

PC鋼より線と被覆PC鋼より線の周長について

竹田 清二*

1. はじめに

PC鋼材のJIS規格や鋼線メーカーカタログには、PC鋼材の標準径、公称断面積、単位質量などは記載されているものの、周長は示されていない。従来、PC構造はグラウトタイプのPC鋼材のように付着が十分にあるか、またはアンボンド鋼材のように付着がまったくないという前提に基づいて設計され、普通鉄筋に対して行われている付着に関する設計は行われなかった。そのため、PC鋼材の周長を規定する必要がなかった。しかし、最近PC鋼材の用途の拡大あるいは被覆PC鋼より線の出現などにより付着設計を行うケースが生じている。本論の目的は、PC鋼より線および被覆PC鋼より線の周長計算式、ならびにその計算結果を示すことである。被覆PC鋼より線については、PC鋼より線の周長との関係について検証し、併せて表面被覆材の断面積ならびに内部空洞部（または充填部）の断面積も提示する。

2. 計算の前提条件

本算定法の前提条件を以下に示す。この算定法は図-1のJIS G 3536のPC鋼より線および被覆PC鋼より線に適用する。図-1において19本より線は「シール形」と呼ばれる配列構成である。この形式の理論的な組合せは1-3-3、1-4-4、……、1-9-9……など、さらに層数も加わって無限に存在する。各素線径ならびに周長は下記的前提条件ですべての組合せに対して算定できるが、本論ではJIS断面に限定する。

① PC鋼より線

- イ) 外層素線（側線）本数は既知数とする。
- ロ) 層数は既知数とする。
- ハ) 素線は真円とする。
- ニ) 各層ごとの素線は同径、かつ各層の素線心は同一円周上にある。
- ホ) 各層ごとの素線は相互にかつ内層素線の谷部で接触する。

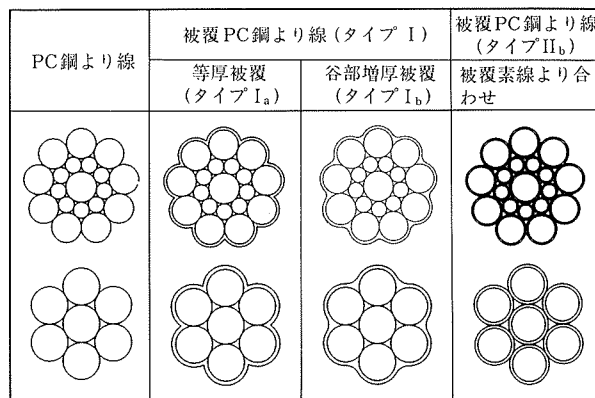


図-1 PC鋼より線と被覆PC鋼より線

- ② 被覆PC鋼より線（PC鋼より線を等厚被覆したもの。以下、「タイプI_a」という）

- イ) 鋼材部分はPC鋼より線的前提条件と同じとする。
- ロ) 側線の被覆厚さは等厚とする。

- ③ 被覆PC鋼より線（PC鋼より線を等厚被覆、かつ谷部を増厚被覆したもの。以下、「タイプI_b」という）

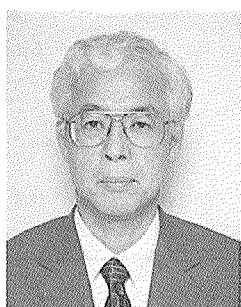
- イ) 基本はタイプI_aと同じとする。
- ロ) 側線の増厚曲線は接触円弧とする。

- ④ 被覆PC鋼より線（被覆素線をより合わせたPC鋼より線。以下、「タイプII」という）

- イ) 素線の被覆厚さは等厚とする。
- ロ) 素線接触面の被覆材はより線形成後も同一形状を保持する。
- ハ) 被覆素線径を素線径に置換した後の条件はPC鋼より線と同じとする。

3. 記号

D : PC鋼より線の外径（標準径）	(mm)
n : 外層素線（側線）の本数	(本)
m_1 : 中間素線の本数	(本)
m_2 : 心線の本数	(本)
d_1 : 外層素線（側線）の直径	(mm)
d_2 : 3層の場合の中間素線の直径	(mm)
d_3 : 心線の直径	(mm)
d_c : 谷部増厚部の被覆曲線（接触円）の直径	(mm)
ϕ_b : PC鋼より線の周長	(mm)
ϕ_c : 等厚被覆PC鋼より線I _a の周長	(mm)
ϕ_{cz} : 谷部増厚被覆PC鋼より線I _b の周長	(mm)
A_{cal} : PC鋼より線の断面積（計算値）	(mm ²)
A_{JIS} : PC鋼より線の断面積（JIS記載値）	(mm ²)
A_c : 等厚被覆PC鋼より線I _a の被覆材の断面積	(mm ²)
A_{cz} : 谷部増厚被覆PC鋼より線I _b の被覆材の断面積	(mm ²)



* Kiyoji TAKEDA

フドウ建研(株) 技営総本部

A_i : PC鋼より線の空洞部断面積 (mm²)
 c : 被覆材の厚さ (mm)
 f : 素線谷部の被覆材の増厚厚さ (mm)
 h : 被覆材の山と谷の差 (mm)

4. PC鋼より線の周長の算定

PC鋼より線の周長 ψ_b は、JIS規格のPC鋼より線における7本より線、19本より線に関係なく、標準径 D 、側線の本数 n の2つの条件から求めることができる。

図-2において、

$$\angle AOB = \theta = \frac{\pi}{n} \quad \dots\dots\dots(1)$$

とおくと、 $\triangle OAB$ から、

$$\sin \theta = \frac{d_1}{D-d_1} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となる。ゆえに、側線の直径 d_1 は、次式で表される。

$$d_1 = D \frac{\sin \theta}{1 + \sin \theta} \quad \dots\dots\dots(3)$$

次に、側線の周長を求める。

$$\angle OAB = \alpha = \frac{\pi}{2} - \theta = \frac{n-2}{2n} \pi \quad \dots\dots\dots(4)$$

