

PCコンボ橋のPC板先端部床版の設計検討

新日本技研株式会社 橋本孝夫
" 高 龍

論文要旨

PCコンボ橋の床版は、主桁間に敷設したプレキャストPC板とその上の現場打ちコンクリートからなり、合成床版として活荷重に抵抗する。PC板は主桁上フランジ切欠き先端に予め敷き均したモルタルの上に設置されることから、先端部は床版厚が変化する剛性の不連続点であるといえる。現行の設計基準ではPC板先端部の設計は、正の曲げモーメントに対して場所打ちコンクリート部のみで抵抗するものとし、その設計曲げモーメントは支間中央と支点上でゼロとした2次曲線により補間した値が用いられている。本検討では、PC板先端部の曲げモーメントについて、主桁の沈下の影響を加味した版解析と換算格子解析を実施し、現行基準で算出した値と比較した。その結果、先端部の正の曲げモーメントは、現行基準値より約28～75%程度大きくなることが解った。また、床版のせん断力を換算格子解析により求めた結果、PC板先端付近のせん断力分布は、押し抜きせん断というよりは梁のせん断に近い性状を示し、モルタルの健全性がその上のRC床版のせん断応力度に大きく影響することが解った。

キーワード：PCコンボ橋，PC板先端部，支持桁沈下，版解析，換算格子解析

まえがき

公共構造物においてコスト縮減及び、現場作業の省力化による施工性の向上が求められるなか、PC橋においても多くの研究・開発が活発化している。その中で、平成7年度～平成9年度にかけて、建設省土木研究所（現 国土交通省 国土技術政策総合研究所）と（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会とが、「コンクリート橋の設計・施工に関する共同研究」を実施し、平成10年12月に「PC合成げた橋(PC合成床版タイプ)設計・施工指針(案)」が発刊された。発刊以来、本構造形式はPCコンボ橋を通称として、施工実績が増加する傾向にある。また、更なる合理的かつ経済的なPCコンボ橋を設計・施工するため、一定の標準化や構造細目等を示した技術資料が作成され、活用されている。

PCコンボ橋の特徴は、工場製作されたプレキャストPC板を床版施工時の型枠として用い、PC板上の現場打ちコンクリート硬化後には、合成構造として活荷重に抵抗することが挙げられる。PC板は主桁上フランジ切欠き先端に予め敷き均したモルタルの上に設置され、現場打ちコンクリートとの一体性は、PC板の上面に凹凸を設けて確保している。しかし、主桁上フランジ切欠き部のPC板先端部に着目した場合、合成床版と現場打ち床版のみの部分の境界となっており、剛性の不連続点であるといえる。

本稿では、PC板先端部の床版の設計法について、現行基準による方法と主桁のたわみの影響を考慮した版解析

及び換算格子解析による方法とを比較した結果を報告するものである。また、換算格子解析により算出した床版のせん断力分布に着目し、現場打ち床版部のみでPC板先端部のせん断力を受け持った場合について検討した結果も合わせて報告するものである。

1. 橋梁諸元

以下に検討対象橋梁の諸元を示す。

道路規格：第1種第3級B規格

設計速度：V=80km/h

構造形式：PC単純コンボ橋

橋 長：38.0m

有効幅員：10.5m

設計荷重：B活荷重

平面線形：A=475

上部材料：コンクリート

主桁・PC板 ck=50N/mm²

場所打ち横桁・床版 ck=30N/mm²

PC鋼材

主桁 SWPR7BL 12S15.2

横桁 SWPR19L 1S21.8

PC板 SWPR7AL 1S9.3

鉄筋 SD345

下部工：逆T式橋台

基礎工：深礎杭(2500, 3000)

