

巨大地震に対応する免震構造 THE免震 ～ワイドレンジシステム～

A Seismic Isolation System with High Safety Margin for Unexpected Input Ground Motions

鈴木 直幹*1、山本 俊司*2、赤澤 資貴*3

1. はじめに

南海トラフ沿いの巨大連動地震により予測される長周期長時間地震動や熊本地震で観測された震源近傍の大振幅地震動への対応など、従来の免震技術では対処が困難な問題が提起されている。巨大地震を受ける免震構造の大きな課題として、上部構造の擁壁への衝突がある。これを回避するためには、免震層の水平クリアランスの拡大があるが、水平クリアランスを確保したとしても、免震ゴムの性能にも限界があり、限界変位を超える場合には、ゴムのハードニングによる上部構造への過大な地震力伝達がある。筆者らは、これらの問題に対応するため、「鉛プラグ入り積層ゴム（Lead Rubber Bearing、LRB）」の上または下に、フッ素樹脂系すべり材とステンレスすべり板で構成する高摩擦すべり機構を重ねて配置したすべり機構付き鉛プラグ入り積層ゴム支承^{1), 2)}（通称QTB：竹中工務店・オイレス工業共同開発、摩擦係数 μ 0.13）を実建物へ初適用し、弾性すべり支承および粘性系ダンパーと組み合わせ、すべり系の支承のみで建物を支持する免震システム「THE免震[®]（Takenaka Highgrade Earthquake resistant system）～ワイドレンジシステム～」を考案した。

2. 免震システム概要

すべての支承材をすべり支承とし、減衰はQTBの鉛プラグ・粘性系ダンパー・すべり支承の摩擦とした免震システムを考案した。すべり支承は低摩擦・高摩擦・

QTBの3種類とし、中小地震から巨大地震までのワイドレンジに対応する免震システムとした。

図-1に開発したQTBの構成と地震時の挙動を示す。通常地震時には、QTBのすべり機構部は摩擦力によって水平に固定されており、LRB部が地震の動きに追従することによって免震性能を発揮する。一方、巨大地震時には、地震の動きに追従する箇所がLRB部からすべり機構部に切り替わり、上部建物への過大な地震力の伝達を防ぐ。写真-1及び写真-2にQTBの出荷前状況と載荷実験状況を示す。

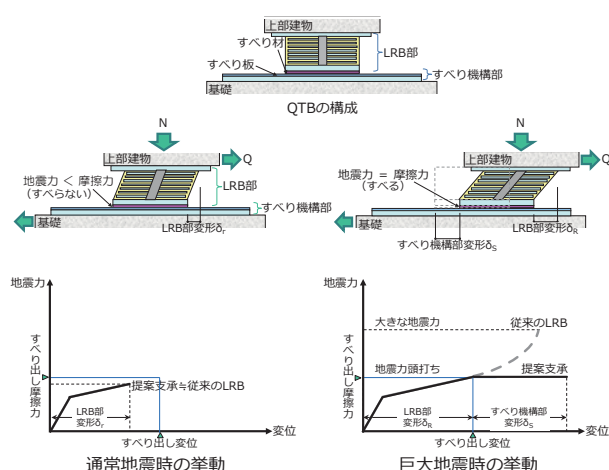


図-1 QTBの地震時の挙動

*1 SUZUKI Naomiki : 株式会社竹中工務店 大阪本店 設計部構造7G グループリーダー
 *2 YAMAMOTO Shunji : 株式会社竹中工務店 大阪本店 設計部構造7G 課長
 *3 AKAZAWA Motoki : 株式会社竹中工務店 大阪本店 設計部構造12G 主任



写真-1 QTB出荷前状況



写真-2 QTB載荷実験状況

図-2にQTBと低摩擦・高摩擦すべり支承・粘性系ダンパーから構成される本免震システムの概念図を示す。中～大地震時には、弾性すべり支承が撓動することで建物を長周期化させ、QTBはLRBとして挙動させ地震力を低減する。想定外の巨大地震時には、QTBも併せて撓動することで、積層ゴムの損傷と建物に加わる地震力の増大を防ぐシステムとなっている。また、風荷重時や小地震時には、粘性系ダンパーでエネルギーを吸収する。

