

トンネル掘削時の半径方向実測変位に基づいて
周辺地山のひずみ分布を求める実際的手法の考察

近藤 達敏

CONSIDERATION ON THE PRACTICAL CALCULATION TECHNIQUE
OF THE STRAIN DISTRIBUTION AROUND TUNNEL BASED ON
THE ACTUAL DISPLACEMENTS DURING EXCAVATION

Tatsutoshi KONDOH

Abstract

Sakurai's "Direct strain evaluation technique" is designed to assess the stability of rocks around tunnel by determining strain produced in the surrounding rocks that is calculated from the actual results of displacements during tunnel excavation and this technique is valid and useful from the practical point of view. This technique requires displacement data along two axes at right angles to one another as the input values used in calculation of strain. However, it is impossible to get any accuracy in determining the real strain distribution, because the actual measurements of displacement at the tunnel sites is capable of getting displacements only in the uniaxial direction.

In response to this problem, this paper deals with the consideration of practical technique for determining the tangential displacements from the actual data of radial ones and for calculating the real strain distribution around tunnel, as a results.

Based on the solution obtained in the elastic plate problem with a circular hole under the biaxial stresses, the author has cleared in this paper that not only the ratio of the radial displacements at any each two points with different central angle and with the same distance from the center of circular hole, but also the ratio of the tangential displacements to the radial ones at any points are connected with the poisson's ratio, the coefficient of lateral pressure and the relative location to the tunnel. From this solution, the author assumes that the conditions above mentioned will also come into existence in the real elastic rocks around a circular tunnel without timberings.

In this paper, the correlation between the tangential displacements and the radial ones as well as the radial displacements and coefficient of lateral pressure based on the numerical models, in the case of poisson's ratio $\nu=0.3$ in the common condition of rocks, are described.

In consequence, it is clear that the tangential displacements can be determined from the radial ones approximately and furthermore, the strain distribution calculated from the above mentioned data can closely resemble to those calculated directly from the numerical model.

Thus, the author proposes a practical technique for calculating strain surrounding rocks accurately from radial displacement data obtained in situ measurement at tunnel sites.

1 緒言

トンネルを安全に施工するためには、トンネルの支保工および覆工の安定性を確保するばかりでなく、周辺地山の破壊に対する安定性をも同時に確保することが必要である。

トンネル構造物や地山の破壊に対する安定性の検討のために、地山内部の応力を求めるための種々の測定が行なわれているが、必ずしも信頼に足る結果は得られてはおらず、むしろ応力を求めることは極めて困難なことと考えられる。

最近に至って、地中の変位測定が比較的簡単に、しかも精度よく行なうことができるようになったこともあり、桜井(1982)は、トンネル掘削によって生ずる地中ひずみを、現地における地中変位の測定結果から直接求め、この地中ひずみによって、地山の破壊に対する安定性を評価する方法を考察し、「直接ひずみ評価法」と名付けて提案している。

この「地中ひずみ評価法」においては、トンネル壁面周辺に生ずる変位を、直交するx軸、y軸方向について求めておく必要がある。しかしながら、トンネル坑内で地中変位を精度よく測定するために、現在使用されている計器は、その構造上の制約から、計器の軸方向の変位成分のみを対象としている。また、計器設置上の制約から、実際には、トンネルの半径方向の変位しか測定されておらず、今のところ、接線方向変位を測定することは不可能である。

したがって、桜井が提案している方法によって、地中ひずみを求めるに当たって、その計算を精度よく行なうためには、実際の測定によって求められる計器の軸方向(トンネルの半径方向)の変位のほかに、何らかの方法によって、計器の軸に直交する方向(トンネルの接線方向)の変位を推定し、中心角θによる方向余弦を用いて、各点のx軸方向、y軸方向の変位を求めることが必要となる。

そこで、弾性有孔板の解から得られる任意の点における半径方向変位と接線方向変位の関係を調べ、半径方向変位から接線方向変位を求めるための実際的な方法を検討した。この検討には、FEM計算から得られた変位の数値モデルを利用し、この数値モデルによって与えられた半径方向変位と接線方向変位のデータを用いて、桜井の方法によるひずみと、数値モデルのひずみとの比較も行なった。そして、半径方向変位のデータから接線方向変位の推定が可能であることを述べ、さらに桜井の提案している方法による地山のひずみ分布を実用的な精度で

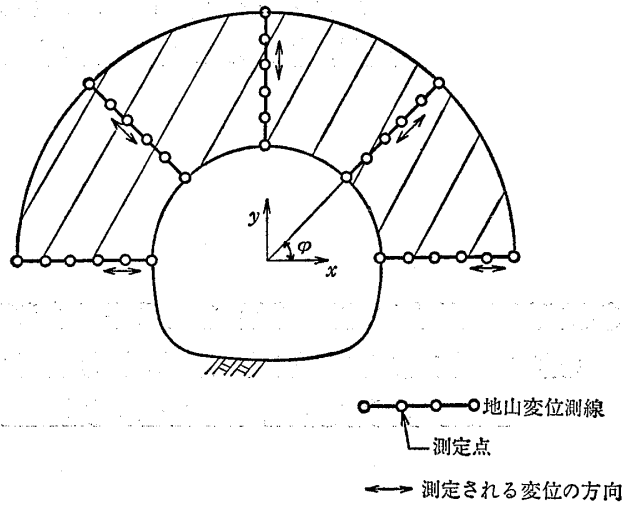


図-1 トンネル掘削における地山の変位測定
Fig. 1 Displacement measurement of surrounding rocks during tunnel excavation

求めることができる方法について提案するものである。

2 地中ひずみ計算の実際の問題点

2-1 桜井による地中ひずみの計算法

桜井(1982)は、図-1に示すトンネルの軸に直交な断面上において、N個の測定点が設けられている場合に、斜線を施してある部分の形状を

$$\left. \begin{aligned} x &= \sum_{i=1}^N P_i(\xi, \eta) x_i \\ y &= \sum_{i=1}^N P_i(\xi, \eta) y_i \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

で表わし、また、地山内の変位を

$$\left. \begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^N P_i(\xi, \eta) u_i \\ v &= \sum_{i=1}^N P_i(\xi, \eta) v_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

で表わされるものとしている。ここに、 $P_i(\xi, \eta)$ は測定点 (x_i, y_i) の局所座標 (ξ, η) における補間関数、 u_i および v_i は、それぞれ、測定点 i における変位の x 方向成分および y 方向成分を表わす。

そして、変位とひずみとの関係

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

を用いて、主ひずみ ϵ_1, ϵ_2 およびその作用方向をつぎの式で示している。

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{pmatrix} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (4)$$

$$\tan 2\varphi = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (5)$$

ここに、 φ は作用方向の x 軸からの角度を表わす。さらに、最大せん断ひずみ γ_{max} および体積ひずみ ε_v は

$$\gamma_{max} = |\varepsilon_1 - \varepsilon_2| \quad (6)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (7)$$

で表わされることを示している。

表-1 FEM解析の入力値
Table 1. Input data for FEM calculations

特性値	ケース	Case-1	Case-2	Case-3
トンネル半径 a cm		500	500	500
弾性係数 E kgf/cm ²		10000	10000	10000
ポアソン比 ν		0.3	0.3	0.3
初期垂直応力 σ_y kgf/cm ²		10.0	10.0	10.0
初期水平応力 σ_x kgf/cm ²		4.0	6.0	8.0
側圧係数 k		0.4	0.6	0.8

2-2 変位数値モデルとひずみの厳密解

桜井の方法によって地中ひずみを計算するためには、各測定点における変位の x 成分と y 成分を知ることが必要であるが、現在のところ、トンネルの半径方向の変位のみが得られるのであって、これらの測定値によって地中ひずみを求めた場合には、当然のことながら誤差を生ずることになる。この誤差を調べるために、地山の変位数値モデルを作成することにした。そこで、モデルとしては、等方等質弾性地山内に半径 $a = 500\text{cm}$ の円形掘削トンネルを設定し、平面ひずみ状態でFEMによる数値解析を行ない、 x 方向変位 u_x 、 y 方向変位 u_y 、半径方向変位 u_r および接線方向変位 u_t を求めた。この計算に当って、計算領域は半径88mの四半円形とし、入力値は、表-1に示すとおりで、3つのケースを設定した。また、要素は、8節点4ガウス点の2次アイソパラメトリック要素により、半径方向に12分割、円周方向に12分割、計144要素からなっている。節点数は中間節点を含め468節点であり、FEM計算に用いた要素分割図は図-2に示すとおりである。

計算は、図-3に示してある45個の代表的な節点について行ない、その結果得られたそれぞれの節点の x 方向変位 u_x 、 y 方向変位 u_y 、半径方向変位 u_r および接線方向変位 u_t の値は、表-2に示すとおりである。

