

## 大和川線シールドトンネルの損傷制御設計

阪神高速道路(株)建設事業本部堺建設部設計課 新名 勉  
阪神高速道路(株)建設事業本部堺建設部大和川線建設事務所 志村 敦  
阪神高速道路(株)建設事業本部大阪建設部西船場ジャンクション建設事務所 藤原 勝也

### 要 旨

大和川線シールドトンネル〔当社施工区間〕は、セグメント外径 $\phi$ 12.230m、延長 2.0km の併設トンネルである。レベル 2 地震動以上の地震レベルである「最大級シナリオ地震動」に対し、縦断方向の耐震設計において、トンネル軸方向の圧縮力が卓越した。このため、圧縮力が卓越したセグメントの構造変化点に変位吸収機構を導入することにより、所要の耐震性能を確保することを目指した。変位吸収機構は、従来技術（可とうセグメント）との比較から、鋼製セグメントの縦リブ変形を活用し、必要以上の変形は抑制する構造（損傷制御型鋼製セグメント）とした。本稿は、このシールドトンネルの損傷制御設計について報告する。

**キーワード:**シールドトンネル、最大級シナリオ地震動、耐震性能、損傷制御設計

### はじめに

当社が施工する大和川線シールドトンネルは、堺市堺区遠里小野町 4 丁 (No. 1 立坑)～同市北区常磐町 1 丁 (No. 2 立坑) の延長 2.0km 区間であり、浅香川を境として、西側約 1.9km は当社、東側約 0.1km は堺市の事業区間である。堺市事業区間の施工は当社が受託し、全体を当社施工区間として

工事を進めているところである (図-1)。

これまで、本トンネルでは、横断方向および縦断方向の耐震設計を実施してきた。縦断方向の耐震設計のうち、レベル 2 地震動以上の地震レベルである「最大級シナリオ地震動」では、過大な地盤応答が発生し、トンネル軸方向に卓越する圧縮力の対策として、セグメント構造変化点に可とう吸収構造を配置する必要性が整理されてきた<sup>1)</sup>。本稿では、この具体策として、損傷制御設計の概

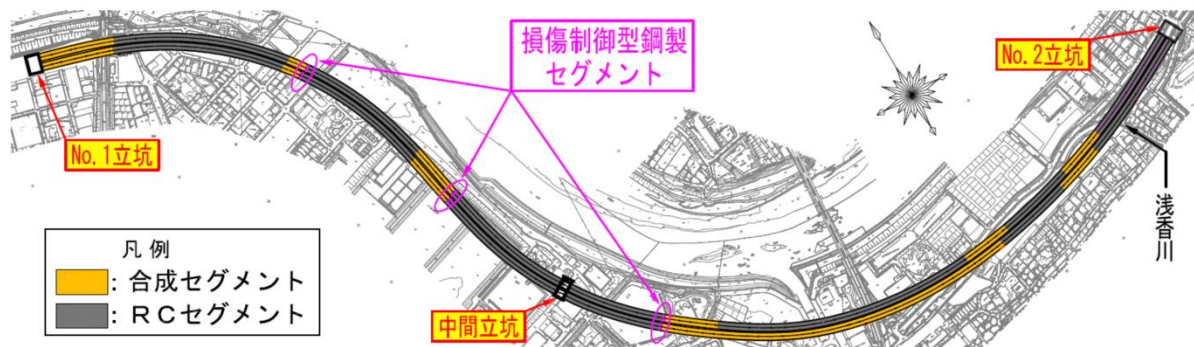


図-1 大和川線シールドトンネル (阪神高速道路(株)施工区間) 平面図

念を導入して開発した「損傷制御型鋼製セグメント」の設計について報告する。

## 1. シールドトンネル概要

図-1 に平面図を、表-1 に概要を示す。施工手順は、西端の No.1 立坑を発進し、西行き車線を No.2 立坑に向かって先行掘進する。No.2 立坑に到達後、同立坑にて転回し、東行き車線を No.1 立坑に向かって後行掘進する。なお、西行き、東行き車線とも、通過型の間立坑を設けている。

表-2 に覆工の概要を示す。主に合成セグメント、RC セグメントを適用した。トンネル外径（セグメント外径）の決定断面である非常駐車帯区間、曲線部の視距拡幅区間は、桁高の小さい合

表-1 シールドトンネル概要

シールド機：泥土圧式（外径 φ12.470m, 機長 12.8m）
掘進延長：4,082m
線形条件：平面線形 最小曲率 R=400m
縦断線形 最大勾配 3.0%
セグメント間最小離隔 986mm（外径比 0.08D）
土かぶり：7.0m ~ 29.7m

