

徳島大学工学部	正会員	小田英一
所南工業高専	正会員	米津 聖
徳島大学工学部	学生員	○ 渡辺 弘
大 林 組		寒川 博

1. まえがき

最近のように道路交通が発達してくると、山岳の多い日本では今後もさらに多くの道路トンネルが新設されると考えられる。一般に峠に近接する谷筋では鉄道と道路は平行している場合が多く、鉄道トンネルの近くに道路トンネルを作る場合が生じてくる。峠の鞍部では、両トンネルが接近する傾向が大きい。このような場合のトンネル周辺の応力状態を知ることによって、道路トンネルが既設鉄道トンネルにおよぼす影響を究明し、かつ、新設道路トンネルにおける支保工、巻立への資料とすることが可能となる。以上のことを調べるために、光弾性実験にて鉛直、水平等分布荷重を模型に作用させ、両トンネルの周辺と間隙での応力分布について解析を行なった。なお勾配の関係により、鉄道トンネルの上方に道路トンネルがある場合を想定し、ある程度の土被りがある場合を考えると地山の初期応力は土被りの地山の重力により生ずる鉛直等分布荷重と地山の土圧係数よりきまる水平方向の等分布荷重が作用する場合を取り扱って研究した。

2. 実験概要

トンネル周辺地山を形成する岩盤は複雑な性質を有しており、成層状態や節理、片理、岩目などの存在によって、いわゆる異方性体と考えられるものがきわめて多いが、岩盤を一般的に等質の二次元等方性弾性体と仮定し、地山の model としてエポキシ樹脂をもちいた。エポキシ樹脂の力学的性質は光弾性感度 0.0929 cm/kg 、板厚 6.00 mm 、ヤング率 $E = 3000 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.33 \sim 0.35$ である。鉄道トンネルは単線、道路トンネルは2車線のものとし、2個のトンネルの近接距離については、水平距離は道路トンネル左側の鉛直接線と鉄道トンネル右側の鉛直接線が一致するようにし、鉛直距離(高さ)は鉄道トンネルの高さ程度にして供試体を写真-1のごとく工作し、装填上の制限から

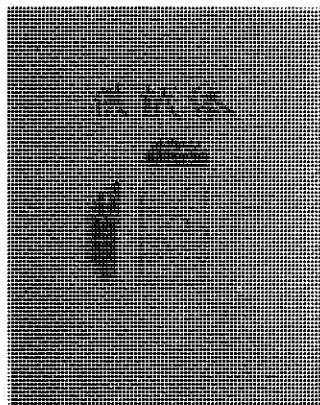


写真-1 模型

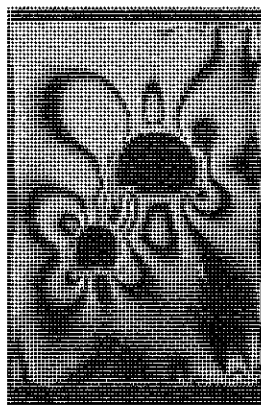


写真-2 等色線(鉛直)

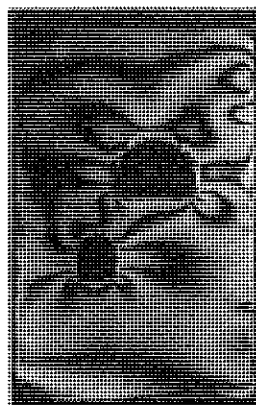


写真-3 等色線(水平)

等分布荷重は鉛直、水平の2方向を別々に作用させて実験を行なった。

等分布荷重として写真-1のように矩形鋼材を1、2、4、と3段に重ね、最上段の中央に集中荷重をかけた。又各段の間は丸鋼によって力が伝わるようにした。

写真-2、写真-3はそれぞれ鉛直、水平等分布荷重を加えた時の等色線であり、これと主応力線図(等傾線からもとまる)から Shear Difference Method により直応力、セリ断応力を求めた。

3. 実験結果とその考察

まず別々に実験した鉛直、水平等分布荷重による応力分布の解析を、トンネル周縁では σ_θ について、又トンネル周辺では σ_x , σ_y , τ_{xy} についておこなった。水平軸をx軸とし、鉛直軸をy軸とするから σ_x , σ_y , τ_{xy} はそれぞれ水平方向直応力、鉛直方向直応力、セリ断応力となる。トンネル周辺応力の求め方は $K = (\text{水平等分布荷重}) / (\text{鉛直等分布荷重}) = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ の6種類の場合についてそれぞれ求めた。ここでは $0.5, 0.7, 1.0$ についての結果を示す。

