

# AUSTRALASIAN TUNNELLING SOCIETY

## October 2010 No.10

### 【1】

繊維を正しく選択、使用するための繊維吹付けコンクリートコンクリートの適切な性能評価試験方法

Fibre sprayed concrete relevant test of characterization to choice the right fibre for the right used

#### 概要

長年、トンネルの一次支保やライニングの吹付けコンクリートには鋼繊維補強コンクリートが使用されている。近年、鋼繊維吹付けコンクリートの挙動に関する調査研究や試験がさまざまな国で行われている。その成果は鋼繊維吹付けコンクリート (SFRC) の性能評価に大いに貢献し、材料の特性をより理解し、それぞれの計画に応じて要求される最低限の効果を特徴付けることができるようになった。到達技術水準 (the state of the art) は良く知られており、安全に鋼繊維補強コンクリートを用いるための手本や性能に関する規準が多くの国際基準で示されている。最近では化学繊維も使われる。異なる繊維の工学的な強度や弱点はあまり知られておらず、混乱を引き起こしている。本論文は地山を保持するために鋼繊維およびポリマー繊維補強吹付けコンクリートを使用する際の重要な特性について述べ、異なる研究所から得られた最新の試験結果を示す。

#### 1. 鉄およびポリマー繊維の材料特性

##### 1.1 繊維のヤング係数

繊維による補強効果は繊維のコンクリートへの定着、引張り強度そしてヤング係数に依存する。

コンクリートの代表的なヤング係数は 30,000MPa、鋼繊維の代表的なヤング係数は 210,000MPa、ポリオレフィンの代表的なヤング係数は 3,000~10,000MPa である。

繊維が十分定着しているとした場合、繊維の伸張、コンクリートのクラック幅は鋼繊維よりポリマー繊維の方が大きい。これはコンクリートの耐久性に影響し、特に従来の補強 (鉄筋補強?) と組み合わせる場合は大きく影響する。

##### 1.2 繊維の引張り強度

代表的な引張り強度はピアノ線が 1,000~2,000MPa で、それに対し化学繊維では 300~600MPa である。

##### 1.3 繊維の密度

鋼繊維の代表的な密度は 7,850kg/m<sup>3</sup> でポリマー繊維は 910 kg/m<sup>3</sup>、水は 1,000 kg/m<sup>3</sup> である。ポリマー繊維は軽く、作業および安全上は好ましいが、水に浮くので表面近くでは繊維のリスク (刺さる?) がある。

##### 1.4 繊維の耐火性

鋼繊維は火災時の構造的な影響は小さい。破裂 (spalling) 効果の減少によって火災時の鋼

繊維補強コンクリートはメッシュ補強構造よりも良い（セグメントライニング）。鉄は 350～400℃までは工学的性能を保っている。化学繊維は温度が 50℃に達するとすぐに機械特性を失い、160℃では消失してしまう。化学繊維を用いた構造物は火災時にはすぐに補強効果をなくし、まったく耐荷能力をなくし、1時間のうちに危険な状況になる。

しかしながら、160℃付近で溶けるマイクロポリプロピレン繊維（単繊維、長さ 6mm、径 20  $\mu$  mm 以下）は耐火性能を向上させることが知られている。その理由が明らかになり、多くの人に受け入れられている。細かいマイクロ繊維は火災環境を越えると溶け、そのため加圧された蒸気が逃げる小さな孔が残る。その結果、ダメージが小さく、コンクリートの破裂（spalling）が生じにくくなる効果が考えられる。

マクロ化学繊維は同じ温度で溶けるが、必要な孔のネットワークを生じるほど細くない。さらに、繊維が溶けるので、繊維による補強効果を重視する建造物には向いていない。

### 1.5 耐酸化性

ポリマー繊維は表面に出てきても錆びることはない。鋼繊維に関する経験および調査結果：鉄筋やメッシュ筋のコンクリート被りは 30～40mm 必要であるのに対し、鋼繊維はたったの 1～2mm である。表面にある繊維の腐食はコンクリート表面の変色を招く。ただし、鋼繊維補強コンクリート構造の機械的性能には影響しない。開口幅 0.25mm 以下のクラックにある繊維は腐食しない（Brite Euram project）。変色が望まれない場合、亜鉛メッキした繊維が用いられる。

### 1.6 繊維の練り混ぜ性能

いくつかのマクロ化学繊維は練り混ぜ時に不規則に振動（fibrillate）する傾向がある。Fibrillate はトラックミキサーの中ですべての繊維が完全に破壊されるまで継続する。鋼繊維の場合は練り混ぜ時の品質低下が起きることはない。

### 1.7 生コンクリート、硬化コンクリートの繊維含有量

ヨーロッパスタンダード（EN）1471 は鋼繊維コンクリートの繊維含有量の測定方法を 2 つ規定している。方法 A は硬化したコンクリート供試体の繊維含有量を測定する方法、方法 B は生コンクリート供試体の繊維含有量を測定する方法である。多くのプロジェクトで品質管理が要求される中、ポリマーに対しては測定方法がなく、この点は課題である。

