

PC 3 径間連続有ヒンジ箱桁橋の連続化補強設計

— 東北自動車道 八幡平橋 —

渡辺 将之*1・小向 清隆*2・上杉 泰右*3・竹村 太佐*4

東北自動車道八幡平橋（安代 IC～鹿角八幡平 IC）は、竣工後 26 年が経過した PC 3 径間連続有ヒンジ箱桁橋である。本橋は近年、中央ヒンジ部の劣化が進行し、走行性の悪化や桁の補修が必要となるなど維持管理上の課題を有していた。

そのため、本橋では中央ヒンジ部を外ケーブル補強工法により連続化しノージョイント化することで、走行性の向上および維持管理の軽減を図った。また、大規模地震時における橋脚の耐震性能の向上を図ることを目的に、補強設計を実施した。

本文は、主に上部工の外ケーブルによる連続化補強設計を中心に、橋梁概要、対策工法、主桁の連続化設計（連続化補強前照査、連続化補強設計、中央ヒンジ部横方向設計、および偏向部・定着部設計）、ならびに施工計画概要について報告するものである。

キーワード：補修補強設計、外ケーブル補強、中央ヒンジ、連続化

1. はじめに

東北自動車道八幡平橋は、1982 年に竣工した PC 3 径間連続有ヒンジ箱桁橋である（写真 - 1）。有ヒンジ箱桁橋とは、鉛直方向に作用するせん断力は伝達するものの、曲げモーメントおよび軸力は伝達しない「ゲレンク沓」と橋軸直角方向の挙動を許す「水平支承」を支間中央部に有する橋梁である。この橋梁形式は、張出し架設工法により施工された場合、施工中と完成時の曲げモーメントがほぼ一致することや、乾燥収縮や温度変化などによる不静定力が発生せず設計が簡易なため、コンピュータが発達していなかった年代に多く設計・建設された。

本橋は竣工後 26 年が経過しており、大規模地震における安全性を確保すること、および伸縮装置部からの漏水による中央ヒンジ部の劣化が進行するなど、維持管理費の増大が課題とされていた。



写真 - 1 八幡平橋全景

本橋では、中央ヒンジ部を外ケーブル補強工法により連続化しノージョイント化することで、走行性の向上ならびに維持管理軽減を図るとともに、大規模地震時における橋脚の耐震性能の向上を図ることを目的に、補強設計を実施した。

本報告は、主に上部工の外ケーブルによる連続化補強設計について報告するものである。

2. 橋梁概要

本橋の諸元を以下に示す。また、最大支間長を有する下り線の断面図（図 - 1）ならびに側面図（図 - 2）を示す。

路線名：東北自動車道

橋名：八幡平橋

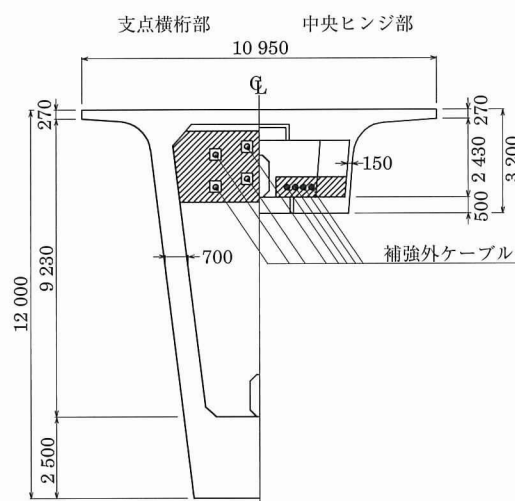


図 - 1 断面図（下り線）

*1 Masayuki WATANABE：東日本高速道路(株) 関東支社 京浜管理事務所

*2 Kiyotaka KOMUKAI：東日本高速道路(株) 東北支社 十和田管理事務所

*3 Taisuke UESUGI：八千代エンジニアリング(株) 総合事業本部 構造・橋梁部

*4 Daisuke TAKEMURA：八千代エンジニアリング(株) 九州支店 道路・構造部

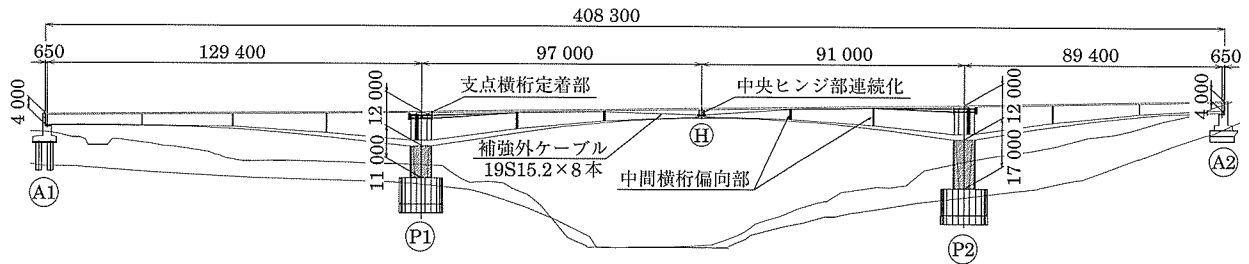


図-2 側面図 (下り線)

