

素掘坑の強さに關する彈性學的考察 (上)

A study of the stress distribution around a tunnel without lining, from the view of the theory of elasticity (I)

By Shunzo-Okamoto, C. E., Member

正員 岡 本 舜 三*

要 旨 素掘坑道の周邊に外力により亀裂が出来る場合に、(1) 亀裂は孔のふちのどこから發生するか、(2) どの方向に進むか、(3) 亀裂の進む方向の急に變るのはどんな機構によるか、の三問題を主として彈性學を應用して考察した。このために寒天と砂を混ぜた材料に坑道形の孔をうがち、これを壓縮した際に生ずる亀裂を調べその位置を彈性學により計算した應力と比較して次のことを示した。(1) 坑のふちの應力の最大なる位置及坑のふちほそ應力の變化の大なる位置には亀裂が發生する。(2) 坑力が破壊條件をみだす區域は外力の増加とともに擴がるが、外圧力がある大きさに達すると、この區域が一方に特に著しく長くなることがあり、こうゆう時に長い亀裂がこの方向に出来る。(3) 亀裂の進む方向が急に變るのはその先端に應力集中現象がおきるためである。

目 次

第1章 素掘坑に生ずる龜裂について

第1節 序 論 第2節 寒天土の性質 第3節 孔のある供試體の壓縮試験

第2章 龜裂の起點に關する考察

第1節 孔のまはりの應力の解法 第2節 孔をあけることによる應力状態 (I) の變化 第3節 孔をあけることによる應力状態 (II) の變化 第4節 孔のふちにそつ應力 $99\%_0$ 第5節 亀裂と應力との關係

第3章 龜裂の進行方向に關する考察

第1節 圓形の孔ある寒天土供試體の亀裂 第2節 尖頭形の孔ある寒天土供試體の壓縮による亀裂 第3節 亀裂の位置と應力分布との關係

第4章 亀裂が急に方向を變えて進むことについて

第1節 序 論 第2節 きれめを入れた寒天の壓縮試験 第3節 きれめを入れた寒天土の壓縮試験 第4節 亀裂の折れ曲る機構について

第1章 素掘坑に生ずる龜裂について

第1節 序 論

無窓立坑道の坑壁に生ずる龜裂の主原因としては、鑿坑後の土質及應力状態の變化が考えられる。兩者は相互に關連あるものであらうが、簡單のために、區別し得るものと假定し、本文では専ら應力状態にもとずく龜裂について考察する。坑道強弱論には土核論的立場にたつもの¹⁾、彈性論的立場に立つものがある。後者は地盤を重力下にある彈性體とみなし、坑道附近の應力

* 東京大學第二工學部助教授

1) 例えは E. Lanelli, Tunneling, 1614 年 105 頁参照。

を算出し材料の破壊理論を採用して、坑道の強弱を論ずるものであるが、その重點は (1) 鑿坑前の應力分布が既知なる場合鑿坑後の應力分布を求むること、(2) 應力分布が既知なる場合に龜裂を生ずる位置を求むることにある。(1) については、かなり研究されているが(2) については從來殆んど觸れられていないので著者はこれに關する若干の研究をしようとするものである。

第2節 寒天土の性質

坑道の龜裂を實驗的に調べるために砂に寒天をまぜた材料を用いる。(以下簡單のため寒天土と呼ぶ) これは定量の寒天を定量の水に入れ、約1時間煮沸して充分溶かしてから溶液と砂にまぜて作る。

溶液の濃度を表はすに沸騰せる水 100gr 中に入れた寒天の gr 數を以てし、砂と溶液との混合化を表わすに砂 100 gr 中の溶液の cc 數を以てすることにしよう。本實驗では砂粒徑 0.1mm. 溶液濃度 2.0 である。寒天土に對する、4cm×4cm の

小型三割箱剪斷試驗機(この際、砂は3層につめ各層ごとに徑4mmの丸棒で30回づつ搗く)による試驗結果は圖-1に示してあるが、これによると τ と σ の間には

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

なる直線的な關係があり、 c と ϕ とは混合化によつて圖-2の如く變ることが認められる。即ち寒天溶液の量が増すと砂の凝集力は増し、内部摩擦角は減ることが知られる。

第3節 孔のある供試體の壓縮試驗

圖-3に示す木製箱に溶液濃度 2.0, 混合比 0.6, 寒天土をつめその中央部に巾約5cmの坑道形の孔をあけ、上側より壓縮する。圖-4は壓縮と共に龜裂の生長してゆく經過、圖-5は種々

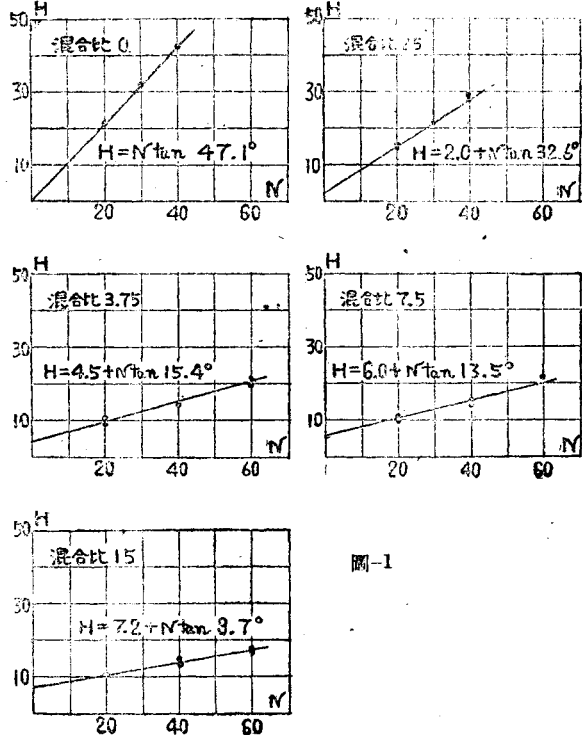


圖-1

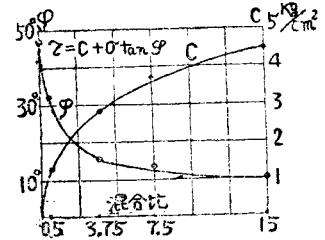


圖-2

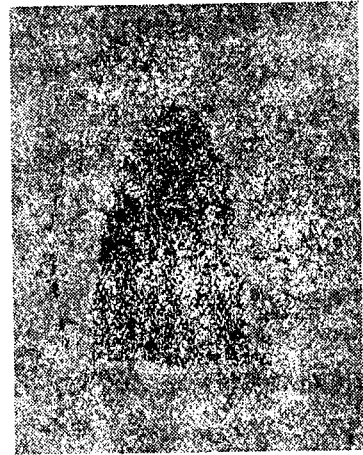
2) 吉村虎彦: 水底道路隧道の換氣について、土木技術第2巻11-12號第1947年25頁には多數の文獻が掲げられている。著者はこれに山口昇: On the investigation of the stress distribution in a tunnel with the agar-agar model experiments. 土木學會誌第13巻第3號1930年113頁と R. D. Mindlin, stress distribution around a tunnel Proc. of A. S. C. E. Vol. 65, 1939, p. 619 と杉原武徳「坑内地壓の解説」東京帝國大學工學部紀要第22册第1號, 1939年1頁とを追加する。



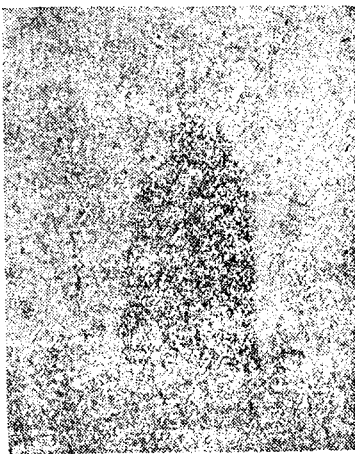
圖-3



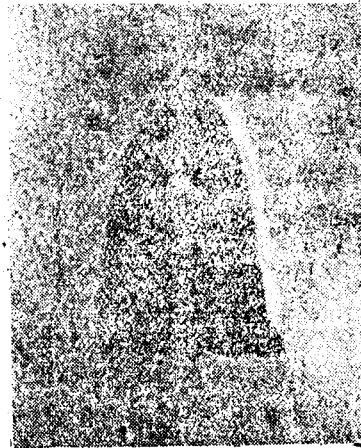
①



②



③



④

の形の孔における龜裂を示す。實驗は數回繰返されたが、結果は概ね同じであつたことからみると、龜裂は豫期し難き偶發的原因によるものではないと思われる。この結果から (1) 龜裂は常に孔のふちにはじまる。(2) 土の内部に深く進んでゆくものと、途中から急に折れ曲るものがあることが認められる。これらの事實は孔の附近の應力と密接に關係しているであらう。したがつて (1) 龜裂は孔のふちのどこから發生するか、(2) 發生した龜裂はどの方向に進むか、(3) 龜裂が急に折れ曲るのは何故であるか、とゆう問題を提出して、弾性學的に計算された應力をもとにして實驗結果を解釋することを試みようと思ふ。