(i) トンネル周縁の応力

$K = 0.5, 0.7, 1.0$ のときの接線方向応力 σ_θ の結果が表-1、図-1である。数値はすべて鉛直等分布荷重を1fringeにした場合のものである。

表-1 σ_θ の値

Point	$R=1.0$ $R=0.5$	$R=1.0$ $R=0.7$	$R=1.0$ $R=1.0$
Q	4.254	4.957	6.013
P	0.605	1.346	2.457
C	-0.232	0.323	1.157
d	-0.186	0.383	1.289
e	0.672	1.264	2.153
f	5.130	5.156	6.579
g	3.432	3.284	3.062
h	2.817	2.573	2.206
i	2.216	2.073	1.714
k	2.594	3.727	2.727
l	1.774	2.162	2.664
m	1.250	1.827	2.692
n	0.819	1.545	2.635
o	0.962	1.775	2.045
p	1.321	2.037	3.110
q	1.184	2.173	2.927
r	2.033	2.251	3.567
s	2.152	2.528	3.243
t	2.917	2.611	2.153
u	3.414	2.107	2.151
v	2.887	2.887	2.887
Q'	2.632	3.256	4.117
P'	0.576	1.308	2.150
C'	0.416	0.922	1.805
d'	0.925	1.516	2.433
e'	3.879	4.433	5.262
f'	2.894	2.880	2.858
g'	2.652	2.561	3.372
h'	2.595	2.719	2.904
i'	0.374	1.022	1.994
j'	0.571	1.422	2.700
k'	2.164	2.905	4.016
l'	3.351	3.394	3.457
m'	2.918	2.728	2.576
n'	1.970	1.828	1.870

ただし R : 鉛直等分布荷重
 R : 水平等分布荷重
 Point n 符号は図-1に示す

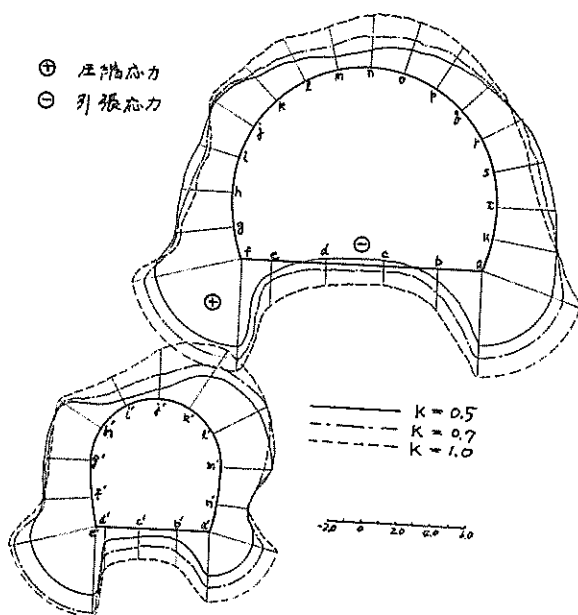


図-1 σ_θ の分布

(ii) トンネル周辺の応力

$K = 0.5, 0.7, 1.0$ により合成した σ_x , σ_y , τ_{xy} の結果が、それぞれ表-2、表-3、表-4である。表中の位置を示すために $\tau_{xy, K=1.0}$ を例にとり図に示したのが図-2である。