所在地：秋田県鹿角市八幡平

道路規格：第1種第3級B規格

構造形式：

(補強前) PC 3 径間連続有ヒンジ箱桁橋

(補強後) PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋

橋長：390.3 m (上り線), 408.3 m (下り線)

支間割：129.4 m + 185.0 m (96.0 m + 89.0 m) + 74.4 m (上り線)

129.4 m + 188.0 m (97.0 m + 91.0 m) + 89.4 m (下り線)

幅員：11.150 m (全幅) 9.750 m (有効)

平面線形：A = 450, R = 900 m (上り線)

A = 450, R = 750 m (下り線)

縦断勾配：i = 下り 0.666 % ~ 上り 2.737 % (上り線)

i = 下り 2.420 % ~ 上り 2.110 % (下り線)

横断勾配：i = 1.317 % ~ 3.000 % (片勾配) (上り線)

i = 2.005 % ~ 4.000 % (片勾配) (下り線)

斜角：90° 00'

設計荷重：(補強前) TT-43, TL-20 (補強後) B 活荷重

3. 設計概要

3.1 ヒンジ部対策工法の選定

大規模な地震が発生した場合、中央ヒンジ部には大きな反力が作用するため、構造上の弱点となる。このための対策として、① ヒンジ補強案、② 落橋防止構造案、③ 連続化案の3案について比較検討した(表-1)。

ヒンジ補強案は、ヒンジ部を補強することで大規模地震時のヒンジ部の損傷を回避するものである。落橋防止構造案は、大規模地震時においてヒンジ部が損傷した場合に、ヒンジ部のずれを制限することで緊急車両の通行を確保するものである。両者とも、連続化案よりも工事規模は小さくなるが、ヒンジ部の維持管理を今後も継続する必要がある

表-1 ヒンジ部の対策工法比較

	ヒンジ補強案	落橋防止構造案	連続化案
構造的性	△	○	◎
経済性	○	◎	○
施工性	△	○	△
走行性	○	○	◎
維持管理	△	△	◎
総合評価	△	○	◎

り、走行性の改善は望めない。

一方、連続化案は、外ケーブルの配置など施工規模が大きくなるものの、構造上・維持管理上の弱点となるヒンジ部を廃止することで走行性ならびに維持管理性が向上するなどのメリットが多いことから採用案とした。なお、連続化することにより、橋脚に作用する断面力は変化することになるが、橋脚の耐震補強量に差は生じなかった。

3.2 上部工補強設計の方針

上部工補強設計をするにあたり、既往図書(設計計算書、設計図面)を参照して、主桁および橋脚の応力度を再計算することで補強前の応力状態を把握した。中央ヒンジ部に外ケーブルを配置し連続化することで、構造系がPC 3 径間連続有ヒンジ箱桁橋からPC 3 径間連続ラーメン箱桁橋へと変更となるため、上部工補強設計では、構造系の変化を考慮して断面力を算出した(表-2)。

表-2 解析モデルと荷重組合せ

荷重の種類	当初設計モデル	補強設計モデル
主桁自重(クリープ・乾燥収縮終了時)	○	—
橋面荷重(クリープ・乾燥収縮終了時)	○	—
プレストレス(当初設計時)	○	—
プレストレス2次力(当初設計時)	○	—
プレストレス(補強設計時)	—	○
プレストレス2次力(補強設計時)	—	○
活荷重(B活荷重)	—	○
温度変化(±10度)	—	○
床版温度差(+5度)	—	○

外ケーブルについては、上部工連続化のほか、上部工耐震補強量への影響に留意するとともに、橋脚耐震補強へのフィードバックを行い、合理的な配置とした。また、定着部および偏向部については、ソリッド要素を用いた3次元FEM解析を実施し、安全性の確認を行った(図-3)。

3.3 主桁の連続化補強設計

(1) 連続化後の照査(補強外ケーブル配置前)

PC 3 径間連続ラーメン箱桁橋への構造系変化後の既設桁の応力状態、耐力を把握するために、連続化後の照査(補強外ケーブル配置前)を行った。ここで、連続化後の照査(補強用外ケーブル配置前)とは、中央ヒンジ部にコンクリートを打設し連続化を行ったのち、補強用の外ケーブルを配置せず既存のPC鋼材のみによる応力状態を示したものである。以下、連続化により中央支間長が最大となる下り