第2章 龜裂の起點に關する考察

第1節 孔のまわりの應力の解法

(I) 自然状態にある地盤内の應力 鑿坑前の地盤内には種々の應力状態があり得よう。

しかしこゝでは從來の例に依つて、深さ h の水平面上の壓力を ωh (ω は單位體積の土の重量) 鉛直面上の壓力を $k\omega h$ とおく。 k は土の堆積せる過程により 0 から 1 迄變り得るといわれている。

(II) 孔の形を表はす曲線座標 直交直線座標 $z = x + iy$ を曲線座標 $w = \alpha + i\beta$ との間に

$$z = c(e^{nw} + be^{-w} + ce^{-nw}) \dots \dots \dots (1)$$

但 a, b, c は實數の常係數, n は正整數なる關係をおく。

$\alpha = 0$ なる曲線

$$\left. \begin{aligned} x &= a\{(1+b)\cos\beta + c\cos n\beta\} \\ y &= a\{(1-b)\sin\beta - c\sin n\beta\} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

を孔の周圍を表わすものとすればこれは一般に $(n+1)$ 多角形に類似した閉曲線を示す。

(III) 曲線座標における Airy 函數 $w, e^{\pm nw}$ ($n=1, 2, 3, \dots$), $zw, ze^{\pm mw}$, を組合せれば Airy 函數を作りうる。應力が x 軸に對稱で、且無限遠にて 0 となること、變位が 1 價なることの條件を満足する Airy 函數を作ると

$$F_1 = P \left[\beta \{e^\alpha - be^{-\alpha}\} \sin\beta - ce^{-n\alpha} \sin n\beta \right] - \frac{1-2r}{2(1-r)} \alpha \{ (e^\alpha + be^{-\alpha}) \cos\beta$$

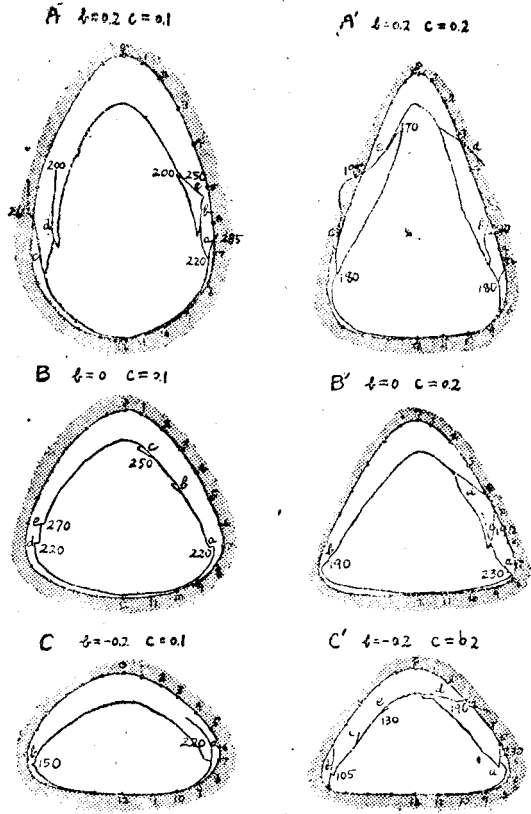


圖 5

$$+ce^{-n\alpha}\cos n\beta\} + A_1x + B_1y + \sum_{i=1}^{\infty} E_i e^{-i\alpha}\cos i\beta + \sum_{i=1}^{\infty} D_i (e^{-i\alpha} + i\cos(i-1)\beta + b\alpha^{i+1})\cos(i-1)\beta + c\alpha^{i+1}\cos(i-1)\beta \dots (3)$$

となる。茲に P, A_1, B_1, D_i, E 等は任意の常数である。孔のある重力體内の應力は、孔を掘つたために變化せる應力の應力函數を F とすれば

$$\widehat{xx} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} - w(h-x), \quad \widehat{yy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - kv(h-x), \quad \widehat{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x\partial y} \dots (4)$$

であつて、これを曲線座標で表わせば

$$\begin{aligned} \widehat{\alpha\alpha} &= \frac{1}{J^2} \left\{ J \frac{\partial^2 F}{\partial \beta^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial J}{\partial \alpha} \frac{\partial F}{\partial \alpha} - \frac{\partial J}{\partial \beta} \frac{\partial F}{\partial \beta} \right) \right\} + \sigma_{\alpha\alpha} \\ \widehat{\beta\beta} &= \frac{1}{J^2} \left\{ J \frac{\partial^2 F}{\partial \alpha^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial J}{\partial \alpha} \frac{\partial F}{\partial \alpha} - \frac{\partial J}{\partial \beta} \frac{\partial F}{\partial \beta} \right) \right\} + \sigma_{\beta\beta} \\ \widehat{\alpha\beta} &= \frac{1}{J^2} \left\{ -J \frac{\partial^2 F}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial J}{\partial \alpha} \frac{\partial F}{\partial \beta} + \frac{\partial J}{\partial \beta} \frac{\partial F}{\partial \alpha} \right) \right\} + \tau_{\alpha\beta} \end{aligned} \dots (5)$$

茲に $\sigma_{\alpha\alpha}, \sigma_{\beta\beta}, \tau_{\alpha\beta}$ は孔を掘らない以前の地盤内の應力、 J は規

格量 $J = \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)^2$ である。(圖-6)

2 個の應力状態

$$(I) \quad \sigma_{x,1} = -wh, \quad \sigma_{y,1} = -kvh, \quad \tau_1 = 0 \dots (6)$$

$$(II) \quad \sigma_{x,2} = wx, \quad \sigma_{y,2} = kwx, \quad \tau_2 = 0 \dots (7)$$

を考え、孔をほる前の應力状態を (I) と (II) の重合と考えれば孔

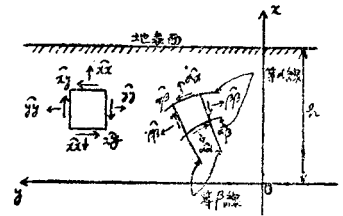


圖-6

をあけた後の應力状態の變化は、應力状態 (I) (II) の變化の重合と考えられる。このうち (I) の變化は孔の深さに正比例し孔徑によらず (II) の變化は孔徑に比例し、孔の深さによらない。それ故普通の坑道では前者は後者に比し、はるかに大なる値とならう。孔の内面上には外力は働かないから

$$\widehat{\alpha\alpha}_{\alpha=0} = 0, \quad \widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = 0 \dots (8)$$

よつて孔の周面にそつ應力 $\beta\beta_{\alpha=0}$ は次式にて表はされる。

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = \sigma_x + \sigma_y + \frac{1}{J_0} \left[\frac{P}{1-r} \{ (1-b)\cos\beta - nc \cos n\beta \} + 4 \sum_{i=1}^{\infty} D_i \{ b \cos(i-1)\beta - \cos(i+1)\beta + nc \cos(i-n)\beta \} \right] \dots (9)$$

$$\text{但し } J_0 = a^2 [1 + b^2 + n^2 c^2 - 2b \cos 2\beta - 2nc \{ \cos(n+1)\beta - b \cos(n-1)\beta \}] \dots (10)$$

(IV) 境界條件 應力の直は孔から充分に離れれば自然状態に一致し、孔の内面上では 0 となる。孔をあけた後の應力として、自然状態の應力に應力函數 (3) から求められる應力を重合せれば、無遠に於ける境界條件は自ら満足される。それ故式中の任意常數は孔の内面に於ける境界條件から定められる。孔の周上では

$$\widehat{xx} \cos(n \cdot x) + \widehat{xy} \cos(n \cdot y) = 0, \quad \widehat{xy} \cos(n \cdot x) + \widehat{yy} \cos(n \cdot y) = 0$$