表-2 覆工の概要

	外径	内径	桁高	幅
合成セグメント	—	—	—	—
└─ 嵌合方式	φ 12.230m	φ 11.580m	325mm	1,800mm
└─ 六面鋼殻	φ 12.230m	φ 11.630m	300mm <sup>※</sup>	1,800mm
RCセグメント	φ 12.230m	φ 11.320m	455mm	2,000mm

※：耐火工厚さは除く

成セグメント（嵌合方式合成セグメント、六面鋼殻合成セグメント）を適用した。その他の区間は、所要の建築限界に対し、内空断面に余裕があるため、経済性も考慮し、桁高の大きい RC セグメントを適用した。

図-2 に地質縦断図を示す。施工区間西端の No.1 立坑付近で局所的に上町断層による撓曲が見られるが、全体的には、洪積層を主体とする大阪層群の砂質土、礫質土および粘性土で構成される互層状の地盤である。シールドが掘進する地盤は、N 値 50 以上の良く締まった砂質土・礫質土、N 値 14~15 およびせん断弾性波速度  $V_s=300\text{m/s}$  程度の比較的硬い粘性土である。

## 2. 縦断方向の耐震設計

### 2-1 耐震性能

縦断方向の耐震設計は、「シールドトンネル設計マニュアル」<sup>2)</sup>に基づき実施した。表-3 に地震レベルと目標とする耐震性能を示す。「最大級シナリオ地震動」は、上町断層の破壊シナリオを反映した、大和川線の設計対象区間に最も大きな影響を及ぼす想定地震動である。最大級シナリオ地震動は、強度が極めて大きい、供用期間中に発生する確率が極めて低い等の特徴を有しており、これを考慮し、耐震性能は安全性に限定している。

以降では、縦断方向の耐震設計のうち、最大級シナリオ地震動におけるトンネル軸方向の圧縮力対策として導入した損傷制御設計について述べる。

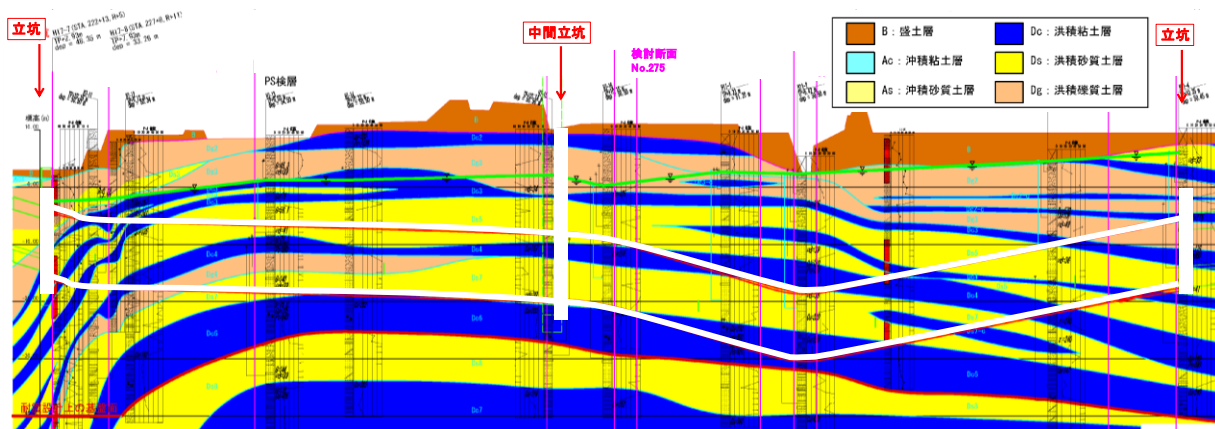


図-2 地質縦断図

## 2-2 設計概要

図-3 に設計フローを示す。最大級シナリオ地震動における各地点の地盤変位は、大和川線のサイトの表層地盤（GL-200m～地表面）をモデル化し、3次元動的FEM解析より抽出した。シールドトンネルは、リング継手による剛性低下を考慮した等価な一様剛性はりとしてモデル化した。立坑接続部は、トンネル覆工と立坑躯体を一体化（剛結）せず、軸方向は充てん材の付着による拘束を考慮したスライド結合、軸直角方向はピン結合としてモデル化した。そして、応答変位法を用いて、トンネル軸方向および軸直角方向（水平・鉛直）の地震外力（地盤変位）をばねを介して動的に載荷した。