図 - 1 に全体一般図を、図 - 2 に上部工断面図を示す。

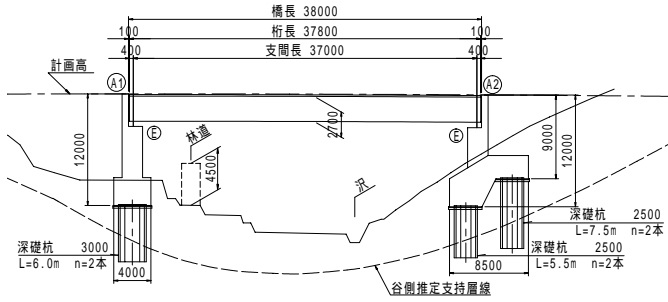


図 - 1 全体一般図

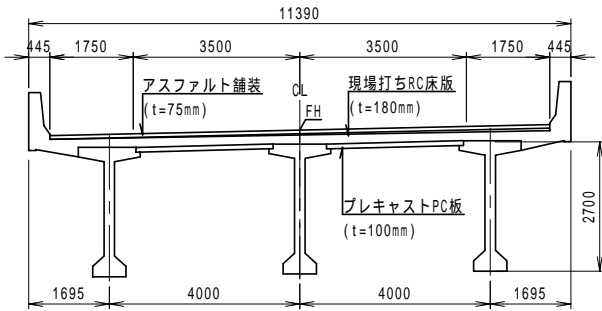


図 - 2 上部工断面図

2. 現行基準によるPC板先端部曲げモーメント

現在、PCコンボ橋の設計は、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会発行の「PCコンボ橋 設計・施工の手引き」が活用されている。本手引きにより、PC板先端部の床版の設計曲げモーメントを算出すると、正の曲げモーメントは、床版支間中央の設計曲げモーメントの48%程度となる(図 - 3)。

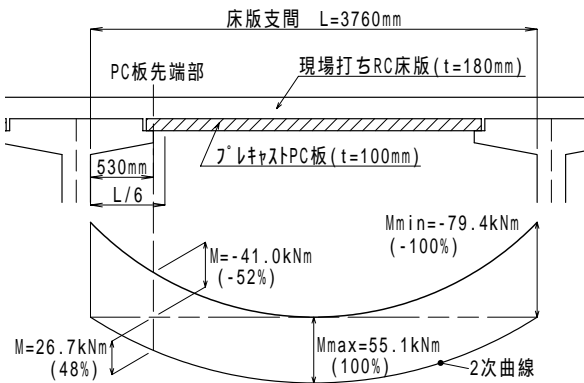


図 - 3 現行基準のPC板先端部設計曲げモーメント

図 - 3 に示すように、PC板先端部の設計曲げモーメントは、支点上、支間中央のそれぞれの曲げモーメントを0点に2次曲線ですりつけて算出している。PC板先端部は、正の曲げモーメントに対しては、場所打ち床版のみで、負の曲げモーメントに対しては、プレキャストPC板と場所打ち床版とで抵抗するものとして、コンクリートの引張応力を無視したRC断面で必要鉄筋量を求めている。

図から解るように、PC板先端部は床版支間の1/6位置

付近にある。現行の道路橋示方書では、連続鉄筋コンクリート床版の支間方向の鉄筋を曲げる場合、床版支間の1/6位置の断面で曲げることが規定されている。この時、床版の支間中央部の引張鉄筋量の80%以上及び、ウェブ前面の引張鉄筋量の50%以上は、それぞれ曲げずに連続させて配置する。また、現行道路橋示方書の解説文には、鉄筋の曲げ上げ位置(床版支間の1/6位置)における正の曲げモーメントは支間中央の曲げモーメントの80%程度であることが示されており、曲げ下げ位置における負の曲げモーメントは、支点上の曲げモーメントの15%程度であることが示されている。同様に、昭和55年の道路橋示方書においても、版計算の結果、曲げ上げ位置の曲げモーメントが支間中央の曲げモーメントの80%近い値であることが示されている。さらに、昭和39年の鋼道路橋設計示方書においては、床版を支持する桁の弾性変形により、支点上でも正の曲げモーメントが働くことが考えられるため、床版支間の1/5位置付近では鉄筋を1本おきに曲げ上げまたは、曲げ下げて配筋することが規定されている。

PC板先端部は、合成床版部と現場打ち床版のみの部分との境界であり、断面が急変するため、構造の連続性に欠ける箇所である。また、この箇所は床版支間の1/6位置付近であり、支持桁の弾性変形によって、図 - 3 で示したPC板先端部の正の設計曲げモーメントよりも大きな曲げモーメントが発生する可能性がある。したがって、剛性の不連続点であるPC板先端部の床版の安全性を高めることを目的に、主桁のたわみの影響を考慮した版解析と換算格子解析を実施し、現行基準により算出した曲げモーメントとの比較を行った。