側線の外周角度は、次式のようにになる。

$$2\angle BAP = \eta = 2\pi - 2\alpha = \frac{n+2}{n} \pi \quad \dots\dots\dots(5)$$

側線の外部周長は、

$$\psi_{b1} = \eta \frac{d_1}{2} = \frac{n+2}{2n} \pi d_1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。ゆえに、PC鋼より線の周長 ψ_b は、

$$\begin{aligned} \psi_b &= n \psi_{b1} = \frac{n+2}{2} \pi d_1 \\ &= \pi D \frac{n+2}{2} \frac{\sin \frac{\pi}{n}}{1 + \sin \frac{\pi}{n}} \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

である。

表-1に各PC鋼より線の種類別に周長の計算式を示し、周長の計算結果については後の表-4に示す。

5. 被覆PC鋼より線の周長の算定

タイプIIの被覆PC鋼より線の周長は、被覆素線径を裸素線径に置換すればPC鋼より線と同じ計算式になる。本論では、タイプI_a、I_bの被覆PC鋼より線の周長に関して述べる。

5.1 等厚被覆PC鋼より線（タイプI_a）の周長

図-2において、被覆厚さを c とする。

$\angle BAC = \beta$ とおくと、 $\triangle ABC$ から、

$$\cos \beta = \frac{d_1}{d_1 + 2c}$$

$$\text{ゆえに、} \beta = \cos^{-1} \frac{d_1}{d_1 + 2c} \quad \dots\dots\dots(8)$$

となり、側線の外周部の角度は、次式で表される。

$$\begin{aligned} 2\angle CAQ &= \zeta = 2\pi - 2(\alpha + \beta) \\ &= \frac{n+2}{n} \pi - 2\beta \quad \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

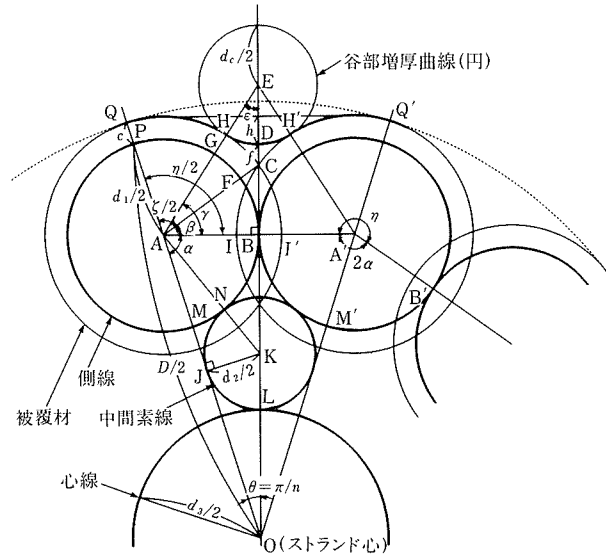


図-2 PC鋼より線の素線および被覆材の関係

表-1 PC鋼より線の周長 ψ_b

PC鋼より線の種類	側線本数 n	周長 ψ_b
2本より線	2	$\psi_b = \pi D = 1.00 \pi D$
3本より線	3	$\psi_b = \pi D \frac{5}{2} \frac{\sqrt{3}}{2 + \sqrt{3}} = 1.16 \pi D$
7本より線	6	$\psi_b = \pi D \frac{4}{3} = 1.33 \pi D$
19本より線	9	$\psi_b = \pi D \frac{11}{2} \frac{\sin \frac{\pi}{9}}{1 + \sin \frac{\pi}{9}} = 1.40 \pi D$

注) D は外径。ただし、2本より線・3本より線の D は外接円とする。
2本より線の $D = 2d_1$ 、3本より線の $D = d_1(1 + \frac{2}{\sqrt{3}})$

側線の外部周長は、次式のようにになる。

$$\begin{aligned} 2\widehat{CQ} &= \psi_{c1} = \pi(d_1 + 2c) \frac{\zeta}{2\pi} \\ &= (d_1 + 2c) \left(\frac{n+2}{2n} \pi - \beta \right) \quad \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

したがって、タイプI_aの周長 ψ_c は、

$$\begin{aligned} \psi_c &= n \psi_{c1} \\ &= (d_1 + 2c) \left(\frac{n+2}{2} \pi - n\beta \right) \quad \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

表-2 等厚被覆PC鋼より線の周長（タイプI_a）

PC鋼より線の種類	側線本数 n	周長 ψ_c
2本より線	2	$\psi_c = (D + 4c)(\pi - \beta)$
3本より線	3	$\psi_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{3}}{2 + \sqrt{3}} D + 2c \right) (5\pi - 6\beta)$
7本より線	6	$\psi_c = \frac{2}{3} (D + 6c)(2\pi - 3\beta)$
19本より線	9	$\psi_c = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin \frac{\pi}{9}}{1 + \sin \frac{\pi}{9}} D + 2c \right) (11\pi - 18\beta)$

注1) 表-1の注と同じ。
2) β は式(8)の値。

となり、ここに、 d_1 は式(3)、 β は式(8)の値である。

表-2に各被覆PC鋼より線の種類別に周長の計算式を、各周長の計算結果については末尾の表-5、6に示す。

5.2 谷部増厚被覆PC鋼より線（タイプI_b）の周長

谷部を増厚した被覆PC鋼より線の周長を求める。谷部の増厚厚さを $\overline{CD}=f$ とする。

被覆の山と谷との差 h は、式(12)で示される。

$$h = \left(\frac{d_1}{2} + c \right) - a - f \quad \cdots \cdots (12)$$

ここに、

$$a = \overline{BC} = \sqrt{d_1 c + c^2} \quad \cdots \cdots (13)$$

(1) $h > 0$ の場合（被覆材に谷があるとき）

図-2において、谷部の増厚部被覆曲線は直径 d_c の円弧の一部とする。増厚の始点 H （増厚円との接点）と側線どうしの接触点 B が側線の心となす角度を $\angle EAB = \gamma$ とおくと、 $\triangle ABE$ から次式のようになる。

$$\cos \gamma = \frac{d_1}{d_1 + 2c + d_c}$$

$$\text{ゆえに、} \gamma = \cos^{-1} \frac{d_1}{d_1 + 2c + d_c} \quad \cdots \cdots (14)$$

