非鋼繊維補強吹付コンクリート適用による溶接金網省略の施工実績

Construction Results of Omitting Welded Wire Mesh by Applying Non-Steel Fiber Reinforced Shotcrete

守田　貴昭*　浜田　眞克**
Takaaki Morita　Masakatu Hamada
鬼頭　夏樹***　大谷　達彦****
Natsuki Kitou　Tatsuhiko Ootani

要　約

溶接金網は，吹付けコンクリートのせん断補強，施工時と施工後のはく落防止やひび割れ発生後のじん性の向上等を目的に使用されるが，一次吹付け状態で設置するため，作業中の肌落ち災害のリスクを伴う．そのため，非鋼繊維補強吹付けコンクリートを適用して溶接金網の省略を検討した．まず，室内試験を実施して「従来のプレーンコンクリート（金網有）」と同等以上の曲げ耐力となる「非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）」の配合（繊維混入量 0.75 vol.%）を決定した．その結果を踏まえ，実現場の非常駐車帯および坑口部で「非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）」を適用した結果，いずれの断面においても，「非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）」のトンネル挙動は「従来のプレーンコンクリート（金網有）」と大差なく，安全に施工できた．

目　次

§1．はじめに
§2．施工実績
§3．2 次元 FEM 解析
§4．まとめ

§1．はじめに

山岳トンネルにおいて，溶接金網は，吹付けコンクリートのせん断補強，施工時と施工後のはく落防止やひびわれ発生後のじん性の向上等を目的に設置される．当該トンネルにおいて，溶接金網は「坑口部の通常断面区間」では，上，下半部に設置し，「大断面区間（非常駐車帯）」では，CⅡの場合に上半部（90°）に設置する．しかし，溶接金網の設置には，一次吹付け状態で 30 分程度の時間を要するため，肌落ち災害のリスクが生じる．この課題を解決するために，非鋼繊維補強吹付けコンクリートを適用して溶接金網を省略することを検討した．

供試体を用いた曲げ試験等の室内試験を行い，非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）とプレーンコンクリート（金網有）を比較した．その結果，非鋼繊維の混入量を 0.75 vol.%とすることによって，強度発現後の非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）は，プレーンコンクリート（金網有）と同等以上の曲げ耐力および岩塊の抜け落ち防止性能を有することを確認した[1)]．

その結果を踏まえ，実現場（不破原トンネル：窪川佐賀道路のうち佐賀工区延長 6.2 km の一部として建設する延長 1831 m のトンネル）で溶接金網を省略して施工を行った．**表―1** に，不破原トンネルの工事概要，**図―1** に工事場所を示す．実施工では，施工時（掘削直後から収束まで）のトンネル挙動に着目し，非鋼繊維補強吹付けコンクリートによる溶接金網の代替性について検証した．また，2 次元 FEM 解析を実施して，溶接金網の有無によるトンネル挙動の相違について確認した．

§2．施工実績

2―1　施工概要

検証のため，「①非常駐車帯」および「②坑口部」で計測工を実施した．「①非常駐車帯」は，大断面トンネルに相当する非常駐車帯断面（掘削幅＝14.57 m，掘削断面積＝99 m^2）である．支保パターンは，CⅡ-L で施工した．「②坑口部」は，坑口部断面（掘削幅＝13.41 m，掘削断面積

*　土木設計部設計二課（現：浅谷トンネル（出））
**　西日本（支）不破原トンネル（出）（現：阿南 PS（出））
***　関東土木支社北陸支店
****土木設計部設計二課

＝88 m^2）である．支保パターンは，DⅢa で施工した．「①非常駐車帯」は土被り 115 m 程度，「②坑口部」は土被り 20 m 程度であり，地質はともに砂岩泥岩互層である．「②坑口部」においては，砂岩の亀裂に一部粘土化した泥岩が介在していた．**図―2** に地質縦断図と施工位置を示す．なお，比較検討のため，プレーンコンクリート（金網有）の施工を各断面にて 1 サイクル行った．

表―2 に，プレーンコンクリート（金網有）と非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）の配合表を示す．溶接金網は一般的にトンネル施工で使用される溶接金網（ϕ5×150×150）を設置した．非鋼繊維は，バルチップ MK（0.75 vol.%）を適用した．

