

徳島大学工学部	正員	小田英一
徳島大学大学院	学生員	才木繁
徳島大学工業短大		藤沢邦彦
徳谷組		黒田和裕

トンネルのコンクリート巻立に土圧が作用したとき、コンクリート巻立の内部に生ずる応力分布の問題は、巻立の設計施工に重要なことからである。この問題を考えるとき、土圧が如何になるかは地質と地山の力学的な係数とトンネル形状、寸法、施工法に關係するので、トンネル開削以前に土圧を推定するのは困難な問題で、経験によることが多い。この研究においては主働土圧の大きさのことはさておいて、トンネル巻立のある一處に主働土圧としての単位荷重がトンネルの断面の半径方向に作用したとき、巻立が変形をするか、そのとき地山に巻立が取り囲まれていて自由な変形が制約される。その結果主働土圧の載荷重以外の隣接した地山には反力としての土圧が生じる。このような外力の影響でトンネル巻立に応力分布があらわれる。この問題に関して Gerhard Sonntag<sup>4)</sup>の研究があるが、拱頂に荷重のかかる場合についてのみ取扱っている。我々はこの主働土圧の載荷重をトンネル周辺部各所に、それぞれの載荷重に半径方向に主働土圧の単位荷重を作用させたときのトンネル巻立内の応力分布に関する影響線を探る、これを利用してある主働土圧分布がトンネル巻立に作用するときの巻立内応力分布を探る、トンネル設計に必要な資料をえんとしたのである。

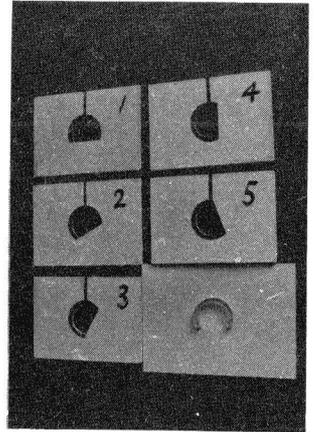


写真-1

この研究においてトンネルの形としては図-1に示すような馬蹄形のトンネルを取扱った。巻立厚を  $t$  とトンネル巻立内径  $d$  との比を  $0.155$  とした。巻立内応力分布を探るため光弾性実験による方法をとった。また地山材料としては石膏を用いることとした。巻立用実験材料としてはエポキシ樹脂を用い、エポキシ樹脂の光弾性感度は  $0.906 \frac{mm}{kg}$ 、板厚は  $6.05 \text{ mm}$ 、ヤング率  $E_2 = 3,000 \frac{kg}{cm^2}$ 、ポアソン比  $0.33 \sim 0.35$  のものである。また石膏材料のヤング率としては  $E_g = 127,650 \frac{kg}{cm^2}$  のものを用いた。これは水  $60^\circ C$  に対して石膏  $84\%$  を混入して作成したものである。馬蹄形の巻立の周辺を石膏で取り囲んで地山材料とするには、木製鋳型の中に巻立部模型をおき、周囲に石膏を流しこみかためて、写真-1にみるような光弾性模型を5種類作成した。

この模型作成の条件としては、 $\alpha$  に石膏の地山自体は写真-1に示すような石膏地山に作ったスリットより角棒によつて巻立に主働土圧に該当する圧力を与える構造として、この土圧の作用する極限に隣接する地山は反力としての土圧をうけて、直接地山の圧力をあたえることのないようにする。 $\alpha$  の

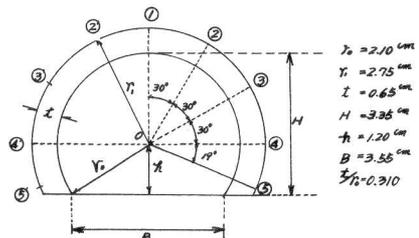


図-1

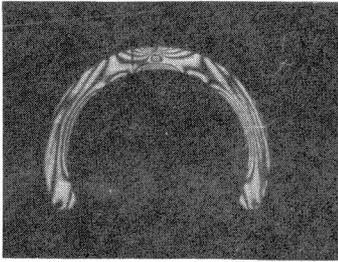


写真-2

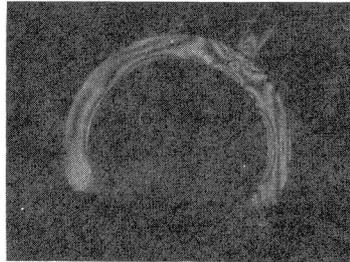


写真-3

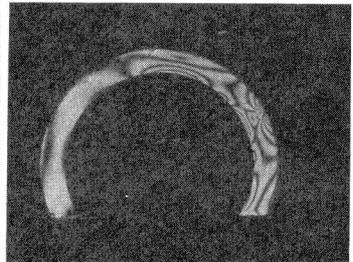


写真-4

条件としては周囲の地山と巻立との間は予め絶縁するようにすると、その境界において引張応力とせん断応力とをうけることはない。またこのような模型においてはトンネル側壁底部は別として、一般に主効土圧の作用する格点に隣接した地山の反力としての土圧は巻立に法線方向