3. PC板先端部曲げモーメントに対する検討

PCコンボ橋は、幅1.0m程度のプレキャストPC板を橋軸方向に敷設し、PC板どうしは特に結合していない。すなわち、床版支間方向は現場打ち床版とPC板が一体となった合成構造であるのに対し、床版支間直角方向は、現場打ち床版のみが抵抗する構造となっている。本検討における版解析及び換算格子解析では、床版支間方向と床版支間直角方向の床版剛性の違いによる影響を加味するため、直交異方性を考慮してモデル化し、解析を行った。以降に、版解析と換算格子解析の解析条件、解析モデル及び、解析結果について示す。

(1) 解析条件と解析モデル

1) 版解析

直交異方性版の基本式は、H.Olsenの次式により表わされる。

$$B_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\sqrt{B_1 B_2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + B_2 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = p \quad \dots (1)$$

$$\text{ここに, } B_1 = \frac{1}{1-\nu^2} EJ_1, \quad B_2 = \frac{1}{1-\nu^2} EJ_2$$

EJ_1 : 版の x 方向単位幅あたりの曲げ剛性

EJ_2 : 版の y 方向単位幅あたりの曲げ剛性

ν : ポアソン比

w : 版のたわみ

p : 鉛直荷重強度

版解析は, (1)式の変位を三角級数で展開して算出し, 任意点の曲げモーメントは下式により求められる。

$$M_x = -B_1 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), \quad M_y = -B_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

・・・(2)

また, 版解析における解析条件を以下に示す。

床版を支持する桁は単純支持直交格子桁とし, 主桁・中間横桁のねじり剛性は無視する。

床版は橋軸方向の曲げ剛性に対して, PC合成床版とした橋軸直角方向の曲げ剛性が約4倍となる直交異方性版とする。

床版は主桁の支承線位置で全幅にわたって単純支持し, 主桁には弾性的に線支持されているものとする。

荷重はT荷重2個を分布荷重として載荷し, 1個当たりの荷重は衝撃の影響を加味し, 140kNとする。

床版自重・ハンチ・壁高欄などの死荷重及び, 等分布活荷重による影響は考慮しないものとする。

2) 換算格子解析

換算格子解析では, 解析プログラムの節点数の制約から着目位置である中間横桁付近が密になるよう格子間隔を決定した。また, 解析モデルは以下の条件により設定した。

解析モデルは直交異方性版をねじり剛性を持った格子桁に置き換える。

主桁のねじり剛性は考慮しない。

端支点横桁のねじり剛性は考慮しない。

床版を直接支持しない中間横桁の剛性は無視する。

床版厚は張出し部も含め 280mm の一定とする。

載荷荷重は等分布荷重 140kN/m² を格点に集中荷重として載荷する。

3) 載荷方法

版解析及び換算格子解析は, 以下の2ケースについて行った。

表 - 1 解析ケース

ケース 1	PC板先端部の曲げモーメントに着目
ケース 2	床版支間中央部の曲げモーメントに着目

表 - 1 の2ケースともに, 橋軸方向の載荷位置は, 主桁のたわみの影響が最も大きくなる中間横桁直上位置とする。図 - 4 にケース1の版解析モデルを, 図 - 5 にケース1の換算格子解析モデルを示す。