図―3 に設計支保パターンと計測位置を示す．プレーンコンクリート（金網有）区間と非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）区間において，A 計測と B 計測（吹付けコンクリート応力，ロックボルト軸力）を実施した．このうち，ロックボルト軸力の計測は，天端部にロックボルトを施工する「①非常駐車帯」のみ実施した．

2―2　計測結果

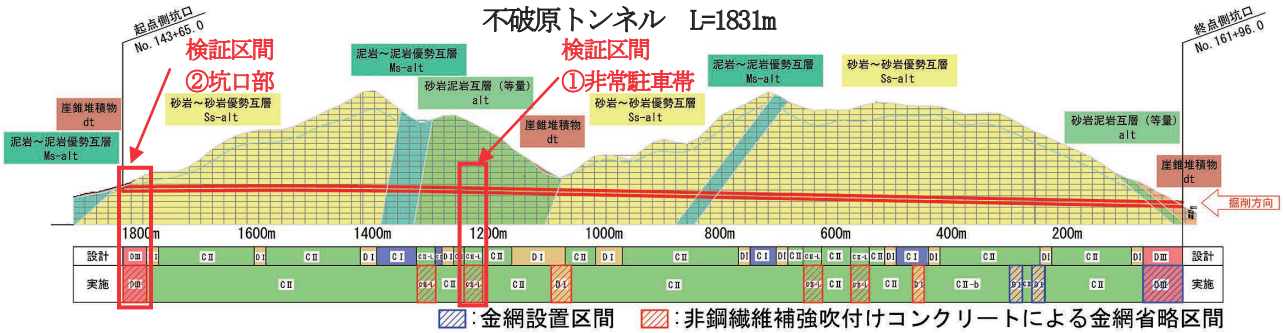
施工時（掘削直後から収束まで）のトンネル挙動に着目した検討を行うために，計測結果を整理した．**表―3**，**図―4**，**図―5** に吹付けコンクリートの応力計測結果を示す．なお，**表―3** は，吹付け後，24 時間経過時の応力度を示す．**図―4**，**図―5** は，吹付けコンクリート応力の収束までの経緯を示す．**図―4**，**図―5** には，A 計測結果も併せて示している．**図―6**，**図―7** は，変位と B 計測結果の収束値を示す．

表―1　工事概要

工　事　名	令和2-5年度 窪川佐賀道路不破原トンネル工事
工 事 場 所	高知県幡多郡黒潮町小黒ノ川～同佐賀地先
発　注　者	国土交通省　四国地方整備局
施　工　者	西松建設株式会社
工　　期	令和3年3月4日～令和6年10月31日
トンネル延長	L＝1831m
掘 削 断 面 積	A＝83.6～99.0m^2
掘　削　方　式	発破掘削方式
掘　削　工　法	補助ベンチ付き全断面掘削

この地図は，国土地理院長の承認を得て，同院発行の電子地図 25000 を複製したものである（承認番号 平 30 四複，第 106 号）中村河川国道事務所の許諾を得て掲載

図―1　工事場所



図―2　地質縦断図と施工位置

表―2　配合表

配合名称	設計基準強度 (N/mm^2)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単位量(kg/m^3)					
						水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤
						W	C	S	FA	G	Ad
プレーン（金網有）	18	15	22	53	59	212	400	946	64	699	4.8
非鋼繊維補強（金網無）				51	67	224	440	1058	48	542	6.16

(1)　①非常駐車帯

表―3 より，吹付け後，24 時間経過時に発生する応力度は，溶接金網断面の最大は 1.9 N/mm^2，非鋼繊維補強断面の最大は 2.7 N/mm^2 であり，非鋼繊維補強断面の方がやや大きいことがわかる．ただし，発生した応力度は，吹付けコンクリートに発現した初期強度（8.6 N/mm^2）に対し 3 分の 1 程度と小さい値である．また，**図―4** より，非鋼繊維補強断面は，上半内空変位（24 時間経過時）で最大 22.1 mm/日の比較的大きな変位が発生したが，一次支保工に変状は生じていない．