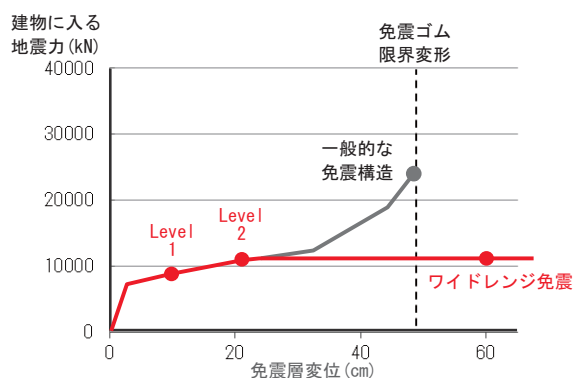
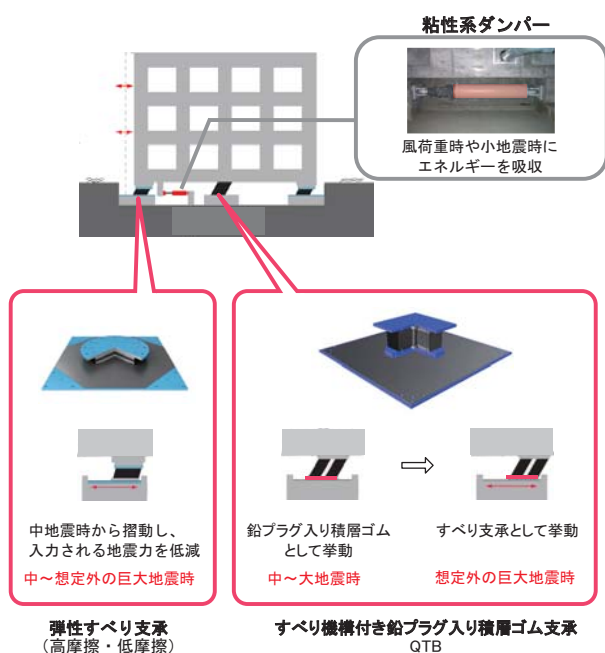


図-2 THE免震ワイドレンジシステム

3. 建物概要

本建物は、自社新入社員寮の建替計画である。図-3に外観パースを示す。阪神淡路大震災では、寮生が被害者の救出や、負傷者の看護、消火作業などの活動を行い、ホールは地域住民の避難所として半年間開放されるなど、深江竹友寮は地域の復旧に大きな役割を果たした。この経験を受け継ぎ、災害時に寮生の命を守り、地域の防災拠点をも担いうる、最上級の安心と安全性の実現を目指した。

1階には寮生が集うさくらホールや食堂、浴室などの共用部と、一部に寮室がある（図-4）。2、3階は寮室が主となっている（図-5、6）。寮室は全て個室とし、寮室10室をひとまとまりの「クラスター」とし、中央に共有のリビング（「クラスターリビング」）を配置している。共用部に配置されたトイレや洗面といったユーティリティをシェアすることで、自然と寮生同士が顔を合わせる機会を増やすように配慮している。これらにより各寮生のプライバシーを確保しながらも寮生同士の交流を促進させることを意図した平面計画としている。また、寮室は2段ベッド（下は勉強スペース、上はベッド）とすることで現在の寮室の1.6倍の広さを確保している。このように寮室を立体的に有効利用することで、1フロアの寮室数の最大化と建物の低層化を両立するとともに、寮生同士の出会いを限りなく増やす配慮をしている。

建 築 地：兵庫県神戸市東灘区深江北町
 建物用途：寄宿舍
 建築面積：2,415m²、延床面積：6,021 m²
 最高高さ：12.25 m、規模：地上3階
 構造種別：RC, SRC造 一部S造
 構造形式：免震構造
 架構形式：耐力壁を有するラーメン架構（1階）、
 ラーメン架構（2,3階）
 基 礎：直接基礎、竣工：2019年7月（予定）