表-2

 σ_x の値

fringe	$P_0 = 1.0$	$P_0 = 1.0$	$P_0 = 1.0$
Point	$R_0 = 0.5$	$R_0 = 0.7$	$R_0 = 1.0$
0	2.636	3.192	4.025
1	-0.733	-0.387	-0.125
2	-1.000	-0.703	-0.258
3	-1.218	-0.959	-0.520
4	-1.319	-1.120	-0.823
5	-1.190	-0.976	-0.654
6	-0.852	-0.577	-0.169
7	-0.584	-0.296	0.181
8	-0.355	-0.087	0.315
9	-0.075	0.175	0.557
10	0.227	0.443	0.764
11	0.353	0.581	0.722
12	0.151	0.182	0.238
13	0.127	0.139	0.186
14	0.046	0.016	0.020
15	0.194	0.116	0.135
16	0.380	0.277	0.428
17	0.257	0.418	0.510
18	0.239	0.248	0.573
19	0.592	0.227	0.629
20	0.128	0.081	0.151
21	0.370	0.226	0.410
22	0.247	0.380	0.581
23	0.232	0.368	0.573
24	0.227	0.233	0.239
25	0.330	0.232	0.234
26	0.488	0.230	0.272
27	0.165	0.272	0.479
28	0.565	0.244	0.227
29	0.160	0.201	0.285
30	-0.234	-0.100	0.100
31	-0.484	-0.272	-0.027
32	-0.427	-0.225	0.032
33	-0.232	0.053	0.481
34	-0.081	0.282	0.728
35	0.154	0.572	0.920
36	0.578	0.925	1.016
37	1.261	1.588	2.078
38	1.376	1.535	1.923
39	0.651	0.691	0.722
40	0.572	0.564	0.581
41	0.185	0.127	0.150
42	0.307	0.210	0.219
43	0.505	0.385	0.405
44	0.712	0.549	0.520
45	1.067	1.238	0.815
46	1.157	1.167	0.682
47	1.076	1.002	0.600
48	0.789	0.621	0.369
49	0.583	0.217	0.019
50	0.313	0.162	0.235
51	0.363	0.191	0.267
52	0.505	0.272	0.280
53	0.671	0.374	0.261
54	0.985	0.467	0.191
55	1.297	0.723	0.127
56	1.198	0.755	0.166
57	1.020	0.630	0.240
58	0.571	0.323	0.202
59	0.567	0.255	0.280
60	0.811	0.527	0.277
61	0.728	0.576	0.230
62	0.767	0.710	0.168
63	0.669	0.779	0.574
64	0.557	0.835	0.723
65	0.483	0.726	0.612
66	0.588	0.733	0.610
67	0.518	0.780	0.619
68	0.620	0.815	0.612
69	0.622	0.770	0.643
70	0.591	0.717	0.602
71	0.574	0.574	0.724

表-3

 σ_y の値

fringe	$P_0 = 1.0$	$P_0 = 1.0$	$P_0 = 1.0$
Point	$R_0 = 0.5$	$R_0 = 0.7$	$R_0 = 1.0$
0	0	0	0
1	-0.005	-0.023	-0.089
2	0.007	-0.022	-0.165
3	0.038	-0.045	-0.171
4	0.057	-0.067	-0.248
5	0.101	-0.017	-0.258
6	0.296	0.106	-0.161
7	0.888	0.278	0.007
8	0.631	0.852	0.129
9	0.273	0.707	0.858
10	1.180	1.021	1.807
11	1.533	1.812	1.231
12	1.822	1.721	1.567
13	2.119	2.019	1.868
14	2.382	2.166	2.052
15	2.371	2.170	2.049
16	2.202	2.162	2.102
17	2.160	1.927	1.906
18	1.690	1.631	1.618
19	1.029	1.087	0.929
20	1.001	1.326	1.043
21	1.207	1.820	1.765
22	2.280	2.187	2.036
23	2.687	2.306	2.035
24	2.182	2.773	2.103
25	2.579	2.791	2.122
26	2.287	2.127	1.725
27	1.830	1.518	1.235
28	1.585	1.229	0.780
29	1.221	1.100	0.613
30	1.105	0.902	0.532
31	1.080	0.887	0.552
32	0.986	0.833	0.612
33	0.768	0.820	0.605
34	1.195	0.905	0.685
35	1.190	1.058	0.851
36	1.392	1.278	1.026
37	1.630	1.531	1.295
38	1.827	1.906	1.828
39	2.191	2.162	2.068
40	2.620	2.682	2.815
41	1.631	1.536	1.326
42	1.228	1.627	1.521
43	1.819	1.715	1.560
44	1.825	1.781	1.508
45	1.767	1.609	1.522
46	1.620	1.612	1.281
47	1.408	1.353	1.120
48	1.299	1.310	1.025
49	1.266	1.138	0.925
50	1.127	1.016	0.824
51	1.128	1.071	0.962
52	1.176	1.132	1.066
53	1.135	1.120	1.037
54	1.138	1.082	1.061
55	0.833	0.854	0.871
56	0.535	0.585	0.659
57	0.250	0.277	0.417
58	0	0	0
59	0.206	0.201	0.383
60	0.309	0.572	0.668
61	0.691	0.721	0.790
62	0.815	0.823	0.824
63	0.818	0.885	0.810
64	0.871	0.826	0.761
65	0.878	0.807	0.760
66	0.888	0.810	0.694
67	0.827	0.851	0.716
68	0.771	0.815	0.781
69	0.615	0.736	0.817
70	0.279	0.794	0.867
71	1.128	1.036	0.905

