

# サポートライニング工法のダクトパネル取付け時の 損傷対策の検討

森 康雄\* 大越靖広\*\* 榎 駿介\*\* 尾崎健一郎\* 前垣創大\*

サポートライニング工法とは支保工とダクトパネルによる内巻き工を利用した既設トンネルの覆工補強工法である。ダクトパネルを支保工に仮固定する際にパネルに埋設している金具（フランジ付きナット）と抑えプレートを利用して六角ボルトで締付ける。この際にダクトパネルの埋設金物の周辺にひび割れが発生することがある。

そこで、ひび割れ発生の原因と防止対策を検討するために、ダクトパネルに埋設してある金物の引抜き実験を行った。その結果、通常モードのインパクトレンチにより締付けると埋設金物に大きなトルクが作用して周辺がコーン破壊することが分かった。対策として埋設金物の深さ（長さ）を以前までの10mmから20mmに深く（長く）して、許容締付けトルクを20~30Nmとすることとした。

キーワード：トンネル覆工補強、サポートライニング工法、ダクトパネル、コーン破壊、引抜き実験

## 1. はじめに

2016年12月～2019年8月に施工されたトンネル大規模更新工事において覆工巻厚不足対策としてサポートライニング工法による覆工補強を行った。

サポートライニング工法とは、支保工と内巻き工の併用による覆工補強工法である。ここで、内巻き工は、ダクトパネルを埋設型枠として利用し既設覆工との隙間に無収縮モルタルを裏込め充填するものである。既設覆工の内面に支保工を建て込み、専用プレートを使用してダクトパネルを支保工に仮止めする。

その際、インパクトレンチでの六角ボルト締付け後にダクトパネルのフランジ付きナットの周辺に円弧状のひび割れが多数見られた。このひび割れ発生の原因とその対策について実験を行い検討したので報告する。

## 2. サポートライニング工法の概要

構造を Fig.1 に示す。当該トンネルにおけるサポートライニング工法の構成部材の様子は、支保工 (H100, @1m)、ダクトパネル (厚さ 30mm)、裏込め充填材である。支保工、添接板、ボルトナットは、防錆のために溶融亜鉛メッキ (2種 55) とした。ダクトは繊維を混入した超高強度繊維補強コンクリート (圧縮強度 180N/mm<sup>2</sup>) であり、鋼繊維の腐食防止のためにパネル表面を 100%無機系の一液性溶剤 (ハイパーセラゼックス) で塗装した。この塗料は有機溶剤を含まず、燃焼による有害ガスの発生もなく、常温でホーロー被膜を形成する。裏込め充填材には無収縮モルタル (60N/mm<sup>2</sup>) を使用した。

\* 土木事業本部 インフラ再生事業部  
\*\* 技術本部 技術研究所 橋梁ソリューション室

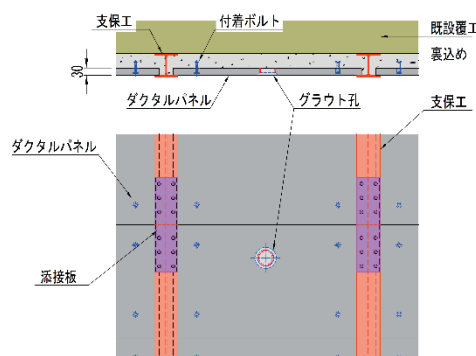


Fig.1 サポートライニング工法構造図

ダクトパネルの支保工への仮固定方法は、ダクトパネルに埋設してあるフランジ付きナット (M10, 埋設深さ 10mm) を利用して抑えプレート (厚さ 6mm, 50mm×100mm) とダクトパネルで、支保工のフランジを挟み込むように六角ボルトで締付ける。

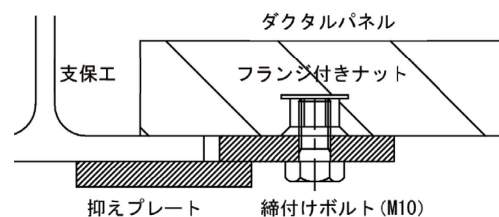


Fig.2 ダクトパネル仮固定

## 3. 施工

### 3.1 工事概要

サポートライニング工法は、当該トンネルで覆工厚さが不足しており内面補強工 (炭素繊維シートによる補強) では対応できない 1 スパン (延長 10.6m) において実施された。標準断面図を Fig.3 に示す。

