

(47) PC鋼材突起定着部の設計手法

ディビダーク協会 技術部会 設計ワーキンググループ 正会員 ○高橋 誠
同 上 正会員 新井英雄

1. はじめに

片持ち張出し架設工法により施工されるPC桁橋では、各設計断面に所要のプレストレスを導入するため、上、下スラブあるいはウェブに突起定着を設けてPC鋼材を定着する場合がある。この時、定着部付近のコンクリートには、定着部背面の割裂応力、断面急変部の応力集中、偏心軸圧縮力の影響、およびPC鋼材の曲げ上げによる腹圧力によって、道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編(以後道示と略す)に示されている引張力 $T1 \sim T6$ (図-1) が作用する。しかし、この引張力計算方法については示方書等で統一されたものがなく、特に引張力 $T4$ 、 $T5$ については計算式が確立されていない。そこで、これらの引張力の計算手法を明確にするため現状における解析方法を整理し、FEM解析を行って比較検討を行った。

その結果、突起定着部に生じる引張力 $T4$ 、 $T5$ の計算式を提案することができた。

2. 現状における解析方法

PC鋼材突起定着部に生じる引張力 ($T1 \sim T6$) に対する計算方法としては、現在、道示および土木学会 プレストレストコンクリート工法設計施工指針(以後PC指針と略す)では、次のように整理することができる。

まず、 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T6$ については提案式が示されている。

$T4$ の引張力は、プレストレスによ

って突起部のコンクリートに大きな圧縮ひずみが生じるため、突起部前面のコンクリートに生じる引張力であるとしており、その計算方法については、現在、提案式がない。たとえば、 $T4 = 0.5P$ として算出している定着工法もあるとしている。

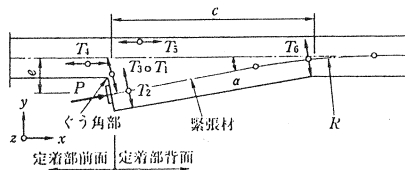
また、 $T5$ の引張力は、プレストレスによる曲げモーメント ($M_0 = P \cdot e$) によって生じる引張力であるとし、その大きさは、偏心軸圧縮力として働くプレストレス力の作用によって生じる引張力として求めることができるとしているが、特に決まった提案式は示されておらず、統一されたものがない。このような理由から、 $T4$ と $T5$ の引張力の計算手法を明確にするためFEM解析およびプレストレス力による曲げ引張を手計算によって求める方法について比較検討を行った。

3. 引張力の解析

(1) 解析の基本方針

PC箱桁橋の下スラブに設置されるPC鋼材突起定着には定着するPC鋼材の本数又は、定着する位置によって種々のタイプがある。また構造的には、下スラブが両端のウェブで固定されており、突起定着の位置によっても拘束の度合いが異なるために引張力の計算を行うにはこの影響を考慮する必要がある。さらに、引張力の値は下スラブ厚の剛性の違いによる影響があると思われるためこれらを変化させて検討を行う必要がある。

このようなことから突起定着の局所的な応力状態を正確に把握するためには一般的に3次元解析を行う必



- P : プレストレス力
- e : プレストレス力の偏心量
- c : 突起定着部の長さ
- R : 緊張材の曲げ半径
- α : 緊張材の曲げ角度
- $T1$: 定着部背面z方向(紙面に直角方向)に生じる引張力
- $T2$: 定着部背面y方向に生じる引張力
- $T3$: 隅角部に生じる引張力
- $T4$: 定着部前面に生じる引張力
- $T5$: プレストレスによる曲げモーメントによって生じる引張力
- $T6$: 緊張材起曲部に生じる引張力

図-1 突起定着部の引張力

要がある。

しかし、3次元解析は、解析結果の評価がむずかしく、解析費用も上がるため、突起定着部の縦断面方向の解析(以後面内解析と略す)と、突起定着部の平面方向の解析(以後面外解析と略す)の2つの方向から2次元FEM解析を行った。

突起定着の基本形状寸法は、土木学会 ディビダーク工法設計施工指針より、図-2に示すように、PC桁橋に一般的によく用いられている、PC鋼棒SBPR95/120 ϕ 32mmを用いるものとし、下スラブ厚は20cmと50cmの2ケースとした。

