

鋼繊維補強コンクリートを用いたECLトンネルの覆工体に作用する土圧の評価

杉山 博一¹・後藤 茂²・今田 徹³

¹正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

²正会員 工博 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

³フェロー会員 工博 東京都立大学教授 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

ECLトンネルで用いられる鋼繊維補強コンクリートは、まだ固まらない状態ではせん断剛性を持たずほぼ液体とみなすことができることから、コンクリートがまだ固まらない状態でのECL周辺地盤の応力は液体状のコンクリートの圧力によって支持されると着想した。このことを確認するため、ネオプレン製のゴム袋に水を満たしたラバーバルーンを模型地盤中に埋設し、遠心模型実験を行ってラバーバルーン内の水圧および周辺の土圧を計測した。その結果、ラバーバルーン周辺の地盤では液体の圧力の強い影響を受けた土圧の再配分が起きていることが確認できた。さらに、この土圧の再配分を考慮した覆工応力の解析を行ったところ、現場で行われた計測結果と良い一致をみた。

Key Words : *Extruded Concrete Lining method, steel fiber reinforced concrete, centrifuge model test, rubber balloon, earth pressure*

1. 序論

シールド工法は都市部の軟弱地盤中に構築されるトンネルの代表的な施工方法としてその地位を確立しており、プレキャスト部材であるセグメントをシールドマシン内で組み立てながら掘進することを原則としている。一方、ECL工法はセグメントの代わりに場所打ちコンクリートにより覆工を行うことが工法の特徴であるが、施工条件によってはシールド工法に比較して安価な施工方法になり得るとして昨今注目されつつある工法である。ECL工法はコンクリートの打設サイクルや覆工体構造の違い等で数種類に分類されるが、そのうち岡南共同溝工事²⁾において採用された鋼繊維を混入させた高流動コンクリート(以下、高流動SFRC)を連続的に打設する方法は、図-1に示すように地盤と内型枠の間にコンクリートを加圧充填しながら連続的に覆工体を構築するものである(以下、本論文では本方法によるものをECLと称する)。この工法は高流動SFRCを連続的にテールボイドに充填させるために周辺地盤への影響が少なく、今後の普及が期待されている工法である。しかしながら、本工法はまだ施工実績が少ないこと

等から数多くの技術的課題が残されており、現在様々な方向から研究開発が進められている。

その課題のひとつとして、ECLの覆工を設計する上で重要な検討項目である覆工に作用する土圧および覆工に発生する応力の問題がある。前述のようにECLはシールド工法とは覆工の構築方法が異なることから、覆工に作用する土圧や覆工に発生する断面力のメカニズムがシールドトンネルと異なる可能性が大きく、現在の土圧設定法が必ずしも最適であるとは限らないため、それらのメカニズムを解明するための取り組みがなされている。大寺ら³⁾は岡南共同溝において覆工体にスリットを切って応力を解放させる方法(応力解放法)により覆工に発生している応力を推定し、得られた結果と様々な荷重条件により解析した結果から得られる応力とを比較している。しかしながら計測における制約があったことなどから明確な結論は得られていない。

本研究では高流動SFRCを用いたECLトンネルに作用する土圧および覆工に発生する断面力のメカニズムを明らかにすることを目的として、ECLトンネル周辺地盤の応力変化(土圧の再配分)に着目した検討を行った。

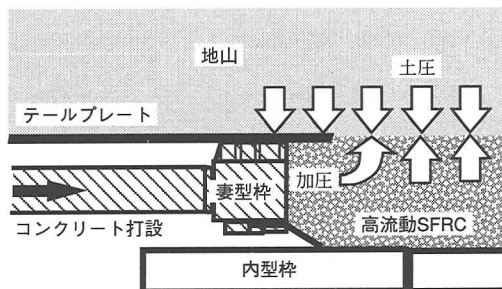


図-1 ECL工法の覆工コンクリート打設概念図



写真-1 高流動SFRCのスランプフロー試験状況

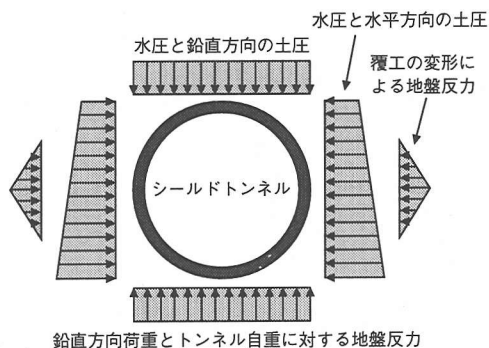


図-2 慣用計算法で用いる覆工に作用する外力の概念図

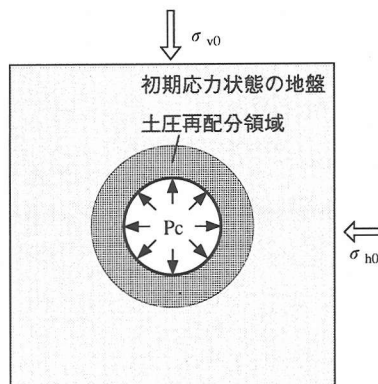


図-3 高流動SFRCによる土圧変化の概念図

2. ECLの覆工に作用する土圧の考え方

図-2にシールドのセグメントの設計によく用いられている設計外力分布を示す⁴⁾が、荷重として考える土圧は上下方向に等分布荷重、水平方向に深度方向を考慮した不等分布荷重が用いられている。通常、上下方向に作用する土圧として砂質土ではテルツァーギの緩み土圧を用いることが多く、これはトンネル上部の地盤が下方に変形する場合のせん断抵抗を考慮する事によって値を低減した土圧モデルである。また、側方の外力としては前述した不等分布荷重の他に覆工の変形に伴う地盤反力を評価している。つまり、この荷重設定方法では初期の地盤の応力は水平方向に比較して上下方向の方が大きいために覆工体が横長につぶれるような変形モードを想定し、上下方向の荷重は低減し、水平方向の荷重は覆工の変形に伴って発生する地盤反力を作用させるという土圧再配分の考え方をしている。しかし、これは剛性を持った覆工体に初期状態の土圧が作用することによって生じる変化を想定したものであり、まだ固まらない高流動SFRCが地山を支持しているECLとは状態が異なっている。