施工時期：2018年, 2019年

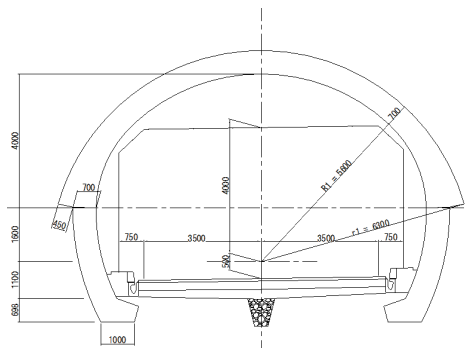


Fig. 3 標準断面図

### 3. 2 ひび割れ発生

#### 3. 2. 1 発生状況

工事竣工検査（2019年9月）においてダクトパネルに埋設されているフランジ付きナットの周辺に段差を伴う円弧状のひび割れが15ヶ所発見された。ひび割れの一例をPhoto. 1に示す。パネル表面の塗装が剥がれている箇所は9ヶ所、段差が大きな箇所は3ヶ所、確認された。

フランジ付きナットの中心からひび割れまでの最短距離は30～65mmで、平均で47.5mmであった。



Photo. 1 ひび割れ発生状況

#### 3. 2. 2 発生原因の推定

ひび割れ発生原因は大別すると、構造、外力、使用環境、材料、施工に分類されるが、それぞれの要因について評価する。

##### (1) 構造、外力

支保工は変形もなく健全であり、ダクトパネルのひび割れも放射状や、縦断方向などの規則性や連続性もなく、パネルの埋設金物付近のみに分散して発生しているため、外力が起因しているとは考えられない。

##### (2) 使用環境

ダクトパネルには多量の鋼繊維が含まれているため、鋼繊維の腐食も考えられるが、表面は防食のため塗装している。コーナー部は塗装の厚さが薄くなることから若干腐食していたが、全体的に腐食する場合はひび割れのように連続的ではなく、点状に茶色く腐食する。また、埋設金物は腐食しておらず、使用環境に起因するものではない。

##### (3) 材料

フランジ付きナットは後工程で穴埋め処理するために

表面から2～3mm埋め込んでいる（ザグリ）ため、抑えプレートとダクトパネルが密着している場合でも、インパクトレンチ WH14DDL2（HiKOKI）によりフランジ付きナットの引抜き強度以上の引抜き荷重が作用すると、フランジ付きナット周辺のダクトがコーン破壊する。

#### (4) 施工

ダクトパネルは鋼製型枠に流し込んで製作するため、パネルの製作精度は、支保工の曲げ加工の精度と比較すると高い。したがって、支保工のフランジとダクトパネルの接触面に隙間が発生し易くなり、この隙間を少なくしようとして六角ボルトを締付けるとフランジ付きナットに過度の引抜き荷重が作用する。さらに、抑えプレートが傾いてしまうため、フランジ付きナットに偏圧が作用し、ひび割れ発生の可能性が高くなる。

以上より、ひび割れ発生の原因として、ダクトパネルのフランジ付きナットとその仮固定方法が要因となり、ひび割れが発生したと判断されるため、対策について以下に検討する。



Photo. 2 抑えプレート

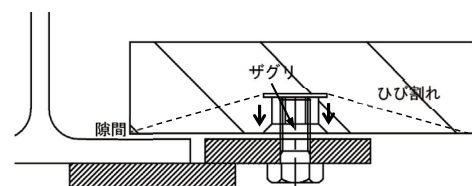


Fig. 4 ひび割れ発生機構

### 3. 3 簡易的な現場再現実験

ひび割れが発生した現場を再現する簡易的な実験として、ダクトパネルに埋設されたフランジ付きナットに直接引抜き荷重を負荷する実験とトルクを負荷する実験を行い、パネルがコーン破壊する際の最大荷重とトルクを測定した。また、対策工の検討のために、埋設金物としてナット+フランジ付きナットを埋め込んだ供試体についても同様の実験を行った。

#### (1) 実施時期

2020年2月12日

#### (2) 供試体

材料：超高強度繊維補強コンクリート

圧縮強度：210N/mm<sup>2</sup>

大きさ：50cm×43cm×厚さ3cm

埋設金物：

- ・フランジ付きナット
- ・ナット+フランジ付きナット



Photo.3 フランジ付きナット

(3) 実験方法

① 引抜き実験

建研式引張試験器(テクノスターMIC-811-0-03, 株式会社マルイ, 最大引張力:30kN)により埋設金物のコーン破壊時の引抜き荷重を測定した。

② トルク負荷実験

デジタルトルクレンチ(デジラチェ GEK060-R3, KTC (京都機械工具), 測定範囲:12~60Nm)により埋設金物にトルク負荷をかけて、ダクトルのコーン破壊開始時, 終了時のトルクを測定した。

現地の施工を再現するために, 支保工のフランジとダクトルパネルを密着させるケースと隙間があるケースについて実験した。

(4) 実験結果

実験結果を Table 1 と Table 2 に示す。

現場で使用した埋設金物(フランジ付きナット)では7~8kNの引張荷重または, 60~70Nmのトルクを作用させると, 埋設金物を中心にコーン破壊することがわかった。

ひび割れの発生位置は, 引抜き実験では埋設金物の中心から最小で2.5cm, 最大で5cmで現場のひび割れと近似していた。しかし, 現場での施工方法により近い条件のトルク負荷実験では, 埋設金物の中心からの距離は3.5~5cmで, 発生位置が現場とは逆で支保工側に発生した。