写真-5



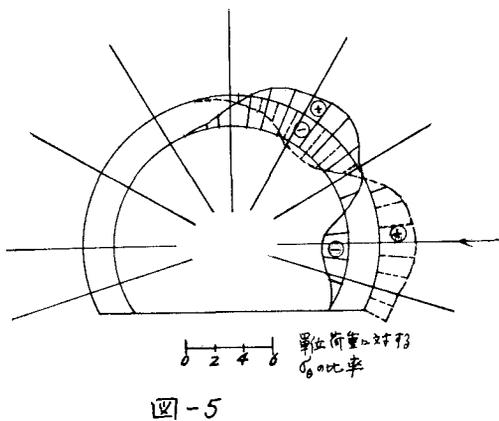
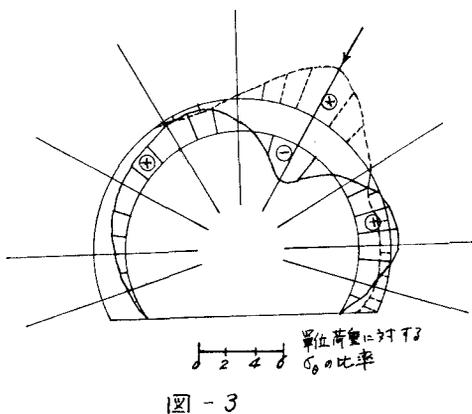
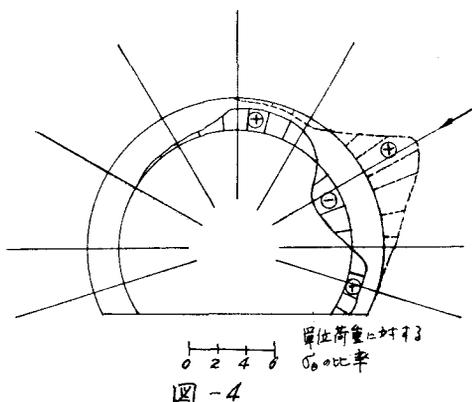
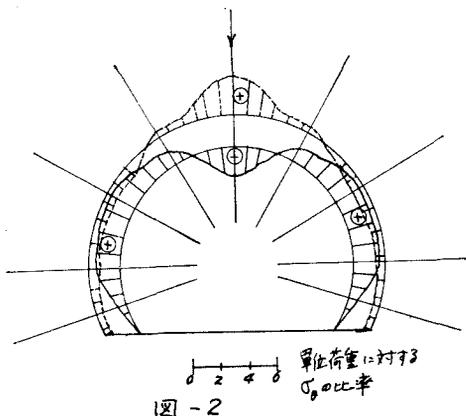
写真-6

に作用するものと考えられる。ここで問題となるのはエポキシ樹脂の巻立模型と石膏材料の地山との間、模型製作上僅かながら隙間の生ずることであるが、これは5ヶの試料とも同一条件となるように注意して製作した。また実験において地山材料のヤング率の値としては上述のもの一つについて研究したが、エポキシ樹脂のヤング率と石膏材料のヤング率との比率が変化すれば変形の損相も変化する。また巻立の厚さが変化すれば変形にも影響する。また巻立と地山との間の隙間の大きさについても巻立の変形におよぼす影響は大きいものと考えられるが、本実験においてはエポキシ樹脂を石膏の孔よりとりはずすのに僅かに摩擦を感ずる程度のものであった。ゆえに本研究における応力分布には上述の条件のときのものに限定されることとなる。また巻立側壁底部は地山の下盤に掘り込んで基礎づけはしていない構造のものとして図-1に示すようなものである。

図-1に模型の寸法を示す。これはトンネル巻厚がトンネル内空の直径に比べて相当大きい場合にあたる。主効土圧に該当する圧力の作用する格点番号は図-1の①、②、……、⑤とする。この格点に載荷するには石膏の地山に作ったスリットより僅かにせまい角棒を挿して巻立に力を加え、地山と角棒との間の摩擦の生じないように考えたのである。写真-2より写真-6までは、図-1の格点①より⑤までのそれぞれこの格点に主効土圧に該当する圧力が1ヶだけトンネル断面半径方向に作用したときの光弾性実験による等色線写真であって、各写真において実験に用いた力の大きさは異なっている。

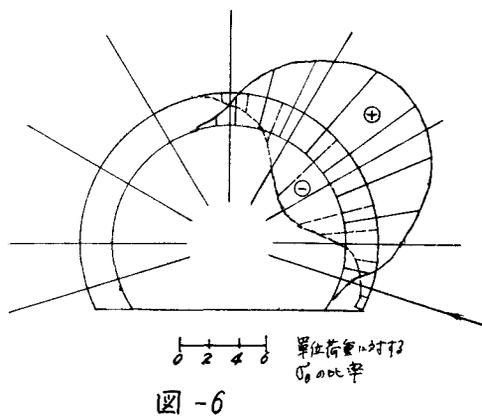
またそれぞれの場合における等色線をも測定した。

光弾性実験より、巻立内縁の自由面の境界条件により *shear difference method* により、断面の半径方向の経路にそって応力計算を行い、格点①より⑤までにそれぞれ単位荷重の主効土圧が作用したと



