

# 論文 PCa 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

丸山 貴吉\*1・福室 順也\*2・笠井 哲郎\*3・中野 友裕\*4

**要旨:** 斜橋ボックスカルバートでは側壁接合面に PC 緊張力を導入した場合、側壁の鈍角部と鋭角部に発生する応力の異なることが推測される。本研究では、直方体ボックスカルバートと斜橋ボックスカルバートに関し、圧着接合面全体が圧縮力となる緊張力を 3 次元解析により算出し、傾斜角・内空幅および PC 鋼材配置位置による相違について比較検討を行った。その結果、PC 鋼材は側壁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小さいほど顕著になることが示された。

**キーワード:** 斜橋ボックスカルバート, プレキャスト部材, PC 緊張力, 圧着接合

## 1. はじめに

我が国の社会基盤施設は、今日に至るまで継続的な投資が行われ、膨大なストックが蓄積されてきた。これらの施設は高度成長期（1955 年～1970 年代）に建設されたものが多く、建設後相当の期間を経過する施設の増加に伴い、老朽化による機能・安全性の低下が顕在化してきている<sup>1)</sup>。特に橋梁と定義される橋長 2m 以上の道路橋の数は全国で 70 万弱存在し、その内の 8 割近くが、市町村が管理する支間長 15m 以下の小規模橋梁である<sup>2)</sup>。これらのうち供用年数 50 年を越えるものが 4 割以上を占め、それらの適切な管理・運用が喫緊の課題となっている<sup>3)</sup>。しかし、市町村をはじめとする自治体は、厳しい財政状況にあり、これまで以上に効率的・経済的に機能向上や維持管理を進めていくことが求められている。

このため、この規模の橋梁では、経済性や工期短縮などの観点から大型プレキャスト (PCa) ボックスカルバートによる架け替え事例が増加している。この PCa ボックスカルバートによる架け替えにおいては、河川と橋梁が直角に交差が出来ない状況が多いため、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）を使用することが多く、また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、側壁に PC 鋼材やボルトによる緊張力を導入し、上下部材を接合する構造となっている。しかし、これまでこの接合部の圧着状態（応力状態）に関する報告は少ない。

特に、斜橋ボックスカルバートでは側壁接合面に PC 緊張力を導入した場合、側壁の鈍角部と鋭角部（図-1）に発生する応力の異なることが推測される。このような形状の影響を評価するには、3 次元にモデル化した解析が必要であるが、既往の研究では直方体をモデル化した例にとどまっております<sup>4)</sup>、斜橋ボックスカルバートについて

て検討した例は見当たらない。

そこで本研究では、直方体ボックスカルバートと斜橋ボックスカルバートに関し、圧着接合面全体が圧縮力となる緊張力を 3 次元解析により算出し、傾斜角  $\alpha$  ・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。

## 2. 斜橋ボックスカルバートの構造と問題点

大型プレキャストボックスカルバート橋の構造は、輸送条件や施工条件等から、部材重量の軽減を目的に上下

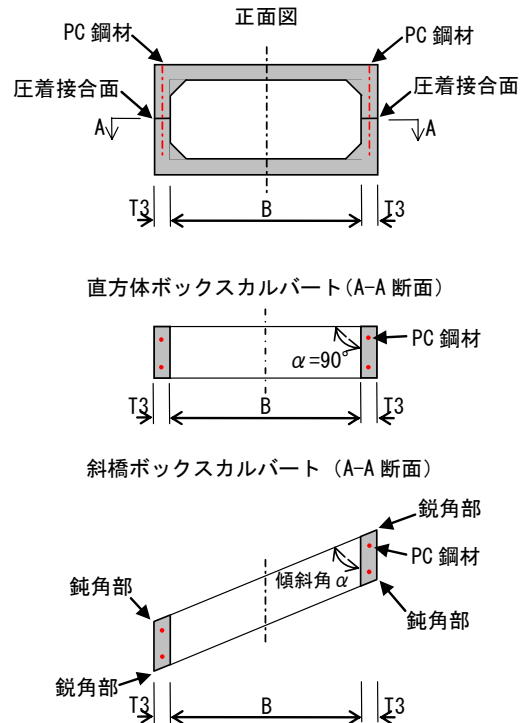


図-1 PCa ボックスカルバートの概略図

\*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)