したがって、

$$\angle AEB = \epsilon = \frac{\pi}{2} - \gamma \quad \cdots \cdots (15)$$

となる。

次に、増厚区間において等厚周長 $\widehat{HC} + \widehat{CH}'$ と増厚被覆部分の周長 $\widehat{HDH}'$ の差 $\Delta \psi$ を求める。

等厚被覆部分の周長は、式(16)で表される。

$$\begin{aligned} \widehat{HC} &= \frac{1}{2} (d_1 + 2c) (\gamma - \beta) \\ &= \frac{1}{2} (\widehat{HC} + \widehat{CH}') \quad \cdots \cdots (16) \end{aligned}$$

増厚部分の周長は、次式のようになる。

$$\widehat{HDH}' = d_c \epsilon \quad \cdots \cdots (17)$$

等厚被覆部分の周長と増厚部分周長との差 $\Delta \psi$ は、

$$\begin{aligned} \Delta \psi &= n \{ (\widehat{HC} + \widehat{CH}') - (\widehat{HDH}') \} \\ &= n \{ (d_1 + 2c) (\gamma - \beta) - d_c \epsilon \} \quad \cdots \cdots (18) \end{aligned}$$

ゆえに、次式のようになる。

$$\psi_{cz} = \psi_c - \Delta \psi \quad \cdots \cdots (19)$$

ここで、接触円の直径 d_c は増厚厚さ f を与条件として、 $\triangle ABE$ から求めることができる。

$$(d_1 + 2c + d_c)^2 = d_1^2 + (2a + 2f + d_c)^2 \quad \cdots \cdots (20)$$

式(20)を整理すれば次式のようになる。

$$\begin{aligned} d_c &= \frac{a^2 + f^2 + 2af - c^2 - d_1 c}{d_1/2 + c - a - f} \\ &= \frac{a^2 + f^2 + 2af - c^2 - d_1 c}{h} \quad \cdots \cdots (21) \end{aligned}$$

(2) $h = 0$ の場合（被覆材が谷を埋め水平状態のとき）

図-3において、 f_0 、 ψ_{cz} は式(22)、(23)で表される。

$$f_0 = \frac{d_1}{2} + c - a \quad \cdots \cdots (22)$$

$$\psi_{cz} = 2n \left(\frac{d_1}{2} \right) + 2n \frac{\pi}{n} \left(\frac{d_1}{2} + c \right)$$

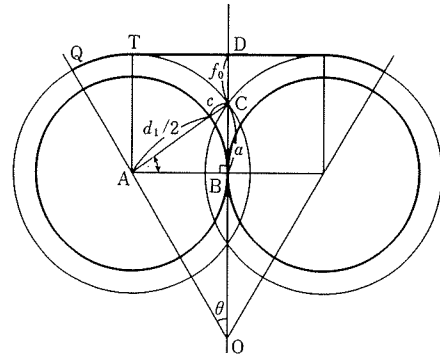


図-3 被覆PC鋼より線（PC鋼より線の被覆材が谷部を埋め、水平の状態）

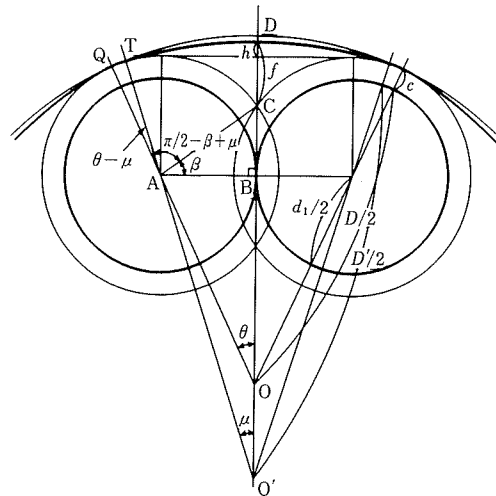


図-4 被覆PC鋼より線（PC鋼より線の被覆材が谷部を埋め、盛り上がった状態）

$$= d_1 n + 2\pi \left(\frac{d_1}{2} + c \right) \quad \cdots \cdots (23)$$

(3) $h < 0$ の場合（被覆材が谷部を埋め盛り上がったとき）

図-4において、谷部が完全に埋まり盛り上がった状態は、直径 $D + 2c$ の円であるから、増厚厚さ f の限度 $f_{\max}$ は、次式で表される。

$$\begin{aligned} f_{\max} &= \left(\frac{D}{2} + c \right) - a \\ &\quad - \sqrt{\left(\frac{D}{2} - \frac{d_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2} \quad \cdots \cdots (24) \end{aligned}$$

したがって、

$$h_{\max} = f_0 - f_{\max} \quad \cdots \cdots (25)$$

となる。

ライズ h の被覆曲線が両被覆素線に外接する円の直径を $D' + 2c$ とする。

$h = -h'$ において、直径 D' を求める。 $\triangle ABO'$ から、

$$\begin{aligned} \left(\frac{D'}{2} - \frac{d_1}{2} \right)^2 &= \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 \\ &\quad + \left(\frac{D'}{2} - h' - \frac{d_1}{2} \right)^2 \quad \cdots \cdots (26) \end{aligned}$$

$$D' = \frac{4h'^2 + d_1^2 + 4h'd_1}{4h'} \quad \cdots \cdots (27)$$

となる。

直径 $D + 2c$ の外接円が被覆素線と接する角度 μ は、次式

で表される。

$$\mu = \tan^{-1} \frac{d_1}{\sqrt{(D' - d_1)^2 - d_1^2}} \quad \dots\dots\dots(28)$$

ゆえに周長 ψ_{cz} は、

$$\psi_{cz} = 2\mu n \left(\frac{D'}{2} + c \right) + 2n \left(\frac{d_1}{2} + c \right) (\theta - \mu) \quad \dots\dots\dots(29)$$