図-3 建物外観パース

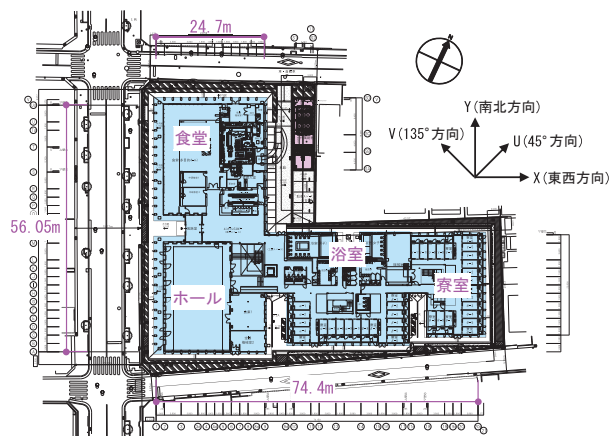


図-4 1階平面図兼配置図

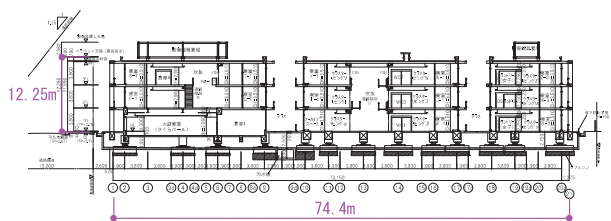


図-5 断面図

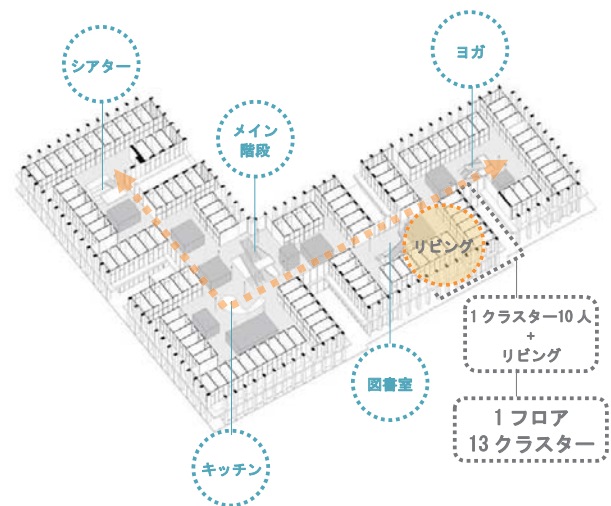


図-6 基準階アクセス

4. 構造計画概要

4.1 設計クライテリア

表-1に設計クライテリアを示す。

基礎についても同様とし、レベル2地震動に対して部材応力は短期許容耐力以下、支持力は短期許容支持力以下としている。

表-1 設計クライテリア

荷重レベル		レベル1	レベル2
想定外力	建設省告示1461号	稀に発生する地震動	極めて稀に発生する地震動
	標準観測波	地動最大速度 250mm/s ²	地動最大速度 500mm/s ²
	サイト波	—	OS3*
	地震規模	中規模地震相当	大規模地震相当
目標性能	地上部	部材応力 短期許容耐力以下	短期許容耐力以下
	層間変形角	1/400以下	1/200以下
	基礎	部材応力 短期許容耐力以下	短期許容耐力以下