### 1.8 防水シート

ダブルシェルトンネルでは吹付けコンクリートとその内側に打設する覆工コンクリートとの間には吹付けコンクリートの凹凸に対する緩衝材としての織物を合わせた防水シートが設置される。吹付けコンクリート表面から突出した鉄繊維がビートを突き刺しことが懸念される。

C E T U（フランストンネル管理委員会）は 1993 年、繊維補強コンクリートに防水シート（600gr/m<sup>2</sup>）を設置し、水圧作用条件下で突き刺しテストを実施した。PVC シートと繊維補強コンクリートとの間に織物はあまり保護材にはならないことが判った。（DRAMIX タイプ RC65/35BN のテスト）

他の試験結果や多くの現場の施工実績では鋼繊維吹付けコンクリートと組み合わせも防水シートに特に問題がないことが明らかにされている。

いくつかのプロジェクトでは3 cmの非繊維コンクリートが採用されており、吹付けコンクリートの凹凸に関する問題は依然として残る。マクロポリマー繊維吹付けコンクリートが施工されていることには注視すべきである。マクロポリマー繊維は吹付けコンクリートの不均一性や凹凸を増加させる傾向があり、この問題についてはまだ議論の余地が残されている。

## 2. 鋼繊維およびマクロ繊維補強コンクリートの特性

繊維補強コンクリートは延性があることが知られている。繊維の効果は補強と networking の組み合わせである。鋼繊維の場合のコンクリートの主な特性変化：鋼繊維はもろいコンクリートを曲げ強度を低下することなく、大きな変形に抵抗できる延性材料へと変化させる。延性はコンクリートの機械的特性に応じて荷重の再配分と構造の高い曲げ抵抗性をもたらす。

### 2.1 吹付けコンクリートの一般的特性規準

荷重-たわみ曲線を得るために行う試験には通常、平板(600×600×100mm)が用いられる。衝撃たわみ試験に用いるスラブは600×600×100mmの型枠で作られる(EN14.488-5)。吹付けは厳密に、特に成分、機械、lance holder、吹付け機については施工時と同じ条件下で行う必要がある。

この研究では実際のライニングの挙動をシミュレートすることを試みている。吹付けコンクリートライニングの曲げ荷重耐力やエネルギー吸収性に関する知見を提供する。材料特性を決定する代わりに、構造の許容を解析するための固有の設計モデルが求められる。EN 平板試験の研究はそのステップを省略し、すぐにライニングのエネルギー吸収性と曲げ耐荷性を確認することができる。

静的な不静定スラブ試験は建設時の挙動を確認するための構造試験であることは明確であり、設計値に用いるための材料特性を決定する試験ではない。

この平板試験に基づき、3つのSFRCクラス(E500, E700, E1000)が定義された。

- 地山の sound 状態に対して 500 ジュール
- 地山の medium 状態に対して 700 ジュール
- 地山の difficult 状態に対して 1000 ジュール

これらの値は一次支保に対して指定される、コンクリートクラス C30/37 に対して提案されたもので圧縮強度が著しく小さいまたは大きなクラスに対しては望ましい値ではない。

圧縮強度が0以下の場合、安全に要求される同じレベルの困難さを保つために EN 基準による性能規準は増やすべきである。

平板試験はまた、異なる繊維のタイプや投入量の比較にも適用でき、破壊モードが同じ基準 EN14 487-1 の吹付けコンクリート、定義、仕様、適合に従ったメッシュ補強と繊維補強コンクリートとの比較ができる。この理由で性能規準がこの試験に基づいており、最近ではスチールメッシュと鋼繊維との比較(ヤング係数が同じ材料)のみに用いることが提案されている。

小さなクラックでの荷重伝達能力(小さなたわみやねじれ)に関する問題は最近、トンネル設計技術者によってはより重要になってきている。

マクロ化学繊維ではヤング係数が非常に小さいことや、観察される破壊モードから、平板試験は鋼繊維と化学繊維補強との比較には十分ではない。ポリマー繊維を用いる場合、残留強度など別の規準を追加するべきである。

## 2.2 残留強度：ワイドビーム試験で測定される補強効果

残留強度の決定には主に EN14651 が用いられる。鋼繊維補強コンクリートの試験方法：曲げ引張強度（線形限界）を測定する。試験の手順は Rilem TC162TDF 「繊維補強コンクリートの試験・設計」に示されている。

このヨーロッパスタンダードでは鋼繊維補強コンクリートの曲げ引張り強度の測定方法を規定しており、線形限界（LOP）と残留曲げ引張り強度値の決定方法を示している。この測定方法は長さ 60mm 以下鋼繊維を対象としている。また鋼繊維もしくは鋼繊維と他の繊維の組み合わせに対しても用いられている。FSRC を提案する請負者は性能評価試験の測定結果から FSRC が機械的な要件を満たしていることを示すことができる。試験方法をより改善するために次の要求を提案する。

- ・試験は特別ではない、普通の設備を備えた多くの試験所でも可能にする。
- ・寸法形状は EN14 488-5 に示されるエネルギー吸収試験のものと同じにする。

