

新しい構造形式の橋における設計方法に関する考察 ～波形鋼板ウェブPC箱桁橋における損傷原因の分析～

五味 傑・白石悠希・白戸真大

1. はじめに

平成14年の道路橋示方書・同解説の性能規定化以後、新しい形式の一つとして比較的採用数が増えたものに波形鋼板ウェブPC（プレストレストコンクリート）箱桁橋がある。写真-1に構造の例を示す。波形鋼板ウェブPC箱桁橋（以下「波型鋼板ウェブ橋」という。）は、コンクリート箱桁橋に比べて上下床板へのプレストレスを効率的に導入できるように、PC箱桁のウェブを鋼材に置き換え、ウェブの軸方向の剛性を小さくした鋼・コンクリート複合橋である。波形鋼板ウェブ橋は、現在までに高速道路を中心に全国で200橋以上が供用されている。多くが供用から10年以上経過しつつあり、隔壁や鋼・コンクリート接合部などの損傷が報告されている。そこで、定期点検結果に基づく波形鋼板ウェブ橋の現状の分析や実橋梁での計測を行うことで、今後の新しい形式の橋の性能評価に有用な知見が得られると考えた。

本稿では、国土交通省の地方整備局等が管理する波形鋼板ウェブ橋18橋の定期点検結果を整理する。次に、同形式の橋の挙動を把握するために、1橋を対象にモニタリング及び数値解析を行った結果を示す。最後に、以上の結果から、道路橋の設計基準において、特殊な形式や新しい形式の橋の性能をよりの確に評価するために、研究が必要と考えられる事項をまとめる。

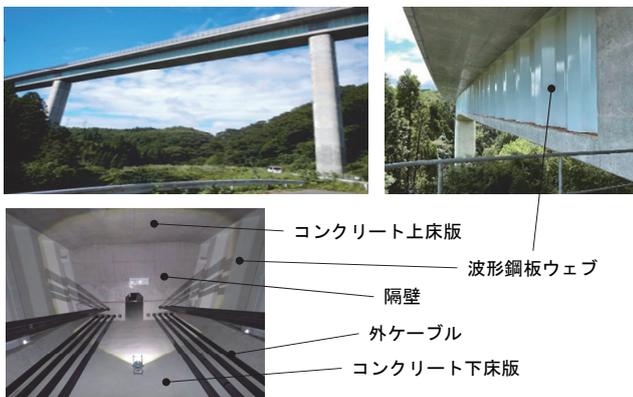


写真-1 波形鋼板ウェブ箱桁橋

Consideration on Design Method for Bridges with New Structural Types -Analysis of Damage Causes in Corrugated Steel Web PC Box Girder Bridges-

2. 波形鋼板ウェブ橋の特徴と既往の研究

波形鋼板ウェブ橋は、従来のPC箱桁橋と同様の設計の手順がとられることが多いが、構造の特徴を反映して設計の考え方が変えられている部分もある。たとえば、活荷重や死荷重に対して箱桁に生じる曲げモーメントに対しては、軸方向の剛性を意図的に小さくしているウェブの応力分担を無視し、軸剛性の比較的大きい床板の応力分担を見込むとともに、隔壁と外ケーブルを利用して上部構造全体を引き上げる効果も見込んで設計される。一方で、せん断力に対しては、波形ウェブのみで抵抗できるように設計されることが多い。

また、ウェブと床板の結合が必ずしも剛とはみなせないこと、ウェブの軸方向の剛性が小さいこと、上下床板を外ケーブルで引き上げている箇所が離散的であることから、上下床板が箱断面として一体で挙動しにくい特徴がある。さらに、辺々の剛性が極端に異なるため、荷重の載荷方向や分布状態に応じて立体的な変形や応力分布が複雑になる。これらの課題については、波形鋼板ウェブ橋の開発当初から様々な研究がされてきた^{1)から3)}が、桁内の温度分布の影響に着目した研究はされていなかった。