表-4 に最大級シナリオ地震動における安全性の照査項目を示す。圧縮力に対する照査では、コンクリートの終局耐力を許容値とした。

## 2-3 地盤応答解析

3次元動的FEM解析の結果、最大級シナリオ地震動での地盤変位は、レベル2地震動と比較して、トンネル軸直角方向（水平方向および鉛直方向）

表-3 地震レベルと目標とする耐震性能<sup>2)</sup>

地震レベル	対象地震動	目標とする耐震性能		
		安全性	機能性	復旧性
レベル1地震動	道路橋示方書I種地盤のスペクトル特性を有する地震動	地震時の利用者に対する安全性を確保	地震直後にも一般車両の通行が可能	通行止めを伴う補修・補強不要
レベル2地震動	兵庫県南部地震における強震動記録より作成した、基盤での平均的なスペクトル特性を有する地震動、および南海トラフ沿いを震源とする南海・東南海地震	地震時の利用者に対する安全性を確保	地震直後にも緊急車両が通行可能・建築限界確保	補修・補強により当初の機能回復が可能
最大級シナリオ地震動	上町断層を震源とするシナリオ地震動	構造物全体系が崩壊せず、地震時の利用者に対する安全性を確保	-	-

表-4 安全性の照査項目(最大級シナリオ地震動)

地震レベル	加振方向	安全性の照査方法		
		部位	照査内容	許容値
最大級シナリオ地震動	軸方向	覆工本体	軸圧縮力に対して覆工本体が崩壊しないことを確認	軸圧縮耐力

は2~4倍程度、軸方向は5倍程度の大きな応答となった。その最大値は、トンネル軸直角方向は約300mm、軸方向は約500mmとなった。

## 2-4 部材耐力検討(応答変位法)

部材耐力の検討では、部材の非線形性を考慮した解析を実施した。シールドトンネルは、道示Ⅲに規定するコンクリートの $\sigma - \epsilon$ 関係<sup>3)</sup>により部材の非線形性を設定した。地盤ばね定数は、併設トンネルによる影響および地震時の地盤のせん断剛性低下を考慮して低減させた。また、最大級シナリオ地震動で発生した地盤変位は過大なため、地盤と構造物の剛性の差により、地盤と構造物の間にはく離が生じると考えられる。そこで、接触面におけるせん断力が地盤と構造物の間のせん断強度を上回った場合にすべりが生じることを想定し、地盤ばねモデルにすべり開始限界せん断力(上限値)を設定した。

圧縮力に対する検討結果として、図-4 にトンネル縦断方向の最大地盤ひずみ分布を、図-5 に

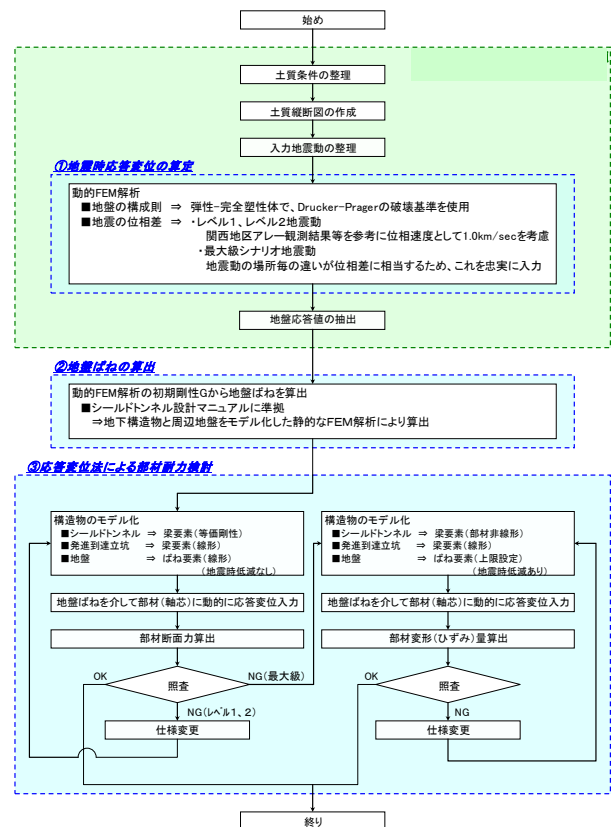


図-3 縦断方向耐震設計フロー

最大級シナリオ地震動に対する最大軸ひずみの分布を示す。図-5の「対策工なし」とおり、地盤ひずみが大きい領域のセグメント構造変化点（合成セグメント-RCセグメント接続部、3断面）において、コンクリートの軸圧縮ひずみが終局ひずみ（ $\epsilon_{cu}=0.0035$ ）を大きく上回る結果となり、対策工の必要性が認められた。

