論文 PCa 斜橋ボックスカルバートの圧着接合に伴う側壁圧縮応力の照査

丸山 貴吉*1・福室 順也*2・笠井 哲郎*3・中野 友裕*4

要旨: 側壁に PC 緊張力を導入することで接合部全体を圧縮状態とした,上下分割形式のプレキャスト (PCa) ボックスカルバートでは, PC 鋼材位置やカルバート形状 (直方体・斜橋) により接合部応力が許容圧縮応力 を上回る場合がある。接合面が許容圧縮応力内の場合でも, PC 鋼材位置やカルバート形状は側壁全体の応力 状態に影響すると考えられるため,側壁内各点における応力を照査する必要がある。本稿では3次元 FEM 解 析から得られる最大圧縮主応力の分布を,複数の内空幅,傾斜角, PC 鋼材位置ごとに検討した。その結果, PC 鋼材を外側に配置することにより,最大圧縮主応力を大幅に低減できることを明らかにした。 キーワード: 斜橋,ボックスカルバート,プレキャスト部材,最大主応力, PC 圧着

1. はじめに

近年,高度成長期(1955年~1970年代)に建設された社会基盤施設の老朽化に伴う機能・安全性確保への対応がなされており,橋梁構造物の多くもその対象となっている¹⁾。

橋梁と定義される橋長 2m 以上の道路橋は,日本全国 におよそ 70 万橋存在する。このうちの8割近くが,市町 村の管理する支間長 15m 以下の小規模橋梁であるが,こ れら小規模橋梁については,供用年数 50 年を越えるもの が4割以上を占めている²⁾。厳しい財政状況下にある各 自治体は,これらの問題に対して,効率的・経済的に維 持管理などの対応を進めていく必要に迫られている。

この視点から考えると、小規模橋梁の架け替えにおい て、工期短縮につながるプレキャスト形式を採用するこ とが有効な選択肢として考えられる。実際、この規模の 橋梁の架け替えを大型プレキャスト(PCa)ボックスカ ルバートを用いて実施する事例は増加の傾向にある。

その一方で,架け替え地点の地形と道路線形の関係から,河川と橋梁とが直角に交差が出来ないケースもある。 この場合,一般的な直方体形状のボックスカルバートを 採用できないため,平行四辺形のボックスカルバート(以 下,斜橋ボックスカルバートと称す)を採用することに なる。

斜橋ボックスカルバートは、輸送条件や施工条件等か らボックスカルバートを上下に分割して設置し、側壁を PC 鋼材の緊張力による圧着接合とする。前報³において 著者らは、圧着接合面全体を圧縮状態にするために必要 となる PC 緊張力を、内空幅、傾斜角 α ($\mathbf{Z}-1$)、PC 鋼材の配置位置ごとに検討し、PC 鋼材の配置は外側寄り に配置することが有利であること、傾斜角が小さくなる ほど必要な緊張力が増加すること、その程度は内空幅が

*1鶴見コンクリート(株) 技術部 (正会員)
*2鶴見コンクリート(株) 技術部 (非会員)
*3 東海大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)
*4 東海大学 工学部土木工学科准教授 博(工) (正会員)

小さいほど顕著になることを3次元 FEM 解析により示した。

その結果,内空幅 4000mm で PC 鋼材を外側に配置し た場合,傾斜角 α=60°の斜橋ボックスカルバートでは, 直方体形状(傾斜角 α=90°)の 1.35 倍の緊張力が必要 になることが示されている。このように,斜橋ボックス カルバートでは,直方体形状の場合と比べて PC 緊張力 の割増が必要となるわけだが,この割増は小さなもので ないこと,ならびに PC 緊張力の導入位置が側壁中央か らずれていることから,側壁の応力状態を確認する必要 がある。また,傾斜角を有する斜橋ボックスカルバート においては,形状・境界条件・荷重条件を2次元にモデ ル化した場合に直方体形状と同じ条件になることから, カルバート形状の比較の意味をなさなくなる。そのため 3次元形状を考慮して検討を行う必要があることは,論 を待たない。