が成立つ。この式に

$$\cos(n \cdot x) = \frac{dy}{ds}, \quad \cos(n \cdot y) = -\frac{dx}{ds}$$

と(4)とを代入し、しかる後孔のまわりを一周して積分すると

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial y} &= w \oint (h-x) dy, & \frac{\partial F}{\partial x} &= hw \oint (h-x) dx \\ \frac{\partial F}{\partial \alpha} &= w\phi \frac{\partial y}{\partial \alpha} + kw\Psi \frac{\partial x}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial F}{\partial \beta} &= w\phi \frac{\partial y}{\partial \beta} + kw\Psi \frac{\partial x}{\partial \beta} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{但し } \phi = \oint (h-x) dx, \quad \Psi = \oint (h-x) dx.$$

(11)を以て境界条件とする³⁾。

第2節 坑をあけることによる應力状態 (I) の變化

(I) Airy 函数と孔周上の應力 應力状態 (I) のところへ孔をあけた後におきる状態の應力函数を

$$F_2 = F_1 - \frac{wh}{2}(y^2 + kx^2)$$

とおく。ここに F_1 は (3) 式に於て $p=0$ とおき且 $A_1EB_mD_1$ を孔の周上にて $F_2 = \text{一定}$ 及 $\frac{\partial F_2}{\partial \alpha} = 0$ なる如く定めたものである。その時必要な連立方程式の左邊は表-1 に示してある。その右邊は0である。

それより $\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0}$ を計算すると次の如くなる。

$n=2$ の時

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = -wh(1+k) + \frac{4}{J_0} \{ (bD_1 + 4CD_2 + 2(CD_1 + bD_2)\cos\beta - D_1\cos 2\beta - 2D_2\cos 3\beta) \}$$

$$\text{但 } J_0 = a^2(1+b^2+4c^2+4bc \cos\beta - 2b \cos 2\beta - 4c \cos 3\beta)$$

$$D_1 = \frac{wha^2}{4} 2\{ -(1-b) + k(1+b) \}$$

$$D_2 = \frac{wha^2}{4} 2c(1+k)$$

$n=3$ の時

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = -wh(1+k) + \frac{4}{J_0} \{ (bD_1 + 9cD_3 - \{(1-3c)D_1 - 3bD_3\} \cos 2\beta - 3D_3 \cos 4\beta) \}$$

$$\text{但 } J_0 = a^2(1+b^2+9c^2 - 2b(1-3c)\cos 2\beta - 6c \cos 4\beta)$$

$$D_1 = \frac{wha^2}{4} \cdot \frac{2}{c-1} \{ 1-b-k(1+b) \}$$

3) 従來の研究では境界条件として専ら (8) が用ひられた。しかし本文の如き複雑な孔形の場合には計算進行の煩に耐えない。本計算が成功したのは全く (8) のかわりに (11) を用いたからである。

n	A ₁	E	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	D ₁	D ₂	D ₃		備考
2		1	1								C	B			$B_{m \geq 5} = 0$ $D_{i \geq 3} = 0$
				1							1	1			
					1										
	1		-1								-2B	-4C			
											-3C	-3B			
3											1+C		2		$E = 0$ $B_3 = B_5 = B_{m \geq 7} = 0$ $D_2 = D_4 = D_{i \geq 5} = 0$
													1		
	1			2							-2B		-6C		
											4C		4B		
4												B	2		$B_4 = B_6 = B_7 = B_{m \geq 9} = 0$ $D_3 = D_{i \geq 5} = 0$
												1	C		
	1			1							C	1			

$$D_3 = \frac{wha^2}{4} 2c(1+k)$$

$n=4$ の時

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = -wk(1+b) + \frac{4}{J_0} \{ (bD_1 + 16cD_4) + 2bD_2 \cos \beta - (D_1 - 8cD_2) \cos 2\beta \\ + (2cD_1 + 4bD_4) \cos 3\beta - 4D_4 \cos 5\beta \}$$

但 $J_0 = a^2 \{ 1 + b^2 + 16c^2 - 2b \cos 2\beta + 8bc \cos 3\beta - 8c \cos 5\beta \}$

$$D_1 = -\frac{wha^2}{2(1-2c^2)} \{ 1 - b - k(1+b) \}$$

$$D_2 = -\frac{wha^2}{2(1-2c^2)} c \{ 1 - b - k(1+b) \}$$

$$D_4 = \frac{wha^2}{2} c(1+k)$$

種々の形の孔の $\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0}$ の値を

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = wh(A+kB)$$

と表はして、係数 A, B を表-2 に示す9種の形の孔について求め、表-3 に示す。

表-2

n	b	c	坑記 形號	坑高 坑幅
2	0.2	0.1	A	1.40
2	0.2	0.2	A'	1.38
2	0.0	0.1	B	0.98
2	0.0	0.2	B'	0.94
2	-0.2	0.1	C	0.66
2	-0.2	0.2	C'	0.64
3	0.2	-0.1	H	1.57
3	0.0	-0.1	I	1.00
3	-0.2	-0.1	J	0.64

第3節 孔をあけることによる應力状態(II)の變化

(I) 應力函数と孔周上の應力 應力状態(II)にある弾性體に孔をあけた後の應力を

$$\widehat{xx} = \frac{\partial^2 F_1}{\partial y^2} + wx, \quad \widehat{yy} = \frac{\partial^2 F_1}{\partial x^2} + kwx, \quad \widehat{xy} = -\frac{\partial^2 F_1}{\partial x \partial y}$$

とおき F_1 に含まれる任意常数を境界 $\alpha=0$ における條件

$$\frac{\partial F_1}{\partial \alpha} = -w \frac{\partial y}{\partial \alpha} \oint x dy - kw \frac{\partial x}{\partial \alpha} \oint x dx$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial \beta} = -w \frac{\partial y}{\partial \beta} \oint x dy - kw \frac{\partial x}{\partial \beta} \oint x dx$$

より定める。それに必要な連立方程式の左邊は表-1 に示す。その右邊は0である。しからは

$n=2$ の時

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = wx(1+k) + \frac{1}{J_0} \left[p \left\{ \frac{1-b}{1-r} \cos \beta - \frac{2c}{1-r} \cos 2\beta \right\} + 4 \{ (-D_1 + 3bD_3 \\ + 8cD_4) \cos 2\beta - 2(D_2 - 2bD_4) \cos 3\beta - 3D_3 \cos 4\beta - 4D_4 \cos 5\beta \\ + 2(cD_1 + bD_2 + 3cD_3) \cos \beta + bD_1 + 4cD_2 \} \right]$$

但 $D_1 = \frac{wa^3}{8} \cdot \frac{1}{2} \{ L_7 - K_7 + k(N_7 - M_7) \}$

$$D_3 = \frac{wa^3}{8} \cdot \frac{1}{2} \{ L_3 - K_3 + k(N_3 - M_3) \}$$

$$D_2 = bD_1 + \frac{wc^3}{8} \cdot \frac{1}{2} \{ L_2 - K_2 + L_6 - K_6 + k(N_2 - M_2 + N_6 - M_6) \}$$

表 (1)