となり、ここに、 θ は式(1)による。

5.3 PC鋼より線の周長と被覆PC鋼より線の周長との関係

図-5は、式(11)の等厚被覆PC鋼より線の周長 ψ_c と式(7)のPC鋼より線の周長 ψ_b との比 ψ_c/ψ_b を縦軸に、被覆厚さ c を横軸にして示したものである。計算は省略するが、 ψ_c/ψ_b の最小値は、より線数の種類ごとに共通で、2本より線0.95、3本より線0.92、7本より線0.86、19本より線0.83である。式から明らかなように ψ_c/ψ_b は標準径と被覆厚さの比 D/c の関数でもある。 ψ_c/ψ_b が最小値のとき、 D/c は6.13 (2本より線)、6.80 (3本より線)、30.0 (7本より線)、および27.7 (19本より線)である。したがって、7本より線15.2mmの場合、 $c = D/30.0 = 15.2/30.0 = 0.51$ mmのとき、 ψ_c/ψ_b は最小の0.86である。

図-6(a)、(b)は谷部増厚被覆PC鋼より線7本より線15.2mmおよび19本より線21.8mm (タイプIb)について、図-5と同様の関係を示したものである。各曲線は谷部増厚厚さ f が0 (等厚被覆厚さと同じ)、0.2mm、0.4mm、0.6mmおよび0.8mmのときの値を示す。

6. PC鋼より線の各素線径および断面積の算定

JIS G 3536 PC鋼より線の素線径および断面積は、PC鋼より線の外径より、以下の式から求められる。

6.1 PC鋼より線の各素線径の算定

(1) 2層より線の場合

心線の直径 d_3 は、式(3)の側線の直径 d_1 から、

$$d_3 = D - 2d_1 \quad \dots\dots\dots(30)$$

となる。7本より線の場合、

$$d_1 = D \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{1 + \sin \frac{\pi}{6}} = \frac{D}{3} = d_3 \quad \dots\dots\dots(31)$$

となる。

(2) 3層より線の場合

図-2の $\triangle AJK$ の関係から、中間素線の直径 d_2 を求める。

$$(D - d_1 - \frac{d_2}{\tan \theta})^2 + d_2^2 = (d_1 + d_2)^2 \quad \dots\dots\dots(32)$$

$$d_2 = -\tan \theta \cdot (d_1 - D - d_1 \tan \theta) - \sqrt{F} \quad \dots\dots\dots(33)$$

ここに、

$$F = \tan^2 \theta \cdot \{ (d_1 - D - d_1 \tan \theta)^2 - (D^2 - 2Dd_1) \} \quad \dots\dots\dots(34)$$

心線の直径 d_3 は、 $\triangle OJK$ において、

$$\begin{aligned} d_3 &= 2\overline{OL} = 2(\overline{OK} - \overline{KL}) \\ &= \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right) d_2 \quad \dots\dots\dots(35) \end{aligned}$$

である。

したがって、断面積 A_{cal} は、

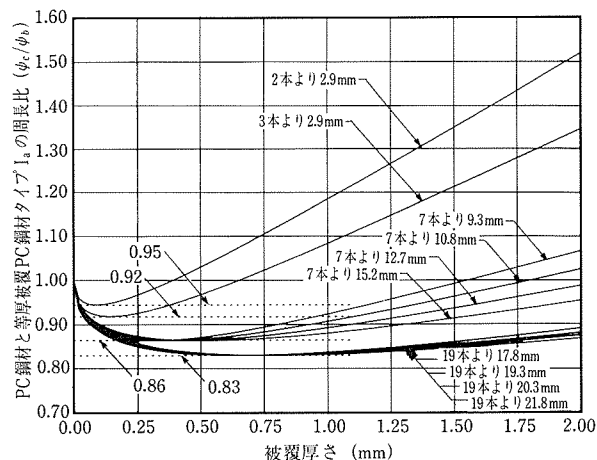
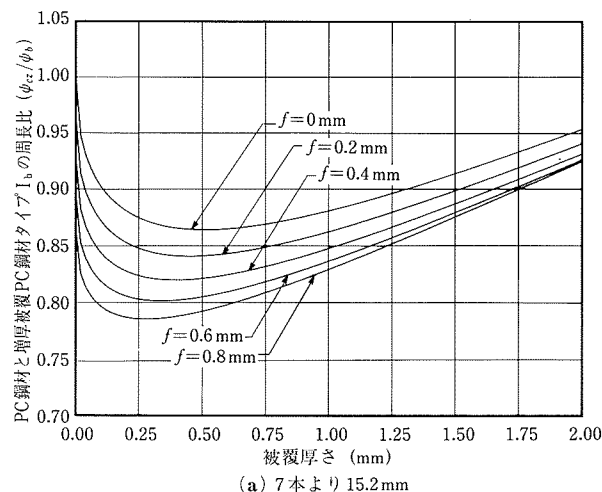
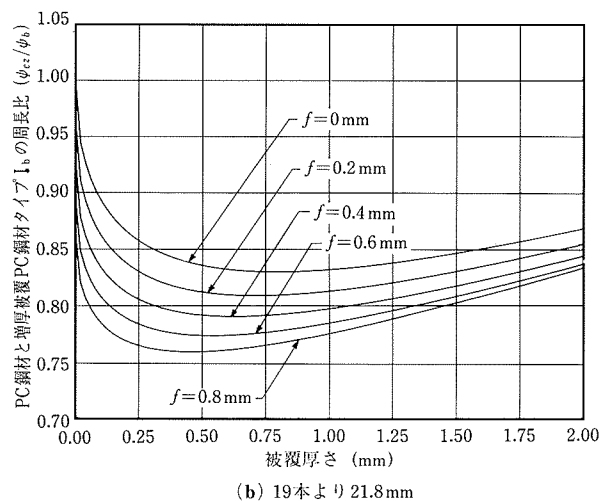


図-5 PC鋼材と等厚被覆PC鋼材タイプIaの周長比 (ψ_c/ψ_b) と被覆厚さの関係



(a) 7本より15.2mm



(b) 19本より21.8mm

図-6 PC鋼材と増厚被覆PC鋼材タイプIbの周長比 (ψ_c/ψ_b) と被覆厚さの関係

$$A_{cal} = n\pi \frac{d_1^2}{4} + n\pi \frac{d_2^2}{4} + \pi \frac{d_3^2}{4} \quad \dots\dots\dots(36)$$