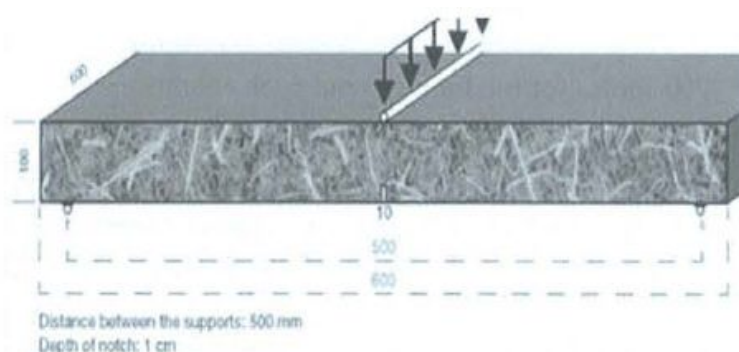
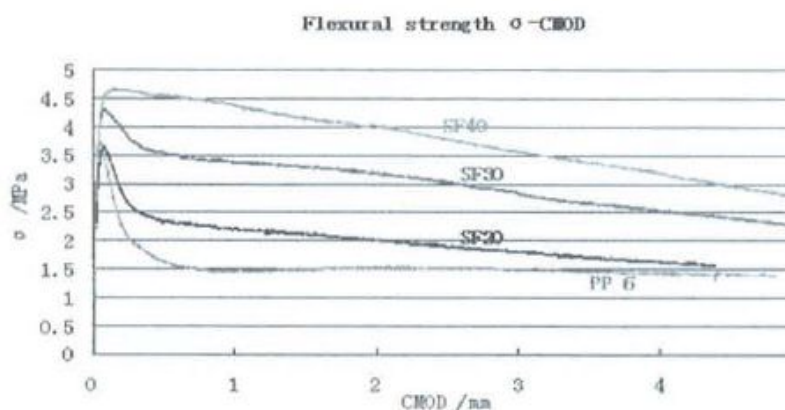


Figure 1: 3 point bending test

静的試験と動的試験とで統一した寸法形状を用いることで、現場の吹付けで同じ手順ででき、また梁試験よりも散らかることが少なくなる。



異なる CMOD (crack mouth opening displacement according to EN 14651) の結果

PP : マクロポリマー繊維 6kg/m<sup>3</sup>

SF20/30/40 : 鋼繊維 20 kg/m<sup>3</sup>、30 kg/m<sup>3</sup>、40 kg/m<sup>3</sup>

マクロ繊維の耐荷重能力は最初のクラック開口後すぐに 60%減少しており、6kg/m<sup>3</sup> の繊維は鋼繊維に比べて残留強度への寄与が小さい。マクロ繊維量を多くするとコンクリート練り混ぜ

のワーカビリティやポンパビリティに影響する。

### 2.3 鋼繊維およびマクロ化学繊維コンクリートのクリープ試験

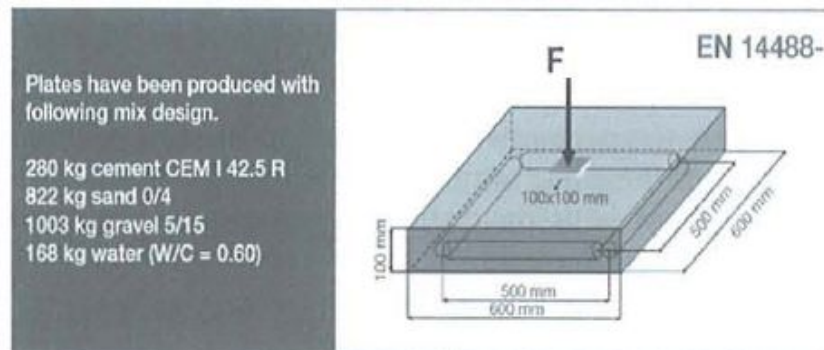


Figure 3: creep test — square panel according to EN 14488-5

試験はEN14488-5に従って変位制御で行われ、3mmのたわみ量を保つよう除荷される。現在、平板でもクリープ試験ができ、そこでは3mmたわむ時の荷重の60%を載荷する。たわみは1/100mm単位で測定し、グラフのY軸にプロットする。