* 国土交通省「長周期地震動への対策」における基盤促波

4.2 主要部材断面

図-7に構造計画概要図を示す。

表-2に代表的な構造断面と使用材料を示す。

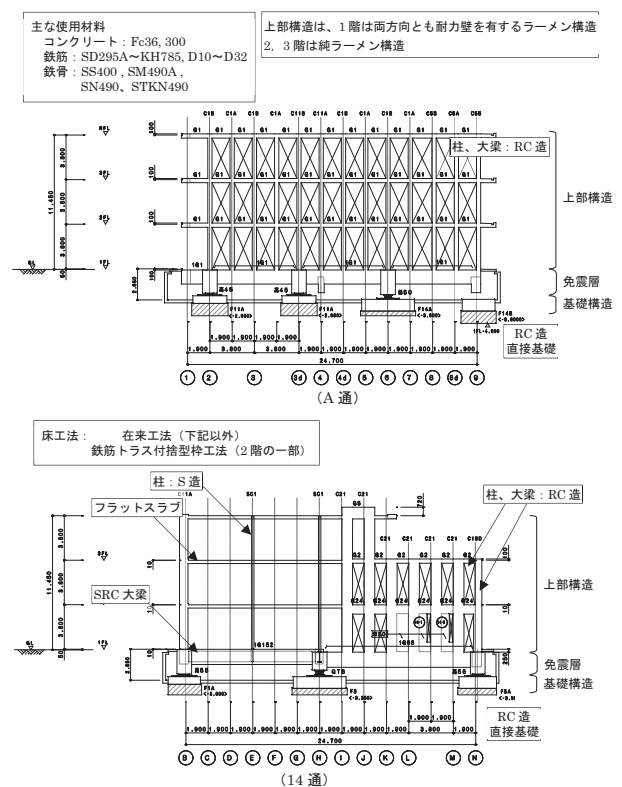


図-7 構造計画概要図

表-2 代表的な構造断面と使用材料

階	柱		大梁		壁	
	C1A 断面 Fc/主筋	C2I 断面 Fc/主筋	G1 断面 Fc/主筋	G2 断面 Fc/主筋	16 通 L-N 通間断面 Fc/横筋,縦筋	H 通 6-9 通間断面 Fc/横筋,縦筋
R	—	—	750×360 Fc36/HD25	—	—	—
3	360×700(550) Fc36/HD25	360×900 Fc36/HD25	750×360 Fc36/HD25	—	—	—
2	—	—	—	—	t=200 Fc36/LD13,LD13	t=300 Fc36/LD13,LD13
1	—	—	—	—	—	—

* 「LD」は SD295A、「HD」は SD345、を示す。

単位 (寸法: mm)

4.3 フラットプレート+S柱でひとつながりの内部空間を実現

寮生同士の交流を促進させるため、内部空間は寮室以外、できる限り仕切りのない、ひとつながりの内部空間の実現を目指した。そこで、内部は5.7m×5.7mを基本グリッドとした厚さ280mmのフラットプレート構造に細いS柱を設ける構造計画とした（図-8及び図-9）。フラットプレート構造の課題として、適用スパンが小さく、柱の本数が多くなり、平面計画上の制約が生じるということがあったが、ボイドスラブを採用することにより、エントランスや一部の共用リビングでは、最大11.4m×7.6mスパンを同厚のフラットプレートで成立させ、基本グリッドだけではない変化に富んだ使いやすい空間を実現した。また、1階の梁はSRC梁とし、S柱はSRC梁からの陸立ち柱とすることで、大スパン化を図り、免震装置数の低減に加えて、建て方の先行化やたわみの抑制など、施工性や経済性に配慮した計画とした。外周に設けた梁については、逆梁とすることで、図-10の断面パースに示すように内部から外部までスラブ下端が揃い、一体感ある開放的でフレキシビリティの高い空間を確保することができた。内部のS柱については露出する部分はφ165の丸柱とし、その他については、フラットバー120×200にすることでシャッターレールや寮室の間仕切り壁に納めるように工夫し、できる限り内部の柱の存在感を消した。