である。

各素線径の計算結果についても、後の表-4に示す。

6.2 PC鋼より線の断面積の数値計算結果とJIS規格値との相違についての留意点

表-3に断面積の数値計算結果と、JIS規格の公称断面積

表-3 JIS規格の公称断面積と数値計算結果との相違

呼 び 名	標準径 (mm ²)	JIS規格の 公称断面積 A _{JIS} (mm ²)	数式による 断面積 A _{cal} (mm ²)	断面積の比 A _{JIS} /A _{cal} (%)
2.9mm 2本より	5.8*	13.21	13.21	100.0
2.9mm 3本より	6.2*	19.82	19.82	100.0
7本より 9.3mm	9.3	51.61	52.83	97.69
7本より 10.8mm	10.8	69.68	71.25	97.80
7本より 12.4mm	12.4	92.90	93.93	98.90
7本より 15.2mm	15.2	138.7	141.1	98.28
7本より 9.5mm	9.5	54.84	55.13	99.47
7本より 11.1mm	11.1	74.19	75.26	98.58
7本より 12.7mm	12.7	98.71	98.53	100.2
7本より 15.2mm	15.2	138.7	141.1	98.28
19本より 17.8mm	17.8	208.4	205.2	101.6
19本より 19.3mm	19.3	243.7	241.2	101.0
19本より 20.3mm	20.3	270.9	266.9	101.5
19本より 21.8mm	21.8	312.9	307.8	101.7
19本より 28.6mm	28.6	532.4	529.7	100.5

注) *:表-1の注と同じ。

を示す。表-3から明らかなように、計算結果による断面積と公称断面積とは必ずしも一致しない。その理由は、素線径が JIS 規格に明記されていないのに関連する。PC 鋼より線の素線は「よられている」ので切断面が真円でないこと、より合わせ段階の素線の競りあいを防ぐため微妙にサイズが調整されている(注:PC 鋼線メーカーにより異なり公表されていない)こと、素線が直線でないことなどのため管理値を用いているからと思われる。

7. 被覆材の断面積の算定

7.1 等厚被覆材の断面積

被覆材の断面積 A_c は、図-2において、

$$\begin{aligned} A_c &= 2n [(\nabla A Q I' - \nabla A P B) - (\nabla A C I' - \triangle A B C)] \\ &= \frac{n}{4} [(\pi - \alpha) \{(d_1 + 2c)^2 - d_1^2\} - \{\beta (d_1 + 2c)^2 \\ &\quad - d_1 \sqrt{(d_1 + 2c)^2 - d_1^2}\}] \quad \dots\dots\dots(37) \end{aligned}$$

である。

7.2 谷部増厚被覆材の断面積

(1) $h > 0$ の場合

増厚被覆材の断面積 ΔA_{cz} は、図-2において、

$$\begin{aligned} \Delta A_{cz} &= 2n [\triangle A B E - \triangle A B C - \nabla D E H - \nabla A H C] \\ &= \frac{n}{4} [d_1 \sqrt{(d_1 + 2c + d_c)^2 - d_1^2} \\ &\quad - d_1 \sqrt{(d_1 + 2c)^2 - d_1^2} \\ &\quad - \varepsilon d_c^2 - (\gamma - \beta)(d_1 + 2c)^2] \quad \dots\dots\dots(38) \end{aligned}$$

であり、ゆえに

$$A_{cz} = A_c + \Delta A_{cz} \quad \dots\dots\dots(39)$$

ここに、 A_c 、 β 、 ε 、 γ および d_c は、式(37)、式(8)、式(15)、式(14)および式(21)の値である。

(2) $h = 0$ の場合

図-3において、

$$\begin{aligned} \Delta A_{cz} &= 2n [\square A B D T - \triangle A B C - \nabla A C T] \\ &= 2n \left[\frac{d_1}{2} \left(\frac{d_1}{2} + c \right) \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\quad - \frac{d_1}{4} \sqrt{\left(\frac{d_1}{2} + c \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2} \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{2} + c \right)^2 \left(-\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right] \quad \dots\dots\dots(40) \end{aligned}$$

ゆえに、次式のようになる。

$$A_{cz} = A_c + \Delta A_{cz} \quad \dots\dots\dots(41)$$

(3) $h < 0$ の場合

図-4において、式(27)、式(28)の D' 、 μ を用い、

$$\begin{aligned} \Delta A_{cz} &= 2n (\nabla O' D T - \triangle O' A B - \triangle A B C - \nabla A C T) \\ &= 2n \left[-\frac{\mu}{2} \left(\frac{D'}{2} + c \right)^2 \right. \\ &\quad - \frac{d_1}{4} \sqrt{\left(\frac{D'}{2} - \frac{d_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2} \\ &\quad - \frac{d_1}{4} \sqrt{\left(\frac{d_1}{2} + c \right)^2 - \left(\frac{d_1}{2} \right)^2} \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{2} + c \right)^2 \cdot \left(-\frac{\pi}{2} - \beta + \mu \right) \right] \quad \dots\dots\dots(42) \end{aligned}$$

ゆえに、

$$A_{cz} = A_c + \Delta A_{cz} \quad \dots\dots\dots(43)$$

である。

8. PC鋼より線の空洞部断面積の算定

側線に囲まれた内部面積 A_i' は、図-2において、

$$\begin{aligned} A_i' &= \nabla O B M = (\triangle A B O - \nabla A M B) \\ &= \frac{n}{4} \{ d_1 \sqrt{(D + d_1)^2 - d_1^2} - d_1^2 \alpha \} \\ &\quad \dots\dots\dots(44) \end{aligned}$$

ここに、 α は式(4)の値。

したがって、空洞部断面積 A_i は側線に囲まれた内部面積 A_i' から中間素線および心線の断面積を控除して、

$$A_i = A_i' - m_1 \frac{\pi d_2^2}{4} - m_2 \frac{\pi d_3^2}{4} \quad \dots\dots\dots(45)$$