なお、引張側の検討では、引張力はリング継手の引張耐力を超えるが、覆工本体は健全な状態であることを確認している。

### 2-5 対策工（変位吸収機構）の検討

圧縮力により終局ひずみが大幅に超過したセグメント構造変化点（3断面）の対策として、変位

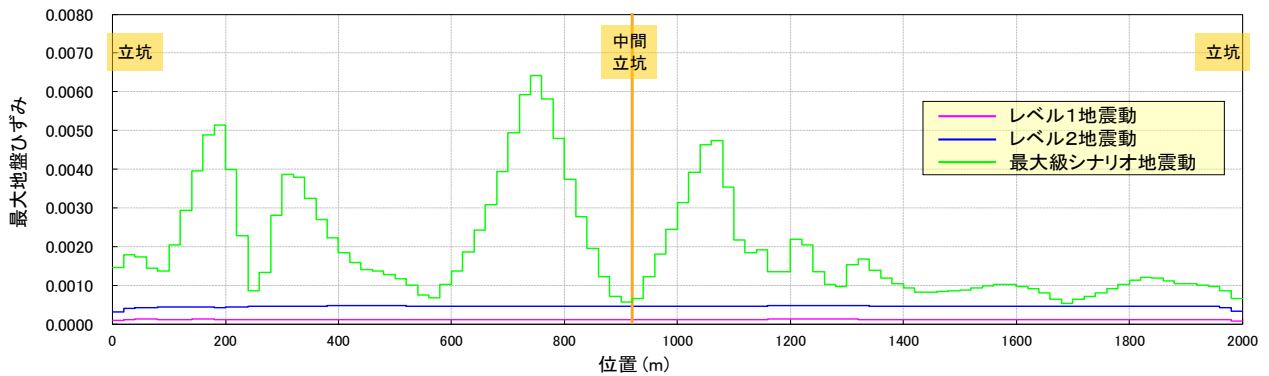


図-4 トンネル縦断方向の最大地盤ひずみ分布

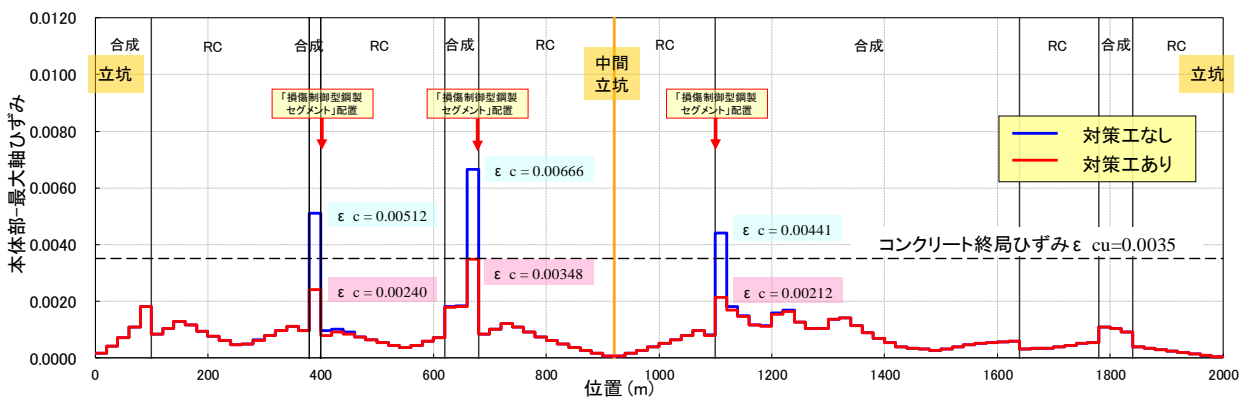


図-5 最大級シナリオ地震動に対する最大軸ひずみ分布（先行トンネル）

表-5 対策工（変位吸収機構）の比較

ケース	①可とうセグメント	②鋼製セグメントの縦リブ変形による対策	
概要	伸縮部を有する可とうセグメントの変形により圧縮力を吸収。 [可とうセグメントは常時部材]	最大級シナリオ地震動に対し、鋼製セグメントの縦リブを不可逆的に変形させることにより変位を吸収。 [変位吸収機構は、最大級シナリオ地震動のみ発揮]	
使用性	常時の可とう性から、舗装等の内部構築に目地が必要となる可能性。	△	通常の鋼製セグメントと同等。 ○
耐久性	止水ゴムの長期耐久性が懸念。	△	通常の鋼製セグメントと同等。 ○
維持管理性	継手部からの漏水リスクあり。	△	通常の鋼製セグメントと同等。 ○
安全性 (最大級シナリオ地震動)	特に問題ない。	○	地震時変形にともなう土砂流入等の懸念はあるが、対処可能。 ○
経済性	一般的なセグメントと比較して高価。	△	比較的安価。 ○
実績	道路シールドトンネルとして複数の実績あり。	○	変位吸収機構としての実績は無いため、解析・実験等による性能確認が必要。 △
評価	△	○	