つぎに、上記の変位数値モデルにおいて、計算によって求められた各節点の x 方向変位 u_x および y 方向変位 u_y

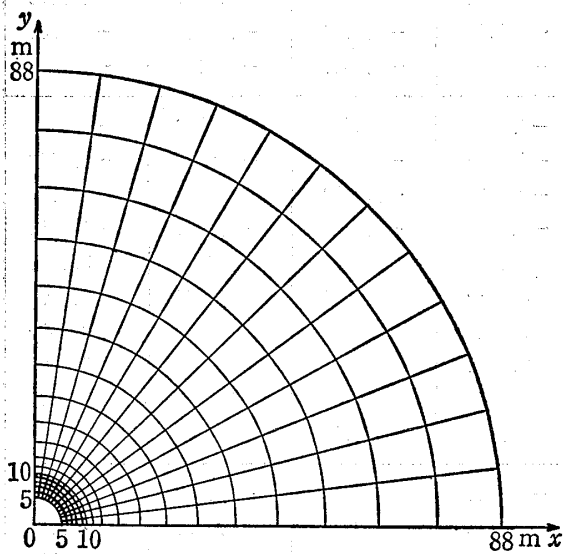


図-2 FEM計算のための要素と節点
Fig. 2 Elements and nodal points for FEM calculations

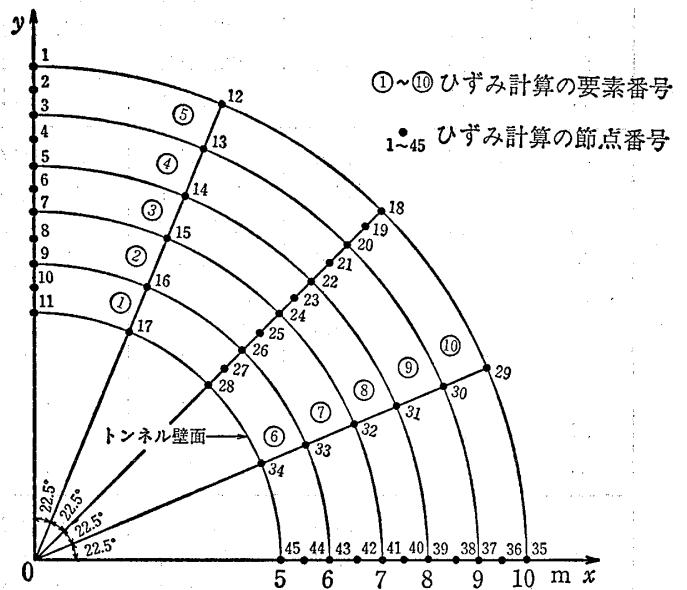


図-3 変位数値モデルにおける節点配置
Fig. 3 The arrangement of nodal points in the numerical models of displacements

表-2(a) F E M計算で得られた変位数値モデル

節 点 No.	角 度 θ deg	半 径 r cm	座 標		側 圧 係 数 $k=0.4$			
			x cm	y cm	U_x cm	U_y cm	U_r cm	U_t cm
1	0.0	1000.0	0.0000	1000.0000	0.0000	-0.4638	-0.4638	0.0000
2	0.0	950.0	0.0000	950.0000	0.0000	-0.4862	-0.4862	0.0000
3	0.0	900.0	0.0000	900.0000	0.0000	-0.5105	-0.5105	0.0000
4	0.0	850.0	0.0000	850.0000	0.0000	-0.5371	-0.5371	0.0000
5	0.0	800.0	0.0000	800.0000	0.0000	-0.5660	-0.5660	0.0000
6	0.0	750.0	0.0000	750.0000	0.0000	-0.5976	-0.5976	0.0000
7	0.0	700.0	0.0000	700.0000	0.0000	-0.6320	-0.6320	0.0000
8	0.0	650.0	0.0000	650.0000	0.0000	-0.6694	-0.6694	0.0000
9	0.0	600.0	0.0000	600.0000	0.0000	-0.7094	-0.7094	0.0000
10	0.0	550.0	0.0000	550.0000	0.0000	-0.7516	-0.7516	0.0000
11	0.0	500.0	0.0000	500.0000	0.0000	-0.7940	-0.7940	0.0000
12	22.5	1000.0	382.6834	923.8795	-0.0872	-0.3894	-0.3931	-0.0685
13	22.5	900.0	344.4151	831.4916	-0.0910	-0.4316	-0.4336	-0.0811
14	22.5	800.0	306.1467	739.1036	-0.0931	-0.4832	-0.4820	-0.0989
15	22.5	700.0	267.8784	646.7157	-0.0911	-0.5474	-0.5406	-0.1253
16	22.5	600.0	229.6101	554.3277	-0.0789	-0.6287	-0.6110	-0.1677
17	22.5	500.0	191.3417	461.9398	-0.0403	-0.7335	-0.6931	-0.2435
18	45.0	1000.0	707.1068	707.1068	-0.0889	-0.2258	-0.2225	-0.0968
19	45.0	950.0	671.7514	671.7514	-0.0915	-0.2401	-0.2345	-0.1051
20	45.0	900.0	636.3961	636.3961	-0.0941	-0.2564	-0.2478	-0.1148
21	45.0	850.0	601.0408	601.0408	-0.0966	-0.2750	-0.2628	-0.1261
22	45.0	800.0	565.6854	565.6854	-0.0987	-0.2965	-0.2794	-0.1399
23	45.0	750.0	530.3301	530.3301	-0.1003	-0.3217	-0.2984	-0.1566
24	45.0	700.0	494.9747	494.9747	-0.1010	-0.3516	-0.3200	-0.1772
25	45.0	650.0	459.6194	459.6194	-0.1002	-0.3877	-0.3450	-0.2033
26	45.0	600.0	424.2641	424.2641	-0.0967	-0.4322	-0.3740	-0.2372
27	45.0	550.0	388.9087	388.9087	-0.0891	-0.4883	-0.4083	-0.2823
28	45.0	500.0	353.5534	353.5534	-0.0744	-0.5613	-0.4495	-0.3443
29	67.5	1000.0	923.8795	382.6834	-0.0217	-0.0831	-0.0518	-0.0685
30	67.5	900.0	831.4916	344.4151	-0.0263	-0.0987	-0.0621	-0.0811
31	67.5	800.0	739.1036	306.1467	-0.0330	-0.1207	-0.0767	-0.0989
32	67.5	700.0	646.7157	267.8784	-0.0438	-0.1537	-0.0993	-0.1252
33	67.5	600.0	554.3277	229.6101	-0.0620	-0.2072	-0.1366	-0.1677
34	67.5	500.0	461.9398	191.3417	-0.0967	-0.3036	-0.2055	-0.2435
35	90.0	1000.0	1000.0000	0.0000	0.0188	0.0000	0.0188	0.0000
36	90.0	950.0	950.0000	0.0000	0.0172	0.0000	0.0172	0.0000
37	90.0	900.0	900.0000	0.0000	0.0149	0.0000	0.0149	0.0000
38	90.0	850.0	850.0000	0.0000	0.0116	0.0000	0.0116	0.0000
39	90.0	800.0	800.0000	0.0000	0.0071	0.0000	0.0071	0.0000
40	90.0	750.0	750.0000	0.0000	0.0008	0.0000	0.0008	0.0000
41	90.0	700.0	700.0000	0.0000	-0.0080	0.0000	-0.0080	0.0000
42	90.0	650.0	650.0000	0.0000	-0.0206	0.0000	-0.0206	0.0000
43	90.0	600.0	600.0000	0.0000	-0.0386	0.0000	-0.0386	0.0000
44	90.0	550.0	550.0000	0.0000	-0.0649	0.0000	-0.0649	0.0000
45	90.0	500.0	500.0000	0.0000	-0.1049	0.0000	-0.1049	0.0000