ここに、 m_1 は中間素線の本数、 m_2 は心線の本数である。空洞部断面積を表-4に示す。

9. ウォーリントン形19本より28.6 mm PC鋼より線

19本より28.6 mmの素線構成は本論で述べてきた「シール形」のほかに「ウォーリントン形」も認められている。このタイプは図-7に示すように素線の配列構成が異なる。したがって、厳密には28.6mmでありながら2種類の周長、断面積が存在する。首記の前提条件のうち、① PC鋼より線(ニ、ホ)を、「(ニ) 2層目の素線は同径、かつ心線を含めて相互に接触する。」、「(ホ) 3層目の素線は2層目素線の各谷部、山部に位置し相互に接触し、かつ一つの外接円を共有する。」と置き換えて算定する。周長計算は、誌面の制約から、被覆PC鋼より線に関しては省略する。

9.1 諸数値の算定

ウォーリントン形19本より28.6 mm PC 鋼より線の素線径、周長、断面積、空洞部断面積の算定法を以下に示す。

記号

D_i : 2層目素線の外接円 (mm)

表-4 PC鋼より線の素線径、周長、空洞部断面積

呼 び 名	標準径 D (mm)	より線本数 N (本)	側線本数 n (本)	中間素線本数 m_1 (本)	側線直径*2 d_1 (mm)	中間素線直径 d_2 (mm)	心線直径 d_3 (mm)	周 長 ψ_b (mm)	空洞部断面積 A_i (mm ²)
2.9mm 2本より	5.8*1	2	2	—	2.900	—	—	18.22	—
2.9mm 3本より	6.2*1	3	3	—	2.900	—	—	22.60	0.339
7本より 9.3mm	9.3	7	6	—	3.100 (3.07)	—	3.100	38.96	2.325
7本より 10.8mm	10.8				3.600 (3.55)	—	3.600	45.24	3.135
7本より 12.4mm	12.4				4.133 (4.12)	—	4.133	51.94	4.132
7本より 15.2mm	15.2				5.067 (5.00)	—	5.067	63.67	6.209
7本より 9.5mm	9.5				3.167 (3.15)	—	3.167	39.79	2.426
7本より 11.1mm	11.1				3.700 (3.65)	—	3.700	46.50	3.311
7本より 12.7mm	12.7				4.233 (4.25)	—	4.233	53.20	4.335
7本より 15.2mm	15.2				5.067 (5.00)	—	5.067	63.67	6.209
19本より 17.8mm	17.8	19	9	9	4.536	2.447	4.708	78.38	10.92
19本より 19.3mm	19.3				4.919	2.653	5.104	84.99	12.83
19本より 20.3mm	20.3				5.174	2.791	5.369	89.39	14.20
19本より 21.8mm	21.8				5.556	2.997	5.765	96.00	16.38
19本より 28.6mm	28.6				7.289	3.932	7.564	125.9	28.19

注) *1: 表-1の注と同じ。

*2: 側線直径の()の数値はJIS規格の解説に示されている値。

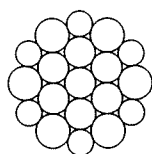


図-7 ウォーリントン形 19本より28.6mm PC鋼より線

 d_1 : 中間素線の谷部で接触する側線の直径 (mm) d_2 : 中間素線の山部で接触する側線の直径 (mm) d_3 : 中間素線の直径 (mm) d_4 : 心線の直径 (mm) n : 2層素線の本数 (本)

素線径の算定法を以下に示す。図-8 から、

$$2d_2 + 2d_3 + d_4 = D \quad \dots\dots\dots(46)$$

$$(d_3 + d_4) \cos \theta + \sqrt{(d_1 + d_3)^2 - d_3^2} + d_1 = D \quad \dots\dots\dots(47)$$

 $\triangle OAB$ において、三角形の第2余弦法則から、

$$\overline{AB}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{OB}^2 - 2\overline{OA} \cdot \overline{OB} \cos \theta \quad \dots\dots\dots(48)$$

ここで、

$$\overline{AB} = \frac{1}{2} (d_1 + d_2)$$

$$\overline{OA} = \frac{1}{2} d_2 + d_3 + \frac{1}{2} d_4$$

$$\overline{OB} = \frac{1}{2} (d_3 + d_4) \cos \theta + \frac{1}{2} \sqrt{(d_1 + d_3)^2 - d_3^2}$$

$$\theta = \pi/n$$

$x = D_i/D$ とおくと、 x が決定され、 d_1, d_2, d_3, d_4 が求まる。

次に、周長の算定法を以下に示す。

周長について、 $\angle OAB = \nu$ 、 $\angle OBA = \xi$ は、三角形の第2余弦法則

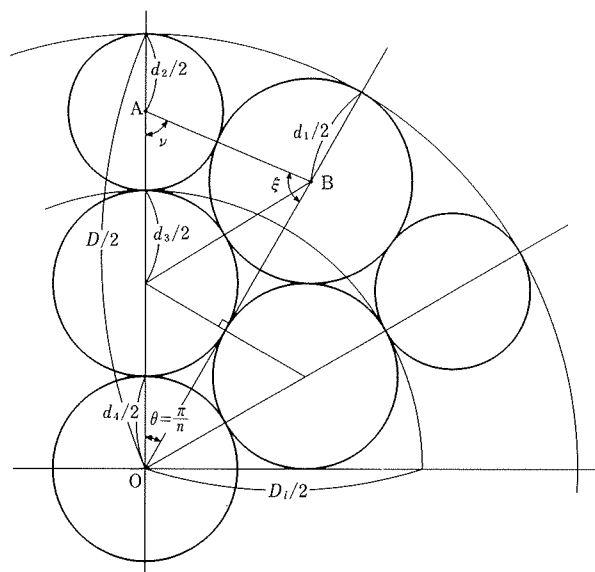


図-8 ウォーリントン形 19本よりの素線の関係

$$\overline{OB}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{AB}^2 - 2\overline{OA} \cdot \overline{AB} \cos \nu \quad \dots\dots\dots(49)$$

$$\overline{OA}^2 = \overline{AB}^2 + \overline{OB}^2 - 2\overline{AB} \cdot \overline{OB} \cos \xi \quad \dots\dots\dots(50)$$

