

大規模地震動に対する シールドトンネルの損傷制御設計

新名 勉¹・志村 敦¹・藤原 勝也²・玉田 康一³・牛垣 勝³

¹正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 堺建設部（〒590-0075 大阪府堺市堺区南花田口町2-3-20）
E-mail:tsutomu-niina@hanshin-exp.co.jp

²正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 大阪建設部（〒550-0011 大阪府大阪市西区阿波座1-1-4）

³正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 地下空間設計部（〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30）

大和川線シールドトンネル（阪神高速道路(株)施工区間）は、セグメント外径φ12.230m、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とした。そして、その具体策として「損傷制御型鋼製セグメント」を開発した。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。

Key Words : shield tunnel, maximum earthquake scenario, seismic performance, damage control design

1. はじめに

関西圏の大阪南部地域では、現在、大阪府、堺市、阪神高速道路(株)の三者の共同事業として、大阪都市再生環状道路の一部を形成する地域高規格道路「阪神高速道路大和川線」（以下、「大和川線」）の整備を進めている。大和川線は、阪神高速4号湾岸線と、14号松原線を接続する延長約9.7kmの自動車専用道路である。本路線は、約6.8kmにわたる大部分にシールドトンネルや開削トンネルとした地下構造形式を採用しており、さらにその約6割（路線全体の約4割）をシールドトンネル構造で計画している。そして、それらのシールドトンネルは、大断面で東西線間の併設離隔が1m程度（トンネル外径比で0.08D）の超近接施工により長距離を掘進する、既往事例の少ないシールドトンネルである（図-1、図-2）。

本稿は、阪神高速道路(株)が施工する大和川線シールドトンネル（No.1立坑～No.2立坑区間、延長約2.0km）を対象としている。これは、泥土圧式シールド機にて掘進する、セグメント外径φ12.230mの併設シールドトンネルである。

本シールドトンネルでは、横断方向および縦断方向の耐震設計を実施してきた¹⁾。縦断方向の耐震設計のうち、特に、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、トンネル軸方向の圧縮力が卓越した。この対策として、損傷制御設計を導入し、所要の耐震性能を確保することを目指した。具体的には、変位吸収機構を有する「損傷制御型鋼製セグメント」を開発し、これを、地盤ひずみが大い領域で、圧縮力が卓越したセグメントの構造変化点に適用した。本稿では、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。



図-1 路線位置図

2. シールドトンネルの概要

(1) トンネル概要

表-1に本シールドトンネルの概要を、図-3に平面図を示す。施工手順は、西端のNo.1立坑を発進立坑とし、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、通過型の中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、桁高の小さい合成セグメント（嵌合方式合成セグメントおよび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。

(2) 地盤条件

図-4に地質縦断面図を示す。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

表-1 シールドトンネル概要

シールド機	： 泥土圧式（外径 ϕ 12.470m, 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※	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