また，**図―6** より，非鋼繊維補強断面のロックボルト軸力の収束値の最大は 3.3 kN であり，設計耐力 176.5 kN に対して，小さい値である．吹付けコンクリート応力の収束値の最大は 6.3 N/mm^2 であり，設計基準強度 18 N/mm^2 に対して小さい値である．いずれの値も，設計耐力，設計強度に対して十分小さい値であることが分かる．

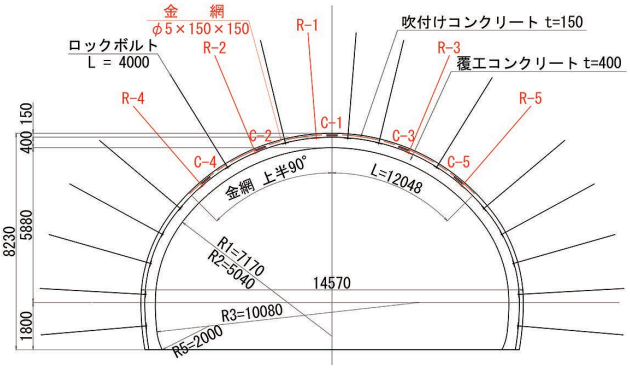
(2)　②坑口部

表―3 より，吹付け後，24 時間経過時に発生する応力度は，溶接金網断面の最大は 1.5 N/mm^2，非鋼繊維補強断面の最大は 1.1 N/mm^2 であり，両者の発生応力度は，おおよそ同程度であることが分かる．発生した応力度は，吹付けコンクリートに発現した初期強度（溶接金網：12.2 N/mm^2，非鋼繊維補強：10.6 N/mm^2）に対し十分小さい値である．また，**図―5** より，非鋼繊維補強断面では，天端沈下（24 時間経過時）で最大 6.4 mm/日の沈下が発生したが，一次支保工に変状は生じていない．

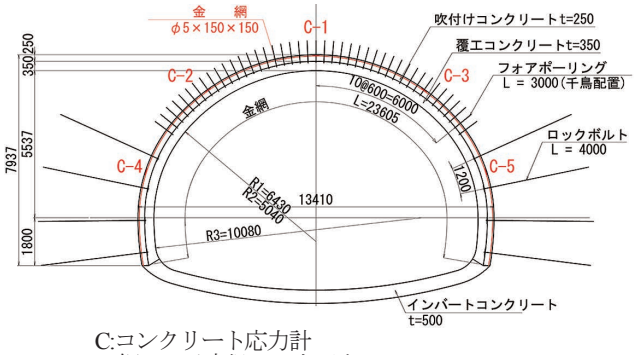
また，**図―7** より，非鋼繊維補強断面の吹付けコンクリート応力の収束値の最大は 1.8 N/mm^2 であり，設計基準強度 18 N/mm^2 に対して十分小さい値であることが分かる．

表―3　24 時間経過時の吹付けコンクリート応力度

対象区間	計測位置	計測開始24時間後の応力 (N/mm²)		初期強度 (24h) (N/mm²)	
		溶接金網	非鋼繊維補強	溶接金網	非鋼繊維補強
①非常駐車帯	C-1	-0.2	2.7	8.6	8.6
	C-2	0.4	0.7		
	C-3	0.1	2.2		
	C-4	0.2	-0.2		
	C-5	1.9	0.3		
②坑口部	C-1	0.6	0.2	12.2	10.6
	C-2	0.2	0.3		
	C-3	0.3	0.0		
	C-4	0.1	1.1		
	C-5	1.5	-0.4		