ナット+フランジ付きナットで深さを現状の2倍(深さ20mm)にすると引抜き荷重は12~17kN程度に増加しており, ひび割れ抑制対策のひとつとして考えられる。

Table 1 引抜き実験結果

埋設金物	No	最大引抜き荷重(kN)	変位(mm)	ひび割れ発生位置 (ナット中心からの距離(cm))	
				最大	最小
フランジ付きナット	1	7.73	0.90	4.0	2.5
	2	6.91	0.55	5.0	2.5
	平均	7.32	0.73	-	-
ナット+ フランジ付きナット	1	16.61	1.80	7.0	3.5
	2	11.79	0.55	8.0	3.5
	平均	14.20	1.18	-	-

Table 2 トルク負荷実験結果

埋設金物	No	ダクトルパネルと 支保工の隙間	最大トルク (Nm)	埋設金物の 変状	ダクトルパネル
フランジ付きナット	1	4.5mm (鋼板+座金)	74.8※	変状無	トルク値58.8Nmでひび割れ発生。ひび割れ発生位置はナット中心から3.5~5cm。
	2	4.5mm (鋼板+座金)	61.0	変状無	61Nmでひび割れ発生を確認。
ナット+ フランジ付きナット	1	無	71.25※	上段ナットが2~3mm垂直に引抜け	ひび割れ無し。
	2	1.5mm(座金)	70.9※	変状無	ひび割れ無し。

※ 最大トルクの※印はトルクレンチの測定範囲をオーバーし, 測定不能となった際の表示値。

3. 4 安全性の確認と対応

ダクトルパネルの部分的なひび割れ発生により懸念される事項としては, ①内巻き補強効果の低下, ②ひび割れが発生している埋設金物周辺のダクトル片の落下による第三者への影響(車輛事故)が考えられる。

内巻き補強工の構造的な影響については, ダクトルパネルに発生したひび割れにより, はく離している部分が欠損していると仮定して, 原設計と同様のフレーム計算を行い, 各種部材の発生応力が許容応力度以下であることを確認した。

ひび割れが発生している埋設金物の周辺のダクトル片の落下対策については, ダクトルに鋼繊維が大量に含まれていることを考慮し, ダクトル片が近い将来, 落下する可能性は小さいと考えられ, 重点的に監視を継続し, 必要に応じて落下防止措置を講じることとなった。

4. 埋設金物の引抜き実験

4. 1 実験概要

前述のトンネルで使用したフランジ付きナットと, ひび割れ防止対策としてのPインサートの静的引抜き実験と, 手動式レンチ(静的)およびインパクトレンチ(動的)によりトルクを負荷した締付け実験を行った。なお, 実験は2021年6月7日~6月8日の二日間で, 株式会社熊谷組技術研究所内, 振動構造実験棟で行った。

4. 2 実験方法

4. 2. 1 供試体

(1) ダクトルパネル

- ・材質:F0(有機繊維), 圧縮強度(公称)160N/mm<sup>2</sup>
- ・大きさ:70cm×90cm×厚さ3cm, 1枚

(2) 埋設金物

- ・フランジ付きナット(ザグリ無し)SUS, M10, h=9
  - ・Pインサート(ザグリ無し)SUS, M10, h=20
- ダクトルパネルの平面図をFig.5に, フランジ付きナット, PインサートをFig.6に示す。

(3) ひずみゲージ

- ・PL-60-11-5LJCT-F(東京測器, コンクリート用ひずみゲージ)で埋設金物1ヶ所につきひずみを4ヶ所ずつ計測した。
  - ・FLAB-3-11-5LJCT(東京測器, 一般用ひずみゲージ)でボルト2ヶ所を計測した。
- 各ひずみゲージの貼付け箇所をPhoto4, 5に示す。