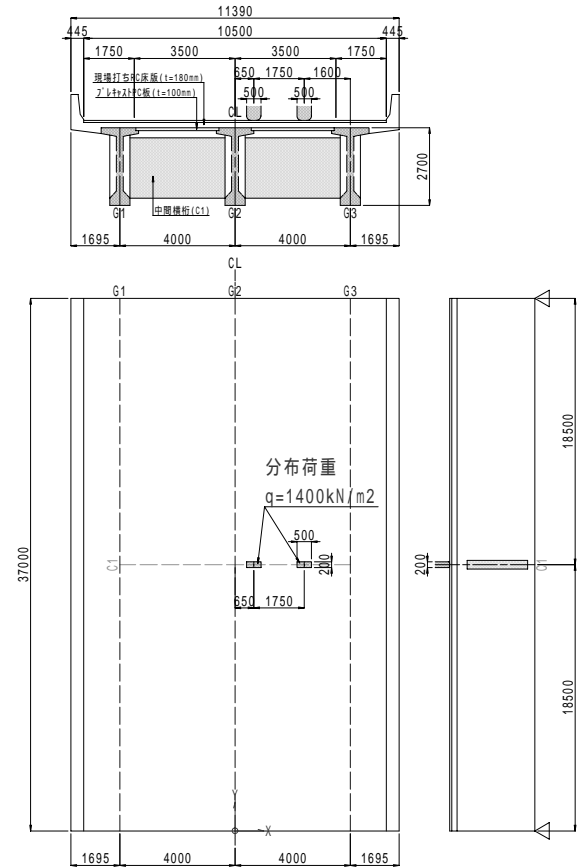


図 - 4 ケース1の版解析モデル図

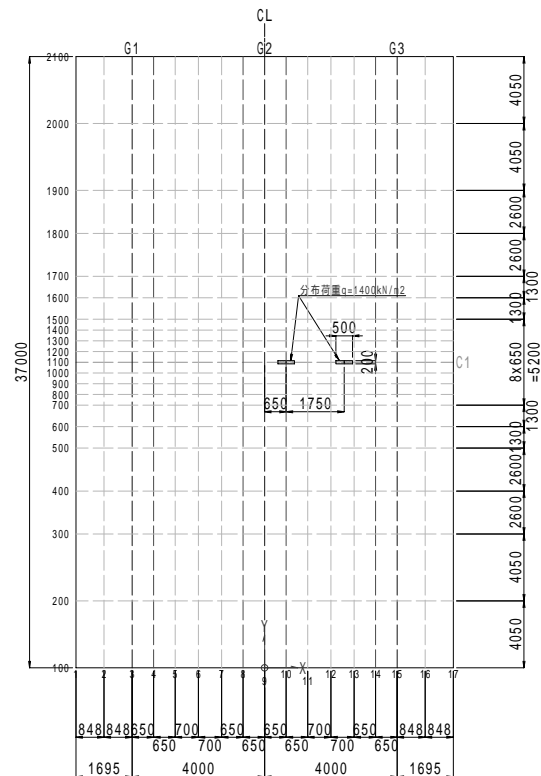


図 - 5 ケース1の換算格子解析モデル図

表 - 2 ケース 1 の版解析値

	G1								G2			着目点	G3							
X(m)	-5.695	-4.650	-4.000	-3.350	-2.675	-2.000	-1.325	-0.650	0.000	0.650	1.325	2.000	2.675	3.350	4.000	4.650	5.695			
W(mm)	0.2678	0.1764	0.1124	0.0380	-0.0337	-0.0778	-0.0682	0.0330	0.2874	0.7333	1.0748	1.2522	1.1641	0.8102	0.4244	0.1166	-0.3034			
MX(kNm/m)	0.000	1.052	2.071	-0.931	-3.951	-7.437	-12.291	-20.926	-44.038	32.167	25.761	40.830	44.123	8.803	-16.568	-6.673	0.000			

(2) ケース 1 の解析結果

版解析及び換算格子解析より算出したケース 1 の床版支間方向曲げモーメントを図 - 6 に示す。また、版解析による床版のたわみ W 及び曲げモーメント値 MX を表 - 2 に示す。

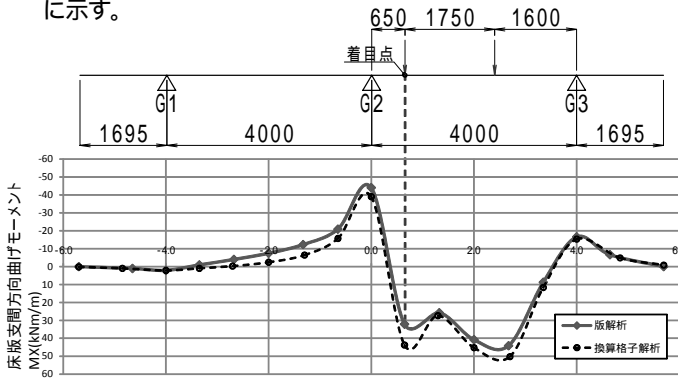


図 - 6 ケース 1 の床版支間方向曲げモーメント図

図 - 6 において、実線は版解析の結果を、破線は換算格子解析の結果を示す。表 - 2 より、版解析における PC 板先端部の曲げモーメントは 32.2kNm/m 程度である。同位置の換算格子解析による結果は 43.8kNm/m であり、換算格子解析による正の曲げモーメント結果が版解析に比べて若干大きくなっている。換算格子解析では、版をねじり剛性を持った梁部材にモデル化しているが、解析プログラムの節点数の制約から、格子間隔を 650mm から 4050mm に変化させて解析した。格子解析では、格子骨組の数を増やせばその解析精度は向上することが知られており、モデル化に際する節点数の制約によって、版解析結果よりも若干大きめの正の曲げモーメントとなったものと考えられる。