注) 本表の節点Noは本文中の図-3に示す要素の節点Noに対応している。

表-2(b) FEM計算で得られた変位数値モデル

節 点 №	角 度 θ deg	半 径 r cm	座 標		側 圧 係 数 $k=0.6$			
			x cm	y cm	U_x cm	U_y cm	U_r cm	U_t cm
1	0.0	1000.0	0.0000	1000.0000	0.0000	-0.4151	-0.4151	0.0000
2	0.0	950.0	0.0000	950.0000	0.0000	-0.4358	-0.4358	0.0000
3	0.0	900.0	0.0000	900.0000	0.0000	-0.4584	-0.4584	0.0000
4	0.0	850.0	0.0000	850.0000	0.0000	-0.4832	-0.4832	0.0000
5	0.0	800.0	0.0000	800.0000	0.0000	-0.5104	-0.5104	0.0000
6	0.0	750.0	0.0000	750.0000	0.0000	-0.5405	-0.5405	0.0000
7	0.0	700.0	0.0000	700.0000	0.0000	-0.5737	-0.5737	0.0000
8	0.0	650.0	0.0000	650.0000	0.0000	-0.6105	-0.6105	0.0000
9	0.0	600.0	0.0000	600.0000	0.0000	-0.6510	-0.6510	0.0000
10	0.0	550.0	0.0000	550.0000	0.0000	-0.6955	-0.6955	0.0000
11	0.0	500.0	0.0000	500.0000	0.0000	-0.7434	-0.7434	0.0000
12	22.5	1000.0	382.6834	923.8795	-0.0987	-0.3575	-0.3681	-0.0456
13	22.5	900.0	344.4151	831.4916	-0.1058	-0.3968	-0.4071	-0.0541
14	22.5	800.0	306.1467	739.1036	-0.1130	-0.4451	-0.4545	-0.0659
15	22.5	700.0	267.8784	646.7157	-0.1191	-0.5057	-0.5128	-0.0835
16	22.5	600.0	229.6101	554.3277	-0.1207	-0.5836	-0.5854	-0.1118
17	22.5	500.0	191.3417	461.9398	-0.1087	-0.6866	-0.6759	-0.1623
18	45.0	1000.0	707.1068	707.1068	-0.1342	-0.2254	-0.2543	-0.0645
19	45.0	950.0	671.7514	671.7514	-0.1400	-0.2390	-0.2680	-0.0700
20	45.0	900.0	636.3961	636.3961	-0.1462	-0.2544	-0.2833	-0.0765
21	45.0	850.0	601.0408	601.0408	-0.1529	-0.2718	-0.3003	-0.0841
22	45.0	800.0	565.6854	565.6854	-0.1599	-0.2918	-0.3194	-0.0933
23	45.0	750.0	530.3301	530.3301	-0.1674	-0.3149	-0.3410	-0.1043
24	45.0	700.0	494.9747	494.9747	-0.1751	-0.3421	-0.3657	-0.1181
25	45.0	650.0	459.6194	459.6194	-0.1829	-0.3746	-0.3942	-0.1356
26	45.0	600.0	424.2641	424.2641	-0.1904	-0.4141	-0.4274	-0.1582
27	45.0	550.0	388.9087	388.9087	-0.1969	-0.4630	-0.4666	-0.1882
28	45.0	500.0	353.5534	353.5534	-0.2009	-0.5255	-0.5136	-0.2295
29	67.5	1000.0	923.8795	382.6834	-0.1124	-0.0959	-0.1405	-0.0456
30	67.5	900.0	831.4916	344.4151	-0.1265	-0.1110	-0.1593	-0.0541
31	67.5	800.0	739.1036	306.1467	-0.1450	-0.1314	-0.1842	-0.0659
32	67.5	700.0	646.7157	267.8784	-0.1699	-0.1608	-0.2185	-0.0835
33	67.5	600.0	554.3277	229.6101	-0.2058	-0.2063	-0.2691	-0.1118
34	67.5	500.0	461.9398	191.3417	-0.2621	-0.2843	-0.3509	-0.1624
35	90.0	1000.0	1000.0000	0.0000	-0.0934	0.0000	-0.0934	0.0000
36	90.0	950.0	950.0000	0.0000	-0.1002	0.0000	-0.1002	0.0000
37	90.0	900.0	900.0000	0.0000	-0.1081	0.0000	-0.1081	0.0000
38	90.0	850.0	850.0000	0.0000	-0.1173	0.0000	-0.1173	0.0000
39	90.0	800.0	800.0000	0.0000	-0.1283	0.0000	-0.1283	0.0000
40	90.0	750.0	750.0000	0.0000	-0.1415	0.0000	-0.1415	0.0000
41	90.0	700.0	700.0000	0.0000	-0.1578	0.0000	-0.1578	0.0000
42	90.0	650.0	650.0000	0.0000	-0.1780	0.0000	-0.1780	0.0000
43	90.0	600.0	600.0000	0.0000	-0.2038	0.0000	-0.2038	0.0000
44	90.0	550.0	550.0000	0.0000	-0.2377	0.0000	-0.2377	0.0000
45	90.0	500.0	500.0000	0.0000	-0.2839	0.0000	-0.2839	0.0000

注) 本表の節点№は本文中の図-3に示す要素の節点№に対応している。

表-2(c) FEM計算で得られた変位数値モデル

節点 No.	角度 θ deg	半径 r cm	座 標		側 圧 係 数 $k=0.8$			
			x cm	y cm	U_x cm	U_y cm	U_r cm	U_t cm
1	0.0	1000.0	0.0000	1000.0000	0.0000	-0.3665	-0.3665	0.0000
2	0.0	950.0	0.0000	950.0000	0.0000	-0.3854	-0.3854	0.0000
3	0.0	900.0	0.0000	900.0000	0.0000	-0.4062	-0.4062	0.0000
4	0.0	850.0	0.0000	850.0000	0.0000	-0.4292	-0.4292	0.0000
5	0.0	800.0	0.0000	800.0000	0.0000	-0.4548	-0.4548	0.0000
6	0.0	750.0	0.0000	750.0000	0.0000	-0.4834	-0.4834	0.0000
7	0.0	700.0	0.0000	700.0000	0.0000	-0.5155	-0.5155	0.0000
8	0.0	650.0	0.0000	650.0000	0.0000	-0.5516	-0.5516	0.0000
9	0.0	600.0	0.0000	600.0000	0.0000	-0.5926	-0.5926	0.0000
10	0.0	550.0	0.0000	550.0000	0.0000	-0.6394	-0.6394	0.0000
11	0.0	500.0	0.0000	500.0000	0.0000	-0.6927	-0.6927	0.0000
12	22.5	1000.0	382.6834	923.8795	-0.1101	-0.3256	-0.3429	-0.0229
13	22.5	900.0	344.4151	831.4916	-0.1206	-0.3619	-0.3805	-0.0271
14	22.5	800.0	306.1467	739.1036	-0.1329	-0.4069	-0.4268	-0.0329
15	22.5	700.0	267.8784	646.7157	-0.1470	-0.4640	-0.4849	-0.0418
16	22.5	600.0	229.6101	554.3277	-0.1626	-0.5385	-0.5597	-0.0559
17	22.5	500.0	191.3417	461.9398	-0.1772	-0.6398	-0.6589	-0.0811
18	45.0	1000.0	707.1068	707.1068	-0.1795	-0.2251	-0.2861	-0.0322
19	45.0	950.0	671.7514	671.7514	-0.1884	-0.2380	-0.3015	-0.0351
20	45.0	900.0	636.3961	636.3961	-0.1983	-0.2524	-0.3187	-0.0383
21	45.0	850.0	601.0408	601.0408	-0.2091	-0.2686	-0.3378	-0.0421
22	45.0	800.0	565.6854	565.6854	-0.2211	-0.2870	-0.3593	-0.0466
23	45.0	750.0	530.3301	530.3301	-0.2344	-0.3082	-0.3837	-0.0522
24	45.0	700.0	494.9747	494.9747	-0.2492	-0.3327	-0.4115	-0.0590
25	45.0	650.0	459.6194	459.6194	-0.2657	-0.3615	-0.4435	-0.0677
26	45.0	600.0	424.2641	424.2641	-0.2841	-0.3959	-0.4808	-0.0791
27	45.0	550.0	388.9087	388.9087	-0.3047	-0.4377	-0.5250	-0.0940
28	45.0	500.0	353.5534	353.5534	-0.3275	-0.4898	-0.5779	-0.1148
29	67.5	1000.0	923.8795	382.6834	-0.2030	-0.1088	-0.2292	-0.0228
30	67.5	900.0	831.4916	344.4151	-0.2268	-0.1232	-0.2567	-0.0270
31	67.5	800.0	739.1036	306.1467	-0.2569	-0.1421	-0.2917	-0.0330
32	67.5	700.0	646.7157	267.8784	-0.2961	-0.1678	-0.3378	-0.0417
33	67.5	600.0	554.3277	229.6101	-0.3496	-0.2053	-0.4016	-0.0559
34	67.5	500.0	461.9398	191.3417	-0.4275	-0.2649	-0.4963	-0.0811
35	90.0	1000.0	1000.0000	0.0000	-0.2056	0.0000	-0.2056	0.0000
36	90.0	950.0	950.0000	0.0000	-0.2176	0.0000	-0.2176	0.0000
37	90.0	900.0	900.0000	0.0000	-0.2311	0.0000	-0.2311	0.0000
38	90.0	850.0	850.0000	0.0000	-0.2463	0.0000	-0.2463	0.0000
39	90.0	800.0	800.0000	0.0000	-0.2638	0.0000	-0.2638	0.0000
40	90.0	750.0	750.0000	0.0000	-0.2839	0.0000	-0.2839	0.0000
41	90.0	700.0	700.0000	0.0000	-0.3075	0.0000	-0.3075	0.0000
42	90.0	650.0	650.0000	0.0000	-0.3354	0.0000	-0.3354	0.0000
43	90.0	600.0	600.0000	0.0000	-0.3690	0.0000	-0.3690	0.0000
44	90.0	550.0	550.0000	0.0000	-0.4105	0.0000	-0.4105	0.0000
45	90.0	500.0	500.0000	0.0000	-0.4630	0.0000	-0.4630	0.0000

注) 本表の節点Noは本文中の図-3に示す要素の節点Noに対応している。

を用いて、桜井の方法により地中ひずみを求め、これを厳密解と呼ぶことにする。この計算において、計算領域と入力値を与えた節点の位置は、図-3に示すとおりであり、各節点における変位の値は、表-2に示されている u_x, u_y の値を直接使用してある。

桜井の方法によってひずみを求める場合には、地山のポアソン比 ν や側圧係数 k などは、ひずみを算出するに当っては直接関係しないのではあるが、一般的な地山を代表するものとして、表-2に示す $\nu=0.3, k=0.6$ のケースについて計算した最大主ひずみ ϵ_1 および最小主ひずみ ϵ_2 の深度に対する変化を、 $\theta=0^\circ, 45^\circ$ および 90° の方向について示すと図-4のようになる。