(2) 面内FEM解析

面内解析では、突起前面(図-3の右側)を可動としているため、ここで得られる結果は主に曲げに起因する引張力である。実際に突起部に生じる引張力は、これに面外解析での軸方向力の拘束に伴う引張力を加えたものであると考えて良い。

ここでは、T4'としてスラブ上側に生ずる引張力、T5としてスラブ下側に生ずる引張力を考え、部材上・下縁の補強鉄筋量を算出するための引張力を求めることとする。図-1でいうT4とはここではT4'とT5を加えたものであることに注意する必要がある。

面内FEMの解析領域については、日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン」に従い、解析結果に影響を及ぼさない範囲でできるだけ小さな領域に絞ることとし、図-3に示す通り、突起部の前後1mの範囲とした。境界条件の設定については、突起部が箱桁のウェブの拘束を受けるので、この拘束による影響の度合いを評価するために、①ウェブの拘束の影響が無いものとして、支点条件をローラー支持とピン支持としたものと、②ウェブの拘束の影響が有るものとして、下スラブの節点を複数のローラーで支持するモデルの2ケースとした。要素は、2次元4節点アイソパラメトリック四辺形要素を基本とし、PC鋼材位置については定みずみ三角形要素とした。

要素分割は、水平方向は突起部と、下スラブ部をそれぞれ3分割程度とし、縦横比として1:1程度を目安とした。

荷重条件としては、載荷する荷重はプレストレスのみとし、緊張端および定着端に集中荷重を、PC鋼材の湾曲部には腹圧力として水平方向と鉛直方向力を節点集中荷重として荷載した。また、プレストレス力は、緊張中の値とし $P_t = 68.8 \text{ tf}$ とした。

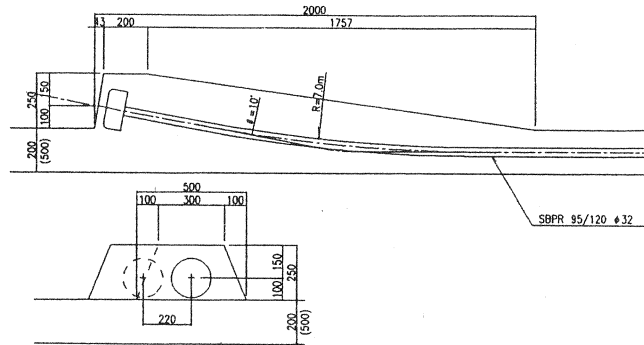
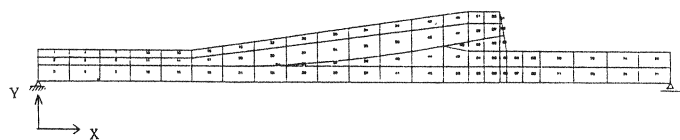
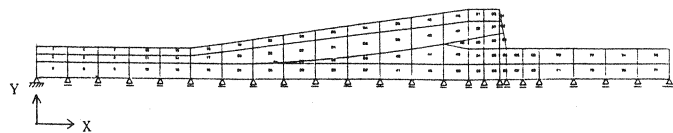