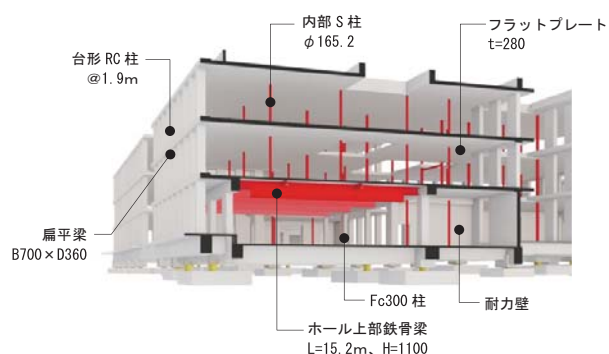


図-8 構造計画概要図

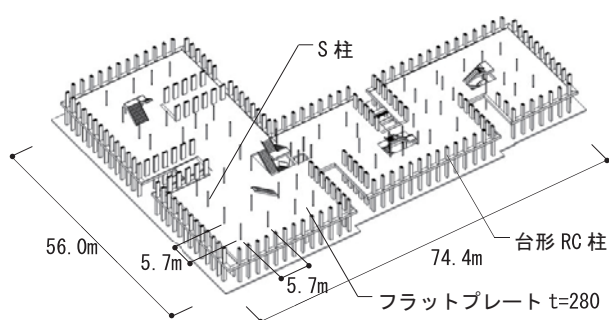


図-9 基準階構造体アクトメ



図-10 断面パース

4.4 地域に開かれた象徴的な外観の実現

「旧深江竹友寮」は完成してからの57年の間に地域に根付き、年に一度「寮祭」と呼ばれる寮生主催のお祭りをを行い、地域の人との交流が図られていた。そこで、新しい寮では、地域に開きながらも寮生のプライバシーを確保する象徴的な外殻フレームの実現を目指した。寮の外観は寮室の連続となるため単調になりがちであるが、外観に変化を与えることができないかを意匠設計者と協議した。そこで、1.9mピッチに配置される寮室間の間仕切りと同じ間隔でRC柱を設けることで、寮室内のプライバシーを確保しつつ、純ラーメン構造である2,3階の4割の地震力も負担する耐震要素として有効利用することとした（図-11）。このRC柱は1.9m間隔で設けることで、1本当たりの負担応力を低減させ、見つけ幅を柱梁とも最小の360mmとした。さらに図-12に示すように柱形状は台形とし、その鋭角の向きを上下（階毎）・水平とも交互に配置することにより、地域に表情をつくり出すと同時に開放感を与えた象徴的な外観を実現した。また、この外殻フレームにより程良く日射を抑制することで、内部環境の向上も図った。



図-11 外観（正面）

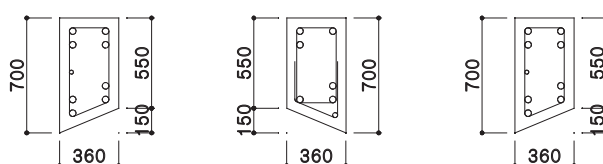


図-12 台形柱の断面

4.5 免震システム詳細

図-13に免震部材配置図、図-14に免震層の変位-層せん断力関係を示す。本システムにより下記2点の実現を目指した。

- ①中～大地震時には、弾性すべり支承が撓動することにより建物を長周期化させ、QTBはLRBとして挙動することにより地震力を低減し、残留変形を復旧不要な範囲に留める
- ②想定外の巨大地震時には、QTBも併せて撓動することで、積層ゴムの損傷と建物に加わる地震力の増大を防ぐ

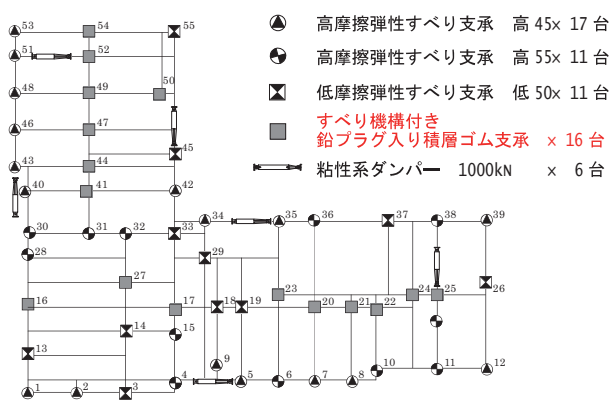


図-13 免震部材配置図

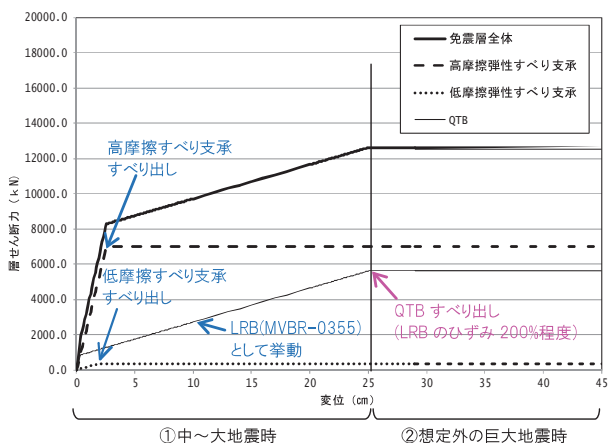


図-14 免震層の変位-層せん断力関係

5. 基礎構造計画

図-15に地盤改良伏図を示す。本計画地は西宮市から神戸市灘区にかけて広がる日本有数の酒所、灘五郷の酒造に使用する「宮水」流域であるため、宮水対策として、宮水の流れを遮らない配置の直接基礎とし、地盤改良にはラブルコンクリートを採用している。