2-3 半径方向変位のみのデータから得られるひずみ

さきにも述べたことではあるが、現場における変位の測定が、半径方向のみしか行なわれていないことから、表-2に示す半径方向変位 u_r の値を用い、図-3に示す45個の節点に入力して、桜井の方法によってひずみを

計算した。求められた最大主ひずみ ϵ'_1 および最小主ひずみ ϵ'_2 のそれぞれについて、厳密解によるそれぞれのひずみ値に対する相対誤差 $\{(\epsilon_i - \epsilon'_i) / \epsilon_i\} \times 100\%$ として示すと、図-5のようになる。この図は側圧係数 $k=0.6$ の場合の $\theta=22.5^\circ, 45^\circ$ および 67.5° のものである。

図-5(a)に示すように、最大主ひずみ ϵ'_1 は、厳密解による最大主ひずみ ϵ_1 に対して、 $\theta=22.5^\circ$ の方向では、5%程度の誤差で、比較的小さく、 $\theta=67.5^\circ$ では5~10%であるが、 $\theta=45^\circ$ の方向では最も大きく、約20%の誤差を示している。一方、最小主ひずみ ϵ'_2 に関しては、図-5(b)に示すように、 $\theta=45^\circ$ の方向では、約10%であるが、 $\theta=67.5^\circ$ では、壁面近傍で約40%、壁面から5mの深度でも約20%であり、 $\theta=22.5^\circ$ の方向では、それらの誤差が約80%、35%にもなっている。

トンネル壁面の近傍においては、最大主ひずみ軸がトンネル半径方向に、最小主ひずみ軸は接線方向にはぼそっていることから、接線方向変位を無視してひずみを求めると、最小主ひずみの値に大きい誤差を生ずることは当然である。

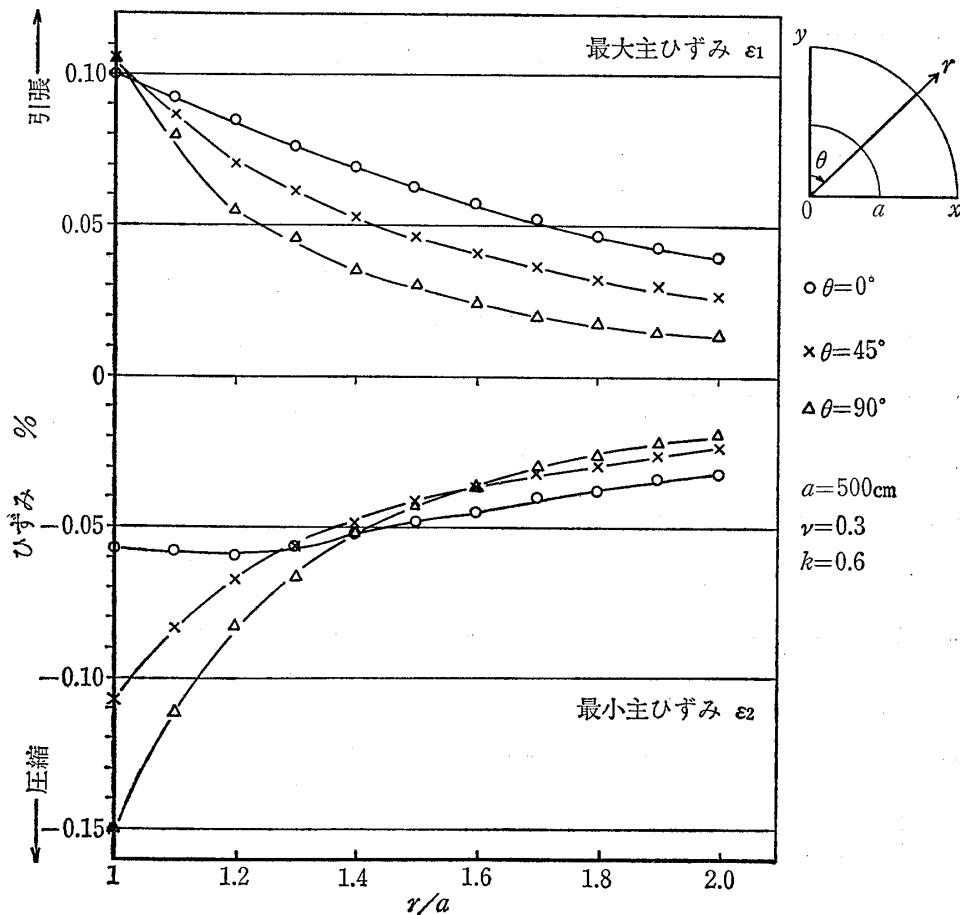


図-4 厳密解による主ひずみ

Fig. 4 Principal strains obtained by the exact solution

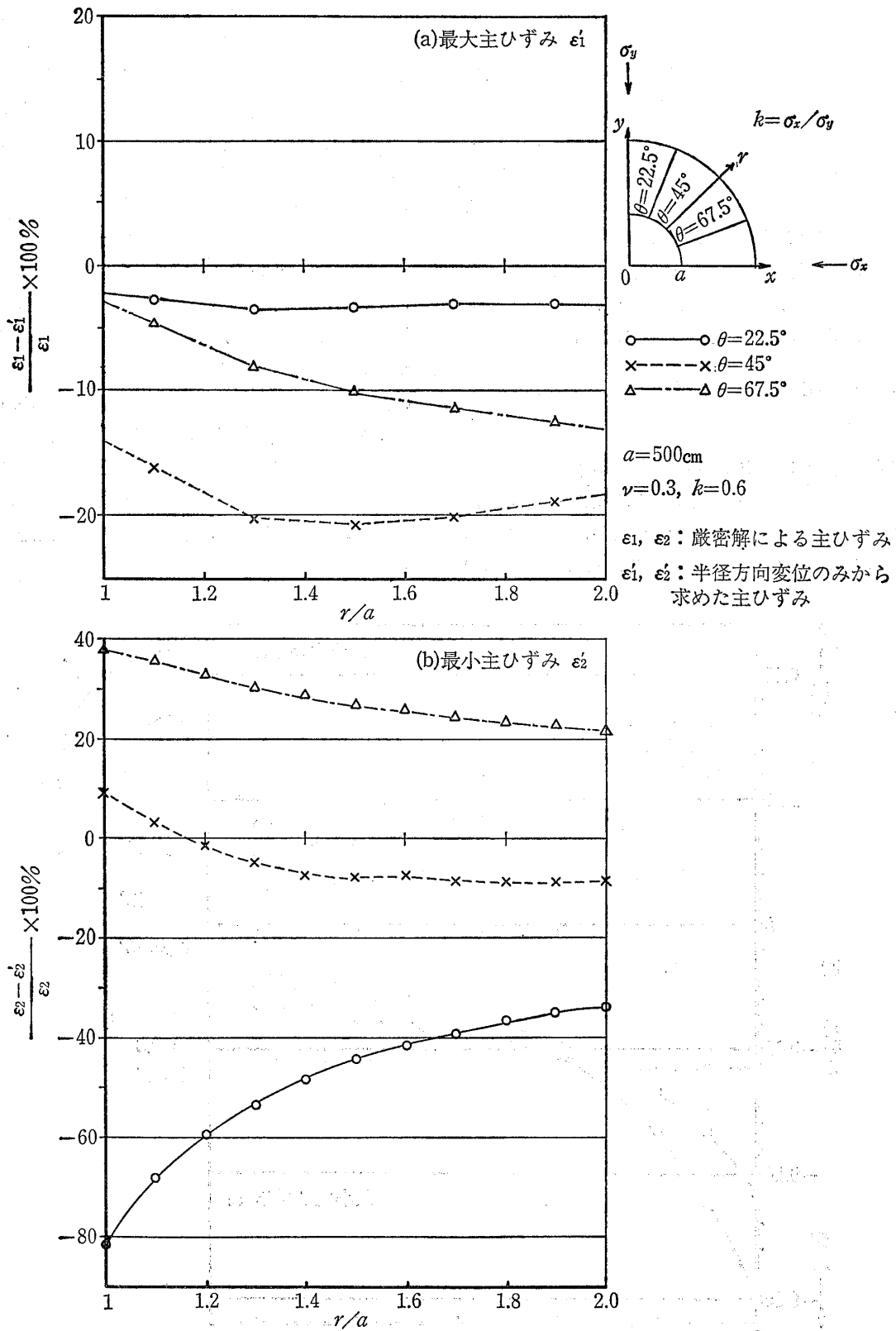


図-5 半径方向変位のみから求めた主ひずみの厳密解に対する相対誤差

Fig. 5 Relative errors of the principal strains calculated from only the radial displacements to the exact solution

また、図-4 に示すように、最大主ひずみは正（引張側）、最小主ひずみは負（圧縮側）にある。接線方向変位を無視した計算においては、 $\theta = 22.5^\circ$ の方向のトンネル壁面の近傍については、最小主ひずみ軸（接線方向にほぼ平行）方向に、より大きい圧縮ひずみ（負のひずみ）が算出される結果となり、厳密解に対してかなり大きい負の相対誤差を生ずることとなる。