3. 定期点検結果の分析

国土交通省が管理する道路橋においては、法令事項に加えて、橋の部材をさらに詳細な要素と呼ばれる領域に区分し、各部の損傷の種類、程度をルールに従い記録している。また、部材の種別等によらず、近接目視により見られたひび割れ等を記録する損傷図も作成している。そこで、波形鋼板ウェブ橋の各部の損傷が部材種別の違いなどによらず偏りなく記録されていることが期待されることから、国土交通省の地方整備局等が管理する全18橋（令和3年時点）の波形鋼板ウェブ橋の点検結果を整理することにした。これらは、当初は高速道路会社にて設計又は設計・施工されたものを引き継いだものである。

表-1 分析対象とした波形鋼板ウェブPC箱桁橋の諸元等とひびわれ発生状況

名称	A橋	B橋	C橋	D橋	E橋	F橋	G橋	H橋	I橋	J橋	K橋	L橋	M橋	N橋	O橋	P橋	Q橋	R橋
延長(m)	173	306	118	356.5	280	218	211.5	243	754	233.5	565	180	244	220	500	270	688	261
径間数	3連	4連	2連	5連	4連	4連	3連	3連	4連+4連	2連	7連	3連	3連	3連	5連	3連	8連	3連
曲率(m)	1,100	1,200	1,100	4,000	1,500	∞	1,200	1,500	1,500	4,000	5,800	∞	1,300	1,300	3,500	1,300	3,000	∞
桁高変化	有り	有り	有り	無し	有り	無し	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り
ウェブ形状	斜	斜	斜	斜	斜	斜	斜	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直
ウェブと隔壁の接合	無し	有り	無し	無し	無し	有り	有り	無し	無し	無し	無し	無し	有り	有り	有り	無し	無し	無し
PCケーブル	内+外	外	内+外	外	外	外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外
柱頭部の接合	ラーメン	ラーメン	ラーメン	支承	ラーメン	支承	支承	ラーメン	ラーメン(内+外) 変換(内+外)	支承	ラーメン							
完成年度	H18	H18	H18	H16	H17	H15	H20	H21	H23	H17	H21	H23	H20	H20	H20	H21	H21	H21
竣工年度	H19	H19	H19	H19	H19	H23	H23	H28	H28	H20	H22	H23	H21	H21	H21	H21	H21	H21
点検年度	H21 H26 R1	H21 H26 R1	H21 H26 R1	H21 H26 R1	H21 H26 R1	H25 H30	H25 H30	H30	H30	H21 H25 H30	H24 H29	H25 H30	H23 H28	H23 H28	H23 H28	H23 H28	H23 H28	H23 H28
ひびわれ発生状況	隔壁	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	鋼材とコンクリートの接合部		○	○	○		○				○	○			○	○	○	○

18橋の橋梁概要と隔壁と鋼・コンクリート接合部のひび割れ発生状況の一覧を表-1に示す。18橋ほぼすべての橋に共通して、隔壁、鋼・コンクリートの接合部などにひび割れが生じている。これらのひび割れは完成年や橋の曲率、柱頭部での桁との接合条件の違いなどによらず生じている。

写真-2に隔壁のひび割れ事例を示す。隔壁は、桁内部でPC鋼材の向きを変えるために用いられるとともに、上下床板の変位差や断面のねじりにより生じ得る、床板や、床板とウェブの接合部などの各部の二次応力の発生を防ぐために重要な部材である。写真-2(a)では、上角部コンクリートが圧壊している様子が見られる。写真-2(b)では、隔壁下側にある外ケーブル偏向部から隔壁下側固定端、そして側面へ抜けるひび割れも見られる。図-1に矢印で示す外ケーブルからの局所的な力の影響は、同図に示すような斜めひび割れとして現れる可能性が考えられ、写真-2(b)の損傷にもみられる。しかし、写真-2(a)のように隅角が圧壊