図-2 突起定着部の形状寸法図



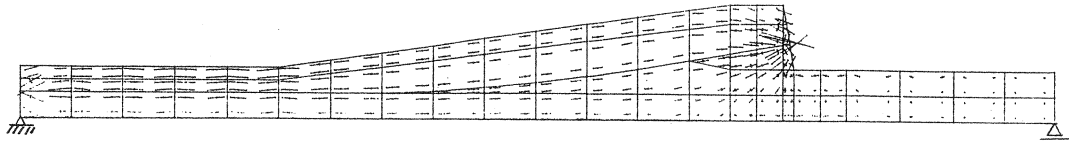
(a) ウェブの拘束影響が無い場合



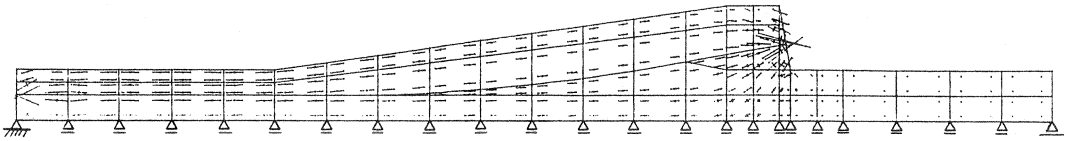
(b) ウェブの拘束影響が有る場合

図-3 面内FEM解析モデル図

スラブ厚20cmの場合の主応力図を図-4に示す。要素内での最大主引張応力は、ウェブの拘束影響が無い場合には、定着部前面では、 21.0 kgf/cm^2 となっており、定着部背面の下側では、 6.6 kgf/cm^2 となった。また、ウェブの拘束影響が有る場合には、定着部前面で、 49.6 kgf/cm^2 、定着部背面で、 4.1 kgf/cm^2 となり定着部背面の下側引張応力は総じて小さくなった。



(a) ウェブの拘束影響が無い場合



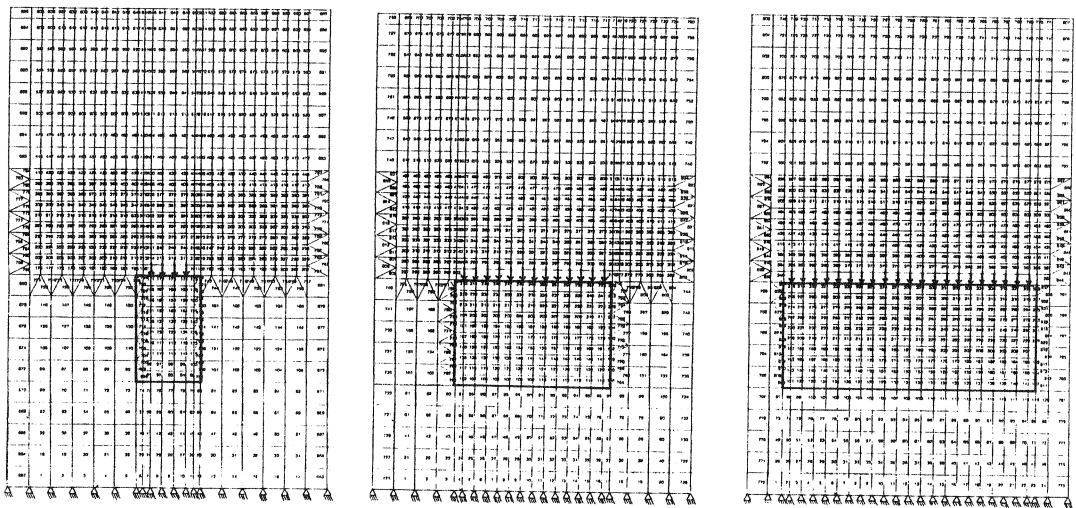
(b) ウェブの拘束影響が有る場合

図-4 T4、T5の引張力発生位置とその主応力

(3) 面外FEM解析

面外FEM解析では、図-5に示すように、突起定着の寸法を幅1.0m~5.0mの3つのCASEに変化させて突起定着部全面に発生する引張力を求めた。また、各々の突起寸法において、下スラブ厚を20cm、50cmとして解析を行った。

解析領域と境界条件の設定は、境界条件の影響を無視できる大きさの領域を設定する必要があることから定着具前面・背面とも突起幅5mのケースにおいて、突起定着の1倍程度を解析領域とした。また、ウェブの剛性による影響が考えられるために、ウェブ位置の剛性は下スラブの5倍とした。使用要素、要素分割、荷重条件および使用材料については、面内方向の解析と同様とした。