以上に述べたように、桜井の方法によって、変位からひずみを算出するにあたって、接線方向変位を無視する場合には、最小主ひずみに大きい誤差を生じ、最大せん断ひずみおよび体積ひずみの値に対しても、その誤差が大きく影響することは明らかである。

3 半径方向変位に基づく側圧係数と接線方向変位の推定

3-1 弾性有孔板の解に基づく検討

等方均質弾性体の無限板に2次元応力が作用した時の円形孔の変形は、W. I. Duvall および鈴木光によって、平面ひずみ状態のときには、次式で与えられることが示されている（図-6 参照）。

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{1-\nu^2}{E} \left[\frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} \left(r + \frac{a^2}{r} \right) + \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \left(r + \frac{4a^2}{r} - \frac{a^4}{r^3} \right) \cos 2\theta \right] \\ &\quad - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \left[\frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} \left(r - \frac{a^2}{r} \right) - \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \left(r - \frac{a^4}{r^3} \right) \cos 2\theta \right] \\ v &= -\frac{1-\nu^2}{E} \left[\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \left(r + \frac{2a^2}{r} + \frac{a^4}{r^3} \right) \sin 2\theta \right] \\ &\quad - \frac{\nu(1+\nu)}{E} \left[\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \left(r - \frac{2a^2}{r} + \frac{a^4}{r^3} \right) \sin 2\theta \right] \end{aligned} \right\} (8)$$

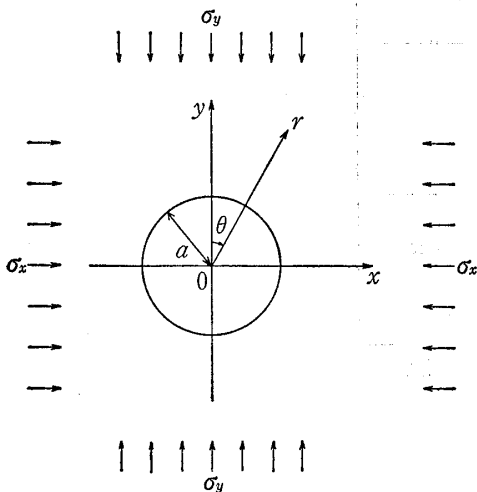


図-6 2軸応力を受ける弾性有孔板
Fig. 6 Elastic plate with a circular hole under the biaxial stresses

ここに、

- r : 円形孔中心からの距離
- θ : y軸からの角度
- a : 円形孔の半径
- σ_x, σ_y : 無限板に作用する応力
- ν : 無限板のポアソン比
- E : 無限板の弾性係数
- u : 半径方向の変位
- v : 接線方向の変位

側圧係数を k とすれば

$$\sigma_x = k \cdot \sigma_y \quad (9)$$

式(9)を式(8)に代入すると

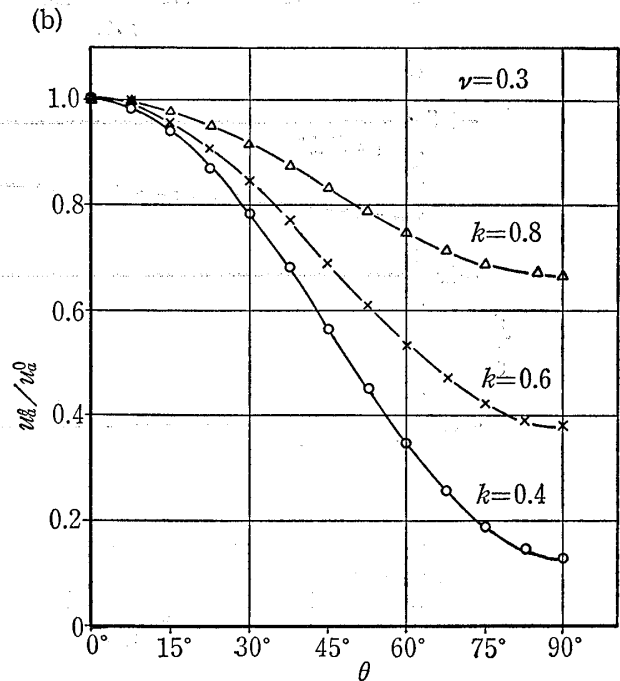
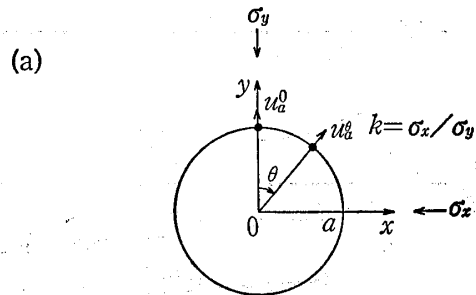


図-7 壁面上における θ と $\left(\frac{u_a^\theta}{u_a^0}\right)$ の関係

Fig. 7 The relation between θ and $\left(\frac{u_a^\theta}{u_a^0}\right)$ on the wall

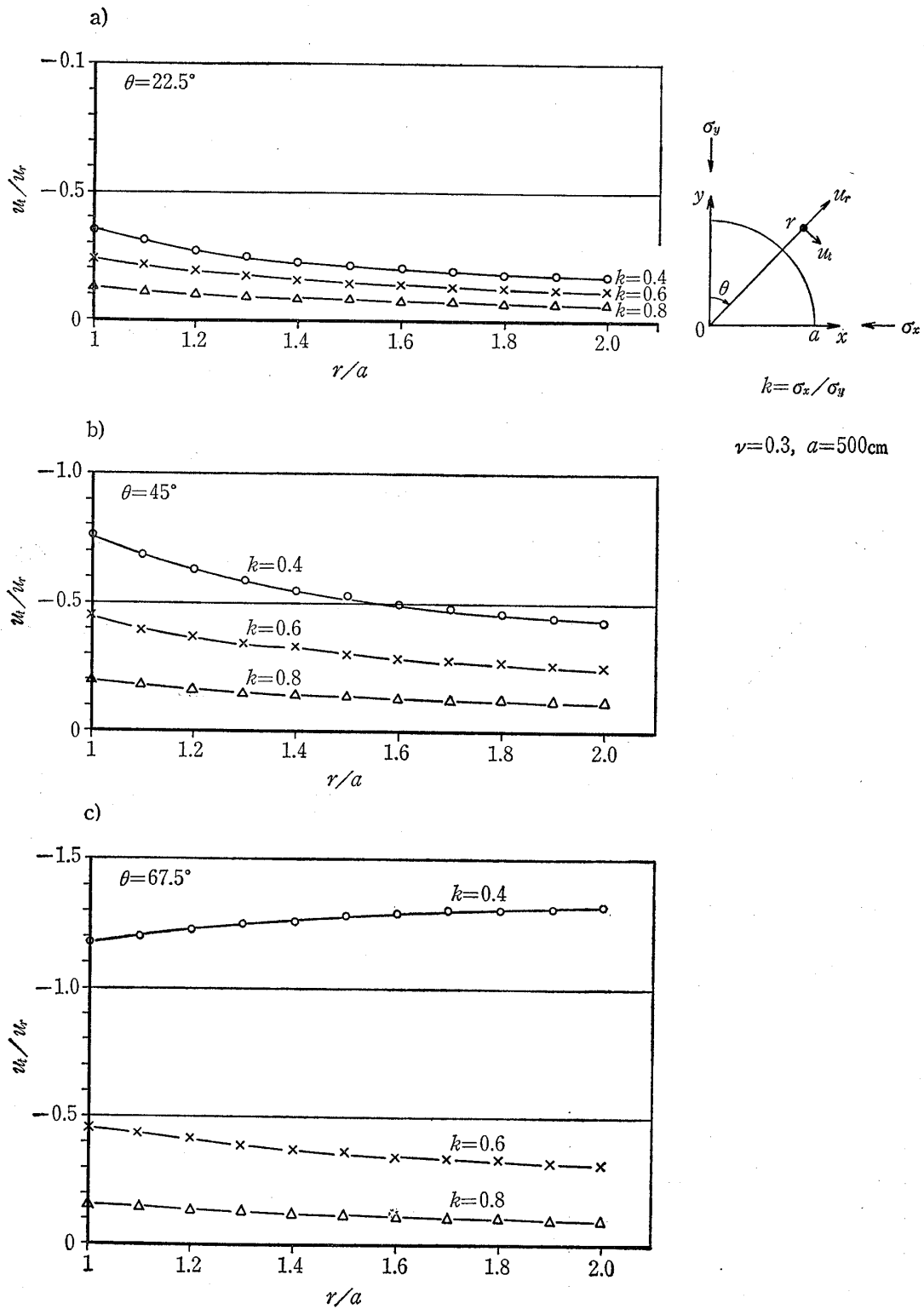


図-8 半径方向変位と接線方向変位の比
 Fig. 8 The ratio of tangential displacements to radial displacements

$$\left. \begin{aligned}
 u &= \frac{1-\nu^2}{2E} \cdot \sigma_y \cdot r \left[(1+k) \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right\} + (1-k) \left\{ 1 + 4\left(\frac{a}{r}\right)^2 - \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \cos 2\theta \right] \\
 &\quad - \frac{\nu(1+\nu)}{2E} \cdot \sigma_y \cdot r \left[(1+k) \left\{ 1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right\} - (1-k) \left\{ 1 - \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \cos 2\theta \right] \\
 v &= -\frac{1-\nu^2}{2E} \cdot \sigma_y \cdot r \cdot (1-k) \left\{ 1 + 2\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \cdot \sin 2\theta \\
 &\quad - \frac{\nu(1+\nu)}{2E} \cdot \sigma_y \cdot r \cdot (1-k) \left\{ 1 - 2\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \sin 2\theta
 \end{aligned} \right\} (10)$$