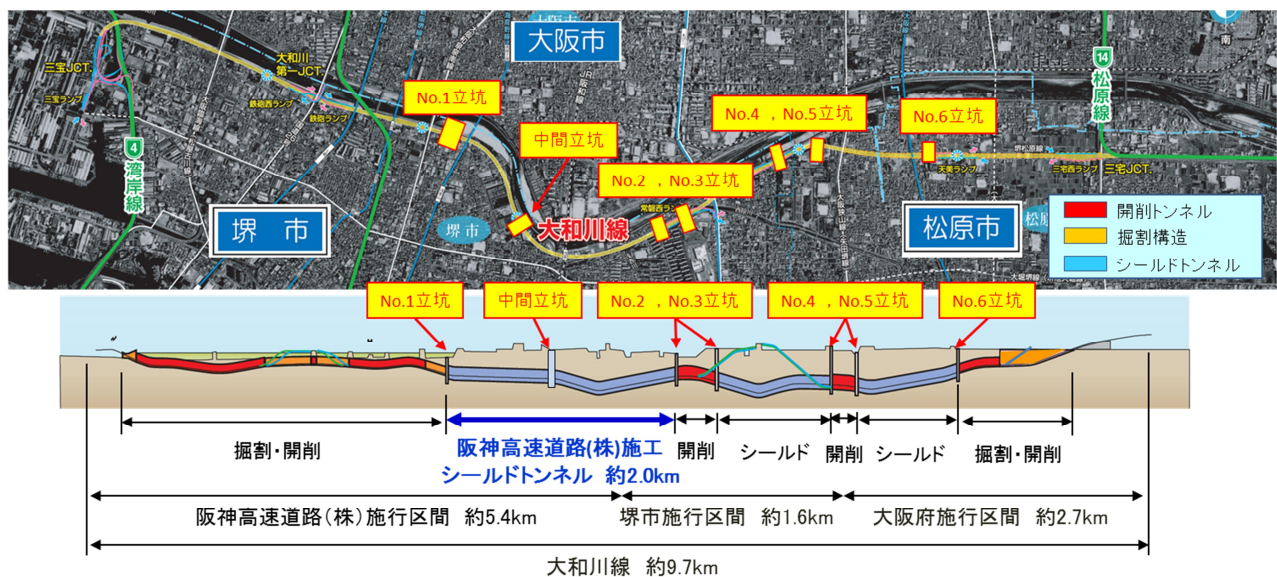


図-2 路線概要図

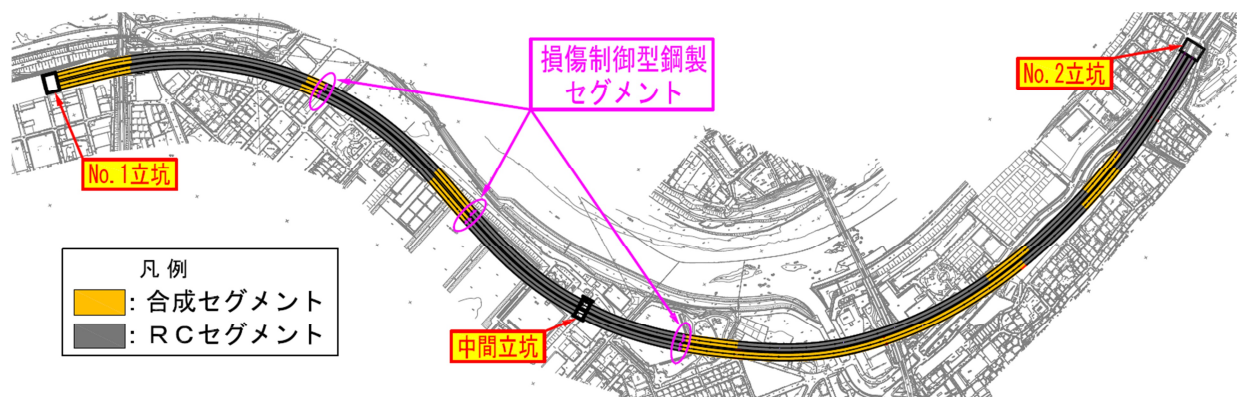


図-3 大和川線シールドトンネル（阪神高速道路(株)施工区間）平面図

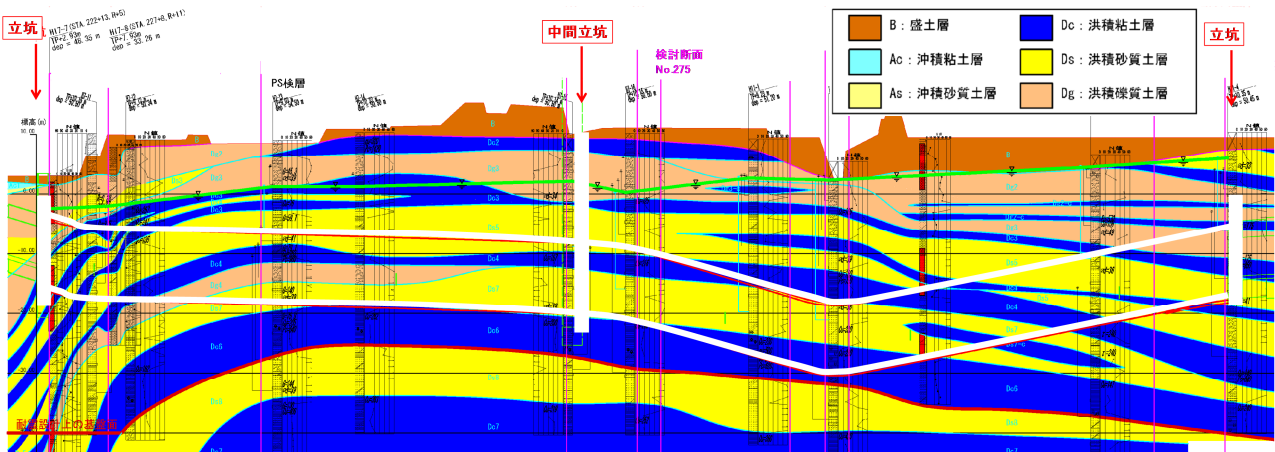


図-4 地質縦断面図

表-3 地震レベルと目標とする耐震性能²⁾

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、地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の震源とする南海・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	構造物全体が崩壊せず、地震時の利用者に対する安全性を確保	—	—

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。

3. 縦断方向の耐震設計

(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」²⁾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、大和川線的设计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では、地震動の特徴を考慮し、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対して導入した損傷制御設計について述べる。

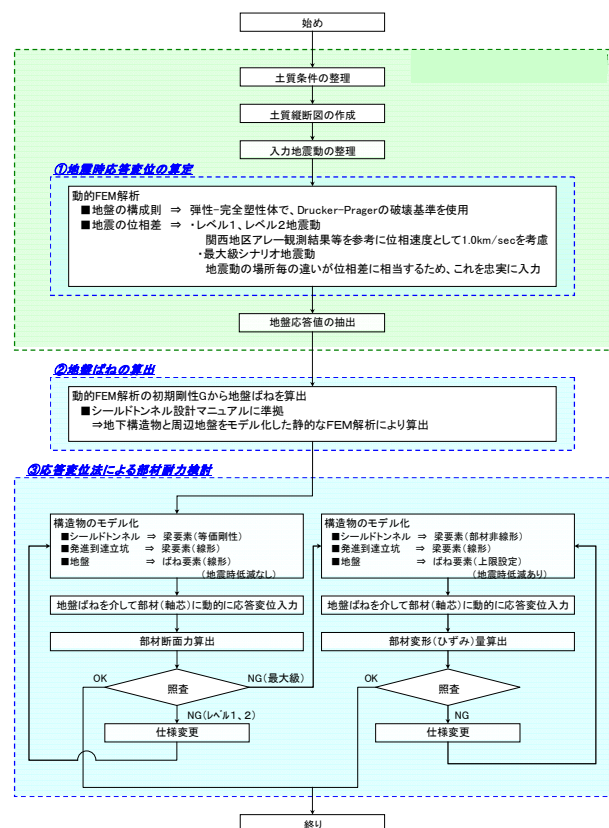


図-5 縦断方向耐震設計フロー

(2) 設計概要

図-5に設計フローを示す。地震時の地盤変位は3次元動的FEM解析により抽出した。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载荷した。

最大級シナリオ地震動の照査では、コンクリートの終局耐力を許容値とした。

(3) 地盤応答解析

地盤応答解析の結果、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）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。

(4) 部材耐力検討（応答変位法）

最大級シナリオ地震動における地盤変位に対して、線形解析では、セグメントの軸圧縮応力度およびリング継手の引張応力度が許容値を大幅に超過した。このため、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³⁾により部材の非線形性を設定した。地盤ばねについては、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、地盤ばね定数を低減させた。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。

図-6にトンネル縦断方向の最大地盤ひずみ分布を、図-7に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。部材の非線形性を考慮した解析を実施したが、図-7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。

(5) 対策工（変位吸収機構）の検討

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、変位吸収機構を導入し、所要の耐震性を確保することを目指した。

表-4に対策工の比較を示す。変位吸収機構として、従来より実績のある「①可とうセグメント」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が無く、開発検討は必要であるが、①と比較して、特に耐久性、維持管理性に優れる