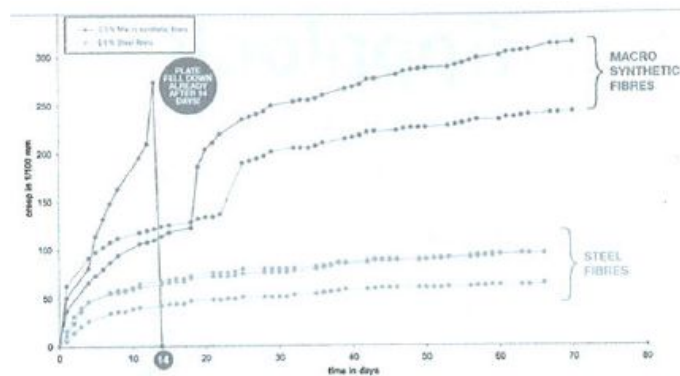


Figure 4: Creep result on square panel

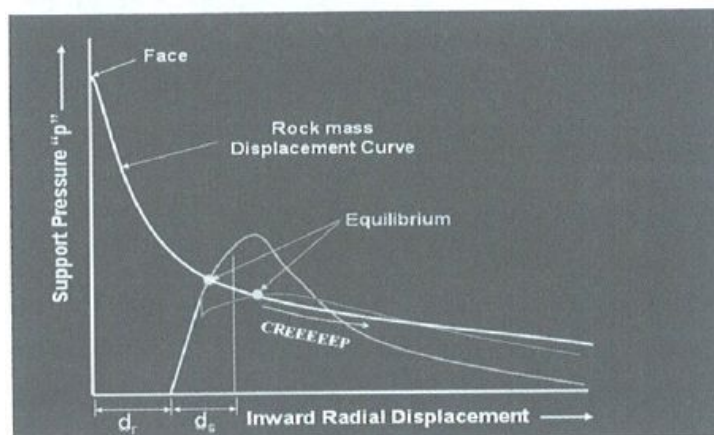


Figure 5: Curve support pressure- inward radial deformation

クリープ試験の結果：このタイプの材料は地山を安定化させたり、長期に生じるであろう変位を抑える顕著な補強効果は示さない。

## 2.4 鋼繊維コンクリートとマクロ化学繊維コンクリートの品質管理

2003年10月から、鋼繊維コンクリートの設計ガイドライン Rilem TC162-TDF が適用されている。

品質管理に関して、繊維含有量を確認するためには生コンクリートの洗い出し試験が行われる。鋼繊維の場合は磁石で取り除く方法もある。

## 3. 結論

トンネルの吹付けコンクリートの繊維補強には鋼繊維が信頼できる材料として長年用いられている。30年の経験が有効で、今では公的な国際基準が適用可能になっている。

鉱山の支保にはマクロ化学繊維もメッシュとの組み合わせでよく用いられる。しかしながら、次の理由から、構造的補強のためには鋼繊維のみが使用されている。

- ・ポリマーファイバーは165℃で溶け、火災時はマクロファイバーでは温度の上昇とともに“補強効果”消失する。
- ・コンクリートヤング係数が30MPaなのに対して、繊維のヤング係数は3-10MPaなので、コンクリート補強材としては十分でない。
- ・マクロ繊維はクリープ変形する。

技術的な要求と安全を確保とが整合するよう、明確な試験手順と性能規準が示されるべきである。

## 【2】セグメントトンネルライニングの3次元構造モデル—有限要素法ソフトを使って— 3 Dimensional Structural Modelling of Segmental Tunnel Lining Using Finite Element Software

### 概要

密閉式のシールドマシンで掘削されるトンネルはプレキャスト部材のコンクリートセグメントで支えられている。これまで、このタイプの支保、特にテーパ付きのセグメントにおいては円周方向の継ぎ目に沿った隣り合うリングの継ぎ手の挙動や、軸方向の継ぎ目に沿った挙動については考慮することなしに評価されてきた。

継ぎ目の機械的、幾何学的な特徴はトンネル支保構造の挙動に大きな影響を与える。現在、支保リングの構造的な評価をするために、理論式 (closed form solution) や2次元の梁—バネ構造モデルなどが用いられている。しかし、単純な2次元の評価ではリング間の相互作用や継ぎ目の挙動を十分考慮することができないので、正確な結果を得ることができない。特にトンネル支保の軸方向の挙動、軸方向継ぎ目に沿った回転 (rotation) に伴う支保の変形および円周方向継ぎ目に沿った相対変位について (は評価されない)。継ぎ手や継ぎ目の挙動についてさらに正確な挙動を表すためにはもっと全部を網羅した3次元FEM解析が必要とされる。本論文はリングや継ぎ目の挙動をいかに適切にモデル化することができるかについて示すことを目的としている。本論文では構造解析ソフト“Strabd7”を用いた3次元モデルの開発について述べている。荷重の仮定が導き出されたかについても述べている。また、従来の2次元梁バネモデルの結果との比較を行っている。

### 1. はじめに

荷重を受けているセグメント支保の挙動は現場打ちコンクリートの挙動とは大きく異なる。プレキャストのセグメントではリングの剛性および変形 (todefomation) 抵抗性は多くの要因に左右される。これら要因には、1リングのセグメント数、荷重作用下で予想される継ぎ目の回転 (rotation)、継ぎ目の物性、リング内において各セグメント間に導入される力、構築されたリングの幾何的な品質、リング間の相互作用などが挙げられる。

水平荷重が鉛直荷重よりも大きいもしくは小さな、一方向ではない地圧が作用する結果、プレキャストリングは伸び縮みする。このアンバランスによりリングには変形が生じる。それぞれ独立したリングの回転や継ぎ目のぐらつきによって、相対的変形は違ってくる。この変形特性の変化はそれぞれのリングの構造特性 (action) に影響を与えることになる。

リングの相対的な挙動は継ぎ手の挙動によって大きく左右され。軸方向の継ぎ目にテーパがつけられている場合、複雑な回転挙動やねじれにより発達する局所的な応力に特に注目すべきである。それゆえ、セグメントの設計には継ぎ目の挙動を考慮する必要がある、本論文では3次元FEM解析を用いてこれらの継ぎ目をどのようにモデル化するのかについて示す。