4. 2. 2 使用機器

(1) 建研式引張試験器

静的引抜き実験では, 建研式引張試験器を用いて, フランジ付きナット, Pインサートの引抜き荷重を測定した。

(2) トルクセンサー

トルクを負荷した締付け実験(静的)では, ラチェットハンドル471(TONE)にトルクセンサーLTA-200NA(東京

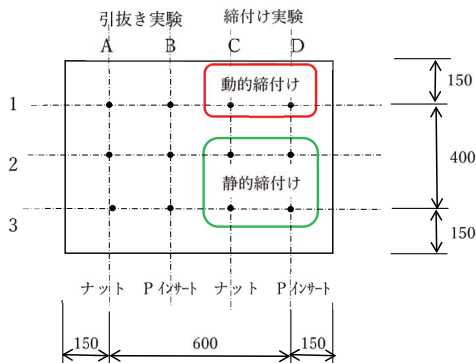


Fig. 5 ダクトパネル平面図

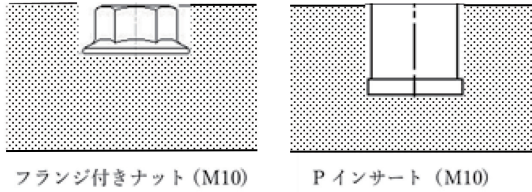


Fig. 6 フランジ付きナット, Pインサート

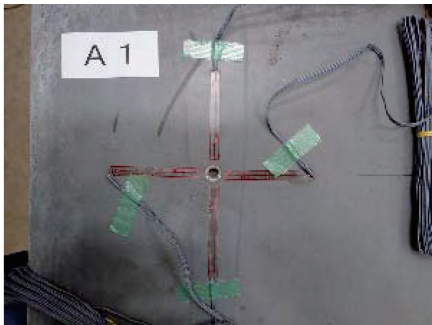


Photo. 4 ダクトパネルのひずみ計測状況

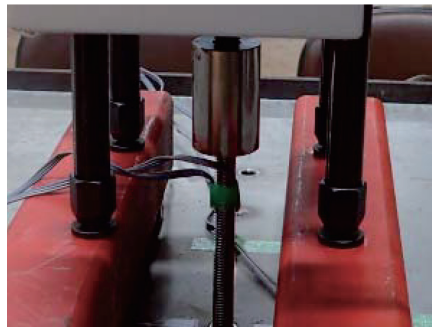


Photo. 5 ボルトのひずみ計測状況

測器) を装着して導入トルクを測定した。

(3) インパクトレンチ

トルクを負荷した締付け実験 (動的) では、当該トンネルで使用した WH14DDL2 (HiKOKI) とほぼ同じ (若干大きめ) 能力のインパクトレンチ WH36DA (HiKOKI) を使用した。なお、モードは当該トンネル施工時と同様にノーマルで使用した。

(4) デジタルトルクレンチ

トルクを負荷した締付け実験 (動的) では、インパクトレンチで締付けたトルクを、デジタルトルクレンチ CEM200N3×19D (東日製作所) を使用して測定した。

4. 2. 3 静的引抜き実験

引張試験器により静的にボルト軸方向に引抜き荷重を作用させた。引張試験器の脚部がフランジ付きナットやPインサートによるコーン破壊の範囲外に据え付けられるように角パイプを井桁に組んでその上に引張試験器をセットした。

引抜き荷重-変位を確認しながら、ハンドル回転速度を調整し、引抜き最大荷重を測定した。前述の方法でダクトパネルとボルトのひずみを同時に計測した。

フランジ付きナットの引抜き実験はケース A (A1, A2, A3), Pインサートの引抜き実験はケース B (B1, B2, B3) とし、それぞれ3ヶ所ずつ実施した。

実際の実験状況を Photo. 6 に示す。

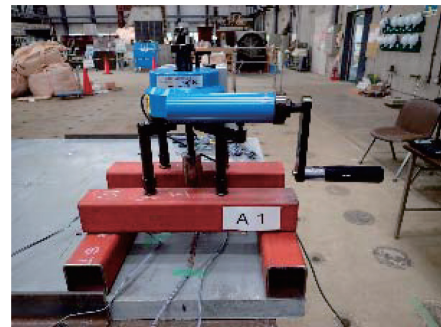


Photo. 6 引張試験器による静的引抜き実験状況

4. 2. 4 静的トルク負荷締付け実験

ダクトパネルに埋め込まれたフランジ付きナットやPインサートにボルト (M10, SUS) を挿入し、鋼板を介してラチェットハンドルによりナットで静的にトルクを負荷して締付けた場合の導入トルク、ボルトとダクトパネルのひずみを測定した。導入トルクはトルクセンサーで測定した。また、ボルトのひずみはデータロガーで測定した。

フランジ付きナットの締付け実験はケース C2, C3, Pインサートの締付け実験はケース D2, D3 で実施した。実際の実験状況を Photo. 7 に示す。



Photo. 7 ラチェットによる静的締付け実験状況

4. 2. 5 動的トルク負荷締付け実験

最初に、インパクトレンチを使い鋼板を介した M10 の締付けトルクを測定し、カタログ値と比較した。締付け時間は、1秒、2秒、3秒とし、締付けたあとデジタルトル

クレンチで導入トルクを測定した。

ダクトパネルに埋め込まれたフランジ付きナットやPインサートにボルト (M10, SUS) を挿入し、鋼板を介してインパクトレンチにより上記で決定した所定の時間でナットを締付けた。動作モードはノーマルとした。ボルトとダクトパネルのひずみは動ひずみ測定器 (DRA101C) で測定した。データ取得頻度は1000回/秒である。

フランジ付きナットの締付け実験はケース C1, Pインサートの締付け実験はケース D1 とし、それぞれ1 ケースずつ実施した。実際の実験状況を Photo. 8 に示す。