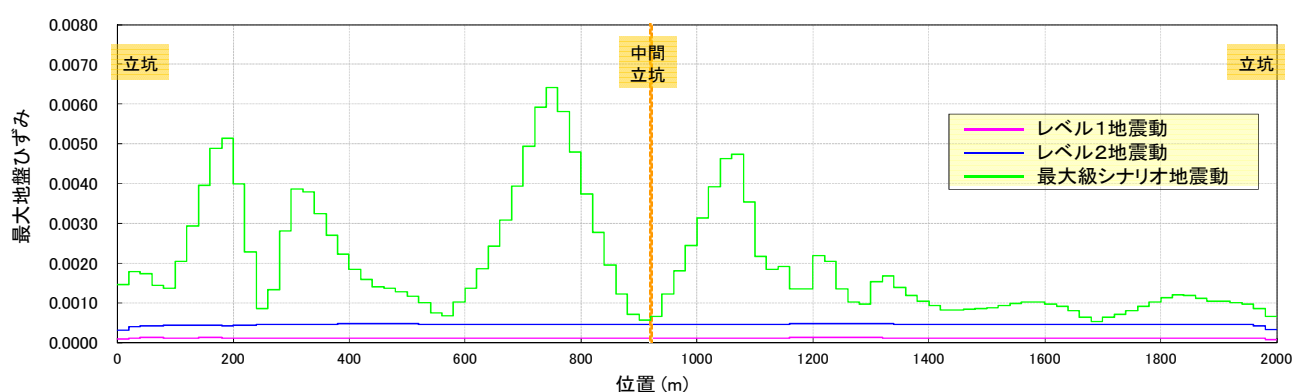


図-6 トンネル縦断方向の最大地盤ひずみ分布

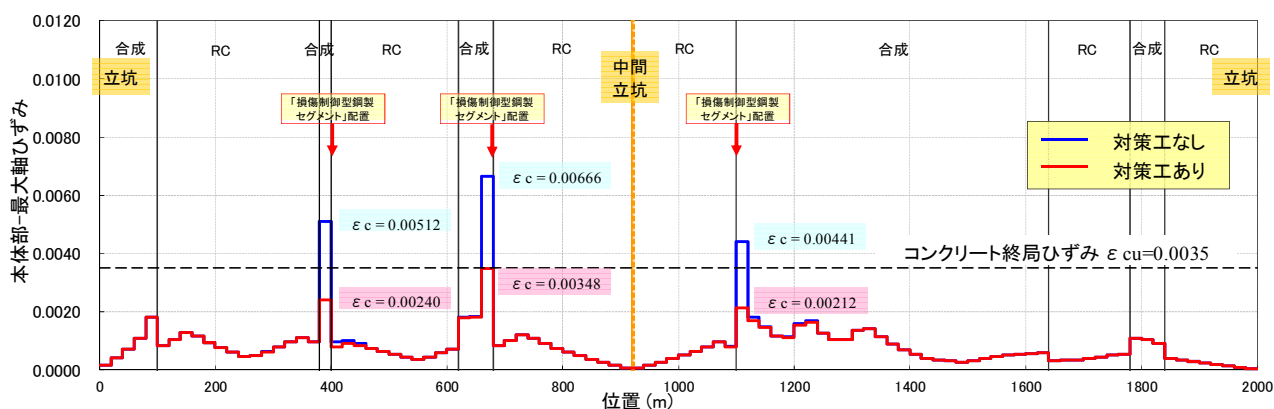


図-7 最大級シナリオ地震動に対する最大軸ひずみ分布（先行トンネル）

表4 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	△	○	

表5 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

ため、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。

4. 「損傷制御型鋼製セグメント」の開発

(1) 断面性能

表-5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が必要とする断面性能は、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）する断面性能である。3断面に適用するセグメントは共通化することとしたため、セグメントリングは256 600～469 500kNの軸圧縮力で座屈する断面性能とする必要があった。

(2) 縦リブ部材仕様の検討

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。

a) 解析検討

まず、3次元FEMモデルによる座屈解析を実施し、下記項目について検討した。

- 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

①の端部境界条件については、縦リブ両端の主桁との接合方法を変化させ、縦リブの降伏荷重への影響を確認した。その結果、端部の境界条件に関わらず、縦リブは降伏荷重で座屈することを確認した。

①の初期不整については、製作上最大の設置誤差を見立てた初期不整量を与え、降伏荷重への影響を確認した。その結果、初期不整を与えた場合は、降伏荷重に至らず座屈するものの、最大荷重の低下率は高々10%程度であり、レベル2地震動における縦リブの発生軸力は十分上回ることを確認した。

b) 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-8に実験供試体の縦リブ仕様を示す。供試体はウェブ厚を $t=28\text{mm}$ 、 30mm 、 32mm に変化させた3水準（各3体）で設定した。圧縮力は、一方向単調載荷にて変位100mmまで載荷し、座屈挙動を確認した。