ECLに用いられる高流動SFRCに着目すると、このコンクリートは引張強度補助材料として鋼製の短い繊維を混入したものであるが、まだ固まっていないときの挙動は高流動コンクリートの特性が強く反映される。写真-1は高流動SFRCによるスランプフロー試験の状況であるが、高流動SFRCは材料分離を防ぐために適度な粘性は持たせてあるものの、まだ固まらない状況ではせん断剛性をほとんど持たないことからほぼ液体として挙動するとみることができる。しかし地盤へは浸透しないことから、掘進直後のECLの周辺地盤は不透水性の膜で覆われた液体の圧力によって支持されているとみなすことができる。図-3は液体とみなした高流動SFRCの圧力により支持された地盤の土圧再配分の概念図である。図に示すように、本論文ではトンネル周辺で生じる応力的な変化を土圧再配分と称する。トンネルの影響を受けない範囲では土圧は鉛直方向と水平方向で圧力が異なるのに対し、高流動SFRCを打設した状態は覆工のないトンネルが内圧を受ける状態と同じであり、あらゆる方向に同一の圧力が作用している。圧力分布が異なる両者がバランスするにはトンネル周辺の地盤がせん断力を発揮しながら応力状態を変える必

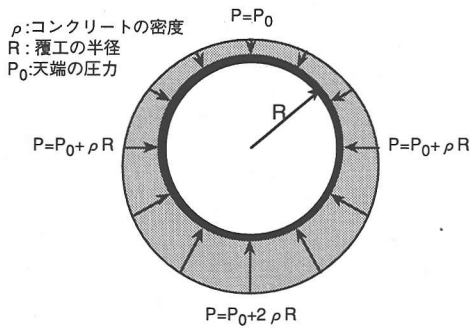


図-4 まだ固まらない高流動コンクリートの圧力分布の概念図

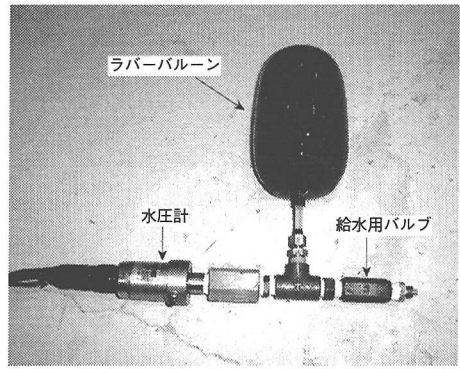


写真-2 土中に埋設したラバーバルーン

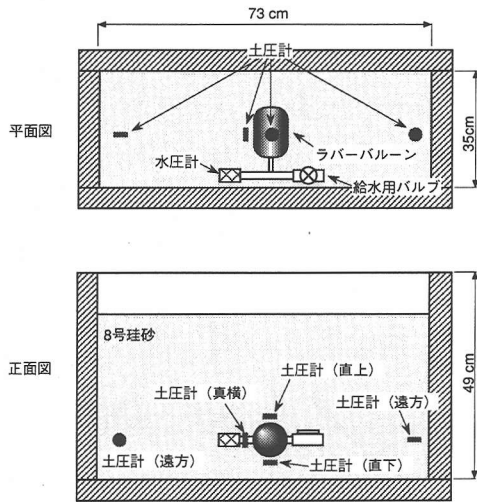


図-5 実験装置の概念図

要がある。したがって応力再配分を受けた地盤がその主応力差に対する強度を持っていることと、土圧再配分された応力状態が永久的に保持されることが前提条件となるが、ECLに作用する土圧が高流動SFRCの圧力の反力であると考えられればその形態は図-4に示す通りになる。図-4は液体とみなした高流動SFRCの圧力分布を概念的に示したものであるが、打設された高流動SFRCの圧力は深度方向に向かってコンクリートの密度に応じた勾配を持つ分布となるため、その反力である土圧もコンクリートの圧力に影響を受けて変化(土圧の再配分)せざるを得ないというのが本研究での基本的な考え方である。

3. ラバーバルーンを用いた土圧の再配分実験

ECL周辺地盤の土圧の変化を実験的に確認するため、地盤が不透水性の膜で覆われた液体(水を封入したラバーバルーン)により保持されている状態を再

表-1 実験条件

	地盤材料	乾燥密度 (g/cm ³)	バルーンの土被り (cm)	地下水
ケース1	8号珪砂	1.27	25	なし
ケース2		1.30	30	なし
ケース3		1.26	20	なし
ケース4-1		1.26	25	なし
ケース4-2		1.26	25	あり

表-2 土圧計の配置状況

土圧計位置	直上	真横	直下	遠方	
	鉛直	水平	鉛直	鉛直	水平
ケース1	●	●		●	●
ケース2	●	●	●		
ケース3	●	●	●	●	●
ケース4-1	●	●	●	●	●
ケース4-2	●	●	●	●	●

現した遠心模型実験を行い、バルーン内部の水圧や周辺地盤の土圧の変化等を計測した。なお、モデル化においてラバーバルーンを用いたことによる地盤との境界条件が問題となるが、法線方向については液圧を伝達する肌落ち防止の役割をしているものであり、特に問題はない。一方、接線方向については、バルーン内部が液体であることからバルーン内側表面にせん断力が生じないことや、地盤の応力状態が初期状態からトンネル法線方向へ卓越した状態に変化することから、両者間にせん断力が発生してもその影響は小さいと考えられ、境界条件については問題はないと思われる。