Photo. 8 インパクトレンチによる動的締付け実験状況

### 4. 3 実験結果

#### 4. 3. 1 静的引抜き実験結果

##### (1) ボルトの引抜き荷重と変位

ケース A, B のボルトの引抜き荷重を Tble3 に、ボルトの引抜き荷重-変位の関係を Fig. 7 に示す。

Table 3 引張試験器による静的引抜き荷重

埋設金物	実験ケース	引抜き荷重 (kN)	
		測定値	平均
フランジ付きナット	A1	3.72	3.73
	A2	3.69	
	A3	3.78	
Pインサート	B1	10.8	11.1
	B2	11.8	
	B3	10.8	

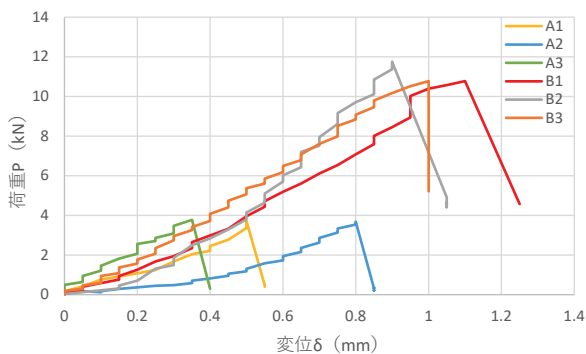


Fig. 7 ボルトの引抜き荷重と変位

##### (2) ダクトのひずみ

ケース A, B のボルトの引抜き荷重-ダクトのひずみの関係を Fig. 8 に示す。ダクトのひずみ変化率が正か

ら負に変化する (極大) 際をコーン破壊が開始した時期とし、その際のボルトの引抜き荷重とダクトのひずみおよびダクトがコーン状に破壊 (終了) した際の引抜き荷重とダクトのひずみを Table 4 に示す。

ボルトのひずみは 2 ヶ所のひずみ測定値の平均値、ダクトのひずみは 4 ヶ所の平均値である。

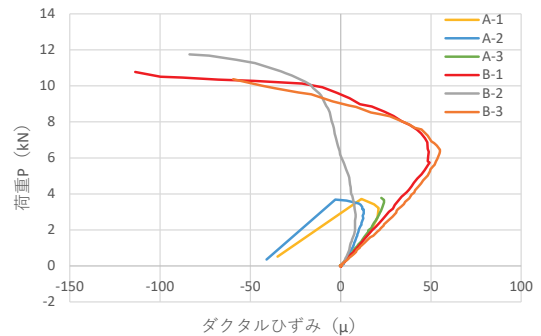


Fig. 8 ボルトの引抜き荷重とダクトひずみ

Table 4 引張試験器による実験結果

埋設金物	実験ケース	ダクトコーン破壊開始		ダクトコーン破壊終了	
		引抜き荷重 (kN)	ダクトひずみ (μ)	引抜き荷重 (kN)	ダクトひずみ (μ)
フランジ付きナット	A1	3.22	21.0	3.72	11.5
	A2	2.95	12.8	3.69	-3.0
	A3	3.59	24.0	3.78	22.5
Pインサート	B1	5.74	49.3	10.8	-114.0
	B2	2.79	8.3	11.8	-83.8
	B3	6.4	55.0	10.8	-104.0

#### 4. 3. 2 静的トルク負荷締付け実験結果

ダクトのコーン破壊 (開始, 終了) 時のトルクとダクトのひずみを Table 5 に示す。ケース C2 は、計測データ取得のタイミングが遅れたことから、正常にデータが得られなかったため結果から除外した。

Table 5 ラチェットによる静的締付け実験結果

埋設金物	実験ケース	ダクトコーン破壊開始		ダクトコーン破壊終了	
		トルク (Nm)	ダクトひずみ (μ)	トルク (Nm)	ダクトひずみ (μ)
フランジ付きナット	C3	14.51	16.0	17.66	407.0
Pインサート	D2	30.51	46.5	52.86	1261.5
	D3	30.88	48.3	51.23	1254.5

#### 4. 3. 3 動的トルク負荷締付け実験結果

##### (1) 導入トルク

インパクトレンチの締付け時間による導入トルク値を Table6 に示す。

Table 6 インパクトレンチの導入トルク値

締付け時間 (秒)	測定値 (Nm)					平均
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	
1	56.8	54.4	59.0	61.2	48.6	56.0
2	70.6	73.6	73.0	68.6	72.0	71.6
3	78.0	80.4	75.6	70.8	83.6	77.7

(2) 締付け実験結果

インパクトレンチでボルトを締付けた際のボルトひずみ-ダクトパネルひずみの関係を Fig.9 に示す。また、ダクトパネルのコーン破壊（開始，終了）時のボルトとダクトパネルのひずみを Table 7 に示す。