(a)上角部の圧壊 (b)偏向部からのひび割れ
写真-2 隔壁のひび割れ事例

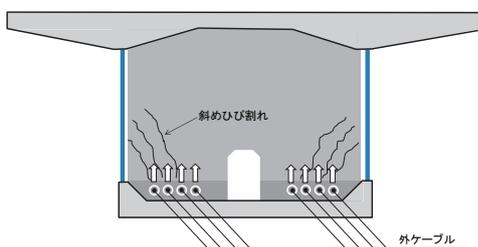


図-1 外ケーブルの偏向力による隔壁の損傷例

するような作用は、隔壁が桁に生じる二次応力の発生を防ぐ役割を有していることから、外ケーブルからの力とは別に、橋の複雑な応答と連動して生じていることが疑われる。

写真-3に、波形鋼板ウェブとコンクリート下床版の接合部(a)及び橋脚柱頭部(b)のひび割れの例を示す。波形鋼板ウェブとコンクリート下床版の接合部のひび割れは、橋脚位置の近傍で生じている傾向が見られた。コンクリートの損傷が進行すると、接合部の鋼材とコンクリートの応力分担が変化し、コンクリートを補修しても応力状態を元に戻すことはできない。材料の収縮など様々な要因も考えられるが、隔壁と同様に橋の応答と連動した複雑な応力状態に置かれている可能性も否定できない。その場合、波形鋼板ウェブと上下床版の接合部で応力状態が厳しく、損傷が進行することで、接合部のコンクリートは耐荷機構の回復が極めて困難な状態への移行も懸念される。

点検調書の写真によれば、波形鋼板ウェブ橋の隔壁は、写真-4(a)(b)のように、上下床版と隔壁は接合されていて波形鋼板ウェブと隔壁は接合されていない形状や、隔壁が左右で分離している形状もみられる。そこで、表-1では、ウェブと隔壁の接合の有無も整理した。接合の有無にかかわらず隔壁や鋼材とフランジの接合部には損傷がみられている。



(a)ウェブと下床版の接合部 (b)ウェブと柱頭部の接合部
写真-3 鋼・コンクリート接合部のひび割れ



(a)左右ウェブと隔壁が
接合されていない (b)隔壁が左右で分離している

写真-4 隔壁形状のパターン

PC箱桁橋の設計においても活荷重の偏心によるそり、ねじりについては考慮されることから、波形鋼板ウェブ橋でも設計において同様の考慮がされている可能性が高い。また、すべての橋が大きな地震等を受けたと仮定するのも現実的でない。したがって、これまでの橋の設計で考慮しているような荷重の組み合わせや各荷重の載荷方法だけでは、新しい形式の橋の性能を評価し、諸元を決定するには十分でない可能性が考えられる。

4. 実橋梁のモニタリング

4.1 断面挙動および部材温度差の計測

点検で見られたような損傷は、活荷重以外で日々受ける作用の組み合わせが関係していることが疑われることから、実橋梁の挙動計測を実施した。対象橋梁は3径間連続波形鋼板ウェブPC箱桁橋とした。一般図および計測項目の凡例を図-2に示す。計測は、11月初旬の3日間にわたって行った。22時から翌5時の時間帯は車両を通行止めし、それ以外の時間帯は供用下で計測を行った。トータルステーションおよびサーモグラフィを用いて中央径間の隔壁5点と波形鋼板ウェブ4点の変位（橋軸方向、直角方向、鉛直方向）および主桁の温度を10分間隔で計測した。

なお、計測データからは、供用下と通行止めの時間帯で橋の挙動に違いはなく、活荷重の影響が橋の挙動に及ぼす影響はさほど大きくないことが分かった。そこで、以下では、温度変化や温度差の影響に着目して整理した結果を示す。

4.2 計測結果

4.2.1 部材温度

計測日の4:00~16:00の上下左右の床板およびウェブの温度の推移を図-3に示す。桁内のサーモグラフィの画像の例を写真-5に示す。図-3の温度は、サーモグラフィによって面的に計測された温度について、写真-5に示すような4つの計測線を仮定し、各計測線上で約200点の温度を平