### 2. 従来の解析アプローチ

従来の解析手法は円形トンネルに荷重が作用した場合の構造終局状態および使用状態の挙動を決めるものである。理論式 (closed form solution) はセグメントの挙動を評価する最初の過程である。この方法ではライニングを一つの長円に変形すると仮定し、平板にあげられた

円孔の理論が用いられる。これらの式は応力が発生している平板の円孔（周り）の釣合い方程式に基づいている。Morgan、Muirwood and Curtis による式が発展してきた。方程式は仮定した荷重によって生じる最大軸力‘hoop’荷重と曲げモーメントを求めるためにライニングの剛性を考慮している。また、方程式はライニングの屈伸挙動を求めるためにも用いられる。

ライニングの変形を予測することにより、想定したセグメントの挙動が予測される。幾何学的釣合い（連続性？）を導入することで軸方向継ぎ目の回転（もしくは bird-mounting）を求めることができる。この計算は一般的に建設誤差（build tolerance）に対する許容値が含まれる。セグメントライニングのトンネルでは一般に、予測する bird-mounting の量を求めるために、想定される最も厳しい地山荷重条件の組み合わせに対して、ライニングの半径方向の変形量が絶対値で 1%以下であることをチェックするのが一般的である。1%はトンネルの BTS 基準に従って確立されたものである。

継ぎ目の挙動に関する知見により、理論式（closed form solution）による仮定とは別の方法でトンネルの構造的挙動を把握する方法が彼ら自身によって示された。

軸力の組み合わせを考慮した場合の継ぎ目の回転の計算値は、回転箇所を最大として継ぎ目面に対して非対称のひずみを生じる。この逆の（交互の）圧力分布はセグメントにたわみ（flexural）曲げを発生する。セグメントは鋼繊維または通常の鉄筋補強でこの曲げに抵抗できるように設計される。セグメントはまた、セグメント間の接触圧に関して、引張り破壊圧力も考慮して設計される。セグメントのリングを評価するためにもっと複雑な構造解析を使うこともできる。続く、梁-バネモデルによる計算は周辺地山の拘束効果を考慮したセグメントリングの挙動を予測する方法である。この方法を用いるためには、構造解析ソフト（Strand7 のような）によって数値モデルを作らないといけない。ライニングは梁要素が一連に連結し、想定した荷重が梁要素の端点に作用するモデルとしてモデル化される。これらの梁要素はグラウトや岩塊で構成される地盤圧縮バネによって拘束される。バネの剛性は荷重と変形の線形関係によって計算される。Duddeck と Erdman によって提案された関係式がよく用いられる。この単純化した 2次元の方法は継ぎ目の挙動を考慮するに多くの点で制約がある。継ぎ目を考慮する方法として、単純に軸方向の継ぎ目の数に比例してリングの剛性を低下させる方法がある。真の継ぎ目の挙動やリング構造への影響を把握するためには 3次元の方法を取り入れる必要がある。特に台形のセグメントのようにテーパ継ぎ目を詳細に検討する場合には必要である。

### 3. ケーススタディ

オーストラリアの主なプロジェクトの一部である水路（water conveyance）トンネルのライニングの設計に 3次元手法を適用したケーススタディが行われた。この計画は内径 4 m のプレキャストコンクリートセグメントで支保される TBM 掘削のトンネルである。

リングは台形もしくは平行四辺形の 6 つのセグメントからなるユニバーサルリングシステムによって設計された。

ライニングの水漏れ防止のため、継ぎ目にはエチレン・ポリエチレン・二重結合・モノマー（Ethylene Polythene Diene Monomer : EPDM）圧縮ゴムが用いられている。軸方向の継ぎ目は槍状ボルトを使って短い間隔で結合され、リングはジベルで互いを固定している。



#### 4. 3次元有限要素モデル

有限要素パッケージ“Strand 7”を用いて3次元モデルの開発が進められた。トンネルライニングを模した3次元有限要素モデルが構築された。そのモデルの特徴を以下に示す。

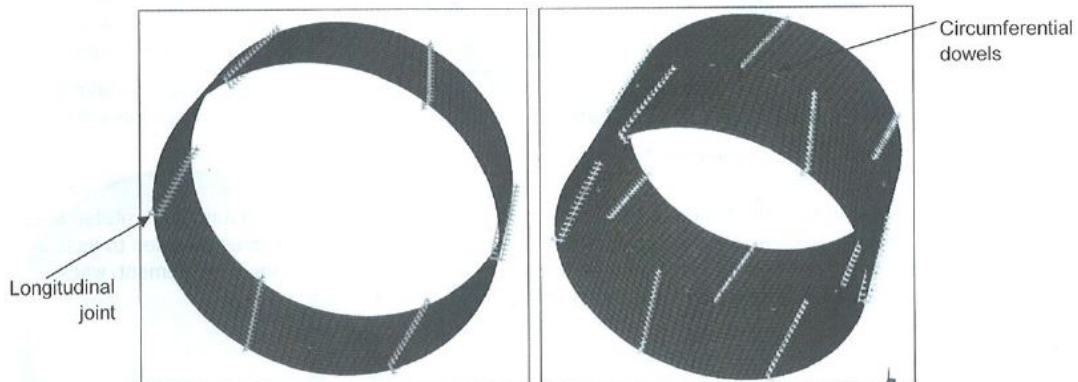


Figure 1: (a) 3D model of tunnel ring with tapered longitudinal joints (b) 3D coupled model.