表-1 PCa ボックスカルバート寸法 [mm]

	B4000	B6000	B8000
内空幅 B	4000	6000	8000
内空高 H	2500	2500	2500
製品長 L	1000	1000	1000
頂版厚 T1	300	450	500
底版厚 T2	300	450	500
側壁厚 T3	250	350	400
ハンチ C	250	300	300

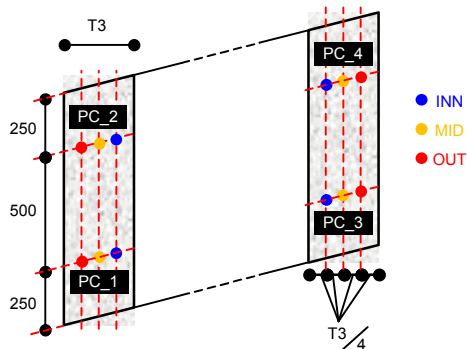
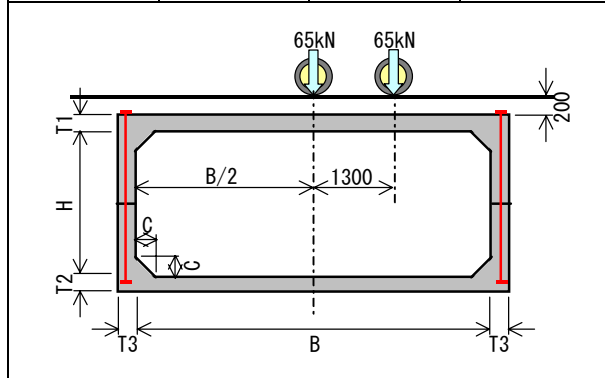
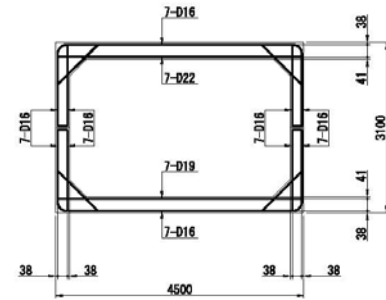


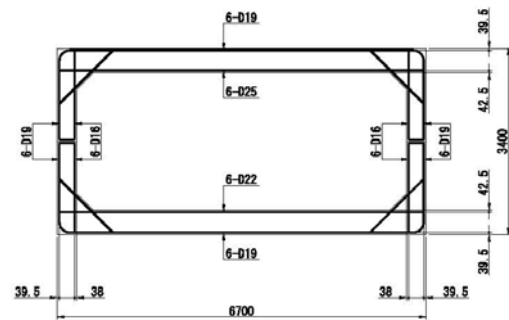
図-2 PC 鋼材配置図

分割構造としている。分割接合の方法は、一般に PC 鋼材やボルトによる接合、機械継手による接合等が行われている。しかし、道路土工カルバート工指針<sup>5)</sup>の 2010 年 3 月の改訂では、本体断面にヒンジがなく、PC 鋼材による圧着接合等により、分割接合部に十分な剛性を与える構造とすることとしている。すなわち接合部は圧着接合面全体が圧縮力を受け持つように（接合面が開かないようにする）緊張力を与えるなどの配慮が必要になる。