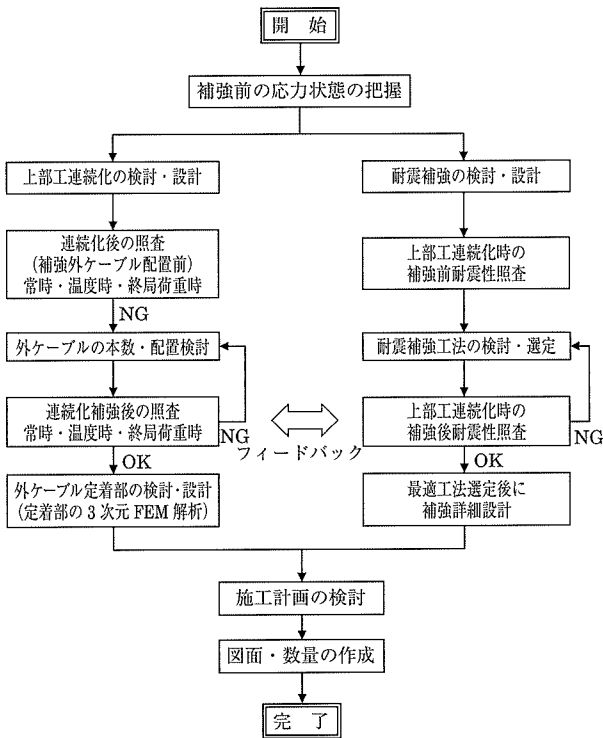


図-3 検討フローチャート

線を代表して記載する。

照査を実施した結果、中央ヒンジ部において「温度時②（死荷重時+活荷重 M_{max} + 温度下降+温度差）」における応力状態がもっとも厳しく、下縁側引張応力度 $-8.37 \text{ N/mm}^2 > \text{許容値} - 2.00 \text{ N/mm}^2$ と許容値を超える引張応力度が発生する。また、A1-P1側径間部下縁側「温度時①（死荷重時+活荷重 M_{max} + 温度上昇+温度差）」において、下縁側引張応力度 $-2.40 \text{ N/mm}^2 > \text{許容値} - 2.00 \text{ N/mm}^2$ と若干許容値を超過する引張応力度が発生する結果となった（図-4）。