図-9に座屈状況、図-10に各供試体の最大荷重を示す。これらの結果から、実験供試体の最大荷重は、いずれの

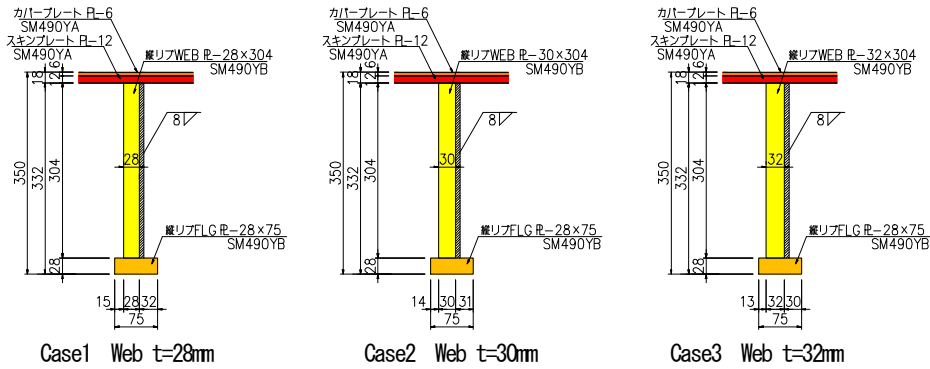
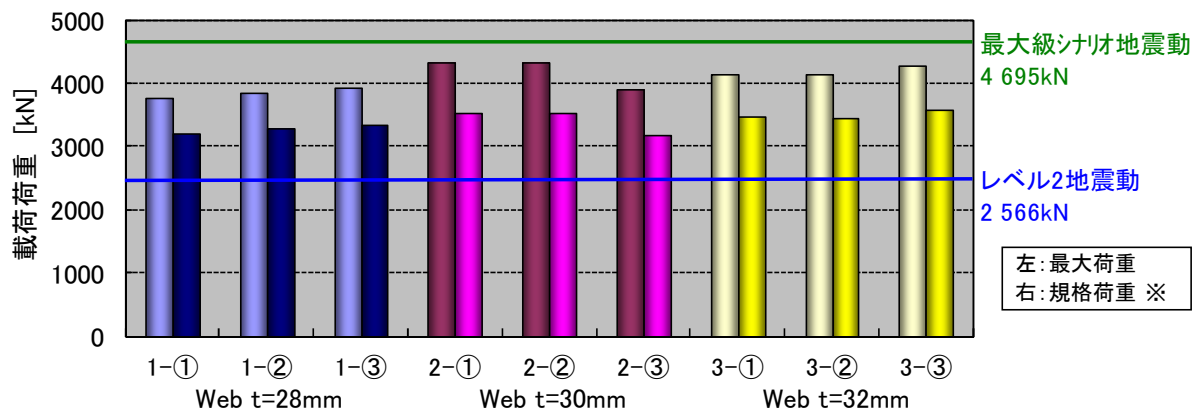


図-8 実験供試体（縦リブ仕様）



図-9 座屈状況
(Case 1-①)



※各試験結果を規格降伏荷重で正規化。
例：1-① $3,778 \text{ kN} \times 355 (\text{規格降伏点}) / 418 (\text{ミルシート降伏点}) = 3,209 \text{ kN}$

図-10 各供試体の最大荷重

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っており、所定範囲の荷重で座屈が生じることを確認した。

なお、④の座屈時の面外変形の方法は、初期不整によるウェブのたわみの方向が影響し、その方向へ変形が進むことを確認した。即ち、縦リブは左右いずれの方向にも面外変形を生じる可能性があり、本セグメントはこれをふまえて製作した。

(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。対策工の要求性能としては、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-11に損傷制御型鋼製セグメントのモデル化を示す。