から求まるので、周長 ψ_b は、

$$\psi_b = n [\pi (d_1 + d_2) - d_1 \xi - d_2 \nu] \quad \dots\dots\dots(51)$$

となる。

また、断面積は素線径より以下の式から求まる。

$$A_{cal} = n\pi \frac{d_1^2}{4} + n\pi \frac{d_2^2}{4} + n\pi \frac{d_3^2}{4} + \pi \frac{d_4^2}{4} \quad \dots\dots\dots(52)$$

 $\triangle ABO$ は、ヘロンの公式から、

$$s = \frac{1}{2} (\overline{AB} + \overline{OA} + \overline{OB}) \quad \dots\dots\dots(53)$$

$$\triangle ABO = A_i' = \sqrt{s(s-\overline{AB})(s-\overline{OB})(s-\overline{AO})} \quad \dots\dots\dots(54)$$

ゆえに空洞部断面積 A_i は、 $\triangle ABO$ 内の素線各面積を控除し、 $2n$ 倍することにより求まる。

$$A_i = 2n \left[A_i' - \left(\frac{d_1^2}{8} \xi + \frac{d_2^2}{8} \mu + \frac{\pi d_3^2}{8} + \frac{\pi d_4^2}{8n} \right) \right] \dots\dots\dots (55)$$

9.2 諸数値の計算結果

ウォーリントン形19本より28.6 mm PC鋼より線の諸数値の計算結果を示す。

(1) 素線径

側線(谷部) $d_1=6.718$ mm, (山部) $d_2=5.122$ mm

中間素線 $d_3=6.118$ mm, 心線 $d_4=6.118$ mm

(2) 周 長

$\phi_b=128.9$ mm

(3) 断 面 積

$A_{cal}=542.1$ mm²

(JIS断面積との比： $A_{JIS}/A_{cal}=98.20\%$)

(4) 空洞部断面積

$A_i=35.65$ mm²

10. ま と め

PC鋼より線および被覆PC鋼より線の周長計算式、ならびにその計算結果を示した。その結果をもとにPC鋼より線と被覆PC鋼より線の周長関係を示した。また、PC鋼より

表-5 被覆PC鋼より線の周長・被覆材断面積(7本より線)

被覆材 厚さ c (mm)	被覆材 厚さ f (mm)	山谷 の差 h (mm)	周長 ϕ_c (mm)	被覆材 断面積 A_c (mm ²)	山谷 の差 h (mm)	周長 ϕ_c (mm)	被覆材 断面積 A_c (mm ²)	山谷 の差 h (mm)	周長 ϕ_c (mm)	被覆材 断面積 A_c (mm ²)
0.2	0.00	1.13	39.44	8.141	1.38	46.59	9.622	1.71	56.07	11.59
	0.20	0.93	37.81	8.291	1.18	44.89	9.757	1.51	54.30	11.70
	0.40	0.73	36.45	8.799	0.98	43.41	10.21	1.31	52.71	12.11
	0.60	0.53	35.39	9.755	0.78	42.17	11.06	1.11	51.31	12.85
	0.80	0.33	34.64	11.25	0.58	41.19	12.38	0.91	50.11	14.00
	1.00	0.13	34.24	13.35	0.38	40.48	14.24	0.71	49.13	15.62
	1.20				0.18	40.07	16.70	0.51	48.38	17.76
	1.40							0.31	47.87	20.49
0.4	0.00	0.94	39.12	15.98	1.16	45.99	18.86	1.46	55.12	22.68
	0.20	0.74	37.75	16.20	0.96	44.53	19.06	1.26	53.58	22.86
	0.40	0.54	36.67	16.92	0.76	43.32	19.71	1.06	52.23	23.43
	0.60	0.34	35.92	18.24	0.56	42.36	20.88	0.86	51.09	24.47
	0.80	0.14	35.50	20.24	0.36	41.69	22.66	0.66	50.17	26.03
	1.00				0.16	41.30	25.12	0.46	49.48	28.19
	1.20							0.26	49.03	30.99
	1.40							0.06	48.84	34.50
0.6	0.00	0.81	39.50	23.83	1.01	46.19	28.07	1.29	55.09	33.69
	0.20	0.61	38.31	24.11	0.81	44.90	28.32	1.09	53.71	33.90
	0.40	0.41	37.43	25.01	0.61	43.87	29.13	0.89	52.53	34.63
	0.60	0.21	36.88	26.63	0.41	43.11	30.57	0.69	51.57	35.91
	0.80	0.01	36.68	29.17	0.21	42.64	32.73	0.49	50.84	37.81
	1.00				0.01	42.47	35.86	0.29	50.35	40.39
	1.20							0.09	50.11	43.72
0.8	0.00	0.72	40.19	31.80	0.91	46.75	37.36	1.17	55.48	44.74
	0.20	0.52	39.14	32.13	0.71	45.59	37.66	0.97	54.22	45.01
	0.40	0.32	38.40	33.19	0.51	44.70	38.61	0.77	53.17	45.85
	0.60	0.12	38.00	35.08	0.31	44.09	40.29	0.57	52.35	47.34
	0.80				0.11	43.77	42.78	0.37	51.77	49.54
	1.00							0.17	51.43	52.50
1.0	0.00	0.66	41.05	39.92	0.83	47.51	46.78	1.07	56.10	55.90
	0.20	0.46	40.10	40.30	0.63	46.45	47.12	0.87	54.94	56.20
	0.40	0.26	39.48	41.51	0.43	45.67	48.21	0.67	54.00	57.16
	0.60	0.06	39.21	43.64	0.23	45.18	50.11	0.47	53.29	58.84
	0.80				0.03	44.98	52.94	0.27	52.83	61.31
	1.00							0.07	52.62	64.63

表-6 被覆PC鋼より線の周長・被覆材断面積(19本より線)