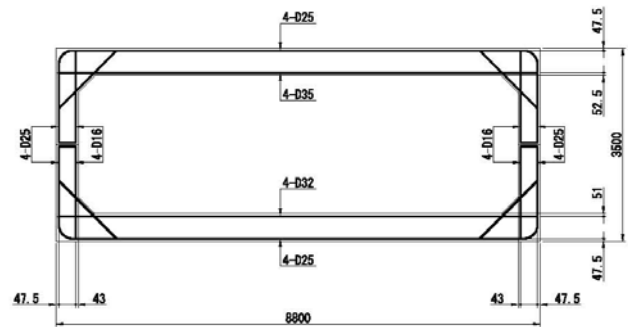
図-1 は、同じ内空幅の直方体および斜橋ボックスカルバートの概略図である。図の 4 箇所 PC 鋼材に緊張力を導入した場合、斜橋では形状の非対称性により直方体とは異なる圧着状態となることが推測される。しかし、それがどの程度の相違であるかなどについて上記指針も含め言及したものはないのである。



a) B4000 配筋図 [mm]



b) B6000 配筋図 [mm]



c) B8000 配筋図 [mm]

図-3 PCa ボックスカルバート主鉄筋配筋図

### 3. 接合面全圧縮とする緊張力の算定

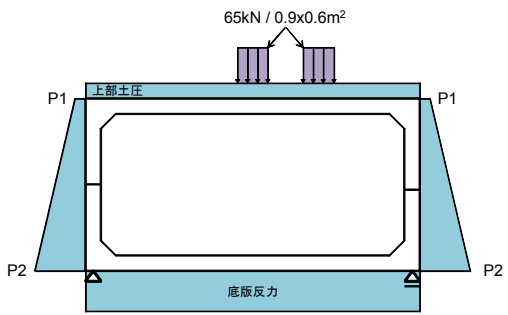
#### 3.1 検討の対象とした PCa ボックスカルバート

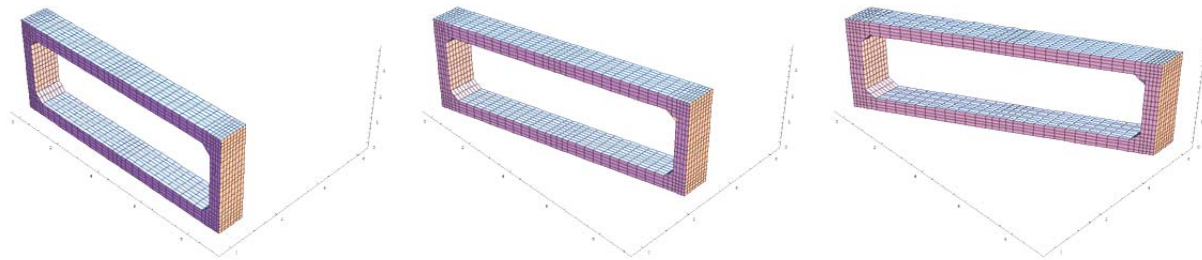
表-1 に、今回検討した PCa ボックスカルバートの寸法を示す。内空幅は 4000,6000,8000[mm] の 3 種類とし、いずれも内空高は 2500[mm] である。内空幅の変化に伴う差異を検討するために H は一定としている。

それぞれの内空幅について、図-1 の傾斜角  $\alpha$  を 90, 75, 60° とした 3 ケースを考え、接合面を全圧縮とするのに必要なプレストレスを算定することとした。その際、PC 鋼材の配置による相違を検討するために、PC 鋼材の配置位置は図-2 のように、側壁内側 1/4, 中央, 外側 1/4 を仮定した（以下、INN,MID,OUT と表す）。

また、主鉄筋配筋図を図-3 に示す。この主鉄筋が B4000 については幅方向に 7 組、B6000 で 6 組、B8000 で 4 組配置されている。配力筋については D10~D22 が 400mm 間隔で配置されている。