(1) 実験装置・条件・手順

図-5に遠心載荷装置に搭載した実験装置の概念図を示す。土槽の内側の寸法は幅73cm、奥行き35cm、深さ49cmであり、8号珪砂を空中落打法を用いて詰めることにより模型地盤を作成した。ラバーバルーンは写真-2に示すようにネオプレンゴム製で、無負

表-3 8号珪砂の諸物性

土粒子密度 (g/cm ³)	2.657
最大密度 (g/cm ³)	1.56
最小密度 (g/cm ³)	1.15
平均粒径 D ₅₀ (mm)	0.16

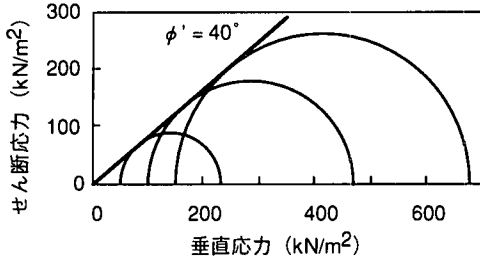


図-6 8号珪砂の破壊時のモールの応力円

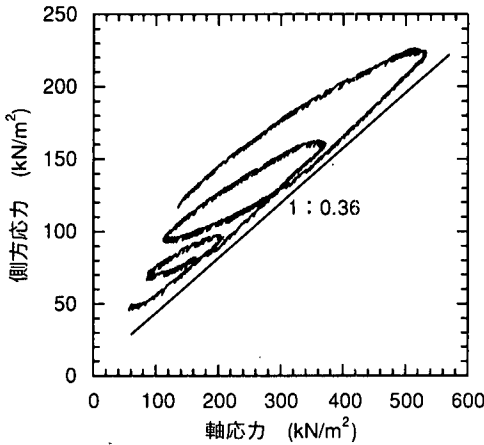


図-7 8号珪砂のK₀三軸試験時の軸応力と側方応力の関係

荷状態ではφ8cm,長さ14cmの円筒状のものであり,口元に給水用のバルブと内部の水圧を測定するための水圧計が接続してある。ラバールーン内を脱気水で満たした後,給水用のバルブを閉じるにより非排水状態にして実験を行った。

実験条件は表-1に示すとおりであり,バルーンの埋設深度等を変えて4ケースの実験を行った。ケース4については乾燥地盤で実験を行った後,同一の地盤に通水して飽和させ,その後引き続いて実験を行った。模型地盤内にはφ3cm,厚さ約1cmのひずみゲージ式の小型土圧計を表-2に示す位置に配置し,バルーン近傍やバルーンの影響のないと考えられる遠方の領域で地盤内応力の測定を試みた。なお,ラバールーン近傍に設置した土圧計とバルーンとの隔離は約1cmである。

遠心力の載荷ステップとしては,遠心加速度を98m/s²(10G)づつ段階的に増加させ,各段階で約1分間

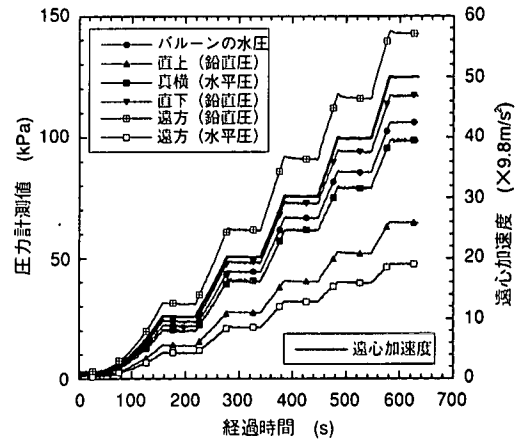


図-8 遠心載荷時の計測結果例(ケース3)

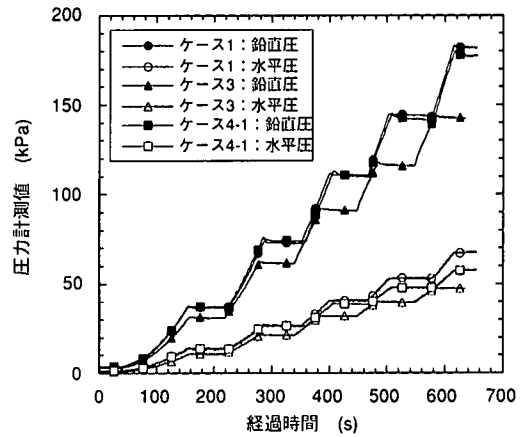


図-9 バルーンの影響のない遠方の領域での鉛直圧と水平圧の経時変化

保持させることを繰り返して490m/s²(50G)まで遠心加速度を上昇させていった。

(2) 模型地盤材料の力学試験

模型地盤に用いた8号珪砂の物性を表-3に示す。また,力学的特性を調べるために三軸圧縮(CD)試験およびK₀三軸試験を実施した。ただし,供試体の寸法はφ5cm,高さ約10cmであり,乾燥密度は遠心模型実験の模型地盤より多少高く1.35g/cm³程度である。図-6に破壊時のモールの応力円を示す。図から分かるように,実験に用いた8号珪砂供試体の排水条件下での内部摩擦角は40°であった。図-7はK₀三軸試験結果であり,K₀状態での軸応力と側方応力の関係が示してある。試験は応力の増加および減少段階を繰り返して行ったが,処女荷重段階(正規圧密状態)での軸応力と側方応力の比はほぼ一定であり,約0.36になった。これは,CD試験で求めた内部摩擦角40°