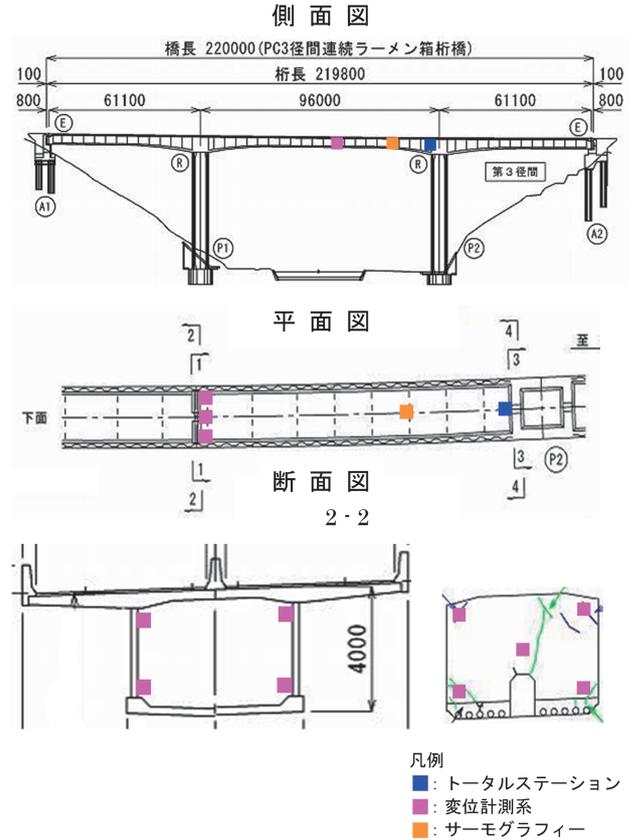


図-2 計測概要図

均した値をそれぞれ示している。

対象橋梁は北西から南東にかけて架橋されている橋である。図-3中Aの8時付近では、東側からの日射の影響で東側ウェブの温度が上昇し、左右のウェブで3℃~4℃程度の温度差が生じる。図-3中Dの15時付近では、西側からの日射の影響で西側ウェブの温度が上昇し、左右ウェブの温度差は午前よりも大きく4℃~5℃程度である。11月初旬であったということもあり、想定したよりも小

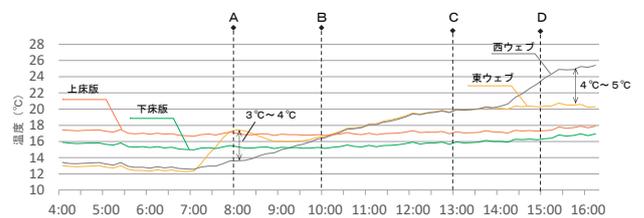
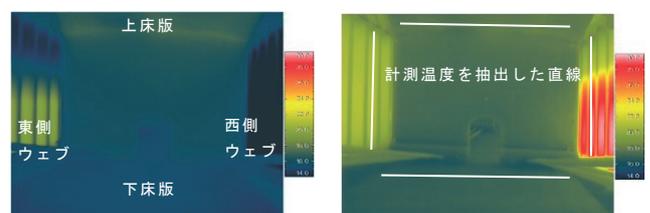


図-3 部材温度計測結果



(a)8時 (b)15時

写真-5 サーモグラフィの撮影画像

さい温度差であった。一方、上下床版コンクリートは外気温や日射の影響をほぼ受けずに一定の温度推移を示しており、常に上床版が約1~2℃程度高く推移している。

4.2.2 断面の動き

計測日の1日間の隔壁中心部の橋軸、橋軸直角、鉛直方向の変位と外気温の変化を図-4に示す。橋軸方向に前後する動きや鉛直方向に上下する動きは外気温の変動と連動して周期的に動いている傾向がみられる。一方、橋軸直角方向の動きには傾向がみられなく不規則に動いている様子があった。図-5は隔壁の東側の上下2点と西側の上下2点を側面から見た橋軸方向および鉛直方向の動きを図化したものである。左右のウェブで温度差のある8時や15時には、東側と西側で橋軸方向に異なる方向に倒れる動きをする。すなわち、箱桁断面は、箱桁を単に棒部材とみなすことはできないことが分かる。