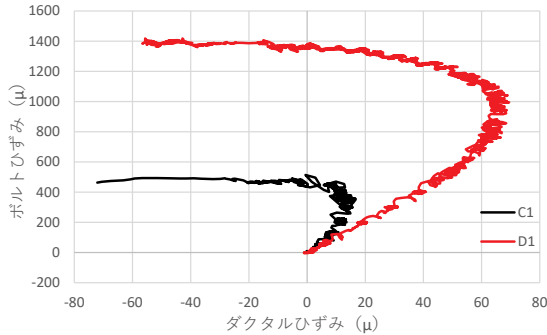


Fig.9 ボルトひずみ-ダクトパネルひずみ

Table 7 インパクトレンチによる動的締付け実験結果

埋設金物	実験ケース	ダクトパネルコーン破壊開始		ダクトパネルコーン破壊終了	
		ボルトひずみ (μ)	ダクトパネルひずみ (μ)	ボルトひずみ (μ)	ダクトパネルひずみ (μ)
フランジ付きナット	C1	356	16.72	463	-72.11
Pインサート	D1	994	69.49	1394	-56.95

5. 考察

5. 1 コーン破壊のメカニズム

Fig. 8 より，各ケースの曲線で値や傾きは異なるが，ボルトに引抜き荷重またはトルクを作用させると，最初はダクトパネルのひずみは引張方向 (+) に比例的に大きくなるが，ある値を超えると，ダクトパネルのひずみが縮小し始め，さらに引抜き荷重を大きくするとひずみは圧縮方向 (-) になり最終的にダクトパネルがコーン破壊する。

上記ダクトパネルのひずみの変化からコーン破壊のメカニズムとして考えられるダクトパネルの変形について以下に示す。

(1) ケース B, D (P インサート) の場合

埋設金物の埋込み深さが深い (20mm) P インサートの場合のダクトパネルの変形のイメージを Fig. 10 に示す。

① ステップ 1

埋設金物に引抜き荷重が作用しダクトパネル全体が埋設金物を中心に上に凸に変形し，ひずみは引張方向に線形的に増加する。

② ステップ 2

引抜き荷重がある値を超えると埋設金物下端周辺 (Fig. 10 赤破線) が局所的に引張破壊し，ダクトパネルの埋設金物近傍だけが上方に変形し，パネル表面が埋設金物を中心に下に凸な変形に移行し始める。

③ ステップ 3

さらに，引抜き荷重の増大に伴い埋設金物が上方に引

張られダクトパネルの表面が下に凸な状態が進行する。破壊領域の増大と共にパネル表面は圧縮応力状態となり，最終的にコーン破壊する。

(2) ケース A, C (フランジ付きナット) の場合

埋設金物の埋込み深さが浅い (10mm) フランジ付きナットの場合は埋込み深さが深い P インサートの場合 (ケース B, D) と比較すると，コーン破壊の荷重，トルクおよびダクトパネルのひずみも小さい。また，上記ステップ 2 におけるダクトパネルの部分的な破壊開始以降，ひずみの変化が小さいためコーン破壊時にはダクトパネルは引張状態のままであるケースが多い。

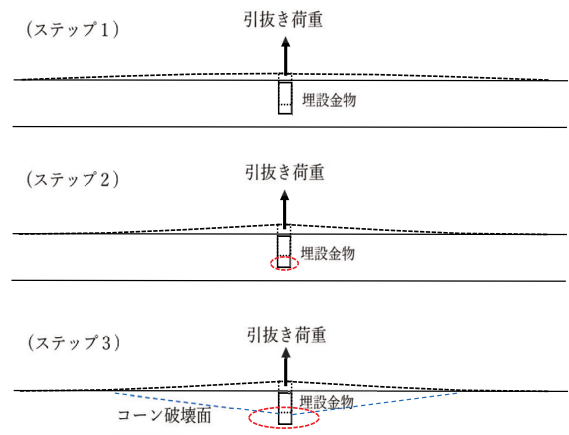


Fig. 10 コーン破壊のメカニズム

5. 2 引抜き荷重の実測値と計算値の比較

ケース A, ケース B におけるコーン破壊時に実測された引抜き荷重とボルトのひずみから計算した計算値の差異について考察する。

コーン破壊終了時の引張試験器による引抜き荷重の実測値とボルトひずみから計算した引抜き荷重を Table 8 に示す。引抜き荷重の算出は M10 の有効断面積を 58mm<sup>2</sup>，ボルト (SUS) のヤング係数を 193GPa とした。

Table 8 ケース A, B におけるボルト引抜き荷重の比較

実験ケース	引張試験器による実測値 (X) (kN)	ボルトのひずみから計算した引抜き荷重 (Y)		比率 (X/Y)	
		ひずみ (μ)	引抜き荷重 (kN)	数値	平均
A1	3.72	388	4.34	0.86	0.84
A2	3.69	407	4.56	0.81	
A3	3.78	396	4.43	0.85	
B1	10.8	1254	14.0	0.77	0.79
B2	11.8	1337	15.0	0.79	
B3	10.8	1201	13.4	0.81	