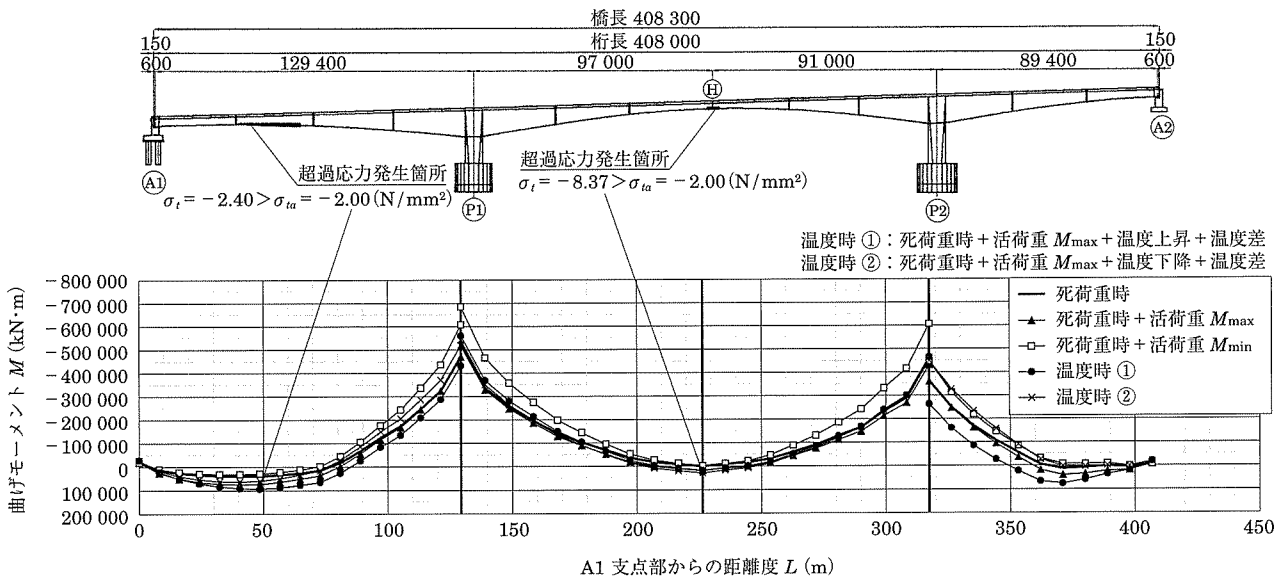


図-4 連続化補強前照査結果（下り線）

(2) 補強外ケーブルの配置比較

中央ヒンジ部の超過応力度については、補強用外ケーブルを配置することにより改善することとし、5案による配置比較を行った（表-3）。

第1案は、中央ヒンジ部にもっとも近い中間横桁部を定着部として集中配置した案であり、外ケーブル（19S15.2B）が14本必要となる。この配置方法は、許容値を満足しない箇所に効率的な補強が可能であるが、中間横桁定着部の補強による重量増加の影響が大きいことや、横桁横締めPC鋼材が必要となり、施工は困難である。

第2案は、中央ヒンジ部付近のウェブに定着突起を設けて外ケーブルを分散配置した案であり、外ケーブル（19S15.2B）が8本必要となる。この配置方法は、分散して突起定着することで定着部補強重量を軽減することが可能であるが、ウェブへの削孔箇所が多くなり、既設せん断PC鋼棒や鉄筋との干渉を避ける必要があることから、施工には不向きである。

第3案～第5案は、支点横桁部を定着部とし、中間横桁部を偏向部として利用するか否かで比較検討した案である。これらの配置方法は、中間支点横桁部まで鋼材を配置する必要があるため鋼材延長は長くなるが、剛な中間支点横桁部で定着することができ、構造的に優れている。いずれの案も、中央ヒンジ部における外ケーブル偏心量は同じであるが、偏向方法により補強用外ケーブルによる不静定力が変化する。

第3案は、中間横桁部を偏向部として利用しない案であり、外ケーブルを合理的に配置できないため、外ケーブル（19S15.2B）が12本必要となる。

第4案は、中間横桁部に偏向部を1箇所設ける案であり、外ケーブル（19S15.2B）が8本ともっとも少なくなる案である。

第5案は、中間横桁部に偏向部を2箇所設ける案であり、外ケーブル（19S15.2B）が10本必要となり、第4案より鋼

表 - 3 補強外ケーブル配置比較

	補強外ケーブル鋼材配置図	構造概要
第1案		<ul style="list-style-type: none"> ・外ケーブル (19S15.2B) : 14本 中間横桁定着部 ・外ケーブルを中間横桁に定着可能な構造とした場合、部材厚が2.70 m程度必要となり、死荷重増になる。また、径間中央付近に横桁定着部を設けることで、橋面の鉛直たわみに対する影響が懸念される。 ・中間横桁を定着部とすることにより、横桁横締めPC鋼材を配置する必要があり、施工は困難である。
第2案		<ul style="list-style-type: none"> ・外ケーブル (19S15.2B) : 8本 ウェブ突起および中間横桁定着部 ・許容値を満足しない箇所に効率的な鋼材配置をすることが可能である。 ・ウェブ突起定着部を分散配置することで、第1案に比べて定着部重量を軽減することが可能である。 ・ウェブ突起定着部を設けることで横締めPC鋼材が必要であり、ウェブのコア抜き箇所が多くなり、既設せん断PC鋼棒および鉄筋との干渉を避ける必要があることから、施工には不向きである。
第3案		<ul style="list-style-type: none"> ・外ケーブル (19S15.2B) : 12本 支点横桁定着部 ・支点部まで鋼材を配置することにより鋼材延長は長くなる。 ・中間横桁部に偏向部を設けないため補強用外ケーブルによる不静定力が大きくなり、鋼材本数が多くなる。 ・剛部材の支点横桁に定着することで局部応力が生じる可能性が小さい。 ・支点横桁定着部は部材厚を増厚する必要があるが、1.00 m程度である。
第4案		<ul style="list-style-type: none"> ・外ケーブル (19S15.2B) : 8本 支点横桁定着部 中間横桁偏向部 ・支点部まで鋼材を配置することにより鋼材延長は長くなる。 ・中央ヒンジ部に近い中間横桁部に偏向部を設けることで、補強用外ケーブルによる不静定力が小さくなり、比較案中もっとも鋼材本数が少ない。 ・中間横桁部で偏向させることによる補強が必要になると考えられるが、ケーブル角度が緩いため鉛直分力の影響は少ない。 ・剛部材の支点横桁に定着することで局部応力が生じる可能性が小さい。 ・支点横桁定着部は部材厚を増厚する必要があるが、1.00 m程度である。
第5案		<ul style="list-style-type: none"> ・外ケーブル (19S15.2B) : 10本 支点横桁定着部 中間横桁偏向部 ・支点部まで鋼材を配置することにより鋼材延長は長くなる。 ・2箇所中間横桁部に偏向部を設けることで、補強用外ケーブルによる不静定力を小さくすることが可能となるが、第4案に比べると鋼材本数が多くなる。 ・中間横桁部で偏向させることによる補強が必要になると考えられるが、ケーブル角度が緩いため鉛直分力の影響は少ない。 ・剛部材の支点横桁に定着することで局部応力が生じる可能性が小さい。 ・支点横桁定着部は部材厚を増厚する必要があるが、1.00 m程度である。