同様の時間帯にて、隔壁5点と波形鋼板ウェブ4点の変位を断面的に図化したものを図-6に示す。特徴的な断面の動きとして、隔壁と波形鋼板ウェブ共に断面形状が保持されないような台形的な変形がみられ、隔壁の変形と波形鋼板ウェブの変形が一致しないような変形もみられた。

以上の計測結果から、基本的に橋は日々の温度変化に連動して橋軸方向、鉛直方向に動いている。その中で、8時や15時のように左右で温度差がある時間帯では、東側と西側で橋軸方向に異なる方向に倒れる変形になっており、隔壁の隅角に応力が集中するような動きをしている。

断面方向で見れば、対象橋梁の隔壁形状は写真-3(a)の左右ウェブと隔壁が接合されていないタイプであり、8時や15時のように左右で温度差があるような時間帯では、ウェブと隔壁が異なる動き方で断面をゆがめる動きをしている。

東側ウェブが伸びるような動きがある8時には、東側ウェブの温度上昇によるものと考えられるが、西側ウェブが縮む方向に動いている15時には、西側ウェブが高温となっているにもかかわらず傾向が異なっている。一般的には、鋼材は部材の温度上昇に伴い伸びる方向に変形するが、橋軸方向に前後する動きや鉛直方向に上下する動きも複合して複雑な動きとなり、実態は単純な予想通りの動きとはならない可能性も示唆される。

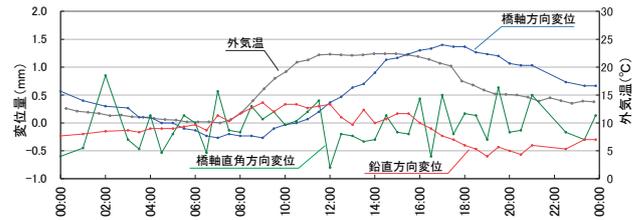


図-4 隔壁中心の変位計測結果

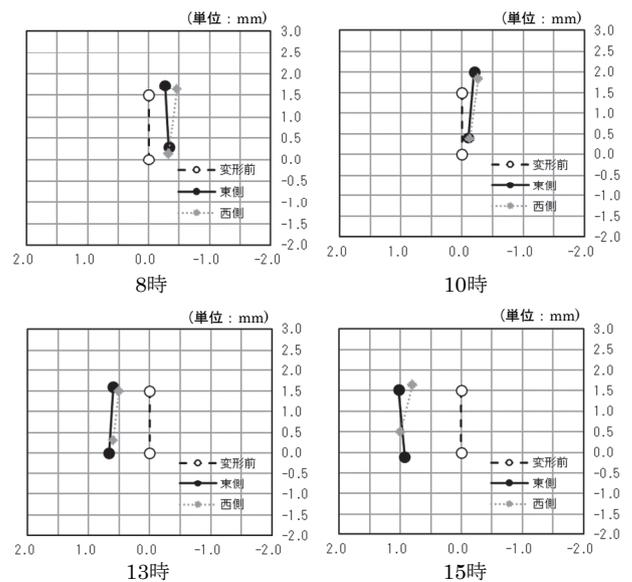
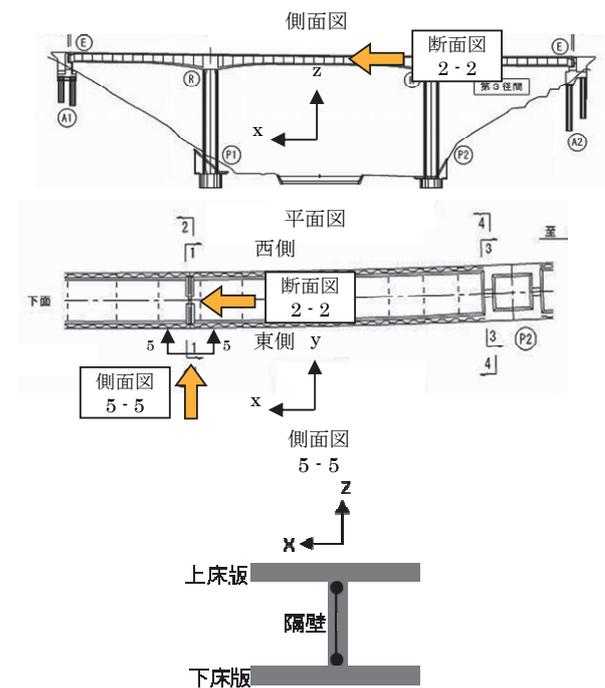