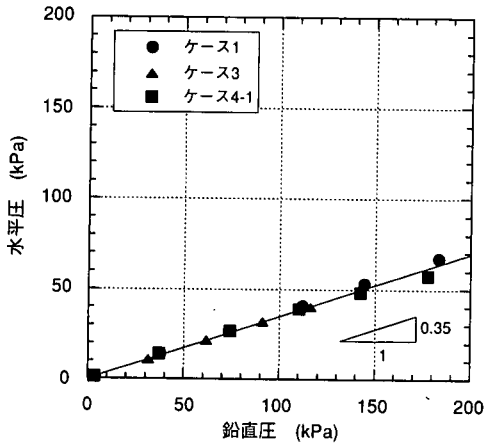


図-10 バルーンの影響のない領域での鉛直圧と水平圧の関係

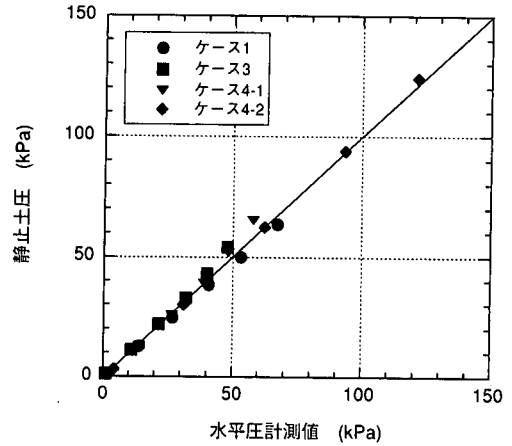


図-12 バルーンの影響のない領域での静止土圧(計算値)と計測値の比較

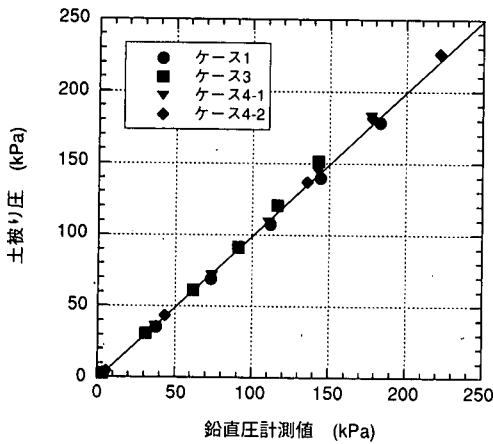


図-11 バルーンの影響のない領域での土被り圧(計算値)と計測値の比較

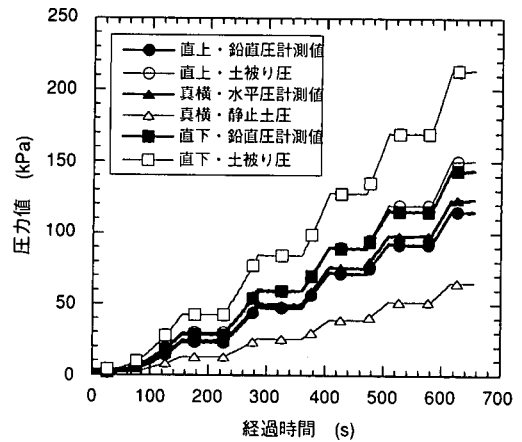


図-13 バルーン近傍土圧の計測値と計算値の比較(ケース4-1)

を用いてJakyの式⁵⁾で推定した K_0 値(0.357)と良く対応していた。

4. 実験結果

図-8は遠心载荷時の各計測値の経時変化の例(ケース3)であり、すべての計測値が遠心加速度の変化に伴って変化している。したがって、模型地盤内の応力は遠心加速度の変化に伴った変化が生じていると考えることができる。図-9はラバーバルーンの影響を受けないと考えられる領域(遠方)に設置した土圧計の計測値の経時変化である。鉛直圧および水平圧ともに土被りの等しいケース1とケース4-1は同等の値になっており、土被りが小さいケース3はそれよりも値が小さい。図-10は図-9で示したデータのうち遠心加速度を $98\text{m/s}^2(10G)$ 毎に保持したときの計

測値を鉛直圧と水平圧の関係で示したものである。両土圧の計測値は直線的な関係を持っており、その比(傾き)は約0.35であった。図-11は鉛直圧の計測値と土圧計の深度での鉛直圧の計算値(以後、土被り圧とする)を比較したものであり、図-12は水平圧の計測値と、土被り圧にJakyの式から求めた K_0 値0.357を乗じて求めた計算値(以後、静止土圧とする)を比較したものである。ただし、図には地盤を飽和させてあるケース4-2の値も示してあるが、このケースの静止土圧は土被り圧の有効応力成分のみに K_0 値を乗じた。図から明らかのように鉛直圧および水平圧の計測値はそれぞれの計算値と良く対応しており、バルーンの影響のない遠方の領域では模型地盤内の応力は鉛直方向が土被り圧になり、水平方向がほぼ静止土圧相当になっていると考えられる。

図-13はバルーン近傍の土圧の計測値と計算値を示したものであり、直上および直下の計算値は前述の

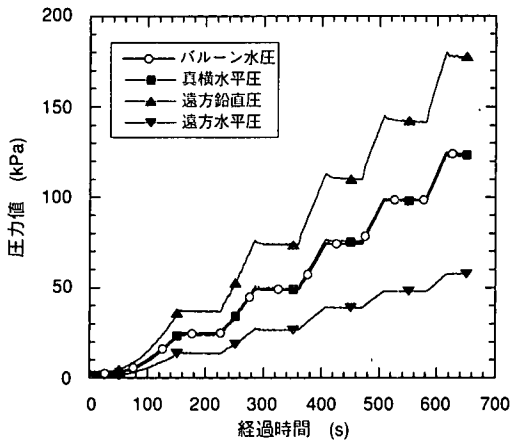


図-14 バルーン中心深度での各圧力計測値の比較 (ケース4-1)