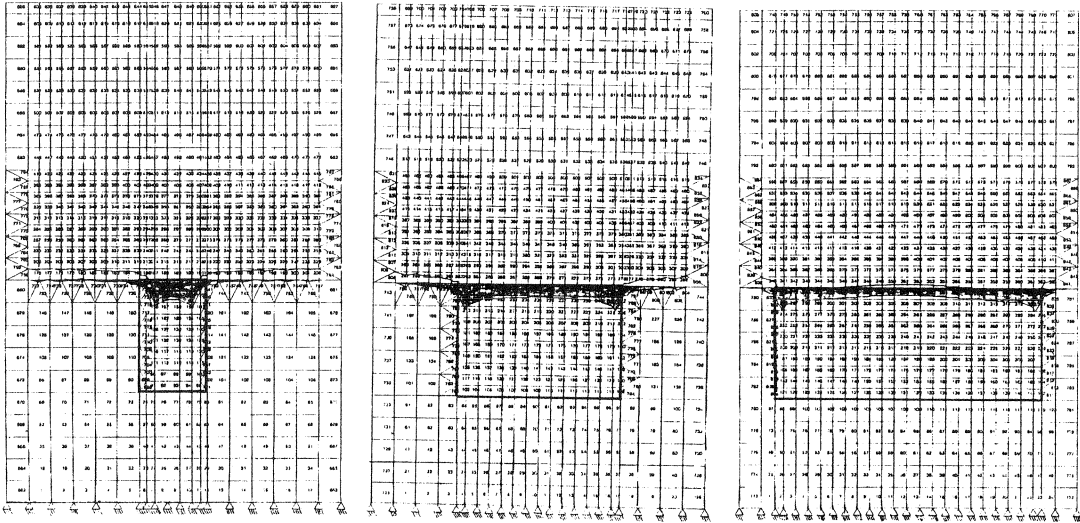
(a) 突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$
CASE-1

(b) 突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$
CASE-2

(c) 突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$
CASE-3

図-5 面外FEM解析モデル図

面外方向の解析結果として、下スラブ厚 $t = 20 \text{ cm}$ の場合の突起前面位置での引張応力度分布を、図-6に示す。最大引張応力は、CASE-1で 52.5 kgf/cm^2 、CASE-2で 54.8 kgf/cm^2 、CASE-3で 52.6 kgf/cm^2 となった。また、突起部の領域に生じる応力の分布状態から全体の引張力について算出すると、幅 22 cm 当たり、CASE-1で 20.1 tf 、CASE-2で 16.2 tf 、CASE-3で 11.9 tf となる。



(a) CASE-1

(b) CASE-2

(c) CASE-3

図-6 面外解析による引張応力の分布図

表-1に面内解析結果に面外解析結果の $1/2$ を加えて求めた $T4'$ および $T5$ を示す。また、引張力は、プレストレス ($Pt = 68.8 \text{ tf}$) の比で評価することとした。

表-1 面内方向と面外方向の合成

(a) ウェブの拘束の影響が無い場合

(b) ウェブの拘束の影響が有る場合

	(幅 22 cm 当り)			
	下スラブ厚 $t = 20 \text{ cm}$		下スラブ厚 $t = 50 \text{ cm}$	
	上側前面 $T4'$	下側背面 $T5$	上側前面 $T4'$	下側背面 $T5$
面内 FEM	4.6 tf	1.5 tf	10.2 tf	2.9 tf
面外 FEM	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 20.1 tf		突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 23.6 tf	
	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 16.2 tf		突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 18.5 tf	
	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 11.9 tf		突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 13.5 tf	
面内 + 面外	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 14.7 tf (0.21)	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 11.6 tf (0.17)	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 22.0 tf (0.32)	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 14.7 tf (0.22)
	上側下側の合計 26.3 tf (0.38)		上側下側の合計 36.7 tf (0.53)	
1	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 12.7 tf (0.18)	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 9.6 tf (0.14)	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 19.5 tf (0.28)	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 12.2 tf (0.18)
	上側下側の合計 22.3 tf (0.32)		上側下側の合計 31.7 tf (0.46)	
2	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 10.6 tf (0.15)	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 7.5 tf (0.10)	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 16.9 tf (0.25)	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 9.7 tf (0.14)
	上側下側の合計 18.1 tf (0.26)		上側下側の合計 26.6 tf (0.39)	