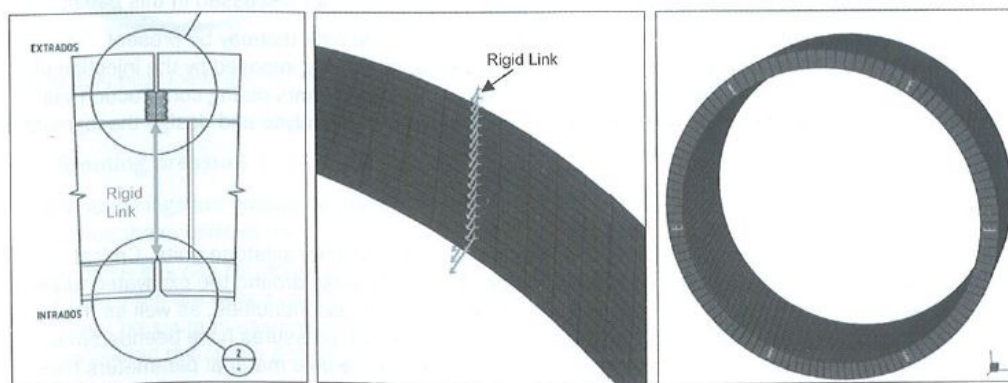


Figure 2: (a) Longitudinal joint (b) Rigid link used to model tapered joint (3) 3D solid model showing joint behaviour.

それぞれのセグメントは独立しており、個々のセグメントは4角形平面要素から構成される。これらのセグメントは軸方向の継ぎ目に沿って100度の角度でつながっている。隣接するセグメント同士の結合箇所には結合面 (bearing surface) の内側、外側の縁を軸に回転できるように、剛結合および接触要素 (contact elements) が用いられた。それぞれの接触面 (joint surface) に沿った剛結合は平面要素に垂直に伸ばされ、結合面の両縁につながる。結合面が分離し、(縁を軸に) 回転することができるように、圧縮のみ有効なバネによって結合されている。各セグメントは2400節点、287の梁、1800の平面、384の結合 (links) 要素で構成されている。

地山による拘束には図3に示すように平面要素の面支持、縁支持モデルを用いている。これらの支持はライニングの直接支持し、またグラウトされたライニングの接線方向のせん断変位に抵抗する。これらのバネ定数はDuddeckとErdmanの提案式による荷重-変位の線形関係を用いて計算される。

$$C_r = \frac{E_c}{R} \text{ [MN/m}^3\text{]} \text{ and } k = C_r \times A \text{ [MN/m]}$$

Where the constrained modulus is given by  $E_c = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$  [MPa]

Where the constrained modulus is given by

$E$ ,  $\nu$  = Young's Modulus and Poisson's Ratio of the ground

$R$  = equivalent tunnel radius

$A$  = area of rock that is to be represented by the equivalent radial spring. This is the distance between adjacent radial springs multiplied by unit length.

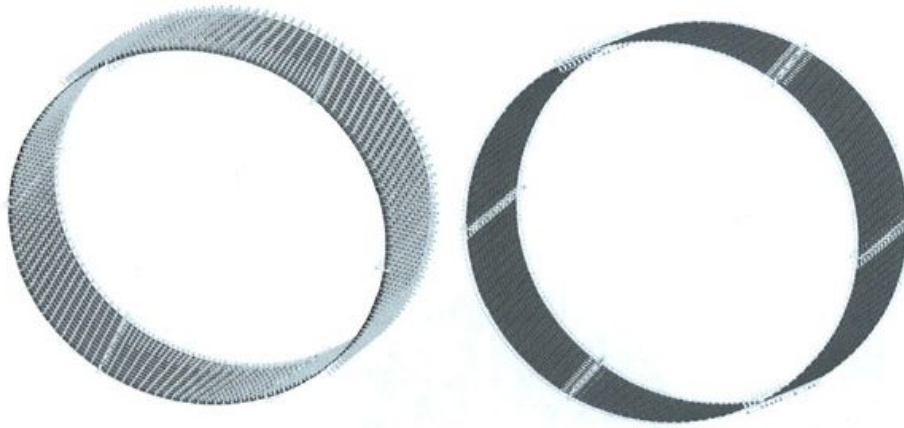


Figure 3: Confinement provided by rock (a) Face support (b) Edge support of plate element.