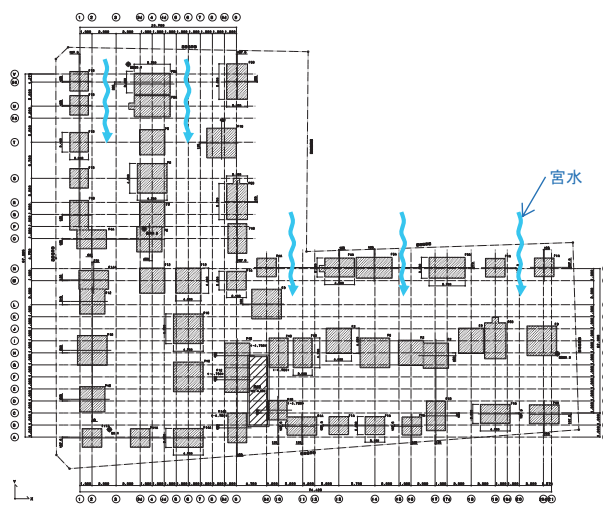


図-15 地盤改良伏図

6. 地震応答解析

6.1 解析モデル

図-16にQTBの地震応答解析モデル概念図を示す。表-3、4に固有周期および固有振動数を示す。

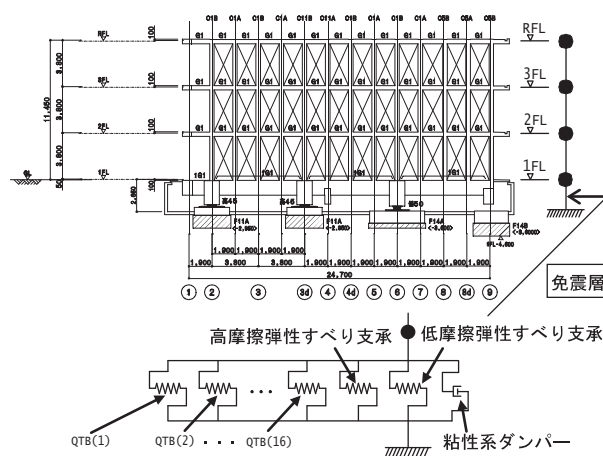


図-16 地震応答解析モデル概念図

表-3 免震層固定時の固有周期および固有振動数

次数	U 方向		V 方向	
	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)
1	0.42	2.38	0.50	2.00
2	0.16	6.11	0.20	4.99
3	0.11	9.37	0.12	8.14

表-4 免震層変位200mm相当時の固有周期および固有振動数

次数	U 方向		V 方向	
	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)
1	3.10	0.32	3.08	0.32
2	0.32	3.15	0.38	2.63
3	0.15	6.55	0.19	5.40

6.2 入力地震動

検討対象地震動は、設計用レベル2地震動として標準3波 (Elcentro1940NS, TAFT1952EW, Hachinohe1968NS) 及び告示波 (A: 八戸位相, B: 神戸位相, C: 乱数位相)、THE免震の効果検証用の長周期地震動としてOS1~3地域で作成した基盤促波、震源近傍の大振幅地震動として上町断層帯地震の予測地震動³⁾ (A4ゾーンの3Cフラットタイプ1波と3Cパルスタイプ1波)を採用した (表-5)。図-17、18に擬似速度応答スペクトルを示す。本建物の免震層変位200mm相当時の固有周期3秒程度での応答は、レベル2地震動と比較すると、最大で2.5倍程度となっている。

表-5 設計用および余裕度検討用入力地震動

		レベル1	レベル2	余裕度検討用レベル
		加速度 (mm/s ²)	加速度 (mm/s ²)	加速度 (mm/s ²)
標準波	Elcentro1940NS	2,555	5,110	—
	TAFT1952EW	2,485	4,970	—
	Hachinohe1968NS	1,745	3,489	—
告示波	告示波 A	1,007	4,112	—
	告示波 B	946	4,452	—
	告示波 C	907	3,953	—
地域波	OS1	—	1,944	—
	OS2	—	2,742	—
	OS3	—	3,060	—
	3C フラットタイプ	—	—	8,293
	3C パルスタイプ	—	—	5,406