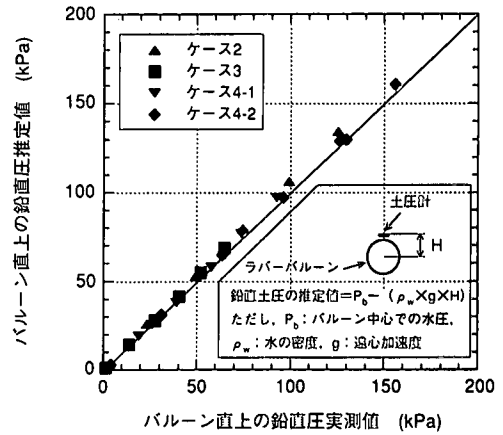


図-16 バルーン直上の土圧計の計測値とバルーン水圧からの推定値との比較

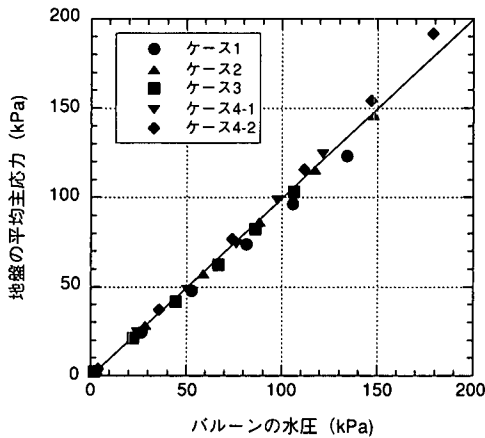


図-15 バルーン水圧の計測値と同深度の地盤内平均主応力の計算値の関係

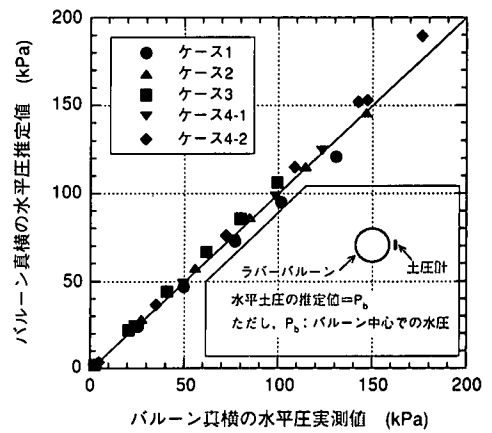


図-17 バルーン真横の土圧計の計測値とバルーン水圧からの推定値との比較

土被り圧を用い、バルーン真横は静止土圧を示した。バルーンの直上および直下の鉛直圧計測値は土被り圧に比較して値がかなり小さく、バルーン真横の水平圧計測値は静止土圧に比較してかなり値が大きい。これはバルーンの影響により土圧の分布が変化したことを端的に示すものである。図-14はバルーン中心での水圧とバルーン真横の水平圧およびバルーンの影響のない領域での鉛直圧と水平圧を示したものであり、これらの計器はほぼ同一の深度に設置されている。バルーンの水圧は同一深度での土被り圧と静止土圧の中間的な値を取っており、また、バルーン真横の水平圧とほぼ同じ値になっている。そこで、図-15ですべてのケースのバルーン内の水圧と同深度での土被り圧と静止土圧の平均値を比較した。ただし、ケース4-2は有効応力成分の平均値に水圧の計算値を

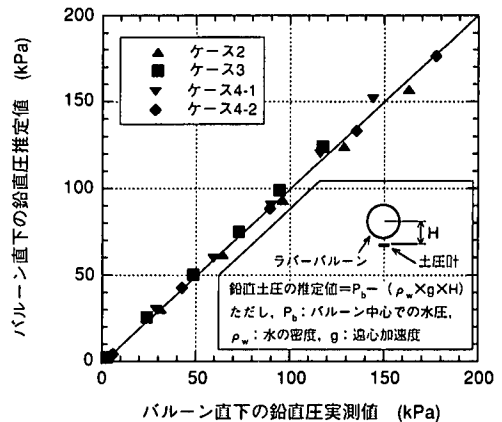


図-18 バルーン直下の土圧計の計測値とバルーン水圧からの推定値との比較

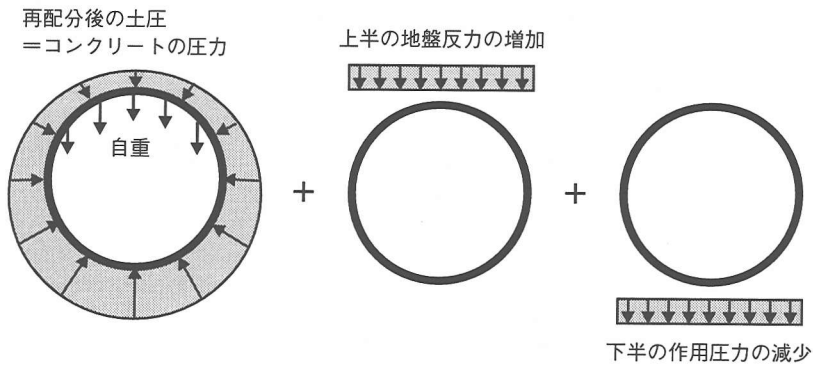


図-19 コンクリートの圧力と地盤反力の変化による力の釣り合いの概念図

加えることにより全土圧として示している。図から明らかなように、すべてのケースで両者は良く一致しており、バルーン中心深度での水圧は同深度での地盤の土被り圧と静止土圧の平均値になっていると考えられる。