表 - 2 の版解析値より、各桁位置でのたわみ W が 0.1 ~ 0.4mm 程度発生しており、版解析において支持桁の沈下の影響が加味されていることが解る。

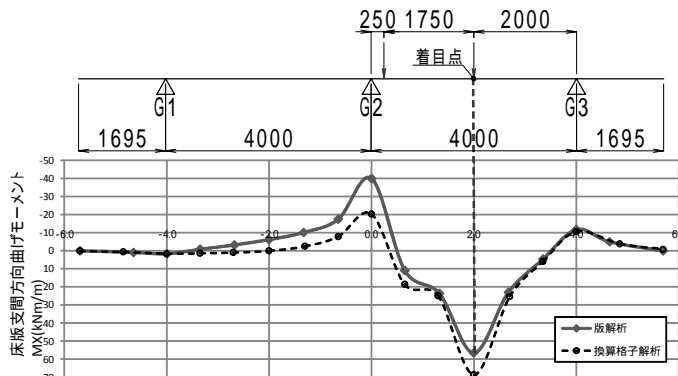


図 - 7 ケース 2 の床版支間方向曲げモーメント図

(3) ケース 2 の解析結果

ケース 2 の床版支間方向曲げモーメントを図 - 7 に示す。本ケースもケース 1 と同様に、着目点における換算格子解析の正の曲げモーメントが版解析結果よりも若干大きくなっている。

(4) 現行基準と解析値の曲げモーメントの比較

道路橋示方書より活荷重のみによる床版支間中央の正の曲げモーメントは次式にて算出できる。

$$M = (0.12 \times l + 0.07) \times P \times 90\% \quad \dots (3)$$

通常、連続版の床版支間曲げモーメントは単純版の算出値の 80% である。PC コンポ橋のように中間横桁を 1 箇所しか設けず、横桁間隔が 15m 以上となる場合には、床版支間方向の曲げモーメントが増加することが知られている。よって、本橋の衝撃を含めた活荷重による床版支間曲げモーメントは、(3) 式に示したように、単純版の設計曲げモーメントの 90% として算出する。(3) 式で床版支間 $l=3.76\text{m}$ 、T 荷重の片側荷重 $P=100\text{kN}$ とすると、床版支間曲げモーメントは 51.8kNm/m となる。本曲げモーメントを用い、現行基準により PC 板先端部の曲げモーメントを 2 次曲線で補間して算出すると 25.1kNm/m となる。

上述の道路橋示方書、現行基準、版解析及び、換算格子解析により算出した床版の活荷重のみによる曲げモーメント値を表 - 3 に整理する。

表 - 3 床版の活荷重のみによる曲げモーメントの比較

	PC 板先端部付近	床版支間中央
道路橋示方書	41.4kNm/m(0.80)	51.8kNm/m(1.00)
現行基準	25.1kNm/m(0.48)	51.8kNm/m(1.00)
版解析	32.2kNm/m(0.62)	56.6kNm/m(1.09)
換算格子解析	43.8kNm/m(0.85)	68.6kNm/m(1.32)

上表()内の値は、道路橋示方書の床版支間中央の曲げモーメントを 1.00 の基準値とした場合の比率を示している。また、道路橋示方書の PC 板先端部付近の値は、床版支間の 1/6 位置での正の設計曲げモーメントの値(支間中央の曲げモーメントの 80%)を示している。

版解析による床版支間中央の解析値と道路橋示方書より算出した値を比較した場合、約 9% 程度解析値が大きくなっている。これは版解析で衝撃を含めた載荷荷重を用いていること及び、少なからず支持桁沈下により床版支間中

中央の正の曲げモーメントが増加していることが原因であると考えられる。

版解析のPC板先端部の解析値 32.2kNm/m と床版支間中央部の解析値 56.6kNm/m を比較した場合、PC板先端部は支間中央部曲げモーメントの約 57% 程度となる。版解析結果どうしの比較による 57% の値は幾分支持桁沈下の影響が過少評価されている傾向にある。これは版解析でT荷重のみを載荷し、等分布活荷重による支持桁沈下の影響を加味していないこと及び、道路橋示方書の床版設計曲げモーメントの算出式に 10~20% と幅のある安全が見込まれていることなどが原因として考えられる。