実測値の計算値に対する比率 (X/Y) は，埋設金物がフランジ付きナットの場合 (ケース A) は平均 0.84 倍，P インサートの場合 (ケース B) は平均 0.79 倍であり，実測値の方がひずみからの計算値よりも 1~2 割程度小さくなっている。

5.3 トルク係数K

インパクトレンチによる締付け時のトルクは衝撃力が大きいので、通常(市販)のトルクメータでは計測できない。そこで、手動によりレンチを使って静的にトルクを負荷し、トルクとボルトの引抜き荷重(ひずみ)を測定し、トルク係数を求める。一般的に、ボルトの締付け力(軸力)とトルクとの関係は次式で示され、Kをトルク係数という。

$$T = K \times D \times F \dots\dots\dots (式1)$$

ここに

T: 締付けトルク (Nm)

F: 引抜き荷重 (ボルト軸力) (N)

D: ネジの呼び径 (m)

トルク係数はボルトや締付ける材料の表面状態(めっき・油等)、ネジのピッチなどに影響を受けるが、通常は0.15~0.2とされる。

ケースC, Dの実験からトルク係数を算出した結果をTable 9に示す。

引抜き荷重Fの算出式を次式に示す。

$$F = \varepsilon \times A \times E \times (X/Y) \dots\dots\dots (式2)$$

ここに

ε: ボルトのひずみ(計測値)

A: ボルト(M10)の有効断面積 58mm<sup>2</sup>

E: ボルト(SUS)のヤング係数 193GPA

X/Y: 引抜き荷重算出の補正係数

X/Yは、ボルトのひずみから計算した引抜き荷重を実測値相当に補正するための係数で、引抜き荷重の実測値(X)とひずみから算出した引抜き荷重(Y)の比率である。

フランジ付きナットの場合(ケースC3)は0.84、Pインサートの場合(ケースD2, D3)は0.79(Table 8参照)。

今回の実験におけるトルク係数は0.46~0.51の範囲で、平均0.47とばらつきが少ない。通常のトルク係数とされる0.15~0.2と比較すると2~3倍大きく、実験と同様のボルト(SUS304)、ナット(SS400)、鋼板(表層錆、油無し)を使用する条件下では、一定の引抜き荷重を発生さ

せるためには、通常よりも大きなトルクを作用させる必要がある。

Table 9 ケースC, Dにおけるトルク係数

実験 ケース	ダクタイルコーン破壊開始				ダクタイルコーン破壊終了			
	トルク (Nm)	ボルトひずみ (μ)	引抜き荷重 (kN)	トルク係数	トルク (Nm)	ボルトひずみ (μ)	引抜き荷重 (kN)	トルク係数
C3	14.51	330	3.1	0.47	17.66	407	3.83	0.46
D2	30.51	673	6.0	0.51	52.86	1262	11.2	0.47
D3	30.88	725	6.4	0.48	51.23	1255	11.1	0.46

5.4 ボルト締付け時の許容トルク

(1) 各ケースのコーン破壊時のトルク

各ケースのコーン破壊(開始, 終了)時のトルクを計算した結果をTable 10に示す。ケースC2はデータの取得タイミングが遅れてデータが得られていない。

① ケースC3, D2, D3

トルクを直接計測しているため計算は不要である。

② ケースA, B

ボルトの軸力を直接計測しているため、前節で算出した平均トルク係数(K=0.47)を乗じて(式1)よりトルクを計算した。

③ ケースC1, D1

直接計測しているのはボルトのひずみだけであるため、(式2)よりひずみから引抜き荷重Fを算出し、平均トルク係数Kを乗じて(式1)トルクを計算した。

(2) ボルト締付け時の許容トルク

埋設金物ごとのコーン破壊開始時のトルクの最小値、平均値、許容トルクをTable 11に示す。

なお、PインサートにおいてB2は計測に不備があったため除外した。

Table 11 コーン破壊開始時のトルク(単位: Nm)

埋設金物	最小値	平均値	許容トルク
フランジ付きナット	13.9	15.2	10
Pインサート	27.0	32.0	20

Table 10 トルク値

载荷方法	機器	埋設金物	実験ケース	ダクタイルコーン破壊開始				ダクタイルコーン破壊終了				
				トルク(Nm)		引抜き荷重(kN)		トルク(Nm)		引抜き荷重(kN)		
				実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	
引抜き力	静的	引張試験器	フランジ付きナット	A1	—	15.13	3.22	—	17.48	3.72	—	
				A2	—	13.87	2.95	—	17.34	3.69	—	
				A3	—	16.87	3.59	—	17.77	3.78	—	
			Pインサート	B1	—	26.98	5.74	—	50.76	10.8	—	
				B2	—	13.11	2.79	—	55.46	11.8	—	
				B3	—	30.08	6.4	—	50.76	10.8	—	
トルク	動的	インパクトレンチ	フランジ付きナット	C1	—	15.73	—	3.35	—	20.46	—	4.35
				C3	14.51	—	—	3.10	17.66	—	—	3.83
	静的	レンチ	Pインサート	D1	—	41.31	—	8.79	—	57.73	—	12.28
				D2	30.51	—	—	5.95	52.86	—	—	11.16
				D3	30.88	—	—	6.41	51.23	—	—	11.10