表-2 構造および荷重諸元

コンクリートのヤング係数[GPa]	30.0	B4000 側圧[kPa]	P1=3.150 , P2=28.350
コンクリートのポアソン比	0.2	B6000 側圧[kPa]	P1=3.825 , P2=30.375
鉄筋のヤング係数[GPa]	200.0	B8000 側圧[kPa]	P1=4.050 , P2=31.050
RC の単位体積重量[kN/m <sup>3</sup> ]	24.5		
PC 鋼材 (φ29) ヤング係数[GPa]	200.0		
土の単位体積重量[kN/m <sup>3</sup> ]	18.0		
土圧係数	0.5		
活荷重の作用幅[m]	0.6		
活荷重の作用長[m]	0.9		



a) 傾斜角  $\alpha=90^\circ$

b) 傾斜角  $\alpha=75^\circ$

c) 傾斜角  $\alpha=60^\circ$

図-4 要素分割図 (B8000)

表-3 B4000 解析結果

L 1 作用時の PC 鋼材の緊張力 [kN]							凡 例			
$\alpha$	90°		75°		60°		PC_2	PC_4		
INN	-692.9	-692.0	-1084.3	-1085.7	-2552.2	-2559.2	PC_1	PC_3		
	-692.9	-692.0	-1086.7	-1083.4	-2560.2	-2551.0				
MID	-254.1	-253.5	-301.1	-301.2	-389.8	-390.4	注： 許容緊張力 569 [kN]			
	-254.1	-253.5	-301.8	-300.6	-390.8	-389.2				
OUT	-156.1	-155.9	-175.2	-175.3	-210.9	-211.1			注： 許容圧縮応力度 12 [MPa]	
	-156.1	-155.9	-175.4	-175.1	-211.0	-210.9				
コンクリート応力の最大・最小値 [MPa]							凡 例			
$\alpha$	90°		75°		60°		左最大	右最大		
INN	11.01	11.40	16.94	17.35	39.03	39.58	左最小	右最小		
	0.08	0.00	0.11	0.00	0.27	0.00				
MID	4.36	4.75	5.08	5.49	6.30	6.85	注： 許容圧縮応力度 12 [MPa]			
	0.08	0.00	0.11	0.00	0.28	0.00				
OUT	2.87	3.27	3.17	3.58	3.59	4.15			注： 許容圧縮応力度 12 [MPa]	
	0.09	0.01	0.11	0.00	0.27	0.00				