きの巻立内線、外線の接線方向直応力 $\sigma_0$ の分布、すなわち影響線を求めたもの本図-2より図-6までに示している。つぎに計算例として、図-10にあるような主応力土圧分布が橋梁に作用するときのトンネル巻立内線の $\sigma_0$ の分布を求めた。図-10(a)は水圧的な土圧の作用する場合であり、図-10(b)は鉛直方向土圧のみの作用するときの橋梁のトンネル断面半径方向の土圧成分が巻立に作用する場合であり、図-10(c)は偏圧の土圧が作用した一つの例の場合である。

図-1の橋梁②より④までの位置にそれぞれ単位主応力土圧が1ずつ作用したときの影響線は、図-3より図-6までのものと左右対称であることより求められる。橋梁①より⑤、および橋梁②より④までの位置に載荷されたときの上述の影響線を用いて、図



—— 内線の $\sigma_0$ の分布 ⊕ 圧縮応力  
 - - - - 外線の $\sigma_0$ の分布 ⊖ 引張応力

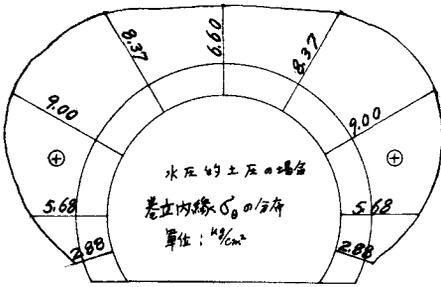


図 - 7

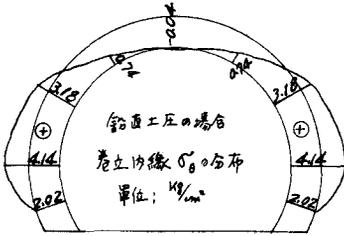


図 - 8

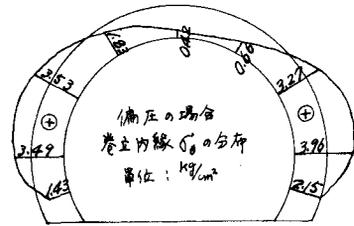


図 - 9

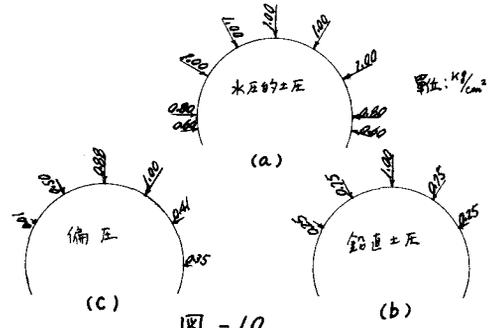


図 - 10

一/10(a), (b), (c)に示すような主働土圧分布のときの巻立内縁の $\sigma_0$ の応力分布図をそれぞれ図-7, 図-8, 図-9に示す。

図-2の影響線は拱頂樁突①に単位主働土圧の作用した場合であるが、巻立内縁 $\sigma_0$ の影響線は拱頂附近は $\sigma_0$ が引張応力で、トンネル側壁部では圧縮応力である。図-3の樁突②に単位主働土圧の作用したとき、および図-4の樁突③に単位主働土圧の作用したときの巻立内縁 $\sigma_0$ の影響線は図-2の分布図を次第に右に回転したようになっていて、載荷樁突附近で引張応力がいつもでてくる。しかしながら図-5の樁突④に単位主働土圧の作用したときのものは、トンネル側壁基礎底面と地山との接触の影響がでていて、図-4と図-6との中間的な巻立内縁 $\sigma_0$ の影響線を示している。図-6の樁突⑤に単位主働土圧の作用したときの巻立内縁 $\sigma_0$ の影響線は全部圧縮となり、樁突②と③との間で相対的に大きな圧縮応力が作用している。これはトンネル側壁基礎底面は、この実験では地山を掘り上げた基礎づけしていない故、この部分は水平方向に内方に変位しやすい構造となつたため、巻立は樁突②と③との間を固定端とする片持梁のような変形をしたためと考えられる。

図-7の水圧的主働土圧がトンネル巻立に作用するとき、巻立内縁 $\sigma_0$ の分布は全部圧縮であつて、拱頂ではその値が僅かに小になつていて、圧縮応力は全般的に相対的に大きい。図-9の偏心土圧の場合は図-8の鉛直土圧の場合にくらべて、巻立内縁 $\sigma_0$ の分布はわづかに右に回転した形となり(偏心方向に回転)、側壁の $\sigma_0$ の最大値は図-7の場合の $\sigma_0$ の最大値の約 $1/2$ であることが判つた。

\* G. Sonntag ; Der Bauingenieur 31 (1956) Heft 11, pp.408~412.