材量が増加する。

以上より、本橋では構造的・施工性に優れている第4案を採用することとした。

(3) 連続化補強後の設計

連続化補強前の照査において、許容値を超過していた中央ヒンジ部「温度時② (死荷重時+活荷重 M_{max} + 温度下降+温度差)」における下縁側引張応力度は、外ケーブルを8本配置することで -0.92 N/mm^2 と許容値 -2.00 N/mm^2 以

内となった (図-5)。

また、A1-P1 側径間部下縁側の引張応力については、外ケーブル配置による2次プレストレス力の影響により、該当区間への新たな補強は行わなくとも -1.20 N/mm^2 と許容値 -2.00 N/mm^2 以内に収めることが可能となった。なお、中央ヒンジ部の連続化部分の曲げ耐力は、外ケーブル補強ならびに鉄筋配置のみで確保することが可能となった。

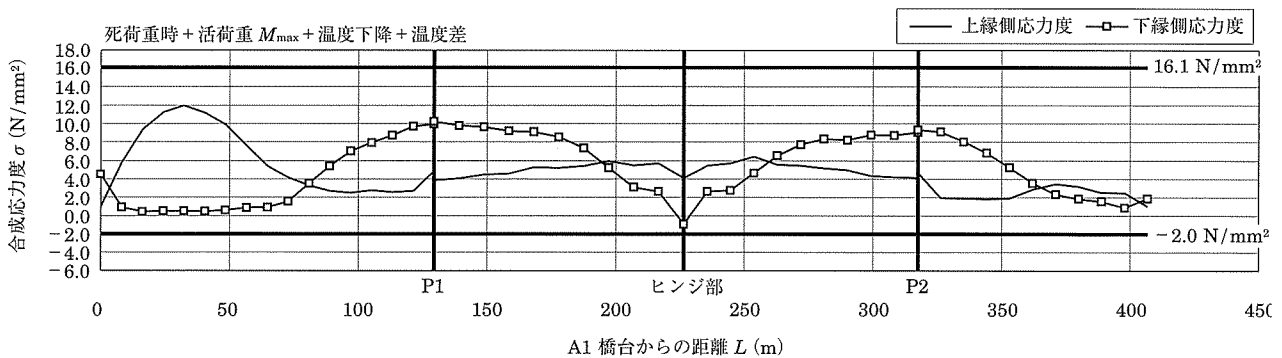


図 - 5 「温度時②」における合成応力度 (下り線)

3.4 中央ヒンジ部横方向の設計

上部工を連続化する際に、中央ヒンジ部・伸縮装置付近のコンクリートを撤去して新たにコンクリートを打設することから、横締めPC鋼材を配置する必要がある。

当初設計では、PC鋼棒SBPR 785 / 1030 ϕ 32を500mmピッチで配置していたが、新設床版部においては、プレグラウトPC鋼材1S28.6を500mmピッチで配置するものとした(図-6)。また、1S28.6を用いるため後打ちコンクリートの水切り幅は180mm必要になるが、既設部との外面を合わせるために、張出し床版先端部を80mm切欠き対応することとした(図-7)。

3.5 定着部・中央ヒンジ連結部・偏向部の設計

(1) 定着部の設計

本橋の中間支点横荷部は2枚壁を有する構造をしており、1枚あたりの壁厚が1.50mと比較的薄い部材厚となっている。大容量の外ケーブル定着した場合、既設コンクリートには大きな局部応力が発生することが予測された。また、2枚壁間の狭かな主桁内部での施工を余儀なくされることか