### 3.2 解析の概要

上述の PCa ボックスカルバートに、表-2 の諸元により算出される自重・上部土圧・底版反力・側圧および輪荷重を作用させ、その荷重状態（以下 L1）で接合面全圧

縮となる緊張力を有限要素解析により求めた。なお、L1 から輪荷重を除いた荷重状態を L0 とする。

今回のような不連続な断面を有する場合、引張力を受け持たないばね定数の大きな接触ばねを使う方法<sup>6)</sup>や、

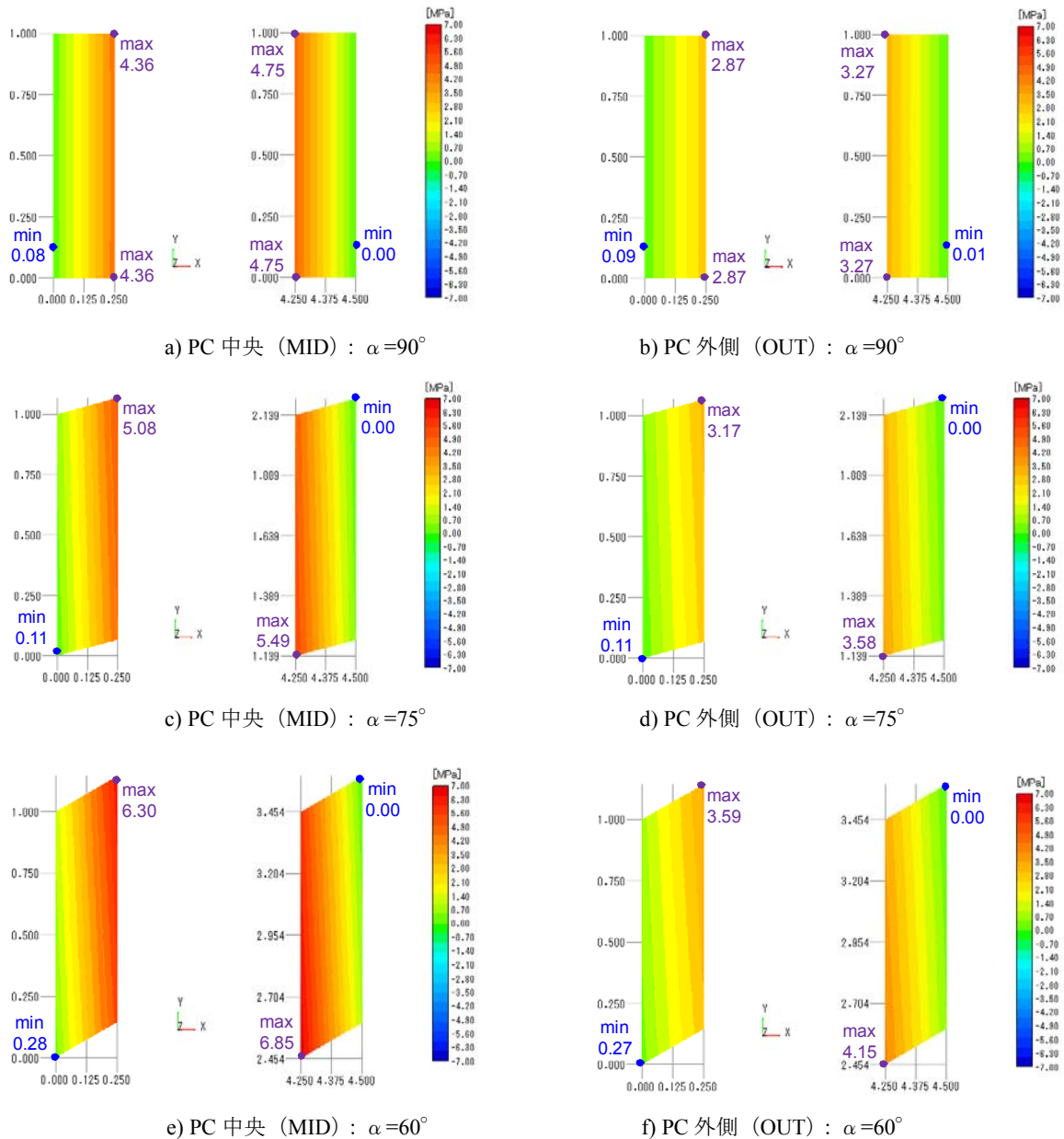


図-5 左右接合面における応力分布 (L1作用時における全断面圧縮時: B4000)

接合要素を使う方法<sup>7)</sup>が考えられるが、これらは適切な許容貫入量やばね定数の設定が難しい。それに加えて、今回の解析の目的が接合面全圧縮となる状態を求めるため、通常連続体解析を行って、接触面位置に引張力が作用していなければ、接合面が全圧縮であると判断できると考え、接触の有無を表現するモデルは採用していない。

解析に用いた要素分割を、B8000の $\alpha=90,75,60^\circ$ の場合について図-4に示す。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、緊張力を算出した。

### 3.3 解析結果

表-3にB4000の各傾斜角および各PC鋼材位置にお

いてL1作用時に接合面全圧縮となったときのPCの緊張力、ならびにそのときのコンクリートの最大・最小応力を示す。全体的な傾向として、

- a) PC鋼材が外側にあるほど、緊張力が小さくて済む。
- b) 傾斜角が小さくなるにつれて、必要な緊張力は増大する
- c) コンクリートに生じる最大圧縮応力は、PCが外側になるほど小さくなる。また、傾斜角が小さくなると、最大圧縮応力は大きくなる。

ことが分かる。B4000について、MIDおよびOUTの場合のコンクリート応力分布を、角度ごとに図-5に示す。いずれの角度についてもOUTの応力分布はMIDよりも小さくなっていることが分かる。また、両側壁において最大・最小圧縮力が生じるのは、鋭角部となっている。