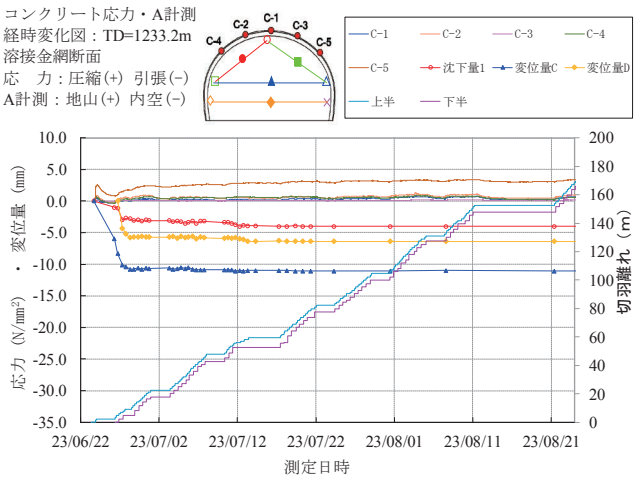


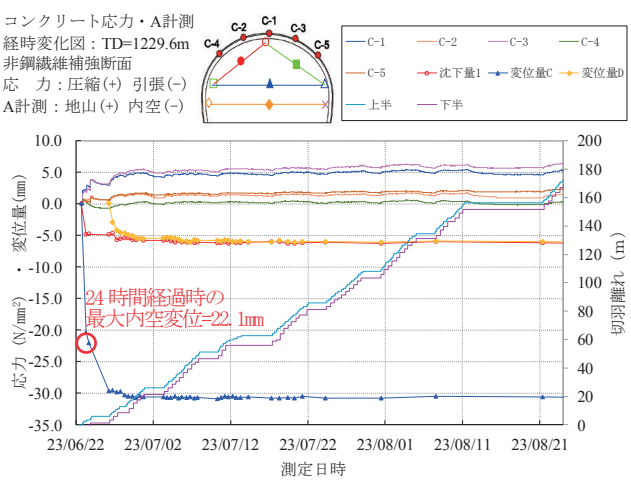
C：コンクリート応力計　R：ロックボルト軸力計
・鋼アーチ支保工：上半 H-150
・ロックボルト：耐力 176.5KN
・吹付けコンクリート：σ_{28}≧18N/mm²



C:コンクリート応力計
・鋼アーチ支保工：上下半 H-200
・ロックボルト：耐力 176.5KN
・フォアポーリング：D25（SD345）
・吹付けコンクリート：σ_{28}≧18N/mm²

図―3　設計支保パターンと計測位置（左：CⅡ-L パターン　右：DⅢa パターン）





図―4　①非常駐車帯の A 計測結果と吹付けコンクリートの応力（左：溶接金網断面　右：非繊維補強断面）

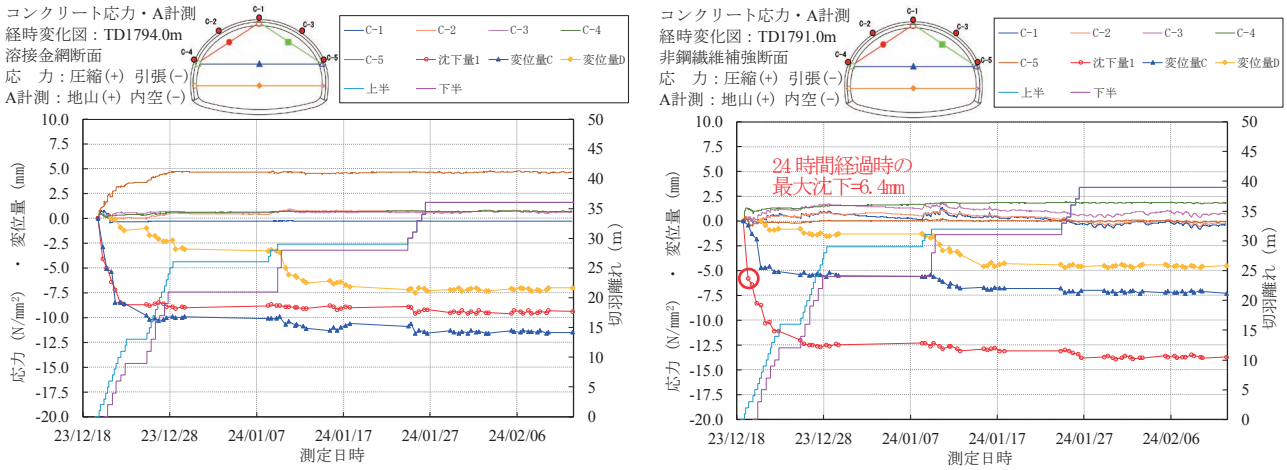
2―3　まとめ

溶接金網を省略して施工を行った結果，非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）を適用することによって，「掘削直後の安定性」を確保することができた．また，施工時に実施した計測結果および変位が収束した段階の目視点検において，一次支保工に変状は生じていないことから，非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）で「施工時の安定性」を確保できたと判断した．