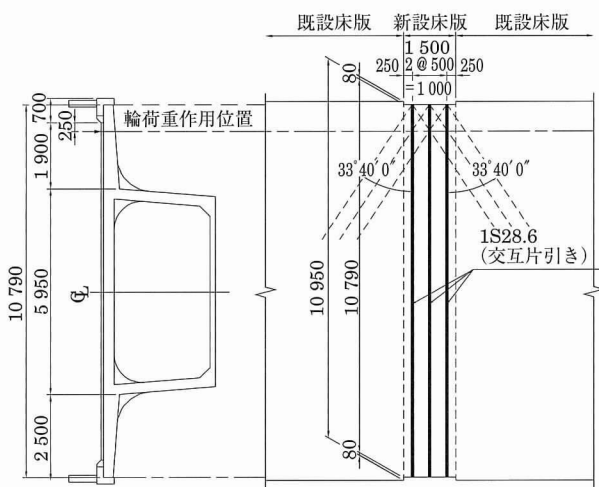


図-6 横締めPC鋼材の配置

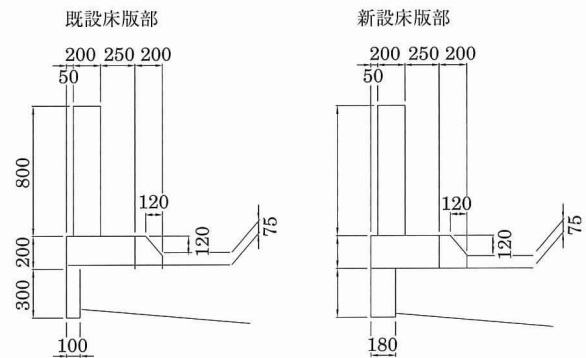


図-7 水切り幅の設定

ら、構造的・施工性に優れた構造とする必要があった。

上記課題に対し、3次元ソリッド要素を用いたFEM解析を実施することで、定着部補強形状の検討を行うとともに、その安全性の確認を行った(図-8)。

解析モデルは、構造中心を対称境界とした3次元立体1/2モデルとし、設計荷重はプレストレス導入時、設計荷重時および終局荷重時の中で、もっとも応力状態の厳しくなるプレストレス導入時 $0.9 \sigma_{py} = 1440 \text{ N/mm}^2$ とした。また、

	第1案	第2案	第3案
側面図			
断面図			
評価	×	○	△

図-8 定着部補強形状の比較

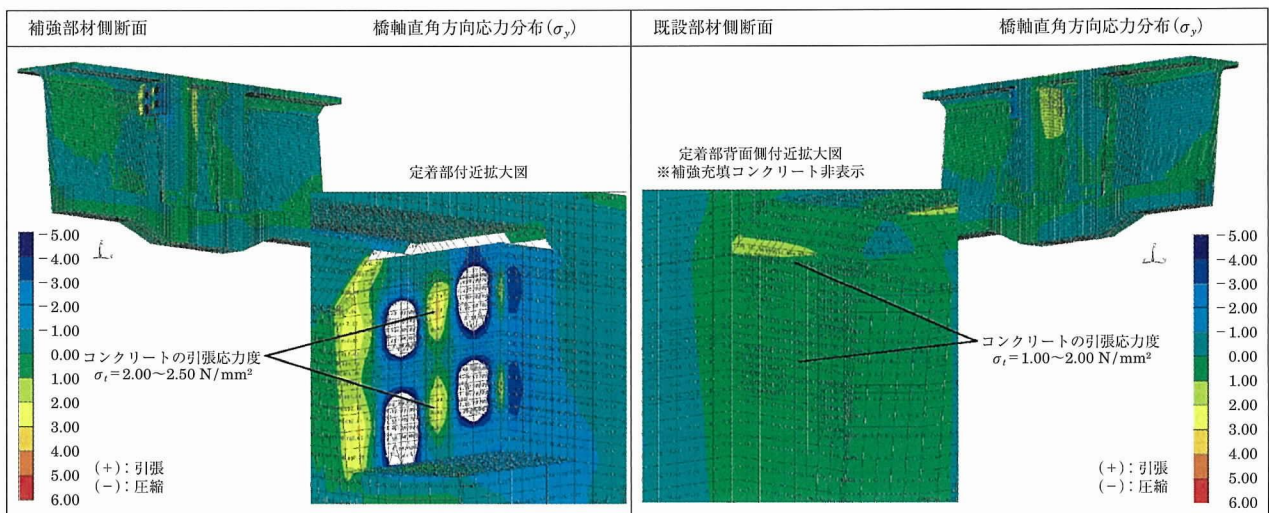


図-9 定着部におけるFEM解析結果(橋軸直角方向応力分布)

コンクリートの許容引張応力度の目安は $\sigma_{ca} = 3.0 \text{ N/mm}^2$ とし、コンクリートの引張領域に配置する引張鉄筋の許容応力度は $\sigma_{sa} = 120 \text{ N/mm}^2$ とした。

第1案は、定着部側のみ補強した案であり、定着部背面側の既設支点横桁には目安値を超える $\sigma_c = 4.5 \text{ N/mm}^2$ 程度の引張応力度が生じる結果となった。

第2案は、定着部背面側の既設支点横桁をコンクリート増厚することにより補強した案である。1.0 m 増厚することにより、大きな局部応力の発生を防ぐことができる(図-9)。