ボルトは、コーン破壊開始時のトルク以下で締付けなければならない。ここでそれぞれの埋設金物の許容トルクを Table 11 の通りとすると、ダクトのコーン破壊開始に対する安全率を 1.5 確保することができる。

## 6. ひび割れ抑制対策

ダクトパネルの埋設金物周辺に発生するひび割れ防止対策を以下の 3 項目として、その効果を確認する。

### (1) 対策 1

二次製品の孔空き箇所ザグリの設けることが慣例となっているようだが、理由は不明確である。サポータライニング工法ではひび割れ発生の原因のひとつであり、ザグりが無くても全く問題ないため、設けないものとする。

### (2) 対策 2

実験結果からもフランジ付きナットの埋設深さを深くすることでコーン破壊への抵抗性は向上する。今後、施工性の検討において許容トルクの範囲内で締付けを行い、施工上問題がなければ埋設金物の深さは 20mm とし、締付けが不十分な場合は大きさ、構造について再検討する。

### (3) 対策 3

埋設金物に長さ 20mm の P インサートを使用する。その場合、許容トルクは 20~30Nm となるため、締付けに使用する機器や使用モードについて確認、選定する。

## 7. サポータライニング工法の今後の課題

### (1) ダクトパネルの防錆対策

通常のダクトパネルの補強繊維は鋼繊維であるため、その錆が問題となる。防錆対策としてパネルの表面の塗装が考えられるが、角部は塗り厚さが確保できず、曲面のパネルでは塗厚を均一に確保することは困難である。また、塗装費用が発生するため経済性にも劣る。

鋼繊維から有機系繊維に変更することで、防錆の観点からは塗装が不要となり経済性に優れるが、強度の低下、耐火性の問題などの課題もある。

### (2) 仮固定時の使用機器の選定

前章の対策 3 でも記述したように、施工性の実験を行い、許容トルク値を発揮する使用機器、モードを選定する。

### (3) 施工性の改善

従来、ダクトパネルの運搬、設置はすべて人力で行ってきたため、1枚当たりの重量が制限された。そこで、施工を機械化し、1枚当たりの形状を大きくし施工性の改善を図る。今後は、ミニクレーンの先端にバキュームパットを取り付け、ダクトパネルを把持、移動する装置の開発について検討を行う。

### (4) 補強設計の検証

既設トンネル覆工の補強設計方法は確立されておらず、案件ごとに作用荷重を想定して、許容応力度法でフレーム計算することが多い。明り構造物と異なり、現在でも地山の等級(安定性、健全性)に応じて、支保構造(補強工)が定められており、同じ既設トンネルでも NATM と矢板工法では支保構造が異なっているなど課題が多い。

既設トンネルの覆工の補強設計には、地山荷重を含めた作用荷重や既設覆工の健全性の評価等困難な問題がある。このような状況の中で、サポータライニング工法の設計の確立に向けて課題を検討するとともに、載荷実験により設計の実証性を検証する必要があると判断する。

## 参考文献

- 1) 前田洗樹・重田佳幸 ほか 5 名：巻厚不足対策における内巻補強工の設計，令和元年全国大会第 74 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，VI-759.
- 2) 垣見広・今井裕之・森康雄 ほか 3 名：道路トンネルの内巻補強工の施工，令和元年全国大会第 74 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，VI-760.

## Study of damage prevention for ductal panel installation when using the support lining method

Yasuo MORI, Yasuhiro OKOSHI, Shunsuke MAKI, Kenichiro OZAKI, and Sodai MAEGAKI

### Abstract

The support lining method is a method of reinforcing the lining of existing tunnels by using shoring and ductal panels. When ductal panels are temporarily fixed to the shoring, metal fittings (flanged nuts) embedded in the panels and restraining plates are held together by tightening hexagonal bolts. In this process, cracks may occur around the metal fittings embedded in the ductal panel. To investigate the cause of the cracks and preventive measures, we conducted a pull-out test on the metal fittings embedded in the ductal panel. The results show that tightening with an impact wrench in the normal mode causes a large torque on the metal fittings and destroys the surrounding area in a cone shape. As a countermeasure, we decided to increase the depth (length) of the embedded metal fittings from 10 mm to 20 mm and to set the allowable tightening torque to 20 Nm to 30 Nm.

Key words: tunnel lining reinforcement, support lining method, ductal panel, cone fracture, pull-out test