)

### 4. FE 解析による検討

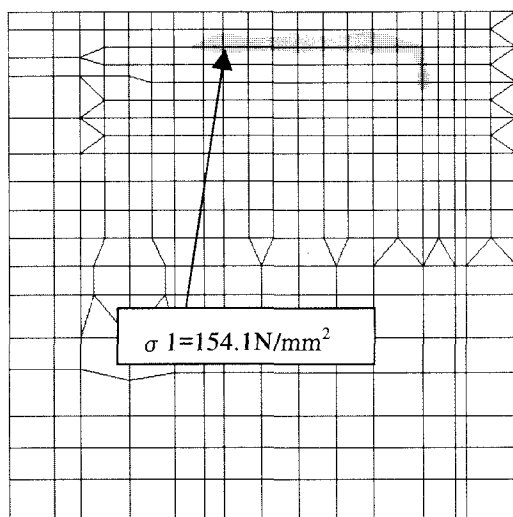
鋼箱桁を構成する部材は全て 3 または 4 接点シェル要素で、上下コンクリートは 6 または 8 接点 3 次元要素でモデル化した。コンクリートと鋼部材間の接触はモデル化せず剛結合とした。偏向部の偏向具はモデル化せずに、ケーブル節点と偏向部間にインターフェイス要素を配置し、その特性に滑り条件を適用した。要素分割は着目位置である定着部と偏向部周辺を細かくした。全体の要素分割図を図-7 に示す。また、床版と上フランジ、下フランジ側のコンクリートを取り除いたモデル図を図-8 に示す。解析モデルの節点数は 9923、要素数は 11309 である。解析には汎用 FE 解析コード DIANA を用いた。

図-9 にケーブル緊張時 ( $N=1250\text{kN}$ ) の解析結果を示す。図-9 a) に示す定着部付近の腹板外側の最大主応力は計測の結果とほぼ一致しており、外ケーブルからの力の一部がブラケット腹板を通じて上フランジに伝達される部分の応力の流れと考えられる。次に、図-9 b) に偏向部付近の腹板外側の最大主応力を示す。偏向部上縁部分に広く分布する応力であり、計測値とほぼ一致している。この応力は補強部材を裏面に配置していたが、補強部材間でブラケットからの偏心曲げモーメントによる腹板の板曲げにより生じているものと考えられる。

図-10 に荷重載荷時の解析結果を示す。図-10 a) に示す定着部付近の腹板外側の最小主応力は計測の結果とほぼ一致する。この応力は主桁作用による応力が定着部の存在により乱されているものと考えられる。図-10 b) に偏向部付近の腹板内側の最小主応力を示す。偏向部では供試体が床版のひび割れに伴う非線形性を示したため、解析