	β	α	ρ	J_0	B	A	$A + \frac{B}{2}$	$A + \frac{B}{2}$	$A + B$
$n = 2$ $b = 0$ $c = 0.2$	0	1.200	0.000	0.360	-5.67	1.00	-0.39	-1.84	-4.67
	15	1.159	0.159	0.595	-3.03	0.20	-0.81	-1.32	-2.83
	30	0.765	0.327	1.140	-0.87	-0.24	-0.77	-0.96	-1.45
	45	0.727	0.507	1.725	-0.56	-0.25	-0.81	-1.07	-0.97
	60	0.602	0.693	1.950	0.27	-0.10	-0.89	-0.99	-0.25
	75	0.086	0.866	1.725	0.64	-0.07	-0.91	-1.37	-0.97
	90	-0.200	1.000	1.150	1.30	-0.25	-0.13	-0.95	-1.45
	105	-0.432	1.066	0.595	1.15	-0.92	-0.10	-0.50	-2.83
	120	-0.600	1.037	0.360	-0.87	-0.90	-0.22	-0.32	-4.67
	135	-0.707	0.807	0.595	-2.36	-0.52	-0.33	-2.72	-2.90
	150	-0.766	0.673	1.140	-2.10	0.12	-0.55	-0.91	-2.00
	160	-0.793	0.589	1.726	-1.94	0.77	0.32	0.00	-0.97
	180	0.700	0.000	1.920	-1.25	1.00	0.38	0.07	-0.86
	$n = 2$ $b = -0.2$ $c = 0.1$	0	0.900	0.000	1.000	-3.00	1.00	0.00	-0.50
15		0.859	0.261	1.066	-2.09	0.64	-0.09	-0.61	-1.85
30		0.783	0.513	1.211	-1.77	0.05	-0.52	-0.84	-1.72
45		0.566	0.749	1.306	-0.80	-0.66	-0.94	-1.08	-1.50
60		0.350	0.953	1.240	-0.05	-1.02	-1.04	-1.45	-1.47
75		0.120	1.109	0.996	0.31	-0.99	-0.25	-2.18	-1.88
90		-0.100	1.200	0.180	0.00	-0.91	-0.38	-0.21	-2.71
105		-0.335	1.200	0.592	0.51	-0.51	-0.36	-0.25	-0.00
120		-0.450	1.126	0.520	-0.70	-0.66	-0.73	-0.83	-3.19
135		-0.566	0.949	0.301	-1.21	-0.19	-0.77	-1.10	-2.00
150		-0.683	0.687	0.959	-2.02	1.07	-0.56	0.17	-1.05
165		-0.606	0.361	1.093	-2.36	2.17	1.38	0.99	-0.19
180		-0.700	0.000	1.160	-2.46	2.38	1.56	1.15	-0.08
$n = 2$ $b = -0.2$ $c = 0.2$		0	1.000	0.000	0.640	-0.00	1.00	-0.33	-1.00
	15	0.946	0.211	0.926	-2.70	0.49	-0.91	-0.86	-2.21
	30	0.793	0.425	1.361	-1.30	-0.18	-0.68	-0.97	-1.56
	45	0.566	0.599	1.592	-0.55	-0.15	-0.74	-0.88	-1.10
	60	0.300	0.716	1.720	0.41	-0.07	-1.02	-1.02	-0.95
	75	0.100	1.089	0.970	1.05	-0.73	-1.52	-1.50	-1.28
	90	-0.200	1.200	0.180	1.00	-0.90	-0.67	-0.50	-2.00
	105	-0.320	1.200	0.592	0.51	-0.72	-0.64	-0.29	-0.87
	120	-0.500	1.120	0.500	-1.50	-0.29	-0.79	-0.60	-0.79
	135	-0.566	1.049	0.767	-2.21	0.37	-0.34	-0.74	-1.80
	150	-0.593	0.773	1.139	-2.16	1.61	0.37	0.53	-0.55
	165	-0.600	0.411	1.574	-1.75	1.82	1.30	1.00	0.10
	180	-0.600	0.000	1.760	-1.73	1.91	1.33	1.04	0.18

表-3 (2)

	β	α	γ	J_0	B	A	$A+\frac{B}{3}$	$A+\frac{B}{2}$	$A+B$
$\pi = 2,$ $b = 0.2$ $c = 0.1$	0	1.300	0.000	0.360	-5.67	1.00	-0.89	-1.84	-0.69
	15	1.246	0.157	0.528	-3.37	0.03	-1.76	-1.76	-3.46
	30	1.089	0.313	0.949	-1.16	-0.52	-0.91	-1.10	-1.68
	45	0.849	0.466	1.419	-0.13	-1.07	-1.13	-1.16	-1.22
	60	0.550	0.609	1.920	0.46	-1.50	-1.35	-1.28	-1.06
	75	0.224	0.723	1.730	0.77	-1.76	-1.50	-1.37	-0.99
	90	-0.100	0.800	1.480	1.00	-2.24	-1.91	-1.74	-1.14
	105	-0.399	0.823	1.123	0.96	-2.57	-2.25	-2.09	-1.61
	120	-0.650	0.779	0.840	0.29	-2.69	-2.59	-2.54	-2.40
	135	-0.849	0.666	0.741	-1.02	-1.48	-1.72	-1.99	-2.50
	150	-0.989	0.487	0.811	-2.39	0.07	-0.93	-1.13	-2.21
	165	-1.073	0.257	1.139	-2.89	0.63	-2.28	-0.77	-2.13
180	-1.100	0.000	1.000	-3.00	1.00	0.00	-0.50	-2.00	
$\pi = 2,$ $b = 0.2$ $c = 0.2$	0	1.200	0.000	0.160	-9.00	1.00	-2.00	-3.50	-8.00
	15	1.332	0.107	0.442	-2.73	-0.37	-1.30	-1.76	-3.12
	30	1.139	0.227	1.139	-0.50	-0.57	-0.74	-0.82	-1.37
	45	0.849	0.366	1.877	0.15	-0.88	-0.83	-0.80	-0.73
	60	0.550	0.523	2.200	0.47	-1.15	-0.99	-0.91	-0.88
	75	0.227	0.603	2.153	0.74	-1.40	-1.15	-1.03	-0.66
	90	-0.200	0.800	1.300	1.00	-2.00	-1.67	-1.50	-1.00
	105	-0.594	0.873	0.777	1.15	-2.25	-2.47	-2.27	-1.70
	120	-0.700	0.866	0.520	0.23	-3.81	-3.73	-3.69	-3.58
	135	-0.849	0.766	0.525	-2.06	-1.43	-2.12	-2.46	-3.49
	150	-0.937	0.573	0.861	-2.47	0.41	-0.41	-0.82	-2.06
	165	-0.936	0.307	1.265	-2.42	0.91	0.10	-0.30	-1.51
180	-1.000	0.000	1.000	-3.00	1.00	0.22	-0.17	-1.34	
$\pi = 2,$ $b = 0$ $c = 0.1$	0	1.300	0.000	0.600	-2.00	1.00	-0.33	-1.00	-3.00
	15	1.083	0.207	0.767	-0.33	0.52	-0.59	-1.14	-2.80
	30	0.716	0.413	1.040	-0.33	-0.29	-1.03	-1.40	-2.51
	45	0.227	0.607	1.223	-1.37	-0.94	-1.40	-1.63	-2.31
	60	0.550	0.777	1.000	-0.37	-1.50	-1.23	-1.80	-2.17
	75	0.157	0.913	0.223	0.37	-2.11	-2.08	-2.07	-2.03
	90	-0.100	1.000	1.000	1.00	-2.88	-2.53	-3.35	-1.85
	105	-0.399	1.013	0.750	1.00	-3.42	-2.79	-2.47	-1.82
	120	-0.650	0.763	0.540	1.00	-2.75	-2.21	-1.93	-1.12
	135	-0.797	0.257	0.757	-0.33	-0.24	-0.89	-0.92	-0.99
	150	-0.816	0.897	1.500	-1.33	0.50	-0.24	-0.50	-1.27
	165	-0.877	0.807	1.323	-2.17	0.20	-0.17	-1.20	-1.28
180	-0.900	0.000	1.000	-3.00	1.00	-0.12	-0.17	-1.33	

	β	α	γ	J_0	B	A	$A + \frac{B}{3}$	$A + \frac{B}{2}$	$A + B$
$n=3$ $b=0.2$ $c=0.1$	0	1.100	0.000	1.210	-2.44	0.87	0.06	-0.35	-1.57
	15	1.088	0.278	0.980	-2.58	0.59	-0.30	-0.75	-2.09
	30	1.039	0.509	0.570	-3.04	-0.17	-1.18	-1.59	-3.21
	45	0.917	0.636	0.530	-0.97	-2.34	-2.66	-2.83	-3.31
	60	0.700	0.693	1.170	0.53	-2.21	-2.03	-1.96	-1.68
	75	0.381	0.702	1.880	0.85	-1.72	-1.04	-1.29	-0.87
	90	0.000	0.700	2.250	0.85	-1.57	-1.29	-1.14	-0.72
$n=3$ $b=0$ $c=0.1$	0	0.900	0.000	1.690	-1.94	0.86	0.21	-0.11	-1.08
	15	0.885	0.350	1.390	-2.23	0.82	0.08	-0.30	-1.41
	30	0.866	0.600	0.790	-2.65	0.34	-0.54	-0.99	-2.31
	45	0.778	0.778	1.490	-1.86	-1.86	-2.48	-2.79	-3.72
	60	0.606	0.866	0.790	0.34	-2.65	-2.54	-2.48	-2.31
	75	0.350	0.885	1.390	0.82	-2.23	-1.97	-1.82	-1.41
	90	0.000	0.900	1.690	0.86	-1.94	-1.65	-1.51	-1.08
$n=3$ $b=-0.2$ $c=0.1$	0	0.700	0.000	2.250	-1.57	0.85	0.33	0.06	-0.72
	15	0.702	0.381	1.880	-1.72	0.85	0.28	-0.01	-0.87
	30	0.893	0.700	1.170	-3.21	0.53	-0.21	-0.58	-1.68
	45	0.636	0.919	0.530	-2.34	-0.97	-1.75	-2.14	-3.31
	60	0.509	1.039	0.570	-0.17	-2.04	-3.10	-3.13	-3.21
	75	0.278	1.088	0.980	0.59	-2.68	-2.48	-2.38	-2.09
	90	0.000	1.100	1.210	0.87	-2.44	-2.15	-2.00	-1.57