図-5 側面から見た隔壁の動き

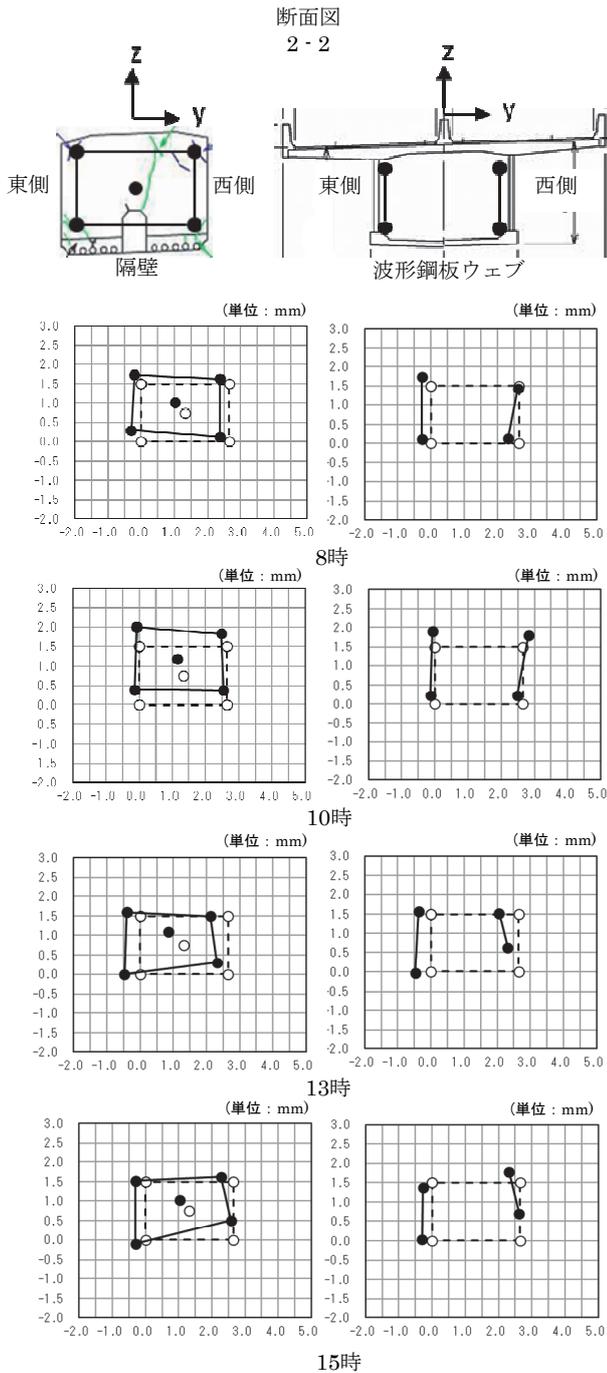


図-6 断面方向の隔壁と波形鋼板ウェブの動き

5. 数値解析

4.でモニタリングを行った橋を対象に、桁内の温度分布が橋の挙動に与える影響について、数値解析で把握する。橋の各部の変形が比較的良好に再現できるシェル要素またはソリッド要素でモデル化し、断面の上下左右にそれぞれ温度差を見込んだ。計測では、季節的な影響からか断面上下左右のフランジのウェブの温度差は大きくなかったが、橋の挙動の特徴をつかむために、過去の別の橋の計測結果も参考に温度差を与える。