吸収機構を導入し、所要の耐震性能を確保することを目指した。

表-5 に対策工の比較を示す。変位吸収機構として、ゴムの伸縮機能で対応する「①可とうセグメント」(実績有)と、「②鋼製セグメントの縦リブ変形による対策」を比較した。②は、変位吸収機構としての実績は無いが、構造は鋼製セグメントの範疇であり、変位吸収を必要とする最大級シナリオ地震時のみ、機能を発揮させることができる。①との比較において、②は特に耐久性、維持管理性で優位であると判断し、これを選定した。そして、②の具体策として、「損傷制御型鋼製セグメント」を開発し、トンネル軸方向の圧縮ひずみを終局ひずみ以内に収めることとした。

### 3. 「損傷制御型鋼製セグメント」の開発

#### 3-1 断面性能

表-6 に縦断方向の耐震設計におけるトンネル軸方向の地震時荷重を示す。損傷制御型鋼製セグメントの断面性能は、レベル2地震動の発生軸力では座屈せず、最大級シナリオ地震動の発生軸力に対して座屈(降伏)するよう設定する必要がある。適用するセグメントは3断面共通としたため、セグメントリングは256,600~469,500kNの軸圧縮力で座屈する必要があった。

#### 3-2 縦リブ仕様の検討

縦リブの部材仕様は、実験および解析により、座屈挙動を総合的に検証した上で設定した。

##### (1) 解析検討

まず、3次元FEMモデルによる座屈解析を実施

表-6 トンネル軸方向の地震時荷重

単位 (kN/ring)			
測点	No.243	No.257	No.278
位置	400m	680m	1,100m
施工時 [ジャッキ推力]	142,600		
レベル1地震動	71,000	64,760	79,810
レベル2地震動	256,600	227,100	217,100
最大級シナリオ 地震動	472,600	470,300	469,500

し、下記について検討した。

- ①端部境界条件、初期不整の影響に対する座屈挙動の確認
- ②所定範囲の荷重で座屈を生じることの確認
- ③縦断耐震設計で用いる非線形モデル(座屈時のP-δ曲線)の検証
- ④非対象の縦リブ形状による座屈時の面外変形方向の確認

特に、①に関して、縦リブの降伏荷重は、端部の境界条件の違いによる影響を受けないこと、初期不整の影響が限定的であることを確認した。

##### (2) 要素実験

次に、解析検討を受け、縦リブの要素実験で座屈挙動を検証し、部材仕様を決定した。要素実験は、上記②~④の検証を目的とし、実物大の縦リブを抽出した供試体を合計9体作成した。図-6に実験供試体を示す。供試体はウェブ厚を28mm, 30mm, 32mmに変化させた3水準(各3体)で設定し、圧縮力を一方向単調載荷し、座屈挙動を確認した。図-7に各供試体の最大荷重を示す。最大荷重はいずれのケースもレベル2地震動以上、最大級シナリオ地震動以下の範囲に収まり、所定範囲の荷重で座屈が生じることを確認した。最終的に縦リブのウェブ厚は、最小の28mmを採用した。

#### 3-3 セグメント設計方針

従前の部材耐力検討から、縦リブが座屈すれば、コンクリートの軸圧縮ひずみを終局ひずみに収め

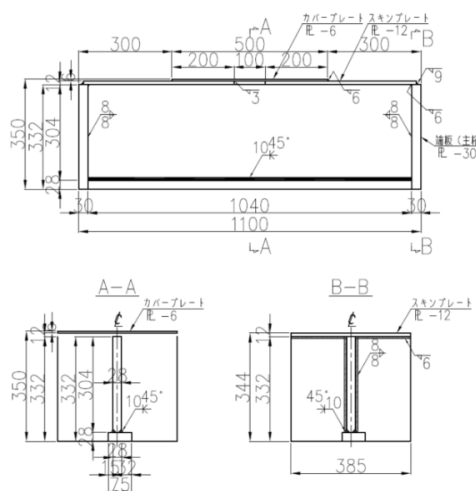


図-6 実験供試体 (Web t=28mm)