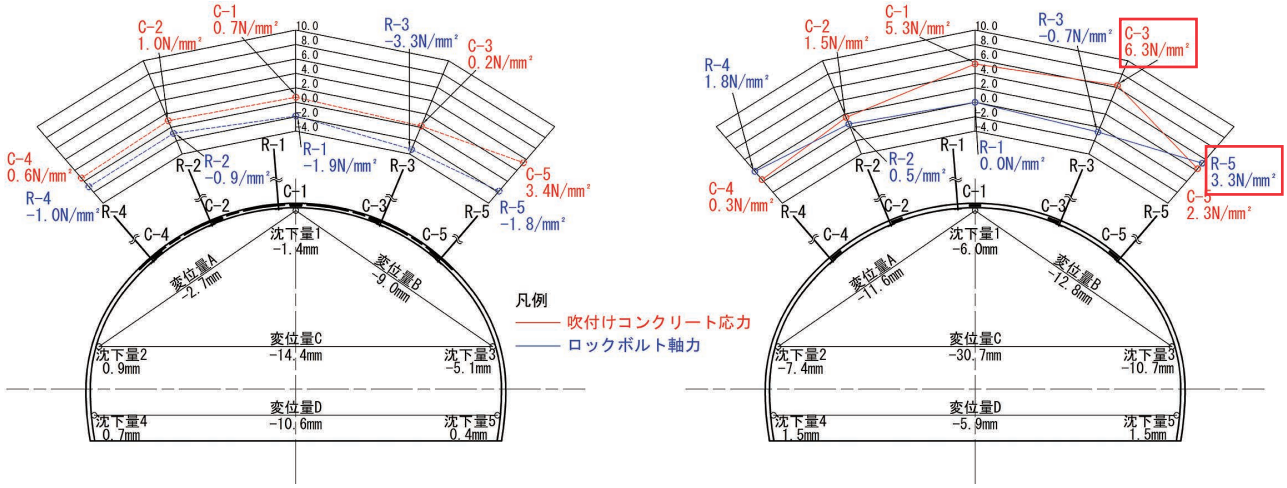
§3.　2 次元 FEM 解析

3―1　FEM 解析の概要

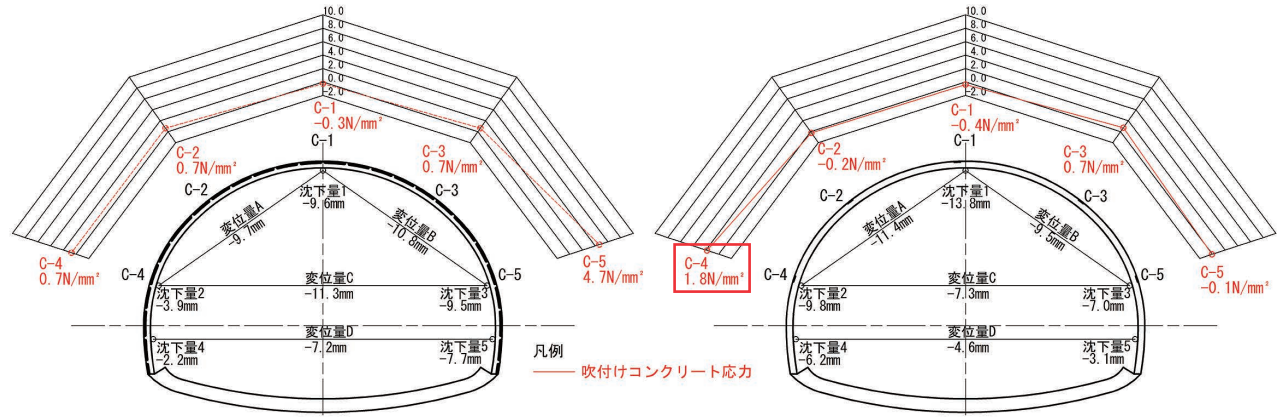
前述したように，非鋼繊維補強吹付けコンクリート（金網無）を実現場に適用することで「掘削直後の安定性」と「施工時の安定性」を確保することができた．さらに，実施工における固有の現場条件の影響を鑑みて，力学的な理論検証を行うため，2 次元 FEM による弾性解析を実