図-16～図-18は先に述べたようにバルーン中心での水圧が同深度での土被り圧と静止土圧の平均値(平均主応力)と等しいことを前提にし、バルーン直上および直下までの位置による違いを補正した値とバルーン近傍で計測した土圧の計測値を比較したものであるが、計測値と計算値は良く一致している。不透水性の膜に覆われた液体が地盤を支持する場合の土圧再配分の形態は、液体の圧力に支配されたものと一致することが明らかとなった。

5. 高流動SFRCによる土圧再配分と覆工に発生する断面力の検討

(1) 覆工に発生する断面力の試算の概要

前述の遠心載荷実験結果より不透水性の膜で覆われた液体の存在により再配分された土圧はその液体の圧力に支配されることが明らかとなった。したがって、掘進直後のECL周辺の土圧もまだ固まらない状態でのコンクリート圧の反力であるとすれば、その分布は図-4に示したようになる。なお、この圧力分布は内型枠が撤去されるまでは変わらないと考えることができる。なぜならば、地盤にひずみが生じない限り土圧分布は変わらないからであり、剛性の高い内型枠で支持されている状態では地盤に変形が生じ得ないと考えられるからである。そこで図-4に示したような土圧分布による覆工に発生する断面力の試算を行った。

覆工に作用する外力の考え方では、図-19に示すよ

うに再配分された土圧分布とコンクリートの自重の他に、この荷重だけでは上下方向の力の釣り合いにおいて上方向の力(浮力)が卓越する事になり、浮力を消去するために下方向の力を考慮する必要がある。なお、この浮力は覆工体が密実な場合の重量と同じ値であり、浮力を解消するための力は内型枠が設置されている状態では内型枠を介して後方のすでに硬化している覆工体から伝達されるが、内型枠が外された状態では覆工体に対する地盤反力の変化として生じると考えられる。そこで計算では浮力によってトンネルは剛体的に移動すると仮定し、そのときの地盤反力係数は載荷側と除荷側で等しいと仮定した。つまり、上半と下半で大きさが同じで下向きに等分布荷重を作用させて浮力分をキャンセルした。なお、浮力分のキャンセル方法としては上半の地盤反力のみで受ける考え方もあるが、今回提案した方法は実際の現象に近く合理的である。

覆工体の断面力は弾性理論でのリングの公式⁶⁾を基に計算した。この公式は慣用計算法の断面力を求める式の基にもなっているものであり、リングに各種の荷重が作用したときの断面力を示すものである。なお、図-19の左図に示すような半径方向の荷重が位置に応じて増加するような不等分布荷重が作用した場合の解については、「半径方向に等分布荷重が作用する場合」の解を用いて周回積分することにより以下のような理論解が求められる。なお、計算式の詳細については今後論文等でさらに報告する予定である。

$$M = \frac{1}{4} \rho_{con} R_0^3 (-2 + \cos \theta + 2\theta \sin \theta) \quad (1)$$

$$N = -P_{top} R_0 + \frac{1}{4} \rho_{con} R_0^2 (-4 + \cos \theta + 2\theta \cos \theta) \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{4} \rho_{con} R_0^2 (2\theta \cos \theta + \sin \theta) \quad (3)$$

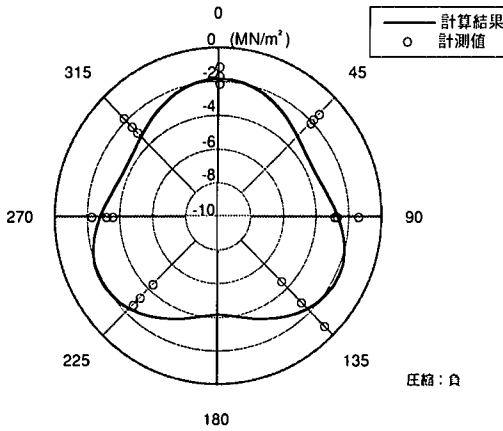


図-20 覆工内縁応力の計算値と計測値の比較（断面1）

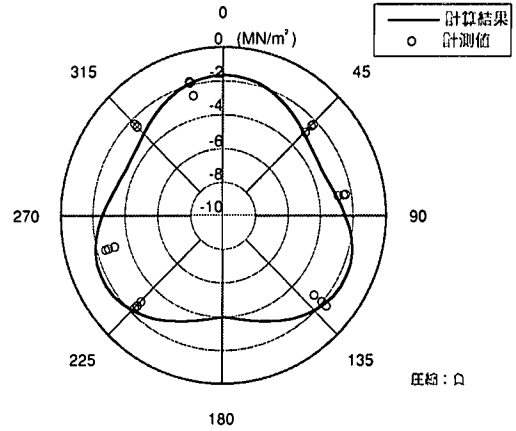


図-21 覆工内縁応力の計算値と計測値の比較（断面2）

ただし、軸力：引張を正とする、 R_0 ：トンネル半径、 θ ：天端から時計回りの角度、 ρ_{con} ：コンクリート密度、 P_{top} ：天端でのコンクリート圧

断面において計算値と計測値が良い対応を見せたことは今回の考え方の妥当性を示唆するものだと考えられる。

(2) 岡南共同溝工事での覆工内縁応力計測値と試算結果の比較

今回提案した土圧再配分の考え方による断面力算定方法の妥当性を検討するために、前述した岡南共同溝での応力解放法による覆工体応力の計測結果³⁾と比較を行った。応力解放法の計測方法は参考文献²⁾に詳しく述べてあるが、覆工内側の表面にひずみゲージを貼付して周辺に溝を切削し、解放されたひずみ量から作用応力を推定するものである。