と表わされる。そこで、 $\theta=0^\circ$ のときの半径方向変位を u^0 、 $\theta=\theta$ のときの半径方向変位を u^θ とすると、 u^θ の u^0 に対する比 u^θ/u^0 は、つぎのようになる。

$$\frac{u^\theta}{u^0} = \frac{(1-\nu) \cdot A_1 - \nu \cdot A_2}{(1-\nu) \cdot A_3 - \nu \cdot A_4} \quad (11)$$

ここに、

$$A_1 = (1+k) \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right\} + (1-k) \left\{ 1 + 4\left(\frac{a}{r}\right)^2 - \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \cdot \cos 2\theta$$

$$A_2 = (1+k) \left\{ 1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right\} - (1-k) \left\{ 1 - \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \cdot \cos 2\theta$$

$$A_3 = (1+k) \left\{ 1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right\} + (1-k) \left\{ 1 + 4\left(\frac{a}{r}\right)^2 - \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\}$$

$$A_4 = (1+k) \left\{ 1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2 \right\} - (1-k) \left\{ 1 - \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\}$$

である。

式(11)によれば、 u^θ/u^0 は、弾性係数 E および初期応力 σ_x 、 σ_y の大きさには関係なく、ポアソン比 ν 、側圧係数 k 、 θ および a/r の関数となっている。

一方、円形孔周辺の任意の点における半径方向変位を

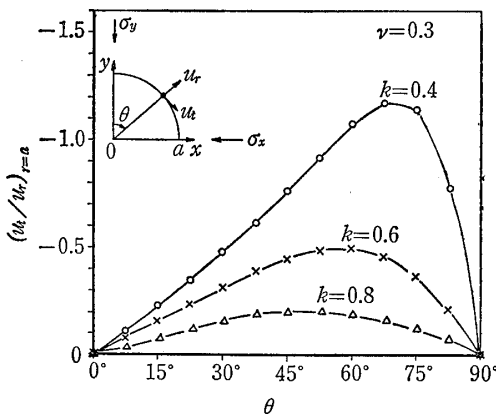


図-9 壁面上における θ と $\left(\frac{u_t}{u_r}\right)_{r=a}$ の関係

Fig. 9 The relation between θ and $\left(\frac{u_t}{u_r}\right)_{r=a}$ on the wall

u_r 、接線方向変位を u_t と表わすと、 u_t の u_r に対する比は、式(10)よりつぎのようになる。

$$\frac{u_t}{u_r} = \frac{-(1-\nu) \cdot B_1 - \nu \cdot B_2}{(1-\nu) \cdot A_1 - \nu \cdot A_2} \quad (12)$$

ここに、

$$B_1 = (1-k) \left\{ 1 + 2\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \cdot \sin 2\theta$$

$$B_2 = (1-k) \left\{ 1 - 2\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \left(\frac{a}{r}\right)^4 \right\} \cdot \sin 2\theta$$

である。

式(12)によれば、 u_t/u_r は、式(11)と同様に、弾性係数 E および初期応力 σ_x 、 σ_y の大きさに関係なく、ポアソン比 ν 、側圧係数 k 、 θ および a/r の関数となっている。

3-2 変位数値モデルに基づく側圧係数

図-7(a)に示すように、円形素掘りトンネルにおいて、壁面における y 軸上の半径方向変位を u_a^0 とし、任意の θ の方向の半径方向変位を u_a^θ とする。この場合、変位の方向がトンネルの外側へ向う方向を正とする。

そこで、表-2に示してある変位数値モデルから計算によって求められた壁面における半径方向変位の値を用いて、 u_a^θ/u_a^0 を縦軸に、 θ を横軸にとり、 k をパラメータとしてプロットすると、図-7(b)のようになる。この図から明らかなように、壁面における半径方向変位は y 軸方向 ($\theta=0^\circ$) において最大であり、 θ が増加するに従って減少する。また、 u_a^θ/u_a^0 の値は、側圧係数 k が小さいほど、小さい値を示す。この図はポアソン比 ν を 0.3 としたときのものであり、 $\theta=90^\circ$ のときの u_a^θ/u_a^0 の値は

$$k=0.4 \quad (u_a^\theta/u_a^0)_{90^\circ} = 0.131$$

$$k=0.6 \quad (u_a^\theta/u_a^0)_{90^\circ} = 0.382$$

$$k=0.8 \quad (u_a^\theta/u_a^0)_{90^\circ} = 0.668$$

表-3 壁面上における半径方向変位と接線方向変位の比
Table 3 The ratio of the tangential displacements to the radial displacements on the wall

θ deg	トンネル壁面上 $r/a=1.0$		
	U_t cm	U_r cm	$(U_t/U_r)_{r=a}$
0°	0	-0.7434	0
22.5°	-0.1623	-0.6759	0.2401
45°	-0.2295	-0.5136	0.4469
67.5°	-0.1624	-0.3509	0.4626
90°	0	-0.2839	0

表-4 半径方向変位から求めた推定接線方向変位(1)
 Tabel 4 The estimated tangential displacements (1)
 calculated from the radial displacements

θ deg	r/a	接線方向変位 U_t cm	半径方向変位 U_r cm	$(U_t/U_r)_{r=a}$	推定接線方向変位 U_t' cm	$\frac{U_t - U_t'}{U_t} \times 100\%$
22.5°	1.0	-0.1623	-0.6759	0.2401	-0.1623	0
	1.1	-0.1331	-0.6283		-0.1509	-13.3
	1.2	-0.1118	-0.5854		-0.1406	-25.7
	1.3	-0.0958	-0.5471		-0.1314	-37.1
	1.4	-0.0835	-0.5128		-0.1231	-47.5
	1.5	-0.0738	-0.4821		-0.1158	-56.9
	1.6	-0.0659	-0.4545		-0.1091	-65.6
	1.7	-0.0594	-0.4296		-0.1031	-73.7
	1.8	-0.0541	-0.4071		-0.0978	-80.7
	1.9	-0.0495	-0.3867		-0.0928	-87.6
2.0	-0.0456	-0.3681	-0.0884	-93.8		
45°	1.0	-0.2295	-0.5136	0.4469	-0.2295	0
	1.1	-0.1882	-0.4666		-0.2085	-10.8
	1.2	-0.1582	-0.4274		-0.1910	-20.7
	1.3	-0.1356	-0.3942		-0.1762	-29.9
	1.4	-0.1181	-0.3657		-0.1634	-38.4
	1.5	-0.1043	-0.3410		-0.1524	-46.1
	1.6	-0.0933	-0.3194		-0.1427	-53.0
	1.7	-0.0841	-0.3003		-0.1342	-59.6
	1.8	-0.0765	-0.2833		-0.1266	-65.5
	1.9	-0.0700	-0.2680		-0.1198	-71.1
2.0	-0.0645	-0.2543	-0.1136	-76.2		
67.5°	1.0	-0.1624	-0.3509	0.4626	-0.1624	0
	1.1	-0.1330	-0.3044		-0.1408	-5.9
	1.2	-0.1118	-0.2691		-0.1245	-11.4
	1.3	-0.0958	-0.2411		-0.1115	-16.4
	1.4	-0.0835	-0.2185		-0.1011	-21.1
	1.5	-0.0737	-0.1998		-0.0924	-25.4
	1.6	-0.0659	-0.1895		-0.0877	-33.0
	1.7	-0.0594	-0.1709		-0.0791	-33.1
	1.8	-0.0541	-0.1593		-0.0737	-36.2
	1.9	-0.0495	-0.1493		-0.0691	-39.5
2.0	-0.0456	-0.1405	-0.0649	-42.5		

となっている。

上に述べたことは、壁面における y 軸方向の半径方向変位に対する x 軸方向の半径方向変位の比がわかれば、側圧係数 k の値を推定することの可能性を示唆している。図-7は、表-1に示すような数値を使って求めた値から作成されたものではあるが、式(1)から明らかなように、弾性係数 E とトンネルの半径 a の値は、 u^0/u^0 の値には無関係である。したがって、ポアソン比 ν の種々の値に対して、 k をパラメータとした $\theta \sim u_t^0/u_r^0$ 関係図

を用いて、現地において測定された値から側圧係数を推定できることになる。この場合、ポアソン比 ν の値は、他の方法により求めておくことが必要となる。

3-3 変位数値モデルに基づく半径方向変位と接線方向変位の比

円形掘りトンネルにおいて、任意の点における半径方向変位を u_r 、接線方向変位を u_t とし、表-2に示す値を用いて、 $\theta = 22.5^\circ$ 、 45° および 67.5° について、 u_t/u_r

と壁面からの深度の関係を k をパラメータとして示すと図-8 のようになる。 $\theta = 0^\circ$ および 90° の場合は、 u_t/u_r の値は常に 0 である。図-8 の場合にも、式(12)から明らかのように、弾性係数 E とトンネルの半径 a の値には関係ない。