表-373

$$D_1 = bD_3 + 2cD_4 + \frac{wa^3}{8} \cdot \frac{1}{2} \{L_3 - K_3 + k(N_3 - M_3)\} - \frac{c}{4(1-r)} p$$

$n=3$ の時

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = wx(1+k) + \frac{1}{J_0} \left[\frac{p}{1-r} \{ (1-b)\cos\beta - 3c \cos 3\beta \} + 4 \{ (2b+6c)D_2 + 12cD_4 \} \cos\beta + (-2D_2 + 4bD_4 + 18cD_6) \cos 3\beta - (4D_4 - 6bD_6) \cos 5\beta - 6D_6 \cos 7\beta \right]$$

但 $D_6 = \frac{wa^3}{8} \cdot \frac{1}{2} \{L_7 - K_7 + k(N_7 - M_7)\}$

$$D_4 = bD_6 + \frac{wa^3}{8} \cdot \frac{1}{2} \{L_4 - K_4 + L_6 - K_6 + k(N_4 - M_4 + N_6 - M_6)\}$$

$$D_2 = \frac{-pc}{4(1-r)} + bD_4 + 3cD_6 + \frac{wa^3}{8} \cdot \frac{1}{2} \{L_2 - K_2 + L_3 - K_3 + k(N_2 - M_2 + N_3 - M_3)\}$$

茲に LKNM 等は表-5 に掲げてある。

種々の形の孔の $\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0}$ の値を

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = wa(A' + kB')$$

と表わす時、 A', B' の値を表-6 に示す。

表 1

n	D	E	A	B	B	B	B	B	B	B	B	B	D	D	D	D	D	D	D		
2	1																			$\frac{4U^2}{8} (4U - 6^2 - 2C^2)$	
	2	-1																		$-\frac{4U^2}{8} (K_0 + K(N_1))$	
	3		1																	$-\frac{4U^2}{8} (K_0 + K(N_2))$	
	4			1																$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K(N_1 + N_2) \}$	
	5				1															$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K(N_1 + N_2 + N_3) \}$	
	6					1															$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \}$
	7						1														$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5) \}$
	8							1													$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6) \}$
	9								1												$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7) \}$
	10									1											$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7 + K_8 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8) \}$
3	1																			$-\frac{4U^2}{8} (L_0 + K(N_8))$	
	2	-1																		$-\frac{4U^2}{8} \{ K_1 + 2L(N_1 + N_2 + K(N_1)) \}$	
	3		1																	$-\frac{4U^2}{8} \{ K_2 + K_1 + 2L(N_1 + N_2 + K_1 + K(N_1)) \}$	
	4			1																$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + 2L(N_1 + N_2 + K_1 + K_2 + K(N_1 + N_2)) \}$	
	5				1															$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + 2L(N_1 + N_2 + N_3 + K_1 + K_2 + K_3 + K(N_1 + N_2 + N_3)) \}$	
	6					1															$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + 2L(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4)) \}$
	7						1														$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + 2L(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5)) \}$
	8							1													$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + 2L(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6)) \}$
	9								1												$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + 2L(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7)) \}$
	10									1											$-\frac{4U^2}{8} \{ K_0 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7 + 2L(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + K_6 + K_7 + K_8 + K(N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8)) \}$

表-5

$K_1 = (1-b)(1+b)^2 + \frac{4\pi^2 c^2}{\pi^2-1} \{1-b-n(1+b)\}$ $K_2 = -(1-b)(1+b)^2$ $K_3 = -\frac{4c}{\pi^2-1} (1+b)\{1-b-n(1+b)\} - \pi c^3$ $K_4 = -\frac{2c}{\pi+1} (1+b)\{1-b-n(1+b)\} - \pi c(1-b^2)$ $K_5 = \frac{2c}{\pi-1} (1+b)\{1-b-n(1+b)\} + \pi c(1-b^2)$ $K_6 = -c^2(1+b) - \frac{2\pi c^2}{\pi-1} \{1-b-n(1+b)\}$ $K_7 = c(1+b) - \frac{2\pi c^2}{\pi+1} \{1-b-n(1+b)\}$ $K_8 = \pi c$	$M_1 = (1+b)(1-b^2 - 4\pi c^2)$ $M_2 = (1-b)(1+b)$ $M_3 = c\{a(1-b^2) - \pi c^2\}$ $M_4 = 2c(1-b^2) - \pi c(1+b)^2$ $M_5 = 2c(1-b^2) - \pi c(1+b)^2$ $M_6 = c^2(1-b) - 2\pi c^2(1+b)$ $M_7 = c^2(1-b) - 2\pi c^2(1+b)$ $M_8 = -\pi c^3$
$L_1 = (1+b)(1-b)^2 - \frac{4\pi c^2}{\pi^2-1} \{1-b-n(1+b)\}$ $L_2 = (1+b)(1-b)^2$ $L_3 = \pi c^2 + \frac{4\pi c^2}{\pi^2-1} (1-b)\{1-b-n(1+b)\}$ $L_4 = \frac{2c}{\pi+1} (1-b)\{1-b-n(1+b)\} - \pi c(1-b^2)$ $L_5 = \frac{2c}{\pi-1} (1-b)\{1-b-n(1+b)\} + \pi c(1-b^2)$ $L_6 = -c^2(1-b) + \frac{2\pi c^2}{\pi-1} \{1-b-n(1+b)\}$ $L_7 = -c^2(1-b) + \frac{2\pi c^2}{\pi+1} \{1-b-n(1+b)\}$ $L_8 = -\pi c^3$	$N_1 = (1+b)^3$ $N_2 = -(1+b)^3$ $N_3 = \pi c^3$ $N_4 = -c(1+b)^2(n+2)$ $N_5 = -c(1+b)^2(n-2)$ $N_6 = -c^2(1+b)(2n-1)$ $N_7 = -c^2(1+b)(2n+1)$ $N_8 = -\pi c^3$

表-6 (1)

β^0	$n=2 \ b=0.2 \ c=0.1$			$n=2 \ b=0.2 \ c=0.2$			β^0	$n=2 \ b=0.2 \ c=0.1$			$n=2 \ b=0.2 \ c=0.2$		
	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$		A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$
0	-1.62	4.53	0.65	-0.57	9.95	4.41	105	-0.79	0.43	-0.57	-0.99	0.35	-0.82
15	-0.62	2.38	0.57	0.48	1.72	1.34	120	-1.35	0.66	-1.02	-1.93	-0.65	1.60
30	0.56	0.23	0.68	0.79	-0.27	0.65	135	-0.97	0.00	-0.97	-0.86	-0.48	-1.10
45	0.91	-0.54	0.64	0.76	-0.69	0.41	150	-0.29	-1.09	-0.84	-0.17	-1.18	-0.76
60	0.88	-0.69	0.53	0.71	-0.70	0.36	165	-0.02	-1.53	-0.79	-0.12	-1.29	-0.77
75	0.57	-0.51	0.31	0.48	-0.52	0.22	180	0.05	-1.63	-0.77	-0.13	-1.30	-0.78
90	-0.01	-0.10	-0.06	-0.04	-0.18	-0.13							

β	$n=2 \ b=0 \ c=0.1$			$n=2 \ b=0 \ c=0.2$			β	$n=2 \ b=0 \ c=0.1$			$n=2 \ b=0 \ c=0.2$		
	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$		A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$
0	-0.80	4.28	1.74	-0.58	4.34	1.59	105	-0.91	-0.61	-1.22	-1.05	0.35	-0.87
15	-0.29	2.97	1.20	0.06	1.92	1.02	120	-1.40	-0.27	-1.54	-1.81	0.33	-1.64
30	0.46	0.98	0.95	0.55	0.14	0.62	135	-0.73	-0.34	-0.90	-0.30	-0.72	-0.66
45	0.86	-0.26	0.73	0.73	-0.45	0.50	150	0.07	-0.59	-0.23	0.29	-1.00	-0.21
60	0.91	-0.85	0.48	0.72	-0.57	0.43	165	0.47	-0.75	0.09	0.36	-1.01	-0.15
75	0.65	-1.05	0.12	0.53	-0.47	0.29	180	0.58	-0.79	0.18	0.35	-1.00	-0.15
90	0.02	-0.96	-0.46	0.03	-0.17	-0.06							