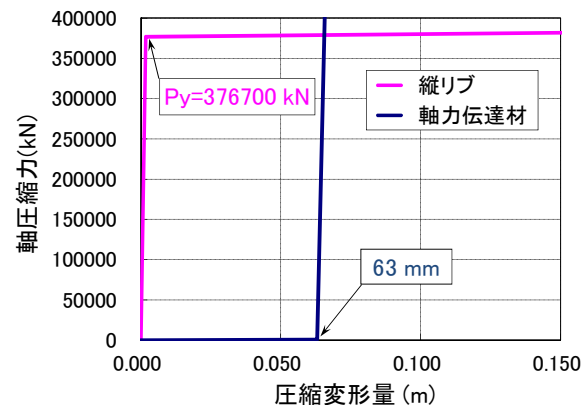


図-11 損傷制御型鋼製セグメントのモデル化

縦リブの圧縮特性（降伏強度等）は、要素実験で確認したP-δ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が、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、軸圧縮力を伝達するモデルとした。

図-7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。

(4) 構造概要

表-6および図-12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-13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-14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、止水プレートを設置、圧縮変形時の土砂流入抑制に配慮した。

表-6 損傷制御型鋼製セグメントの概要

外径：φ12.230m	内径：φ11.530m
桁高：350mm（耐火工厚さ除く）	幅：1100mm
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）	