図 1 (b)に示すように、隣に 60 度回転させたリングをつなげることで、リングの結合効果についても評価された。リング間に円周状にあるダボは隣り合うリングの相互作用を評価するために取り入れられる。ダボは Strand7 にある、変位バネ、回転バネで表される特殊な結合要素を用いてシミュレートされる。

## 5. 荷重の評価

トンネルライニングの解析、設計はタイプや想定する長期荷重によって左右される。セグメントタイプのライニングの設計に用いる荷重について以下に述べる。建設時の評価をするためには設計に短期荷重が用いられるが、耐荷能力に関しては本論文では議論しない。

トンネルライニングへの長期荷重にはトンネル上部に生じる緩んだ地山の重量、地下水圧およびライニング背面へのグラウト注入圧がある。短期荷重としては建設中のセグメントに力が作用する要因として、セグメントの運搬、積み上げ、組み立て作業がある。セグメントトンネルの解析・設計に用いた荷重を次に示す。

### 5.1 地圧の導入

トンネルは砂岩、泥岩・シルト岩と変化する地山を直線的に貫くと解釈する。トンネル掘削に伴う、切羽周辺の地山変形によるゆるみ荷重が最も重要な (critical) 荷重である。この荷重のメカニズムはトンネルに沿った地山の地質、強度、硬さのみならず、不連続面の現れ方にも支配される。ゆるみ土圧はテルツァギーの土圧理論に基づいて決定された。ゆるみ土圧を計算する際、パラメータの値はゆるみ高さが最も高くなるように設定した。この荷重はトンネルスパン長全域で (1 セグメント長全域で?) 等分布に作用すると仮定した。

テルツァギーの土圧理論に基づいて計算したゆるみ高さを解析ソフト "Phase 2" を用いた FEM 解析結果と比較した。ライニングと周辺地山との荷重分担を評価するために地山変形曲線が描かれた。まずは、軸対称モデルで解析した。図 4 に解析モデルおよび結果の要約を示す。

モデル解析から全内空変位量の 90%以上の部分がライニングを設置する前に生じることとした。軸対称モデルの結果は先に述べたように緩み土圧を想定するのに用いた。

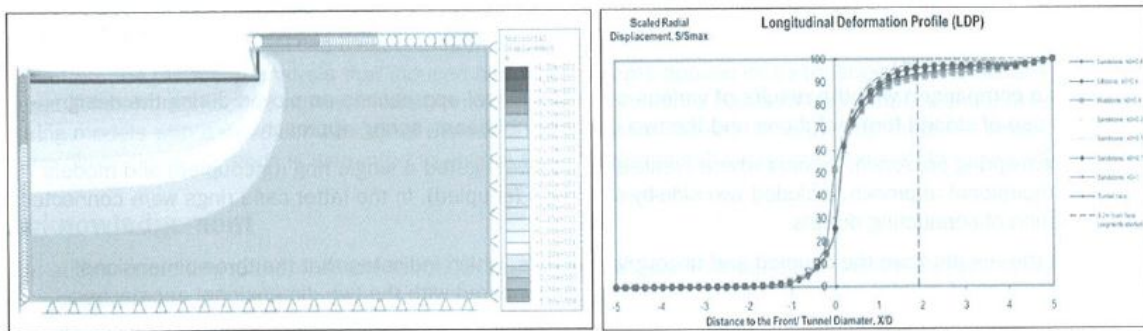


Figure 4: (a) Axisymmetrical modelling using Phase<sup>2</sup> software (b) vertical loading applied in 3D model.

## 5.2 地下水圧の導入

プレキャストセグメントのライニングは満水のトンネル支保の解を与える。この観点でライニングは全水圧に耐えるよう設計される。水圧は現実的に想定される条件を反映して計算される。

ライニング外周から等圧の水圧が作用し、すべてのケース（作業時、排水時）において地下水は（net）外圧を示す。これらの水圧はライニング構造を拘束する効果があり、ゆるみ土圧によって生じるようなたわみ挙動に対する抵抗性を向上させる。

条件の不確実性を担保するために（悪い状態を評価考慮するために？）、満水状態もしくはドライな状態の反映した荷重の組み合わせが評価された。

しかしながら、例えば、誤差や不均一荷重によって水圧が全体的に反対方向の影響を与えるような荷重の組み合わせがある。このようなケースでは設計静水圧が考慮され、このプロジェクトのために開発した3次元モデルに適用された。地下水は節理や断層など岩盤の不連続箇所を通じてつながっているため、地下水圧は全水圧を前提とする。

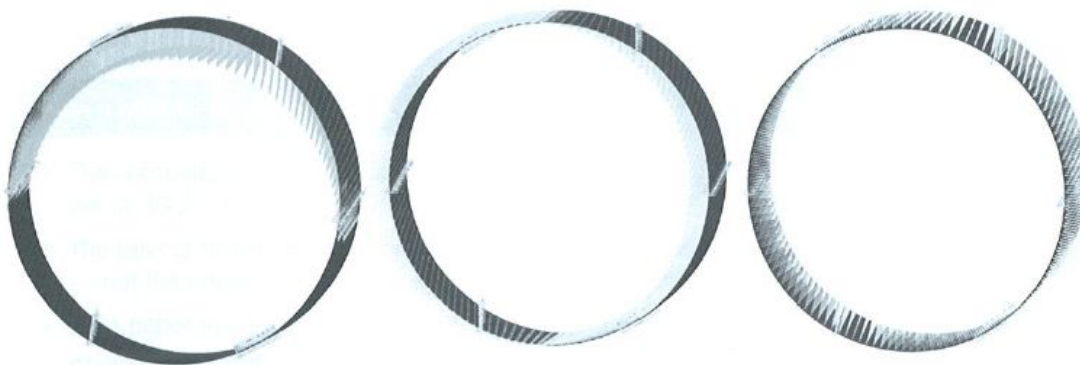


Figure 5: Applied loading in 3D model (a) Vertical rock loading (b) Lateral pressure (c) Hydrostatic loading.