第3案は、2枚壁間にストラットを構築し局部応力を抑える案である。局部応力の改善には有効となるものの、施工性に劣る。

比較検討の結果、本橋では構造的および施工性に優れる第2案を採用することとした。

(2) 中央ヒンジ連結部・偏向部の設計

補強用に配置した外ケーブルは、中間横桁部を偏向部として利用するとともに、再構築した中央ヒンジ部においても偏向される。定着部と同様に、3次元ソリッド要素を用いたFEM解析を実施することで安全性の確認を行った。

中央ヒンジ連結部における外ケーブルの偏向角度は、最大でも3度以下となり、問題となるような局部応力度は生じない結果となった(図-10)。

また、中間横桁偏向部はディアボロ管を配置するために0.30 m 増厚を行ったものの、その偏向角度は3度以下となり、中央ヒンジ連結部と同様に問題となるような局部応力度は発生しなかった(図-11)。

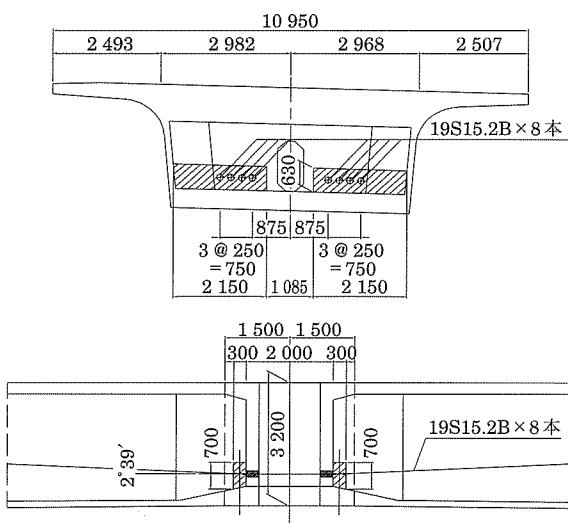


図 - 10 中央ヒンジ連結部の構造

4. 施工計画概要

本橋における上部工補強工事は、中央ヒンジ部を外ケーブルで補強して連続化するため、交通規制を伴う工事となる。そのため、片車線を交通規制しながら施工する案と片ラインを全面通行止めし反対ラインを対面通行規制で施工

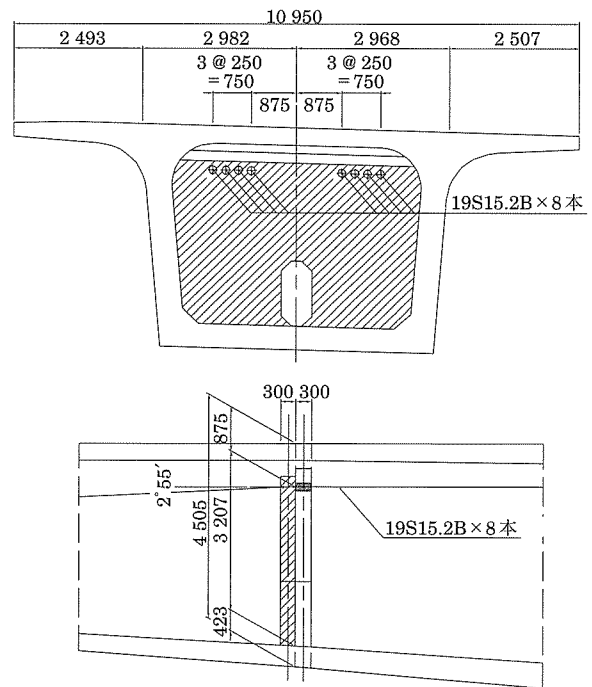


図 - 11 中間横桁偏向部の構造

する案による比較を行った(表-4)。

交通規制方法の比較の結果、交通規制期間を短縮することが可能であり、かつ施工時の安全性(通行車両および作業員)が確保できること、および構造物の品質に悪影響を与える一般交通車両による振動が少ないこと、などから片ラインを全面通行止めを行い施工した。

また、交通規制期間を極力少なくすることを目的として、中央ヒンジ部の補強工事を除く、定着部・偏向部の補強コンクリート打設および補強外ケーブルの搬入・緊張作業の補強工事は、供用しながら桁内で実施した。なお、中央ヒンジ部のゲレンク沓については撤去せず、残存させたままコンクリートに埋設して連続化させることとした。