図-8 に示すように、 θ の大きさによらず、側圧係数 k が 1 に近いほど、 u_t/u_r の値が小さくなる。また、図-8(c)において、 $k = 0.4$ の u_t/u_r の値が、 $k = 0.6$ あるいは 0.8 の場合にくらべて、かなり大きな値を示しているが、一般に、 x 軸の近傍においては、 y の値が小さくなるほど、半径方向にほぼ沿って、主応力が集中して大きくなることとよく一致している。

図-8 において、いずれの θ の値の場合でも、 u_t/u_r の値は、壁面からの深さによって、それほど大きな変化を示していないので、ほぼ一様とみなしても差支えない。そこで、壁面における u_t/u_r の値 $(u_t/u_r)_{r=a}$ をもって、

θ 方向の代表値として、 θ に対応する $(u_t/u_r)_{r=a}$ の値を、 $k = 0.4, 0.6$ および 0.8 の場合について示すと、図-9 のようになる。図-9 は、ポアソン比 ν が 0.3 の場合についての 1 例であるが、ポアソン比 ν のいろいろの値について図-9 と同様な図を予め作成しておけば、3-2 によって推定された側圧係数 k の値に基づいて、 θ の各方向の $(u_t/u_r)_{r=a}$ の値を求めることができる。そして

$$u_t' = (u_t/u_r)_{r=a} \times u_r \quad (13)$$

で表わされる u_t' を推定接線方向変位と定義し、この u_t' の値を各測定点において測定された半径方向変位に対応する接線方向変位とするものである。

さきに述べたように、 u_t/u_r の値が壁面から深さによって、大きな変化はないとして、壁面における値を用い、式(13)から u_t' を求めているが、当然のこととして、地山

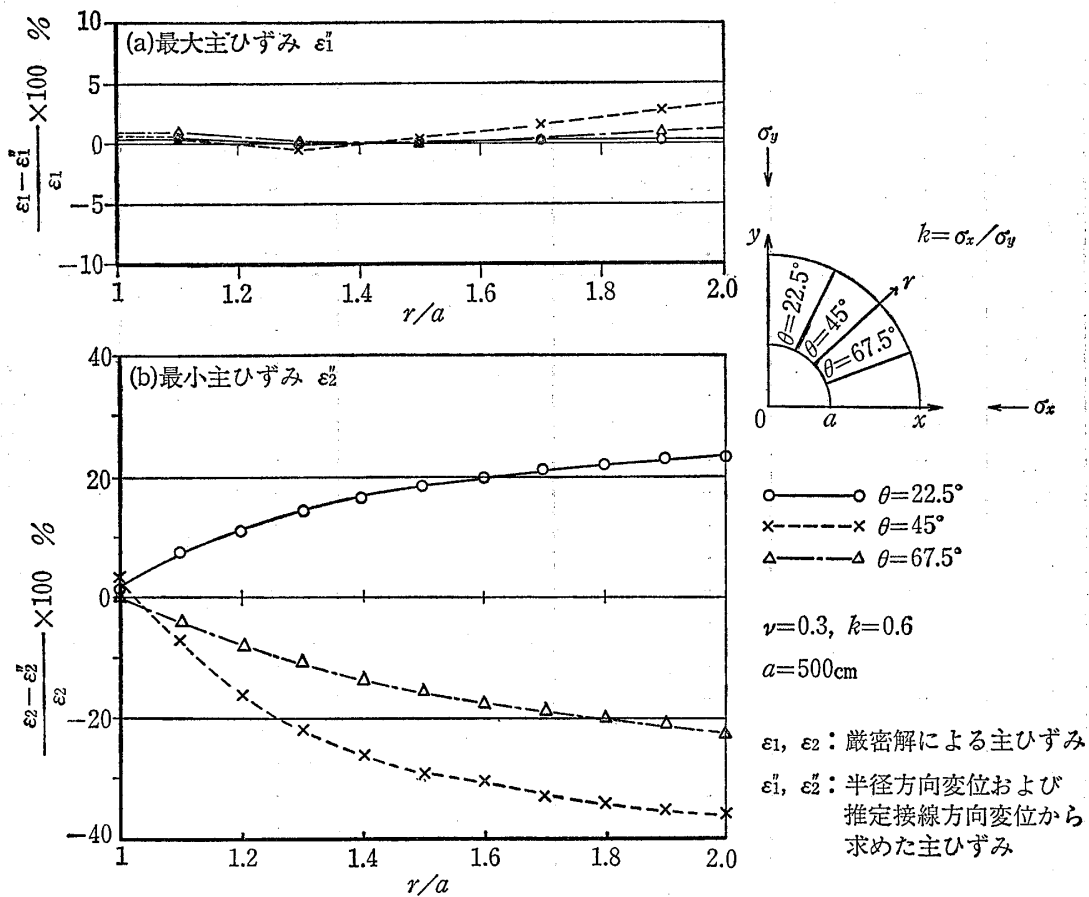


図-10 半径方向変位および推定接線方向変位(1)から求めた主ひずみの厳密解に対する相対誤差
 Fig. 10 Relative errors of the principal strains calculated from the radial displacements and the estimated tangential displacements (1) to the exact solution

内部における接線方向変位は誤差を有することになる。そこで、図-9に示す変位数値モデルの例について、壁面における接線方向変位と半径方向変位の比 $(u_t/u_r)_{r=a}$ は、表-3に示すとおりであり、これらの値に基づいて式(13)によって求められた推定接線方向変位 u_t' と厳密解の接線方向変位 u_t を比較すると、表-4のようになる。この表に示されているように、いずれの方向においても、壁面からの深さが深くなるほど、その誤差は大きくなっている。そして、 $r/a=2$ のところの誤差は、 $\theta=22.5^\circ$

の方向で94%と大きい値となっており、 θ が大きくなるに従って、小さくなる傾向を示している。

4 半径方向変位と推定接線方向変位を用いて得られるひずみ

2, 3において述べたように、半径方向変位のみを用い、桜井の方法によって、ひずみを求めると、図-5に示すように、厳密解に対して大きい誤差を生ずることか

表-5 半径方向変位から求めた推定接線方向変位(2)
Table 5 The estimated tangential displacements (2) calculated from the radial displacements

θ deg	r/a	接線方向変位 U_t cm	半径方向変位 U_r cm	$(U_t/U_r)_{r=a}$	推定接線方向変位 U_t'' cm	$\frac{U_t - U_t''}{U_t} \times 100\%$
				$1 + (r/a - 1) \cos \theta$		
22.5°	1.0	-0.1623	-0.6759	0.2401	-0.1623	0
	1.1	-0.1331	-0.6283	0.2198	-0.1381	-3.8
	1.2	-0.1118	-0.5854	0.2027	-0.1186	-6.1
	1.3	-0.0958	-0.5471	0.1880	-0.1029	-7.4
	1.4	-0.0835	-0.5128	0.1753	-0.0899	-7.7
	1.5	-0.0738	-0.4821	0.1642	-0.0792	-7.3
	1.6	-0.0659	-0.4545	0.1545	-0.0702	-6.5
	1.7	-0.0594	-0.4296	0.1458	-0.0626	-5.4
	1.8	-0.0541	-0.4071	0.1381	-0.0562	-3.9
	1.9	-0.0495	-0.3867	0.1311	-0.0507	-2.4
	2.0	-0.0456	-0.3681	0.1248	-0.0459	-0.7
45°	1.0	-0.2295	-0.5136	0.4469	-0.2295	0
	1.1	-0.1882	-0.4666	0.4174	-0.1947	-3.5
	1.2	-0.1582	-0.4274	0.3915	-0.1673	-5.8
	1.3	-0.1356	-0.3942	0.3687	-0.1453	-7.2
	1.4	-0.1181	-0.3657	0.3484	-0.1274	-7.9
	1.5	-0.1043	-0.3410	0.3302	-0.1126	-8.0
	1.6	-0.0933	-0.3194	0.3138	-0.1002	-7.4
	1.7	-0.0841	-0.3003	0.2989	-0.0898	-6.8
	1.8	-0.0765	-0.2833	0.2854	-0.0808	-5.6
	1.9	-0.0700	-0.2680	0.2731	-0.0732	-4.6
	2.0	-0.0645	-0.2543	0.2618	-0.0666	-3.3
67.5°	1.0	-0.1624	-0.3509	0.4626	-0.1624	0
	1.1	-0.1330	-0.3044	0.4455	-0.1356	-2.0
	1.2	-0.1118	-0.2691	0.4297	-0.1157	-3.5
	1.3	-0.0958	-0.2411	0.4150	-0.1000	-4.4
	1.4	-0.0835	-0.2185	0.4012	-0.0877	-5.0
	1.5	-0.0737	-0.1998	0.3883	-0.0776	-5.3
	1.6	-0.0659	-0.1895	0.3762	-0.0693	-5.2
	1.7	-0.0594	-0.1709	0.3649	-0.0624	-5.1
	1.8	-0.0541	-0.1593	0.3542	-0.0565	-4.4
	1.9	-0.0495	-0.1493	0.3441	-0.0514	-3.9
	2.0	-0.0456	-0.1405	0.3346	-0.0470	-3.1