	(幅 22 cm 当り)			
	下スラブ厚 $t = 20 \text{ cm}$		下スラブ厚 $t = 50 \text{ cm}$	
	上側前面 $T4'$	下側背面 $T5$	上側前面 $T4'$	下側背面 $T5$
面内 FEM	10.3 tf	1.0 tf	15.3 tf	1.5 tf
面外 FEM	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 20.1 tf		突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 23.6 tf	
	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 16.2 tf		突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 18.5 tf	
	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 11.9 tf		突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 13.5 tf	
面内 + 面外	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 20.4 tf (0.30)	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 11.1 tf (0.16)	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 27.1 tf (0.39)	突起幅 $b = 1.0 \text{ m}$ 13.3 tf (0.19)
	上側下側の合計 31.5 tf (0.46)		上側下側の合計 40.4 tf (0.59)	
1	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 18.4 tf (0.27)	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 9.1 tf (0.13)	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 24.6 tf (0.36)	突起幅 $b = 3.0 \text{ m}$ 10.8 tf (0.16)
	上側下側の合計 27.5 tf (0.40)		上側下側の合計 35.4 tf (0.51)	
2	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 16.3 tf (0.24)	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 7.0 tf (0.10)	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 22.1 tf (0.32)	突起幅 $b = 5.0 \text{ m}$ 8.3 tf (0.12)
	上側下側の合計 25.3 tf (0.34)		上側下側の合計 30.3 tf (0.44)	

(4) 曲げ引張による方法

① T4 の引張力

道示によれば、T4 の引張力はプレストレスによって突起部のコンクリートに大きな圧縮ひずみが生じるため突起部前面のコンクリートに引張力が生じるとされている。一般的にはスラブ上側の引張力 T4' として図-7に示すように曲げ圧縮力を引張応力に換算して以下の式によって算出することが多い。

$$T4' = \frac{\sigma_{ci}}{2} \cdot a \cdot (t - x) \quad (1)$$

この場合、応力度を計算するときの P C 鋼材の偏心量 (e p) は、一般に下スラブを含む全部材厚の重心位置としている。

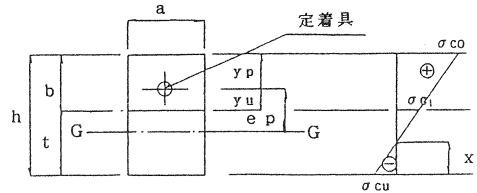


図-7 突起部コンクリートの曲げ応力度分布

② T5 の引張力

T5 の引張力は、T4と同様にプレストレスによる曲げモーメント (M o = P \cdot e) によって生じる引張力であり以下の式によって算出される。また、T5 は下スラブの下側に生じる引張力であることから、応力度を計算するときの P C 鋼材の偏心量 (e p) は、下スラブの中央を重心位置としている。

$$T5 = \frac{\sigma_{cu}}{2} \cdot a \cdot x \quad (2)$$

T4 および T5 の引張力を道示の方法によって求めた結果を表-2に示す。

		下スラブ厚 t = 20 cm		下スラブ厚 t = 50 cm	
		上側前面 T4'	下側背面 T5	上側前面 T4'	下側背面 T5
曲げ引張		13.3 tf (0.19)	17.7 tf (0.26)	24.1 tf (0.35)	19.7 tf (0.28)
上側下側の合計		31.0 tf (0.45)		43.8 tf (0.63)	

(幅22cm当り)

4. 解析結果のまとめ

FEM解析および道示による曲げ引張の計算から、T4' および T5 の引張力について、図-8に示すように突起部に導入されるプレストレス力の大きさの比で算出した。

定着部前面の上側に生ずる T4' については、道示では 0.19 となっているが、FEM解析によれば突起幅の形状寸法により 0.24 ~ 0.3 と変化している。また、定着部前面に生じる引張力 T5 については、道示では 0.26 となるが、FEM解析では 0.10 ~ 0.16 の範囲となる。