そこで本研究では、3次元 FEM 解析により最大圧縮 主応力を壁面全体にわたって算出し、図-1に示す傾斜 角α・内空幅 B および PC 鋼材配置位置による相違につ いて比較検討を行った。



	B4000	B6000	B8000	65kN 65kN
内幅 B	4000	6000	8000	
内高 H	2500	2500	2500	
製品長 L	1000	1000	1000	
頂版厚 T1	300	450	500	Ξ Β /2 1300 ⁻¹
底版厚 T2	300	450	500	C PC鋼材
側壁厚 T3	250	350	400	
ハンチC	250	300	300	















衣─∠ 树科油九	
コンクリートのヤング係数[GPa]	30.0
コンクリートのポアソン比	0.2
鉄筋のヤング係数[GPa]	200.0
RC の単位体積重量[kN/m ³]	24.5
PC 鋼材(φ29)ヤング係数[GPa] (C 種 1 号 SBPR1080/1230)	200.0

表一2 材料諸元



図-3 PC 鋼材配置図(単位[mm])

2. 検討の対象としたボックスカルバート

今回の検討対象は,前報³において圧着接合面全体 がその法線方向において圧縮応力を生じる PC 緊張力 を算定したものと同じボックスカルバートである。内 空幅は 4000,6000,8000mm であり,内空高はすべて 2500mm である。表-1に構造諸元を,図-2に主鉄 筋配筋図を示す。

表-1に示した各構造について, 傾斜角 α を 90° (直方体形状), 75° および 60° (斜橋) とした 3 種 類を検討対象とした。主鉄筋については, B4000 では 幅方向に 7 組, B6000 では 6 組, B8000 では 4 組の配 置となる。なお, 配力筋として D10~D22 が 400mm 間 隔で配置されている。また, 材料諸元は**表-2**に示す とおりである。

いずれのボックスカルバートも、上下分割されたものを重ね、側壁に PC 鋼材を用いて緊張力を導入する 圧着接合により一体化される。その際、接合部全圧縮 となる緊張力は、PC 鋼材の配置位置(図-3)により 異なり、表-3のように得られている³⁾。なお、前報 では、PC 鋼材を内側配置の場合の緊張力も検討したが、 実用的な緊張力を大幅に超過していたため割愛した。

B4000									
α	90	0	75°		60°			凡例	
MID	-254.1	-253.5	-301.1	-301.2	-389.8	-390.4		PC_2	PC_4
	-254.1	-253.5	-301.8	-300.6	-390.8	-389.2		PC_1	PC_3
OUT	-156.1	-155.9	-175.2	-175.3	-210.9	-211.1		注:導入直後の許容	
	-156.1	-155.9	-175.4	-175.1	-211.0	-210.9		緊張力 569[kN]	
B6000(赤字は許容緊張力を超えていることを示す)									
α	90	0	75°		60°			凡例	
MID	-576.8	-576.5	-636.8	-637.1	-731.1	-731.8		PC_2	PC_4
	-576.8	-576.5	-637.4	-636.6	-732.0	-730.8		PC_1	PC_3
OUT	-313.2	-313.2	-331.5	-331.7	-357.1	-356.3		注:導入直後の許容	
	-313.2	-313.2	-331.6	-331.6	-356.3	-357.1		緊張力 569[kN]	
B8000(赤字は許容緊張力を超えていることを示す)									
α	90	90° 75°		0	60°			凡例	
MID	-927.5	-927.4	-1002.2	-1002.8	-1127.3	-1128.5		PC_2	PC_4
	-927.5	-927.4	-1003.0	-1002.1	-1128.6	-1127.2		PC_1	PC_3
OUT	-479.4	-479.6	-499.7	-500.0	-533.9	-534.1		注:導入直後の許容	
	-479.4	-479.6	-499.8	-499.9	-533.8	-534.1		緊張力 569[kN]	