表-6 (2)

β	$n=2 \ b=-0.2 \ c=0.1$			$n=2 \ b=-0.2 \ c=0.2$			β	$n=2 \ b=-0.2 \ c=0.1$			$n=2 \ b=-0.2 \ c=0.2$		
	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$		A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$
0	-0.71	1.88	0.23	-0.87	3.15	0.71	105	-0.97	0.39	-0.77	-1.40	1.23	-0.80
15	-0.41	1.46	0.32	-0.38	1.95	0.60	120	-1.08	0.14	-1.01	-1.64	0.90	-1.19
30	0.16	0.63	0.48	0.29	0.60	0.59	135	-0.29	-0.48	-0.53	-0.12	-0.31	-0.28
45	0.61	-0.03	0.58	0.59	-0.06	0.56	150	0.56	-0.86	0.13	0.52	-0.42	0.27
60	0.79	-0.37	0.60	0.64	-0.26	0.51	165	1.25	-1.09	0.70	0.65	-0.51	0.40
75	0.65	-0.40	0.45	0.49	-0.19	0.39	180	1.26	-1.11	0.70	0.68	-0.51	0.12
90	0.06	-0.09	0.01	0.00	0.20	0.10							

β^0	$n=3 \ b=0.2 \ c=-0.1$			$n=3 \ b=0 \ c=-0.1$			$n=3 \ b=-0.2 \ c=-0.1$		
	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$
0	-0.47	1.78	0.42	-0.45	1.23	0.17	-0.38	0.83	0.04
15	-0.57	1.87	0.37	-0.53	1.31	0.13	-0.43	0.89	0.02
30	-0.06	1.70	0.79	-0.35	1.41	0.36	-0.33	1.01	0.18
45	2.02	-0.17	1.93	1.34	0.41	1.56	0.56	0.72	0.92
60	1.47	-0.62	1.16	1.52	-0.58	1.23	1.37	-0.37	1.18

β°	$n=3 \quad b=0.2 \quad c=-0.1$			$n=3 \quad b=0 \quad c=-0.1$			$n=3 \quad b=-0.2 \quad c=-0.1$		
	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$	A'	B'	$A'+\frac{1}{2}B'$
75	0.61	-0.38	0.42	0.65	-0.34	0.48	0.30	-0.33	0.13
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
105	-0.61	0.38	-0.42	-0.65	0.34	-0.48	-0.30	0.33	-0.13
120	-1.47	0.62	-1.16	-1.52	0.58	-1.23	-1.37	0.37	-1.18
135	-2.02	0.17	-1.93	-1.34	-0.41	-1.56	-0.56	-0.72	-0.92
150	0.06	-1.70	-0.79	0.35	-1.41	-0.36	0.33	-1.01	-0.18
165	0.57	-1.87	-0.37	0.53	-1.31	-0.13	0.43	-0.89	-0.02
180	0.47	-1.78	-0.42	0.45	-1.23	-0.17	0.38	-0.83	-0.04

第4節 孔のふちにその應力 $\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0}$

(I) 坑道の深さが充分深い場合 坑道の周邊上の應力 $\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0}$ は

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = wh\{A+kB+a/h(A'+kB')\} \dots\dots\dots(12)$$

であるが坑道の深さが孔徑に比し充分深い場合には近似的に

$$\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0} = wh(A+kB)$$

となる。 $k=1, 1/2, 3/1, 0$ なる4個の場合について $\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0}$ を求め圖-7 に示した。同圖左半は B

を示し、右半は夫々の k についての $A+kB$

を示してあるが、 $\widehat{\beta\beta}_{\alpha=0}$ に及ぼす孔形や孔の高さと巾の比の影響はこの圖から明らかに知られる。

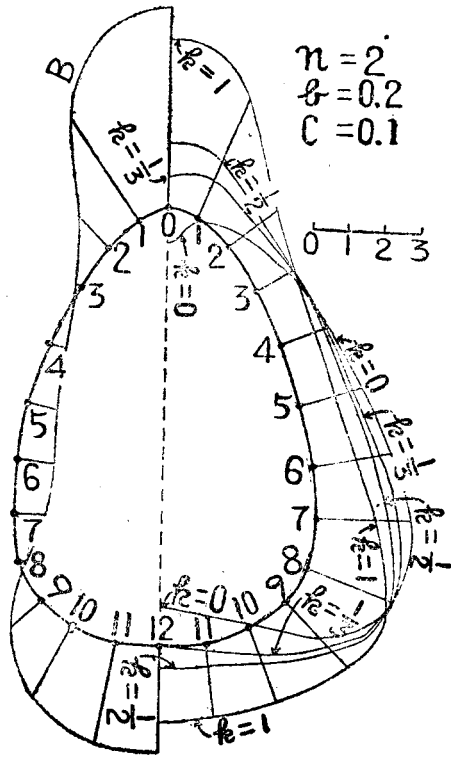
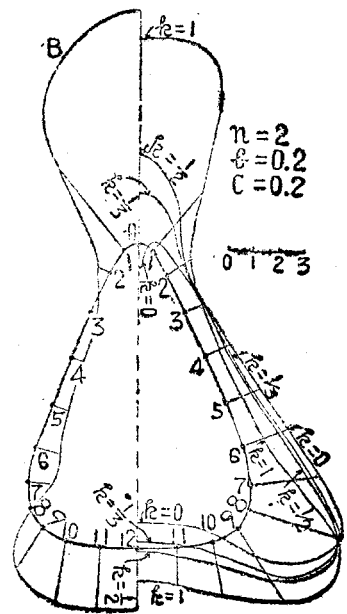
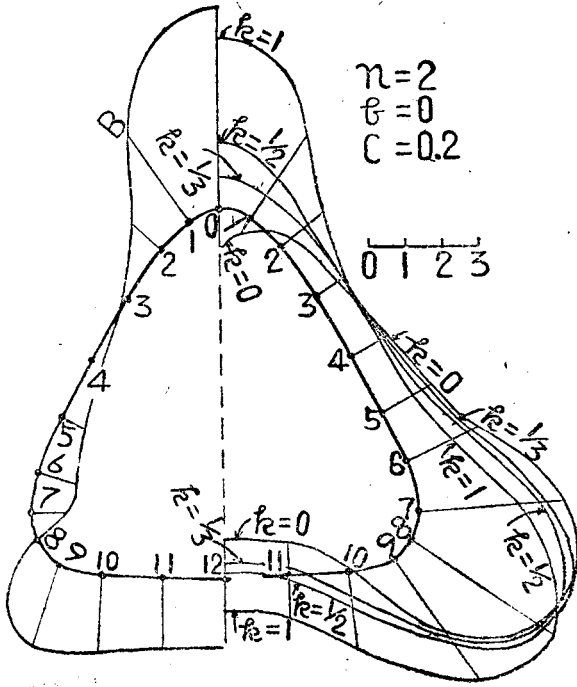