換算格子解析のPC板先端部の解析値 43.8kNm/m と床版支間中央部の解析値 68.6kNm/m を比較した場合、PC板先端部は支間中央部曲げモーメントの約 64% 程度となる。換算格子解析による解析値と道路橋示方書の値及び、版解析値を見比べた場合、解析精度の影響により換算格子解析の結果が大きくなっているが、換算格子解析結果どうしのPC板先端部と支間中央部曲げモーメントの比率は、ほぼ版解析と同様な傾向となる。

PC板先端部における曲げモーメント値を比較した場合、現行基準による値 25.1kNm/m に対して、道路橋示方書では 65%、版解析では 28%、換算格子解析では 75% 程度大きくなっている。したがって、PC板先端部の設計曲げモーメントは、支持桁沈下の影響を加味した場合、現行基準値よりも 28~75% 程度大きくなり、道路橋示方書の床版支間中央部の曲げモーメントの約 62~85% 程度に相当することが解る。

4. PC板先端部のせん断に対する検討

(1) PC板先端部の構造

図-8に主桁上フランジ切欠き部におけるPC板先端部の断面を示す。

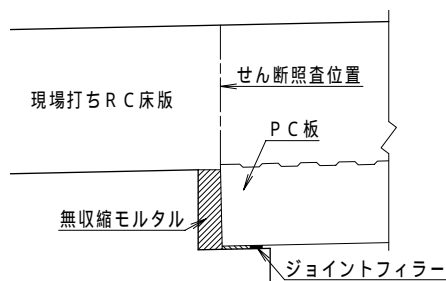


図-8 PC板先端部断面図

PC板は主桁上フランジ切欠き部のジョイントフィラー上に設置され、主桁上フランジとPC板の隙間には無収

縮モルタルが打設される。PCコンボ橋ではこの無収縮モルタル部より主桁側はRC床版として、床版支間側はプレキャストPC板と現場打ちRC床版が一体となった合成床版として抵抗する。

一方、床版のせん断に着目した場合、現行の道路橋示方書では最小床版厚を満足することで、床版のせん断に対しては、十分に耐力が確保されているものとして、照査は省略している。本橋の最小床版厚は、大型車の交通量に対する割増係数 $k_1=1.15$ を考慮して 280mm となる。床版支間部の床版厚はプレキャストPC板 100mm と現場打ちRC床版 180mm より 280mm となることから、最小床版厚が確保されている。しかし、PC板先端部に対しては、現場打ちRC床版の下に無収縮モルタルが充填されているがRC床版厚 180mm では最小床版厚が満足されていない。

昨今、主桁上フランジ切欠き部の輪荷重疲労耐久性確認試験などにより、その耐久性が確認されているが、モルタル部でひびわれが発生しているとの報告もある。また、現場でのモルタル充填不足や過積載車により、PC板先端部には設計で想定されている以上のせん断力が作用している可能性がある。

よって、以降に換算格子解析によりPC板先端部のせん断力を算出し、現場打ちRC床版のみでせん断力を負担した場合の影響について検討を行った。

(2) せん断力分布

換算格子解析は、前述の図-5の解析モデルを用いて行った。図-9に換算格子解析による中間横桁位置でのせん断力分布を示す。

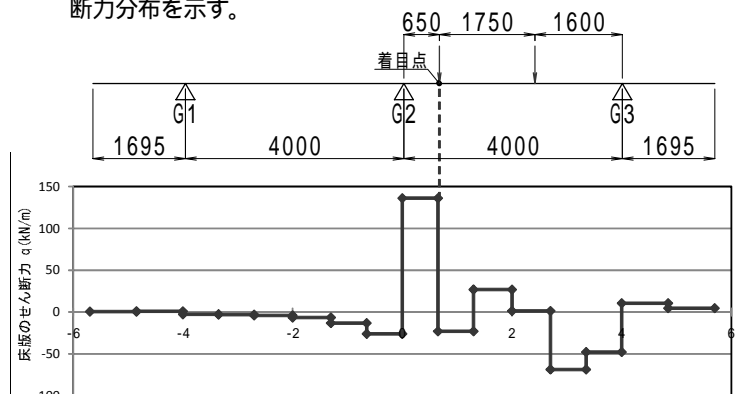


図-9 せん断力分布図

上記せん断力分布より床版に作用するせん断力は、押し抜きせん断のように周辺に均等に作用するのではなく、主桁剛性の影響により主桁近傍のせん断力が大きくなる。主桁近傍でのせん断力は、押し抜きせん断というよりは、主桁側にせん断力が卓越した梁としてのせん断に近く、床版支間中央部に比べ、大きなせん断力が作用する。