表-3 接合面全圧縮となる PC 緊張力[kN]

表-4 荷重諸元





最終的な照査は,文献⁴⁾に基づく荷重状態(**表-4**)に ついて行う。ただし活荷重は,土被りが浅いことを考慮 し,後輪を2軸として作用させ,接合部全圧縮に必要な 緊張力が最大になると考えられる位置で固定とした。

3. 解析の概要

図-4に, B8000 のα=90,75,60°での要素分割図を示 す。鉄筋コンクリートには分散鉄筋モデルを考慮した 8 節点アイソパラメトリック要素, PC 鋼材は初期応力・ひ



ずみを考慮したトラス要素を用いて収束計算を行うこと で、カルバート内部の応力状態を算出した⁵⁾。 具体的には、解析によって得られる応力テンソル

 $\begin{bmatrix} \sigma'_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma'_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma'_z \end{bmatrix}$

の固有値を求めることで最大主応力を算定し,側壁の最 大圧縮主応力が許容応力内に収まるか否かを評価した⁶。

4. 解析結果

側壁中央位置に PC 鋼材を配置した場合(MID)の側 壁の最大圧縮主応力分布を抜粋したものを,側壁の上下



ハンチ間を5等分した断面(**表**-4図中のLA など)に ついて、図-5(B8000: α=90°),図-6(B8000,α =60°)に示す。コンクリートの許容圧縮応力度は 12[MPa]であるが、最大圧縮主応力で検討すると、この 値を超えている部分の存在していることが分かる。この 例では、**表-3**に示したように、圧着接合面を全圧縮に するための緊張力が PC の許容緊張力以上であるが,その結果,コンクリートに生じる側壁の最大圧縮主応力に関しても全体にわたって増加し,許容圧縮応力を超える部分の生じる結果となっていることがわかる。

次に、同じ PC 鋼材を外側に配置した場合について、 図-7 (B8000: α=90°),図-8 (B8000, α=60°)

		90	75	60
B4000	MID	$\sigma'_1 = 6.688$	$\sigma'_1 = 7.350$	$\sigma'_1 = 9.584$
		$\vec{n} = (0.283, 0.084, 0.955)$	$\vec{n} = (0.274, 0.105, 0.956)$	$\vec{n} = (\ 0.125, \ 0.165, \ 0.978 \)$
		P(4.250, 0.375, 0.550)	P(4.250, 0.389, 0.550)	P(4.250, 2.454, 2.425)
D4000	OUT	$\sigma'_1 = 4.812$	$\sigma'_1 = 5.061$	$\sigma'_1 = 6.640$
		$\vec{n} = (0.293, 0.077, 0.953)$	$\vec{n} = (0.287, 0.442, 0.850)$	$\vec{n} = (0.122, -0.121, 0.985)$
		P(4.250, 0.375, 0.550)	P(4.250, 1.389, 0.550)	P(4.250, 2.454, 2.425)
B6000 -		$\sigma'_1 = 9.456$	$\sigma'_1 = 10.178$	$\sigma'_1 = 11.916$
	MID	$\vec{n} = (0.313, 0.004, 0.950)$	$\vec{n} = (\ 0.260, \ 0.024 \ , \ 0.965 \)$	$\vec{n} = (\ 0.245, \ 0.071, \ 0.967 \)$
		P(6.350, 0.375, 0.750)	P(6.350, 1.702, 0.750)	P(6.350, 3.666, 0.750)
	OUT	$\sigma'_{1} = 5.704$	$\sigma'_1 = 5.950$	$\sigma'_1 = 7.069$
		$\vec{n} = (0.318, 0.003, 0.948)$	$\vec{n} = (0.269, 0.072, 0.960)$	$\vec{n} = (\ 0.146, \ 0.935, \ -0.323 \)$
		P(6.350, 0.375, 0.750)	P(6.350, 1.702, 0.750)	P(6.350, 3.666, 2.450)
B8000 -		$\sigma'_1 = 11.884$	$\sigma'_1 = 12.524$	$\sigma'_1 = 14.362$
	MID	$\vec{n} = (0.256, 0.800, -0.543)$	$\vec{n} = (0.249, 0.957, -0.151)$	$\vec{n} = (0.225, 0.760, -0.610)$
		P(8.400, 0.375, 0.800)	P(8.400, 2.501, 0.800)	P(8.400, 4.850, 0.800)
	OUT	$\sigma'_1 = 6.680$	$\sigma'_1 = 6.870$	$\sigma'_1 = 7.960$
		$\vec{n} = (0.265, 0.955, -0.130)$	$\vec{n} = (0.262, 0.926, -0.273)$	$\vec{n} = (0.099, 0.981, -0.165)$
		P(8.400, 0.375, 0.800)	P(8.400, 2.501, 0.800)	P(8.400, 4.850, 2.500)