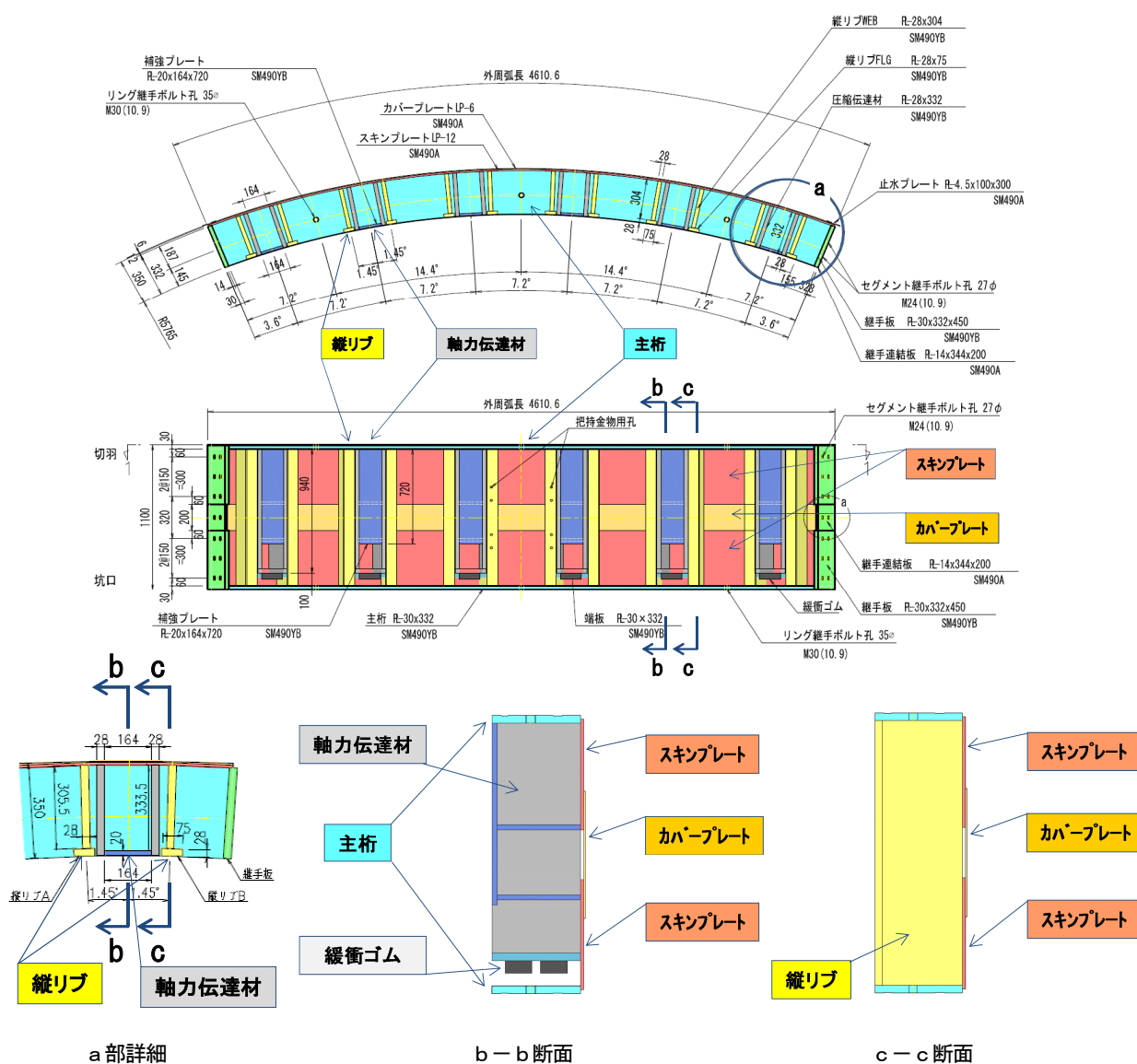


図-12 損傷制御型鋼製セグメントの構造

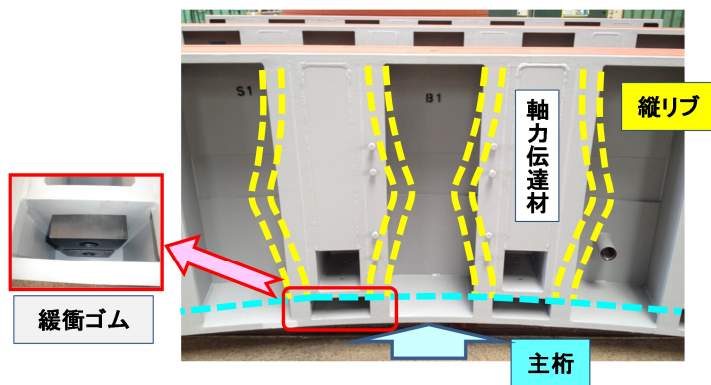


図-13 圧縮変形のイメージ

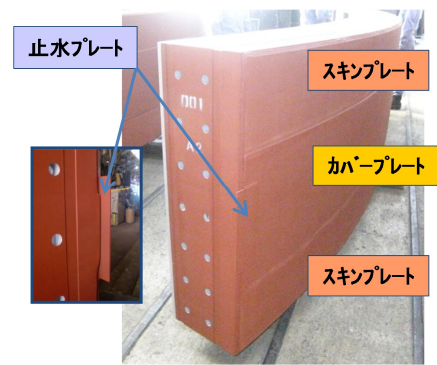


図-14 地山側の構造

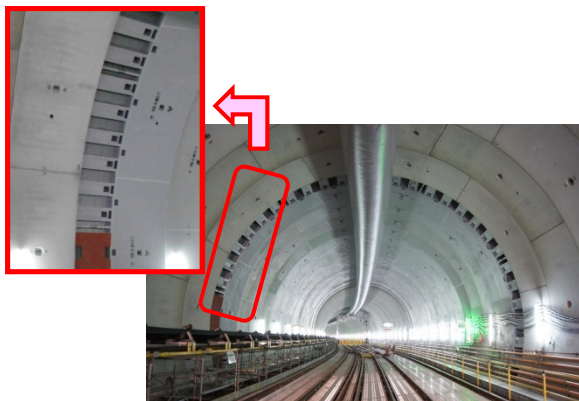


図-15 施工状況

図-15に本セグメントの施工状況（耐火パネルは未施工）を示す。

5. 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：本稿の検討では、「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.

(2014. 9.15 受付)

SEISMIC STUDY ON THE SHIELD TUNNEL FOR THE LARGE-SCALE EARTHQUAKE MOTION USING DAMAGE CONTROL DESIGN CONCEPT

Tsutomu NIINA, Atsushi SHIMURA, Katsuya FUJIWARA, kouichi TAMADA and masaru USHIGAKI

The shield tunnel of Yamatogawa Route, which Hanshin Expressway Company Limited is constructing, is large-cross-section adjacent tunnel (road extension is about 2.0km, outside diameter of segment is 12.230m). The maximum earthquake scenario is an extremely large earthquake motion, exceeding that of Level 2. The seismic analysis showed that axial force would be excessive in the longitudinal direction under the maximum earthquake scenario. In this project, we employed damage control design concept to ensure the seismic performance. This paper reports the design of the segment adopted as a countermeasure to absorb the compressive force.