a) 定着部の主応力



b) 偏向部の主応力

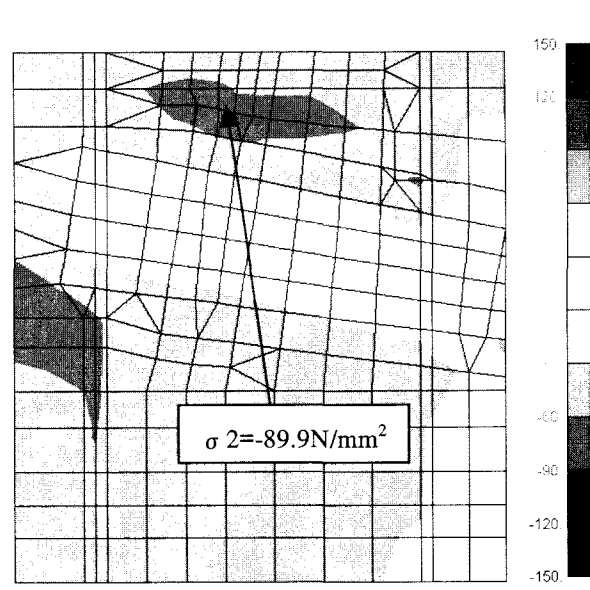
図-9 解析結果（緊張時）

値と一致せず、解析値が測定値を上回る結果となった。応力の分布は主桁作用に伴う応力の乱れと考えられる。

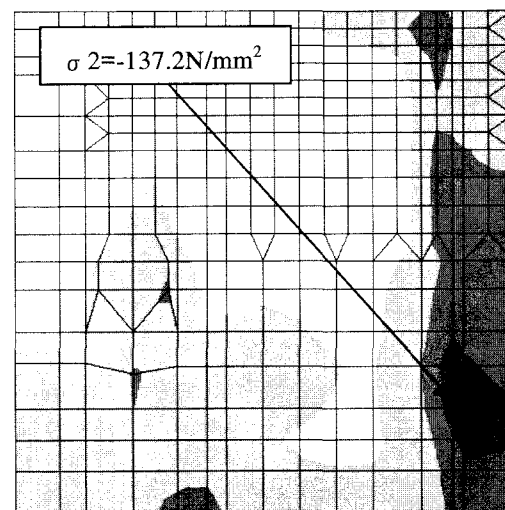
## 5. 疲労に対する検討

今回は静的な耐荷力と破壊性状を調査することが目的であったため、疲労試験は今後の課題である。ただし、床版の連続性はプレストレスの導入にて対処していることから、床版コンクリートの疲労耐久性は一般の RC 床版と同程度以上あると考えられ、また、目地部の補修も容易である。

補強部材が追加された鋼桁腹板には外ケーブル導入時に高い応力が生じるが、主桁作用でも局部的に応力集中が見られる。HTB 接合による補強であるので、この程度の応力範囲であれば疲労上問題ないと考えられるが、補強構造や設置部位が異なれば、より高い応力が生じる可



a) 定着部の主応力



b) 偏向部の主応力

図-10 解析結果（載荷時）

能性があり注意を要する。その点で、構造毎に FE 解析を行って応力性状を照査しておくべきである。

## 6. 結論

本構造における定着部、偏向部、およびその周辺部の応力性状を載荷実験、および FE 解析を行って検討を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 外ケーブルの配置は本来、主桁腹板を挟んで両側に対称に設置するのが基本であるが、供用中の既設構造物の改造という制約条件から、止むなく偏心配置されることも予想される。このような場合でも適切な補強を行うことにより外ケーブルの設置が可能である。この場合、ケーブル 1 本当たりの緊張力が大きくなるが、今回の実験と解析の結果からは降伏点を超えるような性状を示さなかったので問題にならなかった。ただし、

圧縮力が作用する主桁腹板の座屈に対する補強を入念に検討しておく必要がある。また、今回の構造では腹板に高い板曲げによる応力が生じたが、ブラケットや横梁のベースプレートを広げるなど、改善策が必要である。

- 2) 外ケーブルの軸力は定着部から腹板に伝達された後に主桁全体に分布することになるが、フランジ近傍に定着部用ブラケットが設置された場合、フランジにも応力が伝達されるが、これはフランジと腹板のすみ肉溶接で伝達されることになるので、このせん断応力の重ね合わせの照査も必要であると考えられる。
- 3) 主桁作用により、外ケーブル補強のための部材が主桁腹板の応力性状を乱すことになる。この時、補強部材周辺の局所的な応力が広く分布することのないよう、FE 解析による照査を行って、適切に補強を行うことが望ましい。
- 4) 断面の不連続性を伴う場合は、薄板鋼板で構成される連結構造では応力集中などによる耐荷力や耐久性の低下が危惧される。そこで、コンクリートを活用した構造を適切な箇所に配置することで、既設鋼桁橋の連結を可能とするだけでなく、このような問題の対策になり得ることが可能と考えられる。

今回は定着部、偏向部付近に着目し、局部応力の計測・解析を行い、耐久性の問題は無いとしたが、連結構造部における局部応力の緩和効果なども整理し、別の機会に報告したいと考えている。

## 謝辞

本実験は財団法人災害科学研究所のもとで阪神高速道路公団の協力を得て外ケーブル補強研究会（大阪大学大学院教授 松井繁之委員長）にて計画・実施したものです。関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 松井繁之，東山浩士，江頭慶三，太田博士：外ケーブルを併用した既設合成桁橋の連続化，鋼構造年次論文報告集第7巻，pp549-556，1999.
- 2) 中條潤一，栗田章光，坂下清信，武藤和好，松永進一，大山 理：既存鋼桁橋の外ケーブルによる連結化工法その1（全体挙動の検討），土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，CS-171，pp.340-341，1998.10.
- 3) 秦 隆司，坂下清信，平野淳治，栗田章光，大山 理，中條潤一：既存鋼桁橋の外ケーブルによる連結化工法その2（連結部の構造検討），土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，CS-172，pp.342-343，1998.10.
- 4) 八塚博，山田金喜，渡辺泰行，柏木亮二，名取暢：既設鋼桁橋のプレストレス導入による補強，橋梁と基礎 1996.3，pp15-24.
- 5) 武藤和好，松本巧，齊藤秀夫，鈴木真，松井繁之，栗田章光：外ケーブルを用いた単純鋼桁橋の連続化工法における連結部の変形性状，第5回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集 2003.11.