表-5 ケースごとの最大圧縮主応力 σ'_1 [MPa], 方向余弦ベクトル \vec{n} および発生位置 P

に示す。PC を外側に寄せることで PC 緊張力を低下させ られるため、最大圧縮主応力についても大幅に抑制する ことができることがわかる。傾斜角による最大圧縮主応 力の増加も顕著には認められず、PC 鋼材を外側に配置す ることで側壁の応力状態を抑制できることが示されたと 言える。

表-5に、ボックスカルバートの寸法・傾斜角別の最 大圧縮主応力・方向余弦・発生位置を示す。最大圧縮主 応力の方向余弦や発生位置について統一性は見られない が、いずれのケースにおいても、同一の断面幅 B と傾斜 角αにおいては、外側に PC 鋼材を配置することにより、 最大圧縮主応力が抑制され、許容圧縮応力度(12MPa) に収まっている。

これらのことから,外側に PC 鋼材を配置することに よる大幅な圧縮主応力の増大は認められず,外側に PC を配置することの優位性が示されたと考えられる。

5. まとめ

圧着接合を用いて緊結するPCaボックスカルバートに ついて,最大圧縮主応力を用いて接合部以外も含めた側 壁応力状態を照査し,PC 鋼材の合理的な配置方法につい て検討した。得られた知見をまとめると,以下のようで ある。

(1) 側壁中央に PC 鋼材を配置した場合, B4000 では斜 角に関わらず PC 緊張力・最大圧縮主応力ともに許 容圧縮応力度に収まるが, B6000,B8000 では, PC の許容緊張力だけでなく最大圧縮主応力について も許容圧縮応力度に収まらないケースが多い。

(2) 外側に PC 鋼材を配置した場合, すべての傾斜角に おいて, PC 緊張力だけでなく, 側壁コンクリート の最大圧縮主応力についても大幅な低減効果が認 められた。

これらより, PC 鋼材を外側に配置することは, 圧着接 合に必要な PC 緊張力だけでなく, 側壁コンクリートの 圧縮応力度に対しても有効な手段であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会メンテナンス工学連合小委員会:社会基盤 メンテナンス工学,東京大学出版会,pp.1-7,2004
- 2) 多田宏行:橋梁技術の変遷・道路保全技術者のため に,鹿島出版会,2000
- 丸山貴吉,福室順也,笠井哲郎,中野友裕: PC 斜橋 ボックスカルバートの圧着接合に関する解析的研 究,コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.565-570, 2011
- 4) 道路土工 カルバート工指針,日本道路協会,平成 21年度版
- 5) 鷲津久一郎, 宮本博, 山田嘉昭, 山本善之, 川井忠 彦: 有限要素法ハンドブック・基礎編, 培風館, 1981
- 6) 京谷孝史:よくわかる連続体力学ノート,森北出版, pp.51-54, 2008