ら、3章に述べたような考え方によって、半径方向変位から推定接線方向変位を求め、これらの両者を用いて計算されるひずみの値を、前と同じように、厳密解と比較する。この計算の領域、要素および節点の配置は、図-3に示すとおりで、45個の節点に対して、表-2に示す $k=0.6$ の場合の半径方向変位 u_r および表-4に示す推定接線方向変位 u_t' を入力した。

計算結果は、最大主ひずみ ε_1'' および最小主ひずみ ε_2'' のそれぞれに関して、 $\theta=22.5^\circ$ 、 45° および 67.5° の3方向について、厳密解に対する相対誤差と壁面からの深さとの関係として、図-10に示す。図-10(a)に示すように、最大主ひずみ ε_1'' は、厳密解の ε_1 に対する相対誤差は、いずれの θ に関しても3%以下であって、厳密解 ε_1 とほとんど一致する結果となっている。これに対して、最小主ひずみ ε_2'' の方は、図-10(b)に示すように、壁面においては、最大主ひずみ ε_1'' の場合と同じ程度の誤差であるが、深さとともに増大し、 $r/a=2$ において、 $\theta=45^\circ$ の場合には約36%となる。

図-10に示す結果を、半径方向変位のみによって求めた図-5に示す結果と比較すると、最大主ひずみに関しては、3章に述べたような手続によって得られた推定接線方向変位を考慮することによって、厳密解との差は、著しく小さくなっている。さらに、表-4に示すように、深さによって異なる値をもっている u_t/u_r に対して、壁面における値 $(u_t/u_r)_{r=a}$ をもって代表値としており、そのために生ずる相対誤差は、 $r/a=2$ のところで、 $\theta=22.5^\circ$ で-93.8%、 $\theta=45^\circ$ で-76.2%、 $\theta=67.5^\circ$ で-42.5%と大きい値を示しているが、図-10(a)によれば、これらの相対誤差は、最大主ひずみに対してほとんど影響しないことを表わしている。

一方、最小主ひずみに関しては、壁面において、半径方向変位のみの場合には、図-5(b)のように、 $\theta=22.5^\circ$ と $\theta=67.5^\circ$ において大きい誤差を示しているが、図-10(b)においては、その誤差は著しく小さくなり、最大主ひずみのものと同じ程度である。しかしながら、 $r/a=2$ のところの誤差をみると、 $\theta=22.5^\circ$ では、その絶対値は約

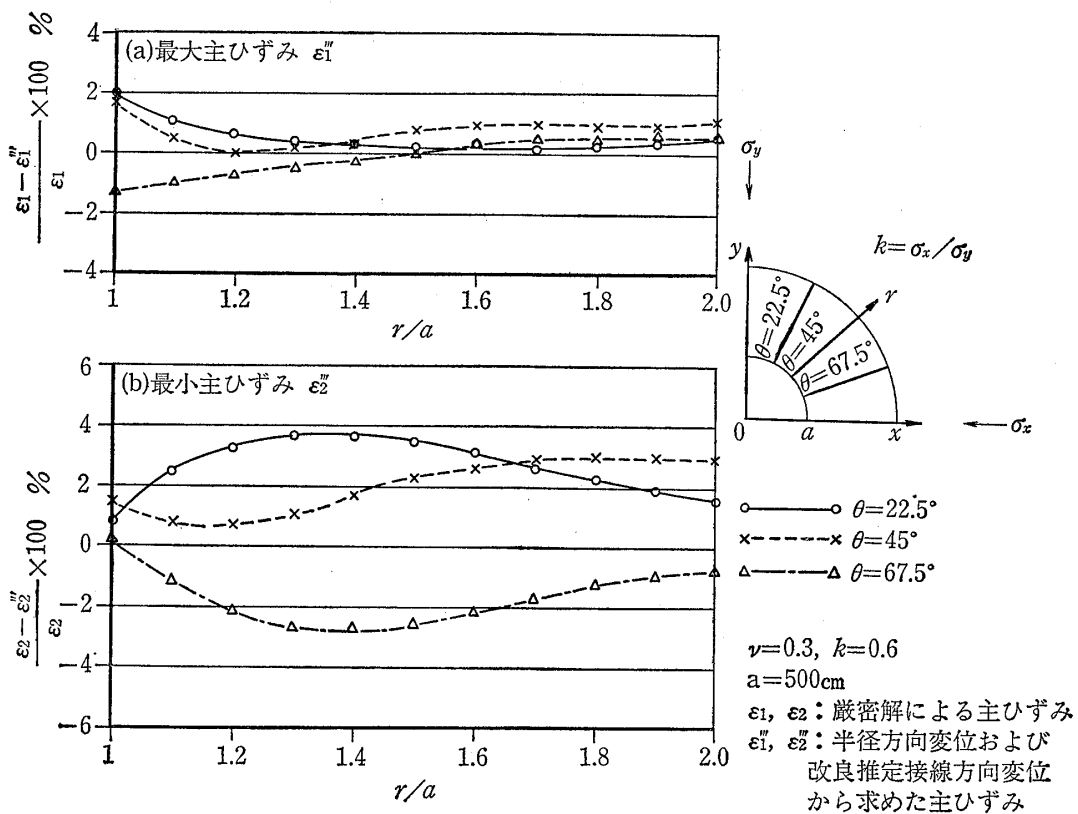


図-11 半径方向変位および推定接線方向変位(2)から求めた主ひずみの厳密解に対する相対誤差
 Fig. 11 Relative errors of the principal strains calculated from the radial displacements and the estimated tangential displacements (2) to the exact solution

$1/2$ であり、 $\theta=67.5^\circ$ ではほとんど同じであるが、 $\theta=45^\circ$ では推定接線方向変位を考慮したときの方が大きくなっている。このように、最小主ひずみにおける誤差が大きくなることは、壁面における値 $(u_t/u_r)_{r=a}$ を代表値として、推定接線方向変位を求めたことによる誤差に依存していることは明瞭である。したがって、最小主ひずみにおける誤差を小さくするためには、式(13)において、

$$u_t'/u_r = (u_t/u_r)_{r=a} = \text{定数}$$

という仮定を変えることが必要である。

そこで、一つの試みとして、 u_t'/u_r が計測点の分布の面から既知の量である θ と r/a の関数であるとし、

$$u_t''/u_r = \frac{(u_t/u_r)_{r=a}}{1 + \left(\frac{r}{a} - 1\right) \cos \theta} \quad (14)$$

と表わされるものと仮定する。この条件を用いて求められる推定接線方向変位 u_t'' の厳密解の接線方向変位 u_t に対する相対誤差は、表-5に示すとおりである。ここに示す誤差の値は、表-4のものにくらべると、きわめて小さくなっている。

表-5に示されている半径方向変位 u_r と推定接線方向変位 u_t'' を用いて、前と同じようにして、ひずみを計算し、最大主ひずみ ϵ_1''' および最小主ひずみ ϵ_2''' のそれぞれに関して、厳密解に対する相対誤差を求めると、図-11のとおりである。この図に示すように、最大主ひずみおよび最小主ひずみの両者ともに、その誤差はきわめて小さくなる。

5 結語

トンネルの施工現場において測定された地山の変位量を用いて、桜井の方法によって、地山のひずみを求めようとする場合、直交2軸方向の変位量を入力値として与える必要がある。現状の変位測定では、計器の構造上の制約ならびに計器の設置上の制約から、半径方向の変位の測定のみが行なわれており、直交2軸方向の変位を得

ることは困難である。

そこで、現場において計測される半径方向の変位から接線方向の変位を推定することを試みた。まず、弾性有孔板の解から、異なる方向の同一半径上の点における半径方向変位の比、ならびに任意の点における半径方向変位と接線方向変位の比が、地山の初期応力や弾性係数には関係なく、ポアソン比、側圧係数およびトンネルの半径方向のみに支配されることを明らかにした。そして、半径方向変位から接線方向変位を推定する方法についての1つの考え方を述べ、変位数値モデルを用いて、その誤差を検討し、半径方向変位のみによって、地中ひずみの確からしい値を求める実際的方法として提案した。

しかしながら、この検討に用いた変位数値モデルは、均質な弾性体という前提を有するものである。したがって、実際のトンネル地山において、上記の条件が成立する場合には、ポアソン比を他の何らかの方法により求めておけば、地山内のそれぞれの点における半径方向変位の測定結果から、接線方向変位を推定することが可能であり、精度よく地中ひずみを求めることができると考える。

今後、いろいろの実測値を用いて、この方法の実用性について検討する予定である。

参考文献

- 1) Shunsuke Sakurai (1982) : Evaluation Technique of Displacement Measurement Results in Tunnels, Proc. Jap. Soc. Civil Eng. No.317
- 2) Shunsuke Sakurai, Akinori Hasui and Tatsutoshi Kondoh (1981) : F.E.M. Model of Three-dimensional Calculation for Tunnels Considering the actual procedures in excavation, Proc. 36th Annual Conf., Jap. Soc. Civil Eng.
- 3) Hikaru Suzuki (1973) : Rock Mechanics and Measurements. Published by Uchida Rokauho Co., Ltd. Tokyo