通常的设计では、桁全体に様に温度変化が生じるときの影響を考慮している。そこで、上下床版と左右ウェブの温度分布を様に+15度とした場合の桁の変形図を図-7に示す。桁は支間中央でそり上がる。支間中央付近の隔壁に生じる最大主応力（引張が正）分布図を図-8(a)に示す。隔壁と上床版の接合部に大きな応力が生じている。コンクリートにひび割れが生じる主応力の大きさは計算上では 3.0N/mm^2 程度であり、接合部が損傷してもおかしくない応力が生じている。

次に、上述の様な温度分布に加えて活荷重を載荷する場合を考慮した。通常のコングリート箱桁の設計では考慮しないが、図-5に示すように隔壁位置での上下床版の変位差が最大となるように活荷重を載荷した。活荷重の載荷位置図を図-9に示す。その時の下床版の変位を図-10に示す。活荷重の載荷により橋は下にたわむ。隔壁に生じる最大主応力分布を図-8(b)に示す。PC鋼材の偏向部付近に最大主応力分布の偏りが見られる。しかし、かなり極端な分布の活荷重を載荷しても、発生する応力はひび割れが生じるほどの大きさではなく、隔壁上部の角部で応力集中する様子は見られない。

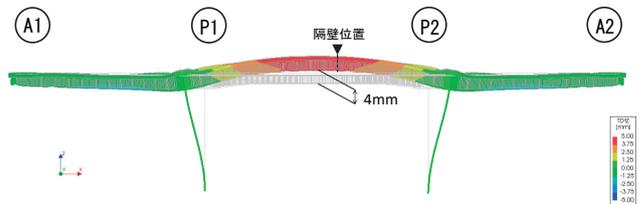


図-7 変形図（様な温度分布を考慮、活荷重なし）

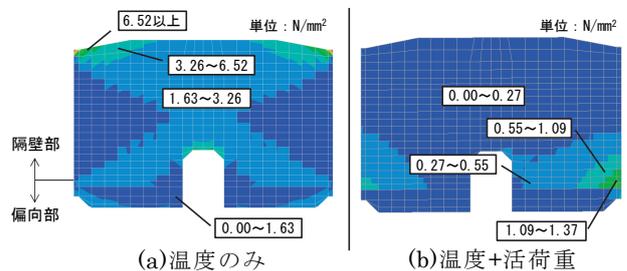


図-8 隔壁の主応力分布図（様な温度分布を考慮）

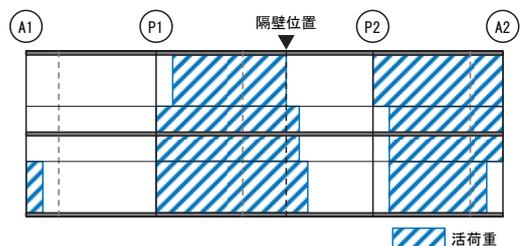


図-9 活荷重載荷位置図

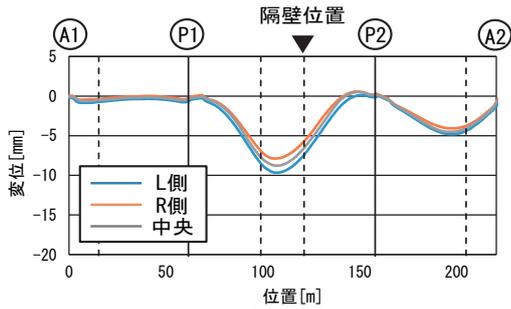


図-10 温度+活荷重作用時の下床版の変位

次に、実際の供用状態では日射の影響により上下左右の床板やウェブの温度に差が生じることから、断面内で非一様の温度分布を考慮する。下床版と比較して、上床版で+5℃、左ウェブで+35℃、右ウェブで+5℃（左右ウェブの温度差は30℃）とした。支間中央付近の隔壁の主応力分布を図-11に示す。ここで活荷重は載荷していない。隔壁の角部に何らかの損傷が生じてもおかしくない大きさの主応力が生じるという計算結果になり、写真-2の隔壁上下の角部の損傷位置とも一致する。

設計上、箱桁は、隔壁をいわば支点として外ケーブルにて支持するように設計される。死荷重や活荷重の分布鉛直荷重であればそのような設計思想も成り立つ可能性はある。しかし、数値解析結果からは、ウェブの軸方向の剛性を意図的に小さくした本構造では隔壁を介したケーブルと桁の力のやり取りは複雑であり、PC箱桁橋の設計の考え方を適用するには限界があると考えられる。