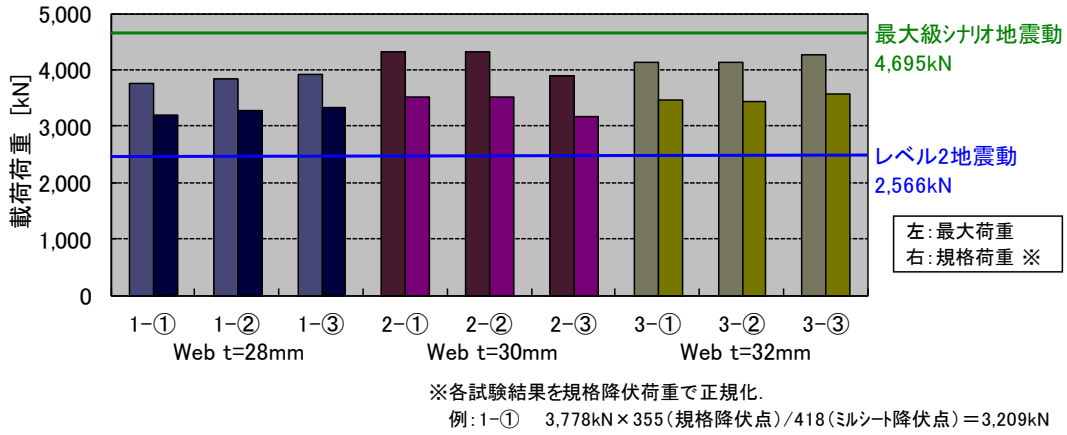


図-7 各供試体の最大荷重

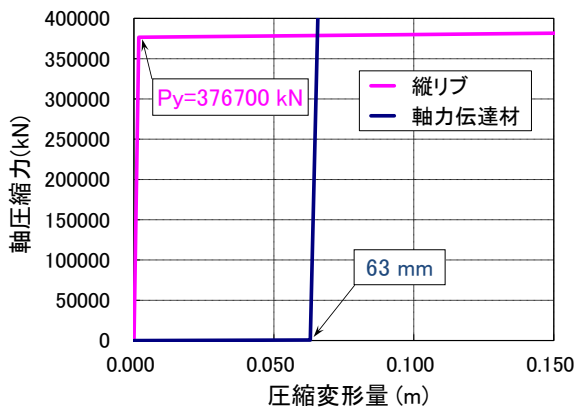


図-8 損傷制御型鋼製セグメントのモデル化

ることができるが、座屈後の変形を制御しなければ、圧縮変形量は最大 246mm に及び、その大変形にともなう悪影響が懸念された。対策工の性能としては、隣接する合成セグメントおよび RC セグメントのひずみが終局ひずみを超えない程度の可とう性（圧縮変形）を発揮すれば良い。このことから、対策工では、所要の圧縮変形が発生した後は、軸力伝達材を介して再度軸力を伝達させ、それ以上の不要な変形は発生させない構造とした。

図-8 に損傷制御型鋼製セグメントのモデル化を示す。縦リブの圧縮特性（降伏強度等）は、要素実験で確認した P- $\delta$  曲線を反映した。ここで、要素実験では、座屈後の縦リブ剛性は軟化した。隣接セグメントに対して安全側の設定となるよう、バイリニアでモデル化した。また、縦リブ座屈後のセグメントの変形性能を 63mm で設定し、これを超える圧縮変形では、軸力伝達材により、軸圧

表-7 損傷制御型鋼製セグメントの概要

外径： $\phi$ 12.230m	内径： $\phi$ 11.530m
桁高：350mm（耐火工厚さ除く）	幅：1,100mm
継手：ボルト式	
耐火構造：あと施工型，パネル形式（検討中）	
縦リブ：100本/ring	
設計圧縮変形量：70mm（最大級シナリオ地震動に対して）	

縮力を伝達するモデルとした。

図-5 の「対策工あり」のとおり、解析上 63mm の圧縮変形量を設定することで、コンクリートの軸圧縮ひずみが終局ひずみ（ $\epsilon_{cu}=0.0035$ ）以内に収まることを確認した。この検討をふまえ、本セグメントの設計上の圧縮変形量は、安全側の 70mm で設定した。

### 3-4 構造概要

表-7 および図-9 に損傷制御型鋼製セグメントの構造を示す。縦断方向の断面性能（縦リブ他）は、レベル 2 地震動の発生軸力以上の耐力を有し、最大級シナリオ地震動では座屈（降伏）するものとした。図-10 に圧縮変形のイメージを示す。縦リブの座屈にともなう圧縮変形により、トンネル軸方向のひずみを許容値内に収めた。一方で、セグメントに必要以上の変形を生じさせず、損傷を制御する観点から、所定の圧縮変形以上の変形に抵抗する部材（軸力伝達材）を設定した。なお、主桁との接触面に緩衝ゴムを配置し、軸力伝達材