図―5　②坑口部の A 計測結果と吹付けコンクリートの応力（左：溶接金網断面　右：非繊維補強断面）



図―6　①非常駐車帯の変位量と B 計測の収束値（左：溶接金網断面　右：非鋼繊維補強断面）



図―7　②坑口部の変位量と B 計測の収束値（左：溶接金網断面　右：非鋼繊維補強断面）

施した．

FEM 解析では，溶接金網の有無によるトンネル挙動の相違について確認することを目的とした．計測工を実施した区間のうち，CⅡ-L パターンのトンネル形状をモデル化して解析を実施した．地山物性値は，トンネル数値解析マニュアル[2] に示される CⅡ地山の一般値を採用した．解析モデルの領域は，トンネルから上下左右に 4 D ずつとした．解析は 2 ケース［Case1：溶接金網有りと Case2：溶接金網無し］を実施して比較検討した．**図―8** に解析モデルと地山物性値，**表―4** に解析ステップ，**表―5** に構成部材の物性値を示す．

3―2　FEM 解析の結果

溶接金網の有無について比較した結果，下記に示すように，溶接金網がトンネル挙動に与える影響は極めて小さい結果となった．**表―6** に解析値の比較表を示す．

⑴　変位量

表―6 より，変位量は，Case1（天端沈下 9.1 mm，肩部沈下 5.9 mm），Case2（天端沈下 9.1 mm，肩部沈下 5.9 mm）となった．両者は一致する結果となった．

⑵　吹付けコンクリート応力

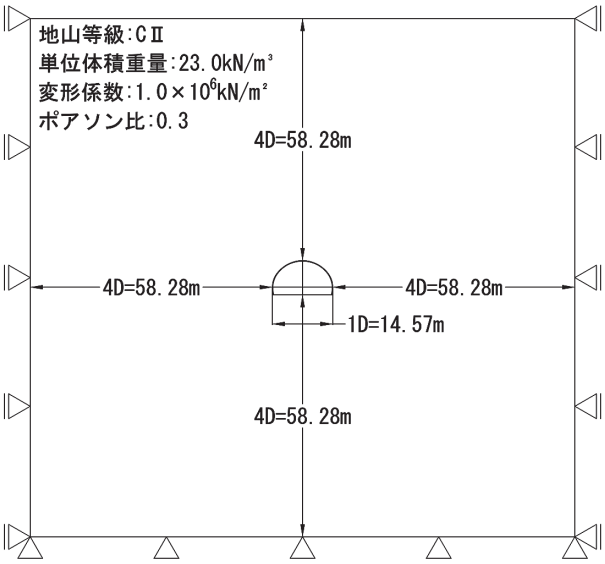
表―6 より，吹付けコンクリート応力は，Case1（天端部 0.9 N/mm^2，肩部 2.7 N/mm^2），Case2（天端部 0.9 N/mm^2，肩部 2.8 N/mm^2）となった．両者はほぼ一致する結果となった．

⑶　周辺地山の最大せん断ひずみ

図―9 より，地山の最大せん断ひずみは，Case1（天端部 0.04 %，肩部 0.23 %），Case2（天端部 0.04 %，肩部 0.23%）となった．両者は一致する結果となった．

3―3　まとめ

FEM 解析の結果，金網の有無によるトンネル挙動による相違は極めて小さい結果となった．この結果は，前述した実施工の結果と同様のものである．今回実施した FEM 解析は微小変形理論に基づく解析であり，大きな変形挙動をしないことが前提となる．このことから，実施工において，地山を緩ませることなく施工ができたものと考える．非鋼繊維を用いて脆性破壊を防止する対策を実施したことも効果があったと考える．