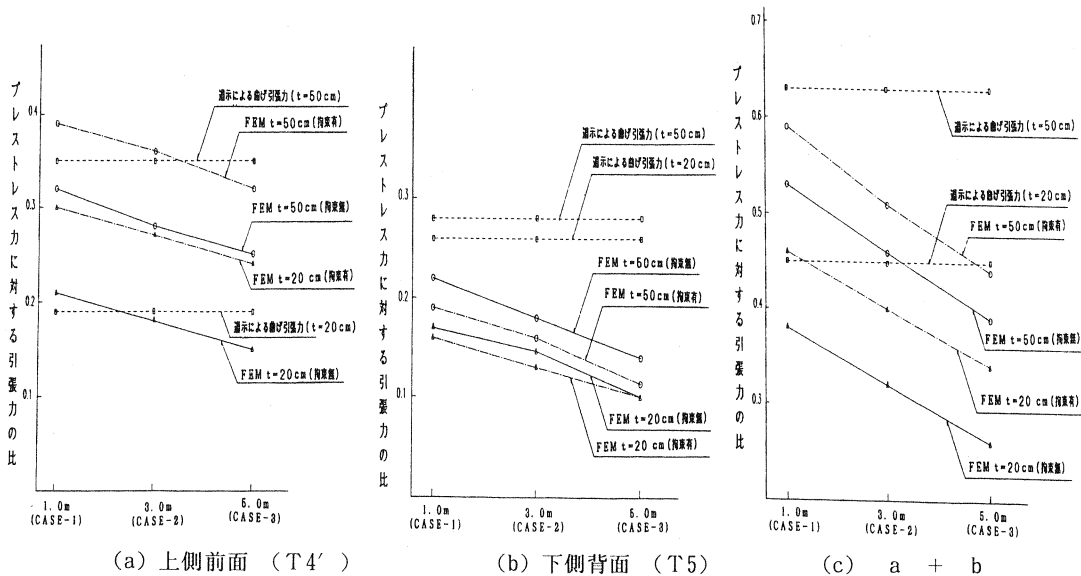


図-8 プレストレス力の比で表した引張力

T4' と T5 の引張力の値を独立したものととらえれば、道示とFEM解析では若干異なった値を示しているが、下スラブ全体の引張力として比較すると、表-3に示すように、道示とFEM解析はほぼ一致した結果となる。

本解析によって得られたT4' (定着部前面に生ずる引張力)、T5 (プレストレス力による曲げモーメントによって生じる引張力)は、導入するプレ
 ストレス力(P)に比例した力であるものと
 して式で表すと概ね次のようになる。

$$T4' = 0.30 \cdot P \quad (3)$$

$$T5 = 0.15 \cdot P \quad (4)$$

$$T4 = T4' + T5 = 0.45 \cdot P \quad (5)$$

ここにP:緊張中のプレストレス力

表-3 道示とFEM解析の比較
 (スラブ厚 t = 20cm)
 (幅 22cm当り)

	道 示	F E M 解 析		
		突起幅 1.0m	突起幅 3.0m	突起幅 5.0m
T4'	0.19(13.3tf)	0.30(20.4tf)	0.27(18.4tf)	0.24(16.3tf)
T5	0.26(17.7tf)	0.16(11.1tf)	0.13(9.1tf)	0.10(7.0tf)
T4 = T4' + T5	0.45(31.0tf)	0.46(31.5tf)	0.40(27.5tf)	0.34(25.3tf)

ただし、突起定着を用いてPC鋼材を定着する場合には、上記のように大きな引張力が作用することになるので、部材に適当な圧縮応力が作用する領域に突起を設けることが望ましい。

あとがき

本論文は、ディビダーク協会 技術部会・設計ワーキンググループの活動の一環として行ったものであり構成メンバーは以下の通りである。

主 査:新井英雄 [住友建設(株)]

副主査:伊藤恵介 [オリエンタル建設(株)]

委 員:上迫田和人 [鹿島建設(株)]、鈴木真之 [(株) 銭高組]、佐藤雅則 [(株) ピー・エス]
 福田皓樹 [鉄建建設(株)]、堂前 満 [ピーシー橋梁(株)]、天野敏彦 [極東工業(株)]
 笹尾克憲 [(株) 日本ピーエス]、羽田義治 [清水建設(株)]、村田信之 [(株) 熊谷組]
 岩澤悦和 [(株) 鴻池組]、高橋 誠 [(株) 千代田コンサルタント]

事務局:山田真人、佐藤大伍 [住友電気工業(株)]

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 Ⅲコンクリート橋編 平成6年2月
- 2) 日本道路協会:コンクリート道路橋設計便覧 昭和60年10月
- 3) 土木学会 :プレストレストコンクリート工法 設計施工指針 平成4年6月
- 4) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の設計にFEM解析を適用するためのガイドライン 1989年3月