の偏当りの抑制に配慮した。

図-11 に地山側の構造を示す。縦リブの座屈挙動に追随、あるいは、座屈挙動を阻害しないよう、

スキンプレートとカバープレートはトンネル軸方向にスライドできる接合構造とした。併せて、セグメントの変形範囲には、止水プレートを設け、

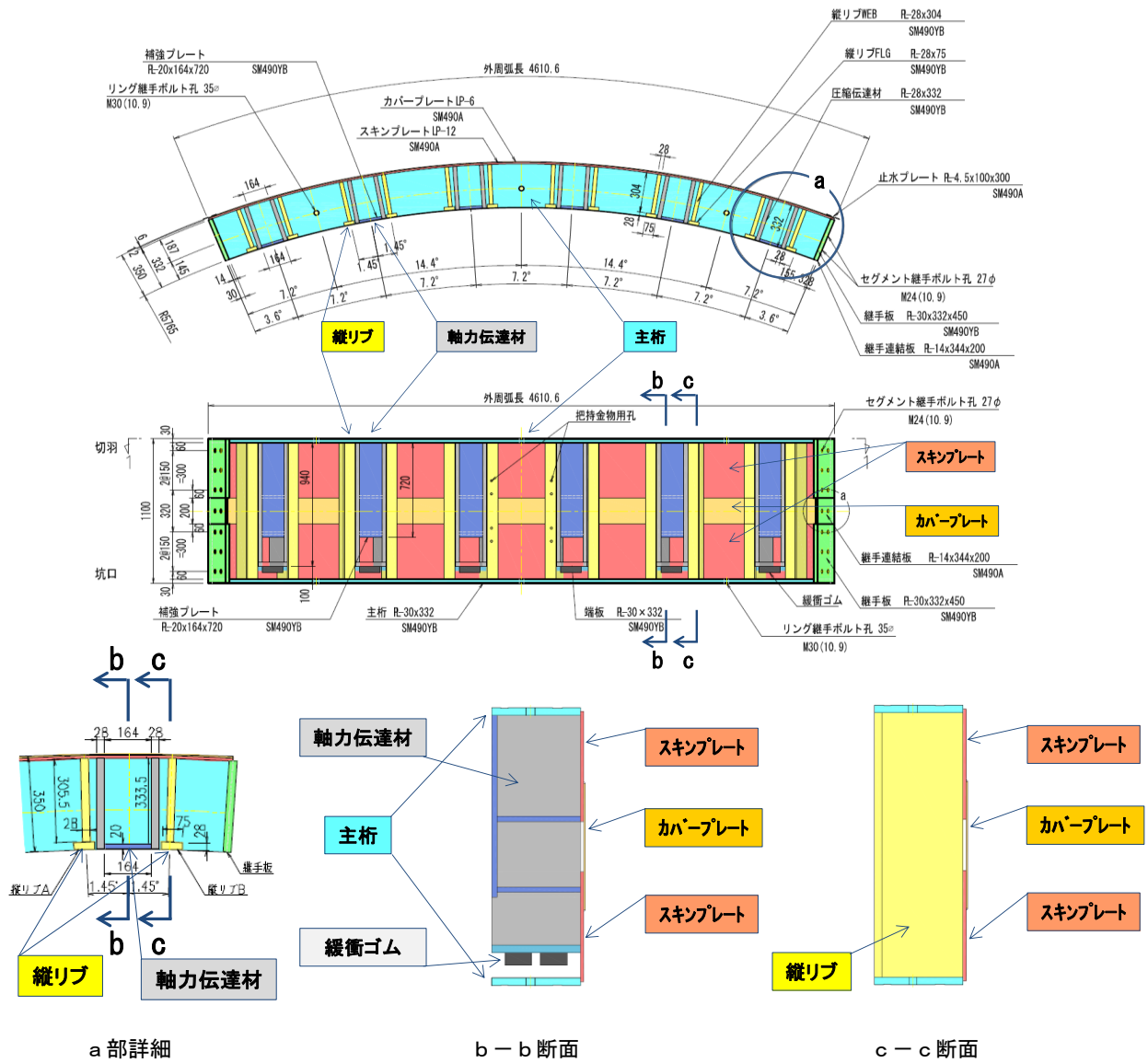


図-9 損傷制御型鋼製セグメントの構造

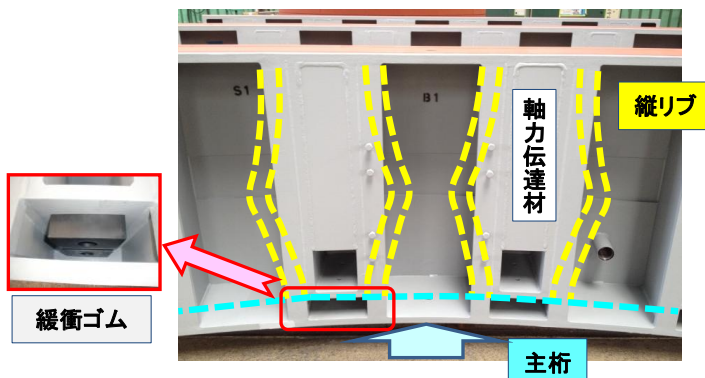


図-10 圧縮変形のイメージ

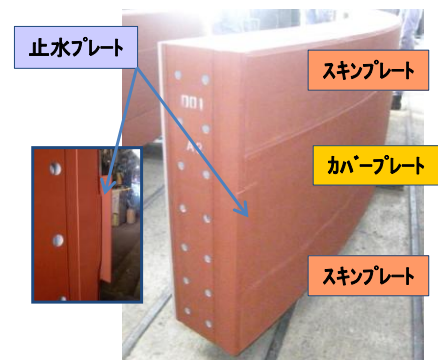


図-11 地山側の構造

圧縮変形時の土砂流入抑制に配慮した。

図-12 に施工状況（耐火パネル未施工）を示す。

## おわりに

今回開発した「損傷制御型鋼製セグメント」により、各レベルの地震動に対して、安全性の確保は大前提とした上で、使用性・耐久性・維持管理

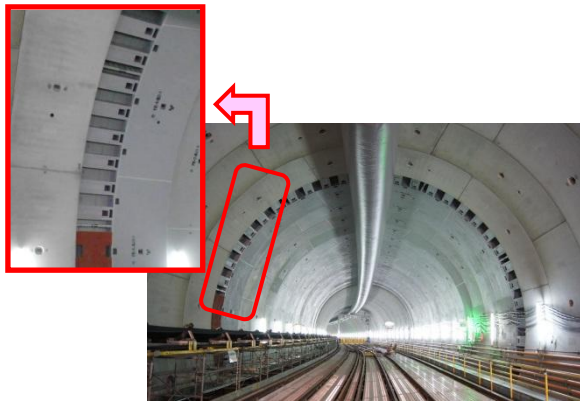


図-12 施工状況

性・経済性に優れた耐震対策を実施することができた。2014年9月現在、掘進を完了した先行トンネルにおいて、本セグメント（3リング）の施工を無事終えている。今後も完工に向けて鋭意努力し、大和川線の事業進捗を図っていきたい。

**謝辞：**本稿の一部（縦リブ要素実験等）は、阪神高速道路(株)・鹿島建設(株)による「損傷制御型鋼製セグメントの開発に関する共同研究」の成果である。また、検討にあたっては、「大和川線トンネル技術委員会（委員長：大西有三 京都大学名誉教授）」より多大なご指導を頂いた。ここに付記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 藤原 勝也, 仲 義史, 志村 敦: 阪神高速大和川線シールドトンネルの耐震検討, 阪神高速道路(株)技報第25号, 2010.
- 2) 阪神高速道路(株): シールドトンネル設計マニュアル, pp.10-1~10-40, 2011.2.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編, pp.142, 2012.3.