図―8　解析モデルと地山物性値

表―4　解析ステップ

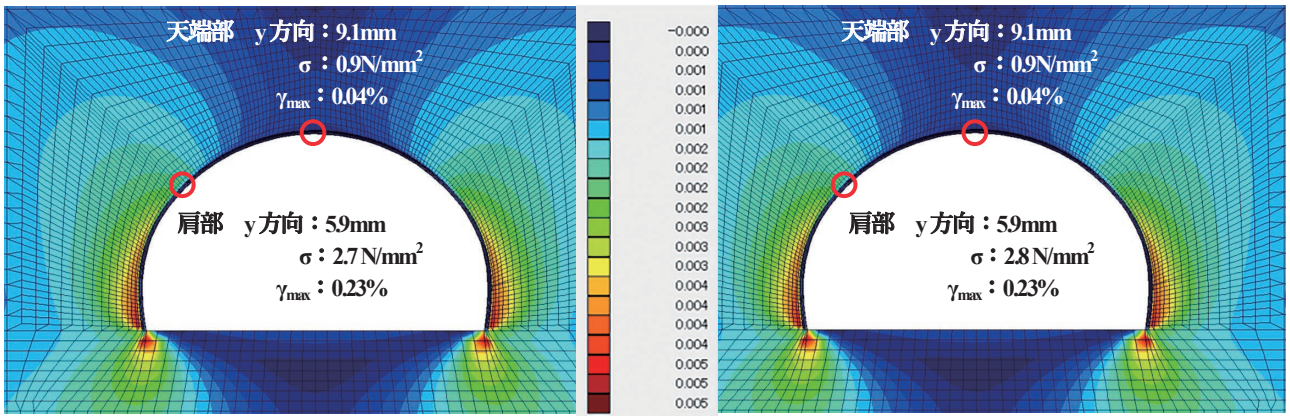
ステップ	施工状況	応力解放率
STEP1	初期応力解析	―
STEP2	全断面掘削	40%
STEP3	上・下半支保工設置	60%

表―6　解析値の比較表

比較項目		天端部		肩部	
		Case1 (有り)	Case2 (無し)	Case1 (有り)	Case2 (無し)
変位量	x方向(mm)	0.0	0.0	0.7	0.7
	y方向(mm)	9.1	9.1	5.9	5.9
吹付けコンクリート主応力	σ(N/mm²)	0.9	0.9	2.7	2.8
地山の最大せん断ひずみ	γ_{max}(%)	0.04	0.04	0.23	0.23

表―5　構成部材の物性値

構造部材	モデル	規格	変形係数 E(kN/m²)	ポアソン比 μ	断面積 A(m²)	断面二次モーメント I(m^4)
吹付けコンクリート	面要素	f'ck=18N/mm²	4.0×10^{5}	0.2	1.8×10^{-1}	3.38×10^{-4}
鋼製支保工	梁要素	H-150 SS400	2.0×10^{8}	0.3	3.97×10^{-3}	1.62×10^{-5}
金網	梁要素	φ5×150×150	2.0×10^{8}	0.3	1.57×10^{-4}	2.45×10^{-10}



図―9　最大せん断ひずみ分布と比較位置（左：Case1：溶接金網（有り）　右：Case2：溶接金網（無し））

§4. まとめ

当該トンネルにおいて，非鋼繊維補強吹付けコンクリート（0.75 vol.%）を適用し，溶接金網を省略することを試みた．その結果，トンネルや地山を不安定化させることなく，安全に施工することができた．溶接金網の省略は施工の安全性向上に大きく寄与するとともに，サイクルタイムの短縮も可能となる．加えて，将来的なトンネル工事の遠隔化・自動化を実現させるためには，溶接金網の省略の検討が求められる．今後のトンネル工事において，溶接金網の省略を検討する際に当該トンネルで得られた知見が参考になると考える．

参考文献

1）高橋秀樹，大谷達彦，亀谷英樹，吉永浩二，鬼頭夏樹：ポリプロピレン短繊維補強吹付けコンクリート適用による溶接金網省略の検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，Ⅵ-272，pp. 543–544, 2009.
2）㈱高速道路総合研究所：トンネル数値解析マニュアル（2017 年度版），pp. 2–13, 2017.