被覆材 厚さ c (mm)	被覆材 厚さ f (mm)	山谷 の差 h (mm)	周長 ϕ_c (mm)	被覆材 断面積 A_c (mm ²)	山谷 の差 h (mm)	周長 ϕ_c (mm)	被覆材 断面積 A_c (mm ²)	山谷 の差 h (mm)	周長 ϕ_c (mm)	被覆材 断面積 A_c (mm ²)
0.2	0.00	1.50	67.29	14.01	1.91	83.15	17.30	2.62	110.4	22.93
	0.20	1.30	64.70	14.21	1.71	80.45	17.47	2.42	107.6	23.07
	0.40	1.10	62.41	14.86	1.51	77.99	18.04	2.22	104.9	23.55
	0.60	0.90	60.45	16.07	1.31	75.77	19.08	2.02	102.5	24.41
	0.80	0.70	58.84	17.94	1.11	73.83	20.69	1.82	100.2	25.73
	1.00	0.50	57.62	20.59	0.91	72.18	22.95	1.62	98.09	27.56
	1.20	0.30	56.79	24.09	0.71	70.83	25.94	1.42	96.21	29.97
	1.40	0.10	56.38	28.56	0.51	69.81	29.74	1.22	94.56	33.03
0.4	0.00	1.26	65.57	27.27	1.63	80.81	33.66	2.29	107.1	44.64
	0.20	1.06	63.33	27.55	1.43	78.43	33.91	2.09	104.6	44.85
	0.40	0.86	61.43	28.48	1.23	76.31	34.72	1.89	102.2	45.53
	0.60	0.66	59.88	30.16	1.03	74.47	36.18	1.69	100.1	46.74
	0.80	0.46	58.72	32.70	0.83	72.93	38.37	1.49	98.10	48.55
	1.00	0.26	57.96	36.20	0.63	71.69	41.40	1.29	96.37	51.03
	1.20	0.06	57.61	40.77	0.43	70.78	45.32	1.09	94.86	54.23
	1.40				0.23	70.21	50.22	0.89	93.59	58.23
0.6	0.00	1.11	65.11	40.32	1.46	79.93	49.72	2.07	105.6	65.89
	0.20	0.91	63.12	40.68	1.26	77.79	50.03	1.87	103.2	66.15
	0.40	0.71	61.49	41.84	1.06	75.91	51.04	1.67	101.1	67.00
	0.60	0.51	60.23	43.90	0.86	74.33	52.84	1.47	99.16	68.49
	0.80	0.31	59.36	46.99	0.66	73.07	55.51	1.27	97.45	70.70
	1.00	0.11	58.92	51.18	0.46	72.12	59.15	1.07	95.97	73.70
	1.20				0.26	71.51	63.82	0.87	94.73	77.54
	1.40				0.06	71.24	69.64	0.67	93.73	82.30
0.8	0.00	1.00	65.23	53.35	1.32	79.73	65.67	1.90	104.8	86.91
	0.20	0.80	63.43	53.77	1.12	77.76	66.05	1.70	102.7	87.23
	0.40	0.60	62.00	55.14	0.92	76.09	67.24	1.50	100.7	88.22
	0.60	0.40	60.96	57.54	0.72	74.71	69.33	1.30	98.96	89.97
	0.80	0.20	60.32	61.10	0.52	73.66	72.43	1.10	97.44	92.53
	1.00	0.00	60.08	85.19	0.32	72.93	76.60	0.90	96.16	95.98
	1.20				0.12	72.55	81.93	0.70	95.13	100.4
1.0	0.00	0.92	65.66	66.43	1.22	79.92	81.63	1.77	104.6	107.9
	0.20	0.72	64.02	66.92	1.02	78.10	82.06	1.57	102.6	108.2
	0.40	0.52	62.75	68.47	0.82	76.58	83.41	1.37	100.8	109.3
	0.60	0.32	61.89	71.19	0.62	75.37	85.78	1.17	99.17	111.3
	0.80	0.12	61.43	75.19	0.42	74.49	89.26	0.97	97.81	114.2
	1.00				0.22	73.94	93.92	0.77	96.69	118.1
	1.20				0.02	73.74	100.4	0.57	95.83	123.0

注) 19本より28.6mmは「シール形」断面を示す。

線の断面積，表面被覆材の断面積，空洞部の断面積を求めた。PC鋼より線の断面積に関しては算定結果とJIS規格の公称断面積の比較をした。これらのことより以下の知見が得られた。

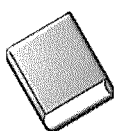
- ① PC鋼より線の周長：JIS規格には素線径が表示されていない（解説に側線の一部掲載）ため，また下記③から計算周長は厳密には正解値とは言えないが，断面積との比較から計算周長を平均値（管理範囲）と判断し採用してよいと言える。
- ② 被覆PC鋼より線の周長：被覆厚さを増すとPC鋼より線の周長と比べ低下する。タイプⅠ_aでは周長比の最低値は，より線ごとに一定，かつ19本より線が最も低い。タイプⅠ_bは7本より線より19本より線の方が低下の程度が大きい。
- ③ 断面積：PC鋼より線のJISの断面積は管理値で示さ

れているため，計算値とは一致しない。さらに28.6 mmにおいて断面積が類似しているとは言え，2タイプの素線配列の併用を認めており，このことからJISの断面積が計算値と一致することを放棄している。JISとの差は A_{JIS} / A_{cal} に対し-2.31%から+1.66%の範囲にあるが，偏差はより線の種類によってまちまちである。

謝 辞

本論文の作成にあたっては，六車 熙 京都大学名誉教授のご指導，ならびに高耐久構造研究会（住建コンクリート工業，神鋼鋼線工業，東京製綱，VSLジャパン，ヒエン電工およびフドウ建研）のご協力をいただいた。関係各位に深謝する次第である。

【2001年4月17日受付】



刊行物案内

- 複合橋設計施工規準(案)
- PC構造耐震設計規準(案)
- PC斜張橋・エクストラドーズド橋設計施工規準(案)－抜粋－

(平成11年12月)

頒布価格：3点セット 5 000円（送料600円）

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会