## SEISMIC STUDY ON THE YAMATOGAWA ROUTE SHIELD TUNNEL OF THE HANSHIN EXPRESSWAY USING DAMAGE CONTROL DESIGN CONCEPT

Tsutomu NIINA, Atsushi SHIMURA and Katsuya FUJIWARA

The shield tunnel of the Yamatogawa Route under construction consists of 2.0 km long twin tunnels with large cross sections (segment outer diameter: 12.230 m). Seismic analysis predicted excessive axial force in the longitudinal direction for the scenario of maximum earthquake ground motion. In this project the authors developed a displacement absorption mechanism under the concept of damage control design and applied it to structural change points on the steel segments. The mechanism was designed to utilize deformation of longitudinal ribs of the steel segments to absorb compressive force and suppress unnecessary deformation, thereby satisfying seismic requirements for the shield tunnel.

新名 勉



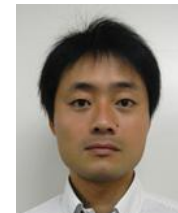
阪神高速道路株式会社  
建設事業本部 堺建設部  
設計課  
Tsutomu Niina

志村 敦



阪神高速道路株式会社  
建設事業本部 堺建設部  
大和川線建設事務所  
Atsushi Shimura

藤原 勝也



阪神高速道路株式会社  
建設事業本部 大阪建設部  
西船場ジャンクション建設事務所  
Katsuya Fujiwara