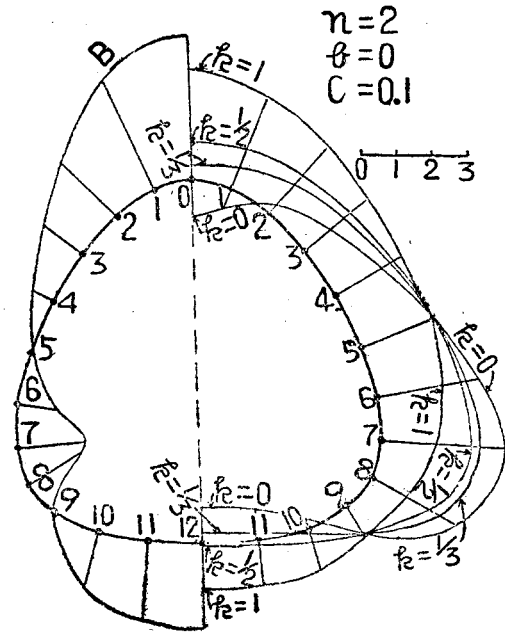
圖-7 (1) A型



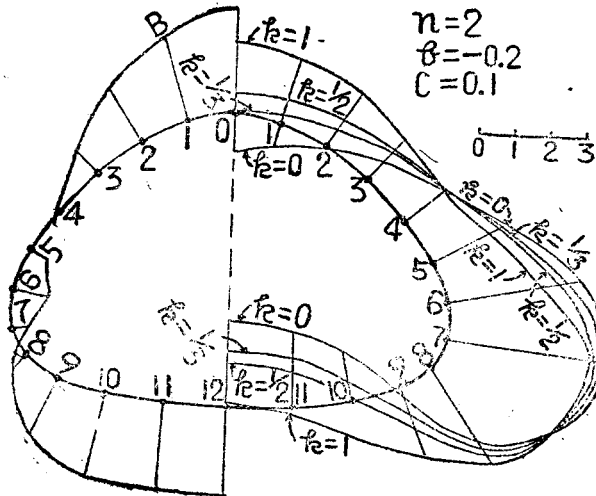
(2) A'型



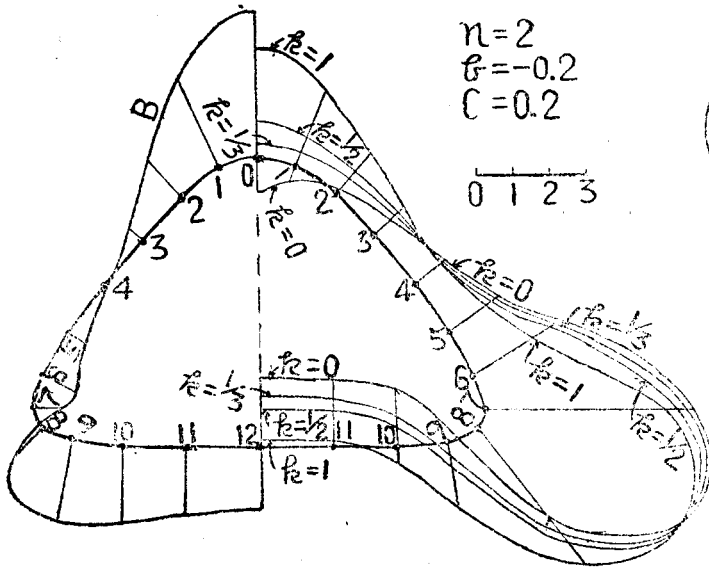
(3) B 型



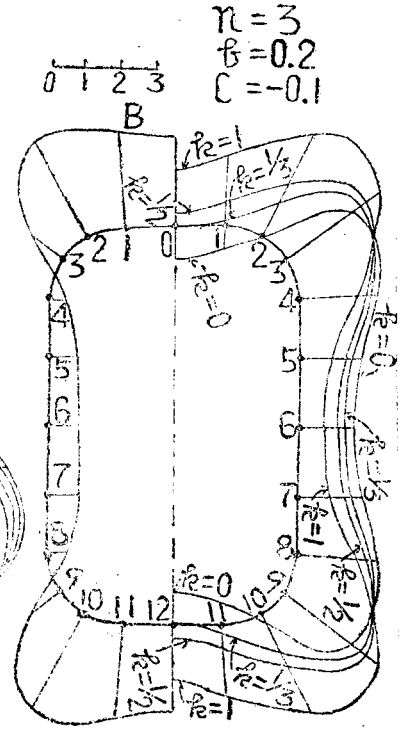
(4) B' 型



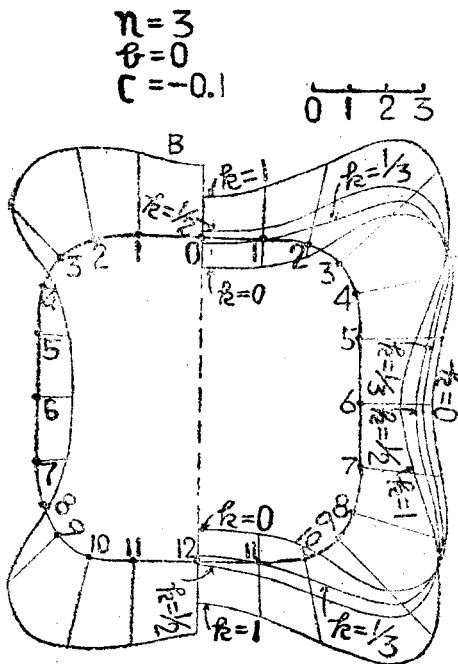
(5) C 型



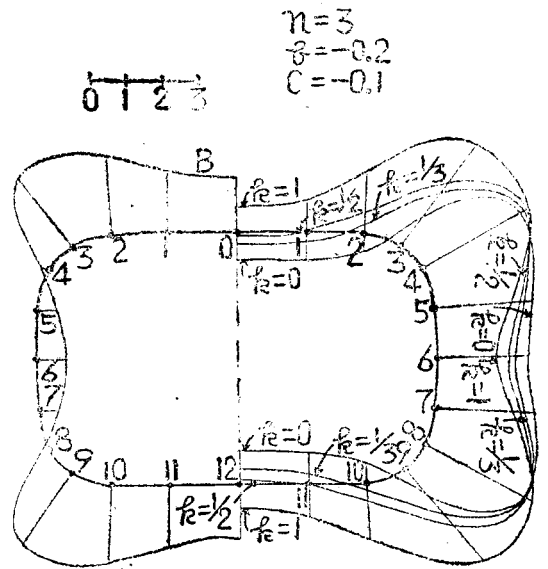
(6) C型



(7) H型



(8) I型



(9) J型

(II) 坑道が比較的浅い場合 坑道の深さが坑徑に比し餘り大きくない時は $\widehat{\beta\beta}_{\alpha_0}$ は (12) 式から定めねばならない。圖-8 右半は $k=\frac{1}{2}$ なる地盤にて h を一定とし $\frac{h}{a}=3$ 及 10 の場合に $\widehat{\beta\beta}_{\alpha_0}$ を示し同圖左半は $k=\frac{1}{2}$ なる場合の $A'+kB'$ の値を示す。

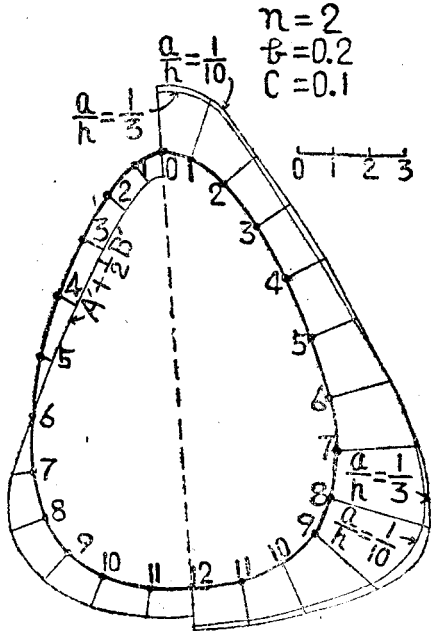
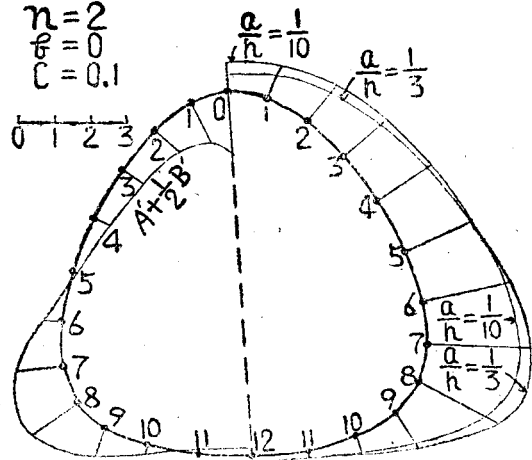
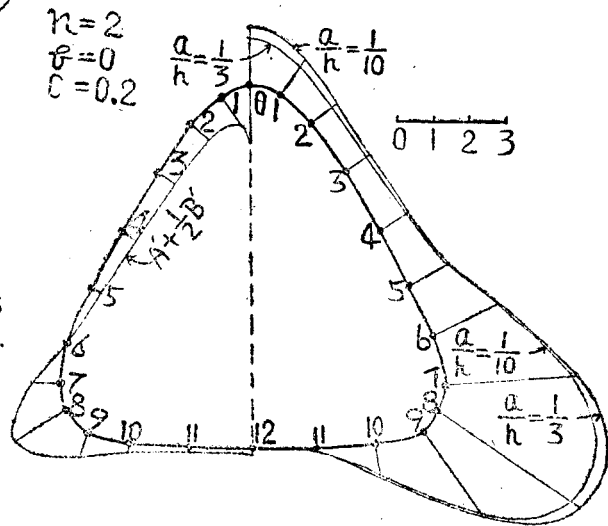