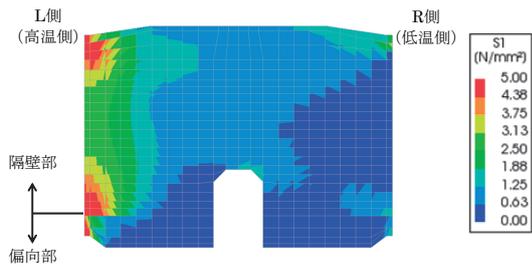


図-11 隔壁の最大主応力度分布 (床版・ウェブで温度差を考慮、活荷重なし)

6. まとめ

設計基準は性能規定化されており、新しい形式や特殊な構造では、形式・構造に合わせて、不利になりえる荷重の組み合わせ、載荷方法、応答の評価方法を個々に検討することが求められている。一方で、3次元有限要素解析なども用いたそりやねじりの検討もされている例も見られるものの、実態として、設計で見込む荷重組合せや荷重モデル（荷重の形状や載荷方法）は基本的には過去のPC箱桁の規定を踏襲しているものと考えられる。しかし、本分析結果は、同規模のPC箱桁橋に比べて局所載荷状態のときや桁内の温度分布などによっても複雑な応答、応力状態に置かれることを示している。すなわち、箱桁という名称にとらわれて、従来同様、橋を直交二方向の棒やフレームに単純化したり、接合部を剛域としてモデル化したり、荷重の組み合わせや荷重の載荷方法や分布のさせ方を踏襲するだけでは不十分であり、少なくとも多様な荷重の組み合わせや分布荷重形状を考慮する必要があると考えられる。

今後、これまでの設計実績が少ない形式や構造の橋についても適切に構造信頼性を評価できるようにするためには、さらに多くの事例収集や分析を進め、設計で考慮する荷重の組み合わせや荷重モデル、応答評価法を充実することが急がれる。

参考文献

- 1) 上平謙二：波形鋼板を有するPC箱桁橋のせん断およびねじり特性に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol.40、No.3、1998.
- 2) 依田照彦：波形鋼板ウェブを用いた合成PC箱桁のねじりと断面変形、構造工学論文集、Vol.40A、1994.3.
- 3) 加藤久人、佐藤知明、牧浦信一、西村宜男：波形鋼板ウェブを有するPC箱桁の断面変形理論、土木学会論文集 No. 766/I-68、2004

五味 傑



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部橋梁研究室 交流研究員、現 三井住友建設(株)土木本部橋梁構造設計部
GOMI Takashi

白石悠希



国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部橋梁研究室 交流研究員
SHIRAIISHI Yuki

白戸真大



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部 橋梁研究室 長、博士 (工学)
Dr. SHIRATO Masahiro