## 5.3 グラウト圧

セグメントライニングはグラウトが行われる。グラウトは掘削面とリング外周との間に圧入される。

グラウトが行われると時間が経過してもリング外周にその圧力が残る。最大グラウト圧は地

下水圧プラス 1 bar に制御して行われ、その地下水圧はトンネル上部全水圧としている。

#### 5.4 荷重の組み合わせ

長期を対象とした場合、ライニングは最も厳しい荷重条件に半永久的に耐えられるように設計される。荷重は終局状態および使用状態の構造安定性を評価するため、AS1170、AS5100.5 に示されるアウトラインに沿って要因が挙げられる。

#### 6. 結果と考察のまとめ

表 1 は 3 次元モデルの結果のまとめである。図 6 は Strand7 の出力の一部である。表 1 はまた、理論式や 2 次元の梁-バネモデルを用いた方法で設計した結果との比較も示している。

梁-バネモデルの方法にはつながっていない一つのリングのモデルと 3 次元手法のように 2 つのリングをつないだモデルがある。後者は接合ダボ（の効果）を再現するようにリングがつけられている。

連結モデルおよび非連結モデルとも、3 次元モデルの結果では、曲げモーメントが 2 次元モデルよりも大きい。これは慣用的に用いられる方法では発生力を小さく評価していることを示している。

また、連結モデルでは鉛直方向の変形が大きくなる傾向がある。これは異なる回転（ポジション？）の隣接リングの 'drugging down' 効果によるものと思われる。最後に、軸方向継ぎ目のテーパはセグメントのジョイント付近に発生する曲げモーメントに影響する。図 6 に示されるように曲げモーメントは複雑で、2 次元モデルの手法では十分には評価できない。

Table 1: Summary of results from long term structural modelling of lining.

Description of analysis approach	Bending moment (kNm/m)	Axial force (kN/m)
Closed form solutions	41	775
2D bedded beam model (single uncoupled ring)	51	735
2D bedded beam model (two rings coupled)	62	748
3D plate element mode (single ring)	64	1084
3D plate element model (two rings coupled)	80	1065

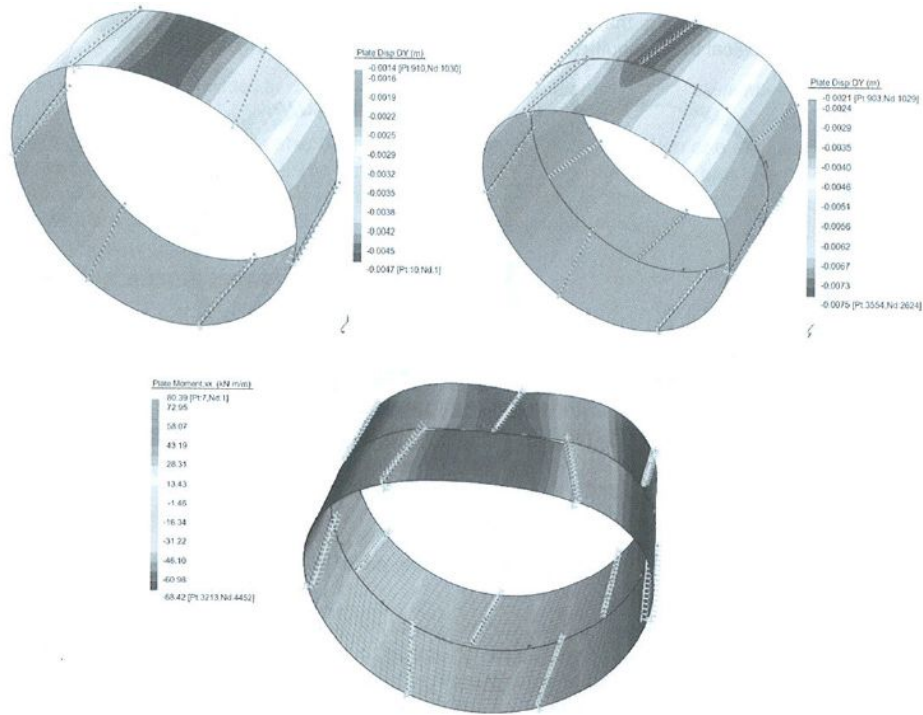


Figure 6: (a) Displacement vector in single ring (b) displacement vectors for coupled ring (c) Bending moment for coupled model (exaggerated diagram)

## 7. 結論

本論文で述べた、複雑な3次元モデル技術に関して、著者の見解としてはライニングの挙動は汎用的な2次元モデルの方法よりも、特に、テーパがついた軸方向継ぎ目がある場合には正確にリングの挙動を予測する。テーパは軸方向継ぎ目付近に生じる曲げモーメントに影響する。従来の理論式の解や2次元梁-バネモデルの結果と複雑な3次元モデルとを比較するため、異なる解析手法を行った。セグメントリングが十分な耐力を持つよう設計するには3次元モデルが適切であるケースがあった。