表-4

 τ_{xy} の値

fringe	$P_0 = 1.0$	$P_0 = 1.0$	$P_0 = 1.0$
Point	$R_0 = 0.5$	$R_0 = 0.7$	$R_0 = 1.0$
0	0	0	0
1	-0.867	-0.821	-0.783
2	-0.693	-0.627	-0.584
3	-0.875	-0.380	-0.237
4	-0.370	-0.135	0.067
5	-0.168	-0.062	0.147
6	-0.185	-0.072	0.029
7	-0.176	-0.138	-0.072
8	-0.176	-0.134	-0.072
9	-0.200	-0.238	-0.239
10	-0.373	-0.822	-0.521
11	-0.326	-0.810	-0.227
12	-0.300	-0.811	-0.653
13	-0.821	-0.545	-0.588
14	-0.387	-0.287	-0.288
15	-0.178	-0.187	-0.178
16	0.158	0.077	0.157
17	0.265	0.320	0.828
18	0.624	0.587	0.731
19	0.327	0.479	0.529
20	0.595	0.681	0.824
21	0.538	0.615	0.701
22	0.322	0.663	0.510
23	0.251	0.361	0.277
24	0.088	0.016	0.228
25	-0.128	-0.173	-0.161
26	-0.573	-0.571	-0.618
27	-0.830	-0.766	-1.171
28	-0.134	-0.556	-0.624
29	-0.277	-0.312	-0.315
30	-0.311	-0.212	-0.168
31	-0.196	-0.088	0.072
32	-0.131	-0.068	0.116
33	-0.232	-0.203	-0.053
34	-0.267	-0.291	-0.206
35	-0.520	-0.512	-0.685
36	-0.677	-0.700	-0.736
37	-0.827	-1.053	-1.181
38	-1.213	-1.368	-1.190
39	-1.722	-1.680	-1.663
40	-1.241	-1.361	-1.790
41	-0.297	0.021	0.170
42	0	0.088	0.121
43	-0.032	-0.054	0.022
44	-0.203	-0.172	-0.062
45	-0.268	-0.251	-0.227
46	-0.229	-0.298	-0.263
47	-0.219	-0.286	-0.287
48	-0.168	-0.157	-0.172
49	-0.065	-0.052	-0.032
50	-0.051	-0.015	0.038
51	-0.005	-0.053	0.026
52	-0.353	-0.202	-0.126
53	-0.827	-0.568	-0.500
54	-0.647	-0.636	-0.680
55	-0.851	-0.71	-0.726
56	-0.872	-1.010	-1.216
57	-0.641	-1.349	-1.197
58	0	0	0
59	-0.303	-0.301	-0.837
60	-0.387	-0.426	-0.686
61	-0.324	-0.304	-0.274
62	-0.204	-0.144	-0.228
63	-0.073	-0.071	-0.080
64	-0.025	-0.024	-0.057
65	0.001	-0.007	-0.028
66	0.004	-0.035	-0.057
67	-0.070	-0.035	-0.058
68	-0.072	-0.072	-0.079
69	-0.183	-0.094	-0.079
70	-0.157	-0.133	-0.072
71	-0.188	-0.149	-0.070

ただし Pointの位置は例えば ④5とは図-2の④列の5の点であることを示している。
 P_0 :鉛直等分布荷重, R_0 :水平等分布荷重 σ_x, σ_y の正の値は圧縮
 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ の値は $P_0 = 1$ fringeとしたときに対応する数値である。