表－４ B6000 解析結果

L 1 作用時の PC 鋼材の緊張力 [kN]							
$\alpha$	90°		75°		60°		凡 例
INN	-3693.6	-3692.9	x	x	x	x	PC_2    PC_4
	-3693.6	-3692.9	x	x	x	x	PC_1    PC_3
MID	-576.8	-576.5	-636.8	-637.1	-731.1	-731.8	注： 許容緊張力 569 [kN] x は応力が 10000MPa 以上を示す
	-576.8	-576.5	-637.4	-636.6	-732.0	-730.8	
OUT	-313.2	-313.2	-331.5	-331.7	-357.1	-356.3	
	-313.2	-313.2	-331.6	-331.6	-356.3	-357.1	
コンクリート応力の最大・最小値 [MPa]							
$\alpha$	90°		75°		60°		凡 例
INN	40.09	40.45	x	x	x	x	左最大    右最大
	0.17	0.00	x	x	x	x	左最小    右最小
MID	6.60	6.96	7.27	7.61	8.25	8.64	注： 許容圧縮応力度 12 [MPa]
	0.17	0.00	0.18	0.00	0.23	0.00	
OUT	3.77	4.14	3.99	4.34	4.27	4.66	
	0.17	0.00	0.18	0.00	0.23	0.00	

表－５ B8000 解析結果

L 1 作用時の PC 鋼材の緊張力 [kN]							
$\alpha$	90°		75°		60°		凡 例
INN	x	x	x	x	x	x	PC_2    PC_4
	x	x	x	x	x	x	PC_1    PC_3
MID	-927.5	-927.4	-1002.2	-1002.8	-1127.3	-1128.5	注： 許容緊張力 569 [kN] x は応力が 10000MPa 以上を示す
	-927.5	-927.4	-1003.0	-1002.1	-1128.6	-1127.2	
OUT	-479.4	-479.6	-499.7	-500.0	-533.9	-534.1	
	-479.4	-479.6	-499.8	-499.9	-533.8	-534.1	
コンクリート応力の最大・最小値 [MPa]							
$\alpha$	90°		75°		60°		凡 例
INN	x	x	x	x	x	x	左最大    右最大
	x	x	x	x	x	x	左最小    右最小
MID	9.35	9.64	10.08	10.39	11.24	11.61	注： 許容圧縮応力度 12 [MPa]
	0.19	0.00	0.20	0.00	0.26	0.00	
OUT	5.06	5.36	5.27	5.58	5.54	5.91	
	0.18	0.00	0.20	0.00	0.27	0.00	

同様に、B6000、B8000 での L1 作用時に接合面全圧縮となるときの PC 緊張力とコンクリート最大・最小応力を表－４、表－５にそれぞれ示す。これらについても B4000 において見られた上記 a), b), c) と同じ傾向がみられる。

また、いずれの場合も INN の場合には全圧縮になるための緊張力が著しく大きくなっている。これは、緊張力が内側に作用すると、曲げの作用によって外側が開くため、側壁外側への軸圧縮の効果が打ち消されるためであ

ると説明できる。

なお、輪荷重が作用していない L0 のときの断面状態も確認したが、すべてのケースについて全断面圧縮となっている。

### 3.4 接合面全圧縮とするのに必要な緊張力

表－３～表－５の結果に基づき、斜橋ボックスカルバートの場合に必要な緊張力が、同じ内空幅の長方形ボックスカルバート ( $\alpha=90^\circ$  に相当) での緊張力と比して何倍になるかを、図－６に示す。