(3) せん断応力度

道路橋示方書において、 $f_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の押し抜きせん断に対する許容値は 1.0N/mm^2 である。一方、梁のせん断力に対して、コンクリートが負担できるせん断応力度は 0.45N/mm^2 と押し抜きせん断に対する許容値の $1/2$ 以下である。表 - 4 に、衝撃を含めた T 荷重 140kN に対して版としての押し抜きせん断応力度及び、換算格子解析のせん断力に対して梁としてのせん断応力度を比較する。

表 - 4 せん断応力度の比較 (N/mm²)

	合成床版 厚 280mm	R C 床版 厚 180mm	許容値
押し抜きせん断応力度	0.22	0.40	1.00
梁としてのせん断応力度	0.49	0.76	0.45

上表に示すように、T 荷重に対する押し抜きせん断応力度は、床版を合成床版厚分考慮した場合($t=280\text{mm}$)でも、R C 床版厚分のみとした場合($t=180\text{mm}$)でも許容値を満足する。しかし、換算格子解析の P C 板先端部のせん断力 136.1kN/m に対して、合成床版厚分を考慮した場合でも、現場打ちの R C 床版のみで抵抗するとした場合でも、せん断応力度は、コンクリートが負担できる許容せん断応力度を超過する。特に、せん断応力度は R C 床版厚のみで抵抗するとした場合で約 69% 程度応力超過となる。主桁上フランジ切欠き部に充填した無収縮モルタルが健全である場合には、P C 板先端部の R C 床版のせん断応力度も上記のような大きな値とはならないが、モルタルによる支持能力が低下した場合には、R C 床版には許容値を大幅に超過するせん断応力度が作用する可能性がある。P C 板先端部はプレキャスト部材と現場打ちコンクリート部材の接点部であり、構造上の弱点となり易く、主桁近傍のせん断力分布が梁せん断に近い性状を示すことから、この付近の経年変化に留意する必要がある。

あ と が き

P C コンボ橋の主桁上フランジ切欠き部の P C 板先端部に着目した床版の設計法について検討を行った。検討により得られた知見は以下のとおりである。

- ・ P C 板先端部の現場打ち R C 床版の設計曲げモーメントは、主桁のたわみの影響を加味した場合、現行基準の設計手法により得られる曲げモーメントよりも 28 ~ 75% 程度大きな正の曲げモーメントが発生する。
- ・ その大きさは、道路橋示方書の床版支間中央部の曲げモーメントの約 62 ~ 85% に相当するため、P C 板先端部の正の設計曲げモーメントとしては、床版支間中央部の曲げモーメントの 80% 程度を考慮することが望

ましいと考える。

- ・ P C 板先端部は主桁近傍にあり、主桁剛性の影響によって、せん断力分布は押し抜きせん断というよりは梁のせん断に近い性状を示す。そのせん断力を R C 床版厚のみで受け持ったとした場合、梁としての許容せん断応力度の約 1.69 倍のせん断応力度が作用し、許容値を超過する。P C 板先端部はその構造より、主桁上フランジ切欠き部と P C 板の隙間に充填された無収縮モルタルの健全性が、P C 板先端部直上の現場打ち R C 床版のせん断応力度に大きく影響する。

本検討では、合成床版と現場打ち R C 床版との境界点において剛性の不連続性を考慮した解析まで実施することができなかった。今後 F E M 解析等により、剛性の不連続性を考慮した P C 板先端部の解析を実施し、更なる検討を行いたいと考えている。

最後に、本検討を行う上で多くの方々より貴重な資料とご指導をいただきましたことに心より深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説
コンクリート橋編，2002.3
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説
コンクリート橋編，1978.1
- 3) 社団法人日本道路協会：鋼道路橋設計示方書，1964
- 4) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：
P C コンボ橋設計・施工の手引き，2007.5
- 5) 高尾孝二：鋼道路橋鉄筋コンクリート床版の曲げモーメント計算法，橋梁と基礎，1985.3
- 6) 榎祐二，伏黒邦雄：道路橋床版のせん断耐力の検討，
土木学会 第 62 回年次学術講演会，2007.9