4. 考察

トンネル周辺地山のセリ断応力について： K の変化にともなうセリ断応力の変化を調べるために A の値を計算した。 $A = (\tau_{xyk=0.5} - \tau_{xyk=1.0}) / \tau_{xyk=0.5}$ この値で判断すると、 $\tau_{xyk=0.5}$ の小さい点では大きくなりがちであるが、一応の目安にはなると考えられる。 $A = \pm 0.5$ 以上の部分をピックアップすると、②③～⑧、④④①～④、②③、⑥～⑨、⑦⑥～⑨、⑬～⑭ ②⑦⑦～⑧であるが $\tau_{xyk=0.5}$ の絶対値が小さいのを除くと ②③と②⑦⑬～⑭ が問題となるようである。一方 A が 0.1 以下の部分をピックアップすると ②⑦⑬～⑭、④④①、②②①～②、⑦⑩～⑫ となっている。

トンネル周辺地山の σ_x について： $K = 0.5 \sim 1.0$ の変化にともなって ②⑦②～⑥、②⑥⑦ではまだ引張応力のままであるが ②⑦⑦～⑧、②⑥⑥、⑧～⑩では引張から圧縮応力へと移っている。圧縮応力の作用している所では K の増大に伴い、大部分の σ_x は増加している。地山の引張強度が非常に小さい場合には、引張応力の生じている箇所が破壊状態となり周辺への応力の再配分が行われると考えられる。 σ_y の場合と同様に考え A の値を求めたが、部分的に目立つ点はない。ただし圧縮応力 0.5 MPa 以上の比較的大きい点について A の平均値をみると 0.9 程度で、これを基準に考察すると、②⑦⑩～⑭、②②①～② では変化が他の点と比較して大きいようである。

トンネル周辺地山の σ_y について： 表-3 からわかるように σ_y については K による変化はあまり見られない。特に道の大きい箇所についての変化率 A は非常に小さい。一方 ②⑦⑪～⑭、②②①～② では $K = 0.5 \sim 1.0$ にともない、応力が減少している。以上 τ_{xy} 、 σ_x 、 σ_y についての考察を行ってきたが、②⑦列については、ほとんどトンネル底部の角 (スミ) 近くから Shear Difference Method で計算を行っているので、等傾線、等色線が複雑な所だったため、他の場所と比べて精度が低い。

トンネル周縁の σ_θ について： 新設の道路トンネル周縁についての応力状態はほぼ対称であり、 K の変化とそれに伴う応力の変化は比例的であるが既設の鉄道トンネル周縁については、図-1 から明らかのように、対称性からは相当はずれており、 K による応力分布の変化も箇所により異なる。もう少し詳しく説明すると、点 $g \sim l$ の部分で変化率 A の値は順に 0.12, 0.33, 0.33, 0.86, 0.03 となっており K によって著しく変化する。つまり初期地山応力のとり方が問題となる。

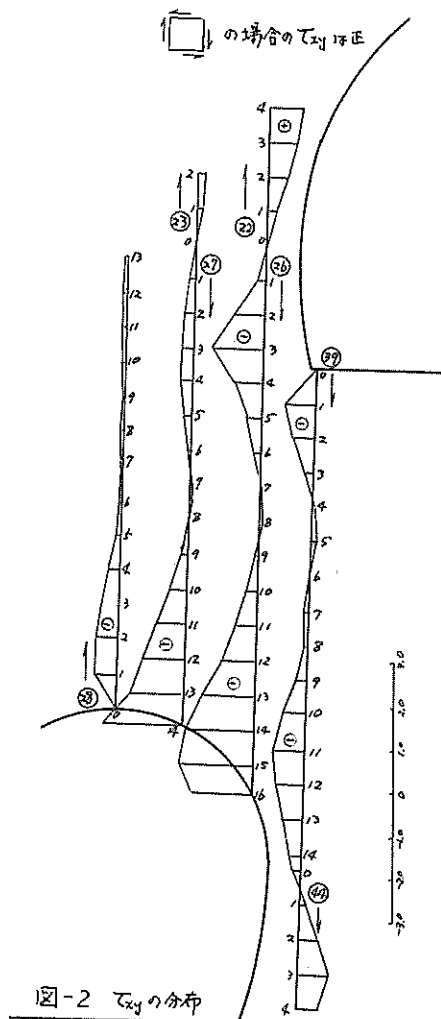


図-2 τ_{xy} の分布