5. おわりに

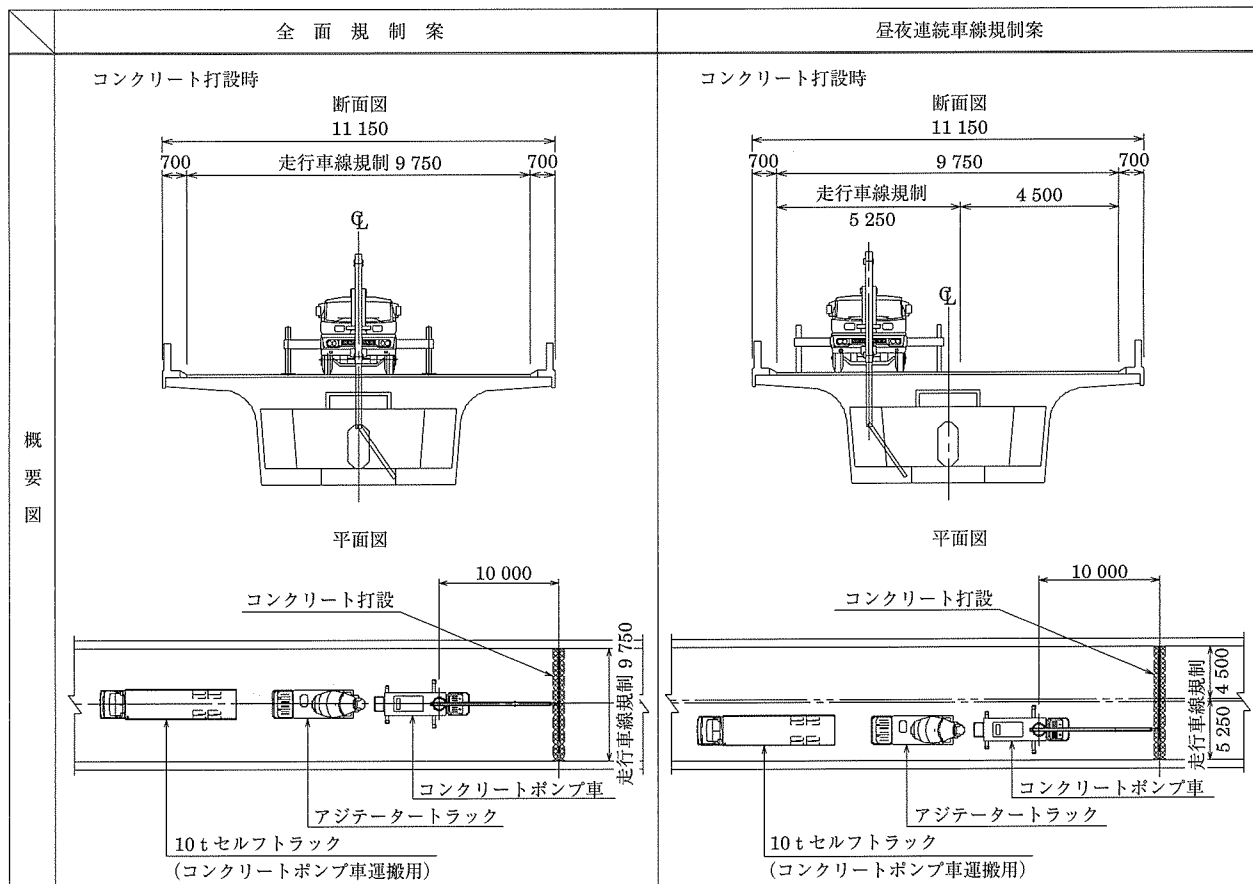
本報告は、中央ヒンジ構造を有する箱桁橋の外ケーブルによる連続化補強の計画・設計についてとりまとめたものである。今後、構造物の高齢化は急速に進み、維持管理への取組みはさらに重要となると考えられる。本稿が、今後の同種橋梁における補強計画ならびに補強設計において一助となれば幸いである。

最後に、本橋の補強設計をするにあたり、適切な助言ならびにご指導をいただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

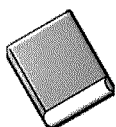
参考文献

- 1) 竹村太佐, 渡辺将之, 阿部憲二, 上杉泰右: 有ヒンジラーメン箱桁橋の連続化補強設計— 東北自動車道 八幡平橋 一, 第16回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp.293-296, 2007.10
- 2) 渡辺将之, 阿部憲二, 小原淳一, 竹村太佐: 有ヒンジラーメン橋東北自動車道八幡平橋の耐震補強設計, 第63回年次学術講演会, 土木学会 2008.9

表 - 4 交通規制方法の比較



【2009年2月16日受付】



図書案内

PC技術規準シリーズ

PC 斜張橋・エクストラローズド橋設計施工規準

定 価 4,725 円 / 送料 500 円

会員特価 4,000 円 / 送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編

技報堂出版