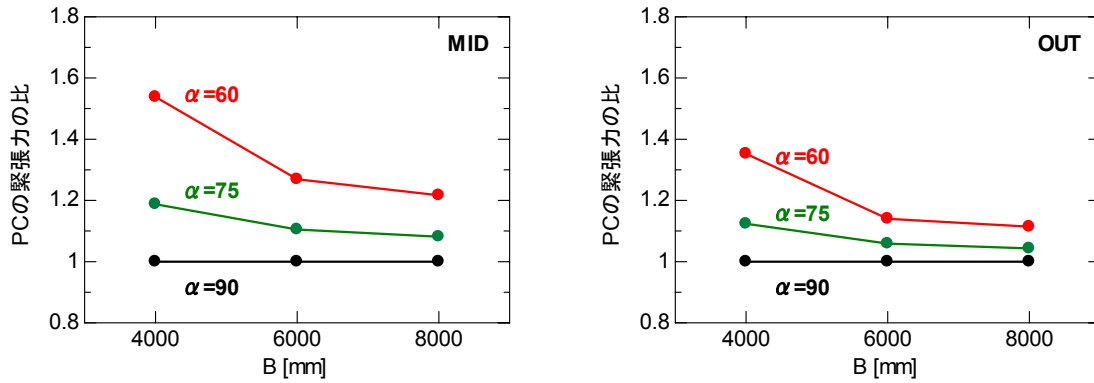


図-6 接合面全圧縮となるPC緊張力 (L1作用時:  $\alpha=90^\circ$  の緊張力を基準とした比率)

MIDの場合、B4000で $60^\circ$ では1.53倍、 $75^\circ$ では1.19倍であるが、内空幅が大きくなると倍率は低下し、B8000では、 $60^\circ$ で1.22倍、 $75^\circ$ で1.08倍である。

OUTの場合も同様の傾向であるが、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ ともにMIDの場合より倍率が小さくなる傾向が認められた。

以上から、PCを配置するにあたっては、PC鋼材を外側に配置することが緊張力・コンクリート応力両面から有利であること、また、傾斜角を有する場合には、緊張力を割増することで対応することができるが示されたと考えられる。

ただし、PCの配置を外側に寄せすぎると、偏心圧縮による壁面の座屈や内側の目開き、またPCのかぶりなどの製作上の問題が生じる可能性もある。また、以上で得られた傾向は今回想定した荷重状態に対するものであることから、地震時の安全性なども含めて、実験・解析の両面から更に検討する必要がある。

#### 4. まとめ

上下に分割されたPCaボックスカルバートの圧着接合面が全圧縮となる緊張力ならびにその時の接合面コンクリート応力状態を各種の条件ごとに検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) PC鋼材は、側壁中央に配置するよりも外側1/4に寄せた配置をした方が全断面圧縮に必要な緊張力が少なくすむ。
- (2) 斜角が $90^\circ$ から減少するにつれ、全断面圧縮に必要な緊張力は大きくなる。ただし、内空幅が大きくなるほどその比率は小さくなる。
- (3) PC鋼材を内側に配置して緊張力を与えるのは、外

側の曲げ引張と軸圧縮が打消し合うため、合理的ではないと考えられる。

以上より、斜橋ボックスカルバートの設計を行う場合は、斜角のない一般的な直方体ボックスカルバートよりも緊張力の割増が必要と考えられる。

今回は、3次元FEM解析結果のみにより評価を行ったが、今後、供試体による載荷試験を実施し、解析結果との整合性を確認した上で、安全な設計手法を提案したいと考えている。

#### 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.
- 3) 原田吉信: 橋梁のアセットマネジメントについて, 建設マネジメント技術, pp.12-15, 2006
- 4) 添田政司, 出光隆, 百田国広, 成田久平: 外部拘束を受けるカルバート構造物のひび割れ抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.611-616, 2003
- 5) 道路土工 カルバート工指針, 日本道路協会, p.11, 平成21年度版
- 6) たとえば, 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hue Shi: 不連続変形法(DDA), pp.30-43, 丸善, 2005
- 7) Sharma, H.D., Nayak, G.C. and Maheshwari, J.B., "Generalization of sequential nonlinear analysis - A study of rockfill dam with joint elements", Numerical Methods in Geometrics, ASCE, 1976, pp.662-685