計算条件は岡南共同溝の施工時の実績に準拠し、掘削外径 6.6m、トンネル内径 5.9m、コンクリート密度 2.3t/m^3 とした。なお、その他の施工条件としては土被りが GL-11.4m ~ GL-16.7m であり、全断面において礫径 $\phi = 50 \sim 150\text{mm}$ が主体の洪積砂礫層を掘進している。計算上のもう一つの入力データであるコンクリート圧については、計測が断面 1（230リング付近）と断面 2（1215リング付近）の 2箇所で行っており、各断面の実績値よりクラウン部でそれぞれ 233kPa および 212kPa とした。なお、応力解放法による計測は覆工打設後 1年以上が経過した時点で実施し、各断面付近で 3回ずつ行っている。

図-20 および 21 に応力解放法により推定された覆工内縁応力と土圧再配分を考慮した場合の計算値の比較を示すが、両断面とも土圧再配分を考慮した場合の計算値は計測値と良い対応を見せている。今回の計測データは多少のばらつきがみられるように、応力解放法の技術もまだ完成されているとは言えず、今回の計測結果との比較だけで土圧再配分を考慮した考え方の信頼性を確立することはできないが、両

(3) 覆工断面力の試算

土圧再配分を考慮した計算結果との比較のために慣用計算法による断面力の計算も行った。計算条件としては覆工体は内径 10m、覆工厚さ 40cm とし、コンクリートの密度は 2.3t/m^3 とした。計算において想定した土被り厚は、0.5D、1.0D、1.5D、2.0D であり、慣用計算法では各ケースにおいて全土被り圧を考慮し、また土圧再配分を考慮した計算でも同様に全土被り圧をコンクリートの圧力により支持させると考えて慣用計算法と同じ全土被り圧を想定した。基本的に対象地盤は「締まった砂質土」⁴⁾を想定し、地盤密度を 2.1t/m^3 、側方土圧係数を 0.5、地盤反力係数を 30MN/m^3 と仮定して計算を行った。なお、慣用計算法では覆工の自重と浮力の差を上方向からの荷重に加えることによって浮力考慮を行った。

図-22は高流動コンクリートによる土圧再配分を考慮した場合と慣用計算法により算出した曲げモーメントの分布を示す。図は左側に土圧再配分を考慮したものを示し、右側に慣用計算法によるものを示した。慣用計算法では土被り比が 0.5D から 2.0D に増加するにしたがい曲げモーメントの値が増加している。一方、土圧再配分を考慮したものは図で線が 1本しか書かれていないように、すべての土被り圧に対して曲げモーメントの値は同一になる。これはこの考え方の特徴の一つであり、曲げモーメントは覆工に作用する圧力の偏差から生じるため、今回提案した土圧再配分を考慮した解析では天端圧に影響されずコンクリートの圧力勾配とトンネル径だけで決まる。両解析では土圧の分布形態が異なるため曲げモーメ

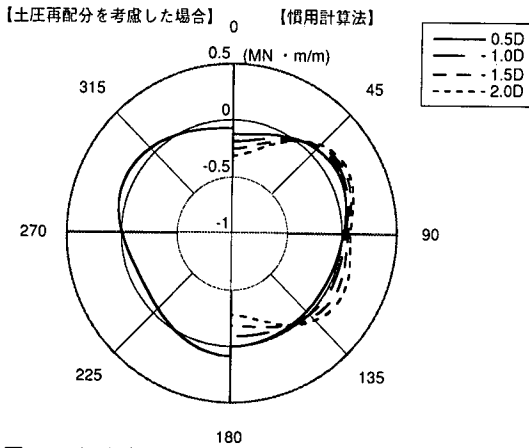


図-22 土圧再配分を考慮した場合と慣用計算法による曲げモーメントの比較

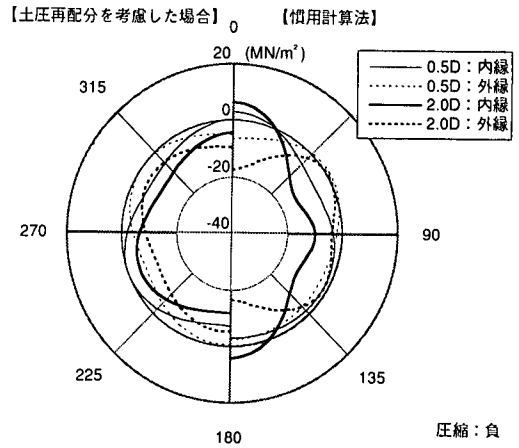


図-24 覆工に発生する応力の比較

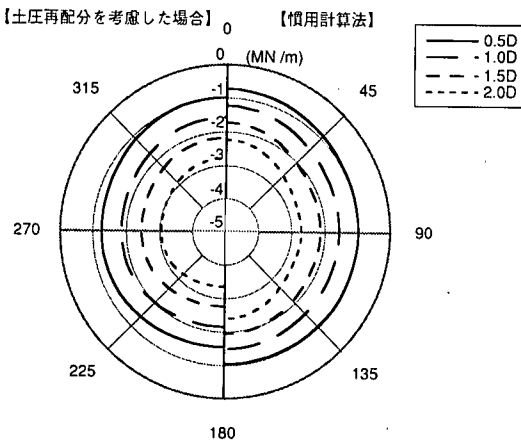


図-23 土圧再配分を考慮した場合と慣用計算法による軸力の比較

(4) 土圧再配分の考え方の適用性

高流動SFRCを用いたECLトンネル周辺地盤の応力状態が高流動コンクリートの圧力で規定できるという考えは、これまでの設計荷重の考え方とは異なることからその適用性が問題となる。