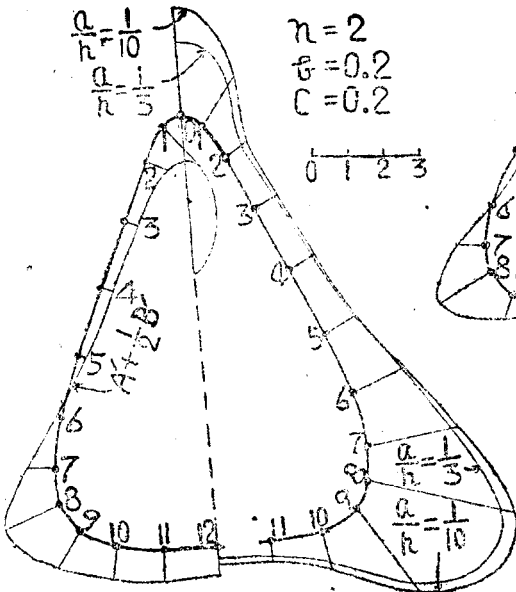
圖-7 (1) A 型



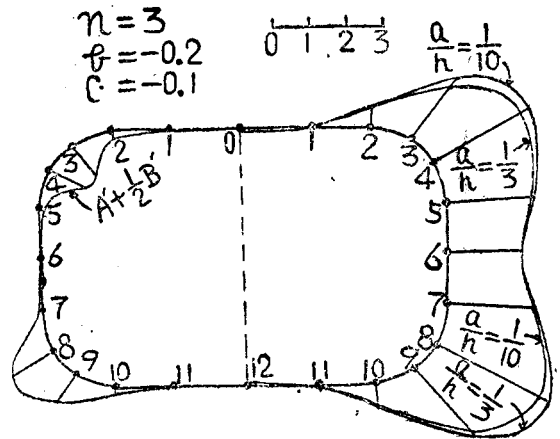
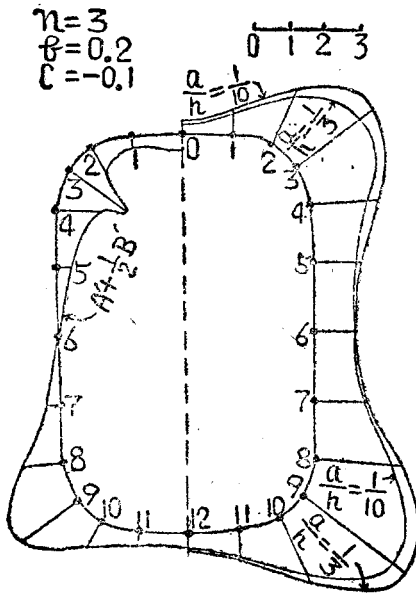
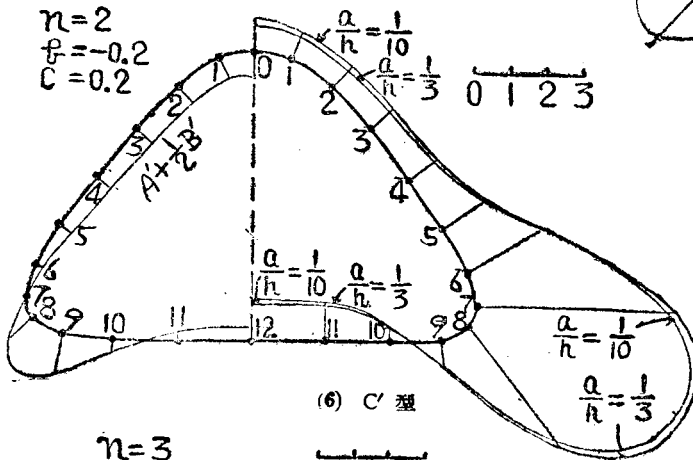
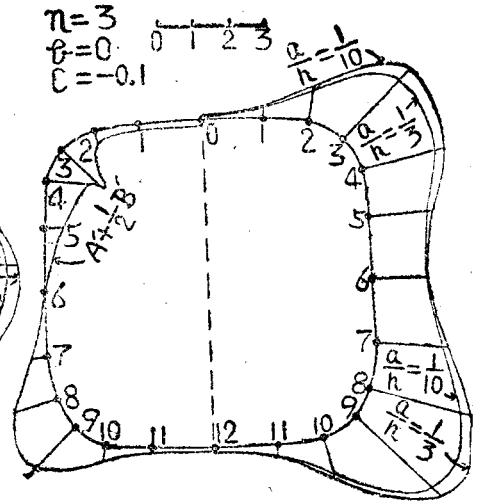
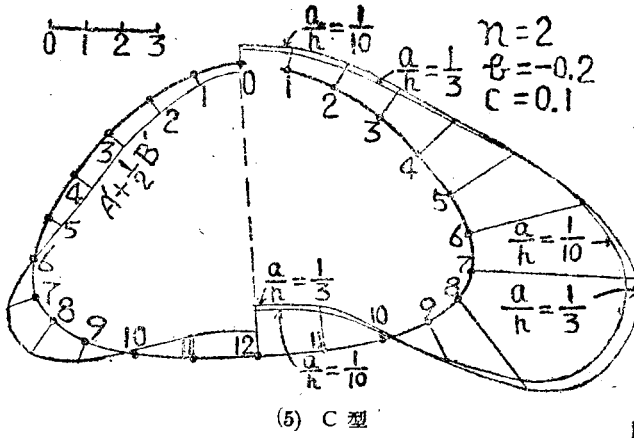
(3) B 型



(4) B' 型



(2) A' 型



第5節 龜裂と應力との關係

AA'BB'CC' の6種の孔について寒天土を用いて壓縮試験を行いその龜裂を圖-5に示す。この圖にて龜裂のはじまつている断面を調べ、計算による壓應力の異なる断面及周邊にその應力の變化の激しい断面と比較して記入すると表-7の如くなる。應力計算に當つては、この實驗では

表-7

孔形	龜 裂			壓應力の異なる断面	應力變化の異なる断面	
	方向	記號	始斷面			
A	上向	a	7-8	8	7-8 8-9	
		b	6-7			
c		7-8				
d		6-7				
	下向	e	4-5			
A'	上向	a	7	8	7-8 8-9	
		b	6-7			
			c	6-7		
	下向	d	2	0	0-1	
e		2				
B	不明	a	7	7	6-7 8-9	
		b	4			
		c	1-2			
		d	7			
		e	6			
B'	不明	a	7	8	5-6 8-9	
		b	7-8			
	上向	c	5-6			
		d	2-3			
C	不明	a	7-8	7	6-7 8-9	
	上向	b	7-8			
C'	上向	a	6-7	7	6-7 8-9	
		b	6-7			
		c	4-5			
	下向	d	0-1			
		e	2-3			

加えられた外壓力に比べて、掘りこられた孔を埋めていた寒天土の重さは比較にならぬ程軽いから $wa(A'+kB')$ の項は無視して差支えない。外壓力に對して $A+kB$ を計算するとき k の値を確定することは困難であるが、 $k=1/2$ と推定した。 k の値によつて最も大きな影響を受けるのは頂部と底面における應力であるからこの區域の應力の値についてはかなりの差異がありうることは豫期せざるを得ない。

この表をみると一般に次の關係が認められる。

- (1) $\beta\beta_{\alpha=0}$ が異なる位置には龜裂が発生しやすい。
- (2) 孔のふちにその $\beta\beta_{\alpha=0}$ の變化の著しい位置には龜裂が発生し易い。

即ち、A形孔の a, c 及 A'形孔の a, c, d, c 及 B形孔の a, d, c 及 B'形孔の a, b, c 及 C形孔の a, b 及 C'形孔の a, b はこれに該當する。かくの如く記入された龜裂 26 個のうち 16

個は條件に該當すること、又條件を満足する位置の附近から龜裂が出てない例は殆んどないことは上記の條件が妥當なることを示すものである。しかし上記の條件は龜裂の發生を促す條件であつて、それが大きな龜裂にまで發達するにはその附近に於ける應力狀態がそれにふさわしい状態になければならないと思はれる。次章で述べる如く、龜裂が肉眼で見うるように大きくなるためには、ある範圍にわたつて破壊の條件が充たされなければならない。したがつて孔のふちの上の一點に於て破壊の條件が充たされても、その附近の應力がそれを大きな龜裂にまで發展させるに足る状況にならないことは、肉眼で見得るような龜裂にはならないであらう。B形孔に大きな龜裂が生じないのは、さうゆう原因によるのではないかと思ふ。

4) この表で断面 7-8 とあるは圖-5 に示せる断面 7 と断面 8 の間に位する断面の意である。