土圧再配分を考慮した断面力の計算では打設したコンクリートの圧力によって曲げモーメントは変わらず、軸力にのみ影響する結果となった。図-24は土被り比が0.5Dおよび2.0Dの時の断面力から求めた縁応力をそれぞれの解析について比較したものであるが、慣用計算法では土被り比が大きくなるほど引張応力が大きくなるのに対し、土圧再配分を考慮した計算では圧縮応力が卓越している。つまり、人為的に制御できる高流動SFRCの圧力を地盤が受働破壊しない、もしくは割裂破壊しない範囲で高めに設定できれば、覆工の設計計算上有利になると考えられる。

一方、覆工に作用している外力の経年変化については別途検討する必要がある。つまり、今回提案した計算方法により求められた覆工応力は施工直後の状態を考慮したものであり、施工後にトンネルが受ける様々な環境の変化により覆工の応力が変わる可能性については考慮していない。これら環境の変化としてはコンクリートの乾燥収縮やクリープ等内的要因によるものと、トンネル周辺における掘削や地震等の外的要因によるものがある。内的要因については施工後約1年経過した後に行われた岡南シールドの応力実測値が計算値と良い対応を見せたことから影響は小さいと思われる。また外的要因については覆工の設計法に関わらず別途検討すべき事項であろう。

ントの値に関しては明確な比較は難しいが、今回計算した範囲では土圧再配分を考慮した場合の方が値が小さい傾向にあり、土被り圧が大きくなるほどその差が大きくなる。図-23は軸力の分布を示したものであるが、軸力の値は慣用計算法に比較して土圧再配分を考慮した場合のものの方が値が明らかに大きい。これは土圧再配分を考慮した場合は半径方向の圧力が外力の主体になっていることの表れである。

さらに、慣用計算等で用いられてきた土圧については地盤の物性値や地盤条件に応じたゆるみ土圧など様々な条件を考慮する必要がある、その取り扱いについては高度な技術的判断が必要であるが、今回提案した手法ではコンクリートの圧力が決まれば土圧は一義的に決定されると考えるためにこれまでのように様々な条件を考慮する必要がなくなり、また合理的に設計できるようになると考えられる。

6. 結論

高流動 SFRC を用いた ECL トンネルの覆工に作用する土圧を明らかにする目的で、まだ固まらない状態の高流動 SFRC は地盤へは浸透しないが液体の如く挙動するという特性に着目した土圧再配分の考え方を提案した。

この考え方を検証するために行った遠心模型実験では掘進直後の ECL トンネルを不透水性の膜で覆われた液体(水を封入したラバールーン)としてモデル化し、ラバールーン内の液体圧および周辺地盤の土圧変化を計測した。実験から得た知見は以下の通りである。

- ①ラバールーンの影響を受けない位置では、鉛直土圧および水平土圧が土被り圧および Jaky の式や K_0 三軸試験から得られる静止土圧係数を用いた計算値とほぼ等しいのに対し、ラバールーン周辺の土圧はラバールーンの水圧に近い値を示す。したがってその値は液体の密度および高さの違いにより規定できる。
- ②無負荷状態のラバールーンを埋設した場合、土圧が再配分された後のラバールーンの水圧はその中心深度で計算される鉛直土圧と水平土圧の平均値(平均主応力)になる。

また、今回提案した土圧再配分の考え方にもとづき覆工に発生する断面力の解析を行った。解析ではトンネル上下方向の荷重のアンバランス分をトンネルの浮上による地盤反力とそれと同等の土圧低減分を考慮することにより消去した。解析結果を岡南共同溝工事で行われた応力計測結果および従来用いられてきた慣用計算法による計算結果と比較した。得られた知見は以下の通りである。

- ③今回提案している土圧再配分を考慮した計算結果が岡南共同溝において行われた応力解放法による覆工内縁応力の計測値と良い対応を見せた。
- ④土圧再配分を考慮した計算結果と、ほぼ同じ荷重条件で計算した慣用計算法による結果を比較すると、土圧再配分を考慮した方が曲げモーメントでは小さく、軸力は大きくでる。
- ⑤土圧再配分を考慮した計算では、コンクリート圧力の変化が覆工の曲げモーメントに影響せず、軸力にのみ影響する。

謝辞:本研究を実施するにあたり、岡南共同溝工事関係者の方々より貴重なデータおよびご意見を頂きました。謹んで感謝いたします。

参考文献

- 1) ECL 工法ハンドブック, ECL 協会編, 1999.
- 2) たとえば, 原田俊作, 渋谷都男: ECL 工法入門(最終回) 施工実績 岡南シールド工事, トンネルと地下, 1996.12.
- 3) 大寺伸幸, 真下英人, 関伸司: 応力解放法を用いた場所打ちライニングの応力計測, 土木学会第 54 回年次学術講演会 III -B pp.210-211, 1999.
- 4) トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説, 土木学会編, 1996.
- 5) 山口柏樹: 土質力学, 技報堂出版, 1990.
- 6) 構造力学公式集, 土木学会編, 1986.

(2000.9.13 受付)

EARTH PRESSURE REDISTRIBUTION AROUND ECL TUNNEL LINED WITH SELF-COMPACTING CONCRETE

Hirokazu SUGIYAMA, Shigeru GOTO and Toru KONDA

Centrifuge model tests were conducted to clarify the mechanism of redistribution of earth pressure around ECL tunnel. The tunnel was modeled by rubber balloon filled up by deaired water so that the steel fiber reinforced concrete used for ECL could be regarded as liquid before hardening. And some cases of ECL tunnels were analyzed with the redistribution. Following conclusions may be drawn by these studies. (1)the earth pressures around the ECL tunnel were influenced by fresh concrete pressure intensely. (2)redistributed earth pressures were defined by concrete density, depth and pressure at the crown. (3)analysis results were nealy equal to the in-situ measurement at Kohnan Common Duct Work in Okayama.