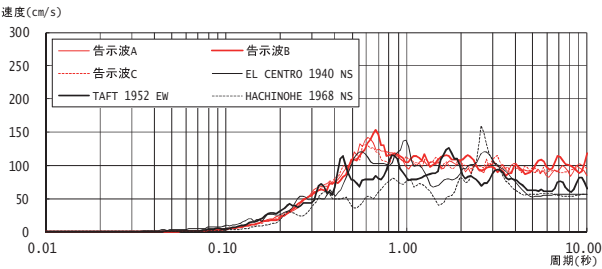


図-17 レベル2地震動 擬似速度応答スペクトル

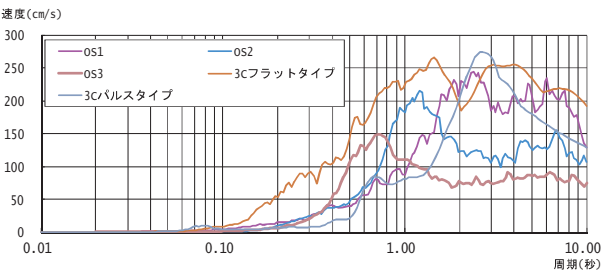


図-18 THE免震の効果検証用長周期地震動 擬似速度応答スペクトル

6.3 応答解析結果

応答解析結果として図-19に最大変位、図-20に最大層間変形角、図-21に最大加速度、図-22に最大層塑性率、表-6に免震層の最大変形、残留変形を示す。いずれの地震波も設計クリアランスの800mm以下の最大変形量となっている。レベル2地震動、長周期地震動については、いずれも残留変形は50mm以下となり、地震後の免震部材の原点復帰が不要な程度である。すべての支承が撓動することで加速度、層せん断力が頭打ちとなり、層塑性率は最大でも上町断層帯地震の0.31となっている。

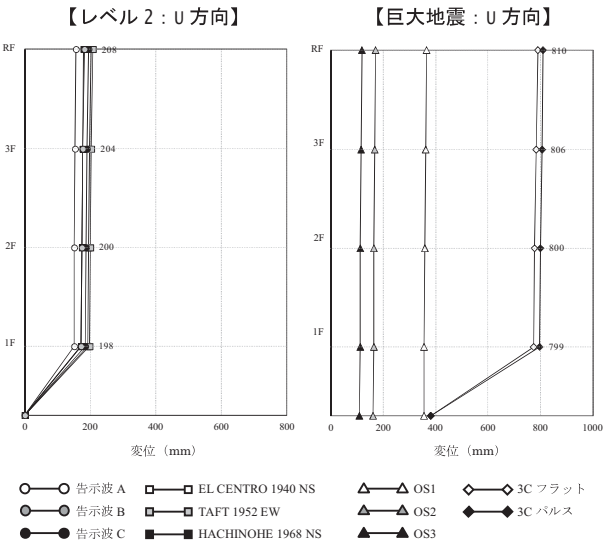


図-19 最大変位

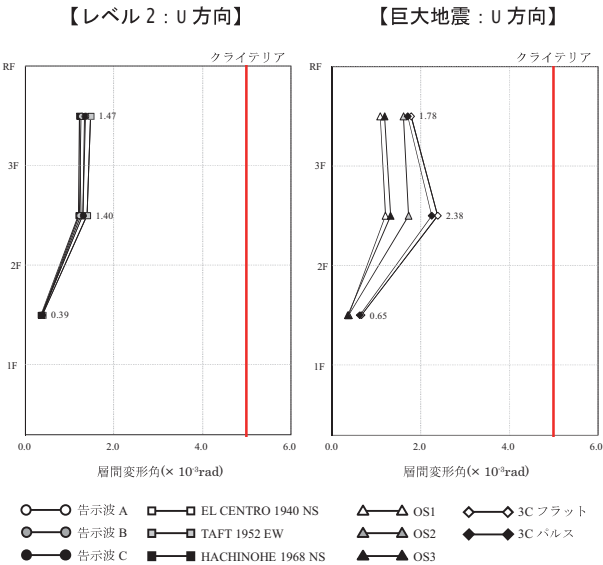


図-20 最大層間変形角

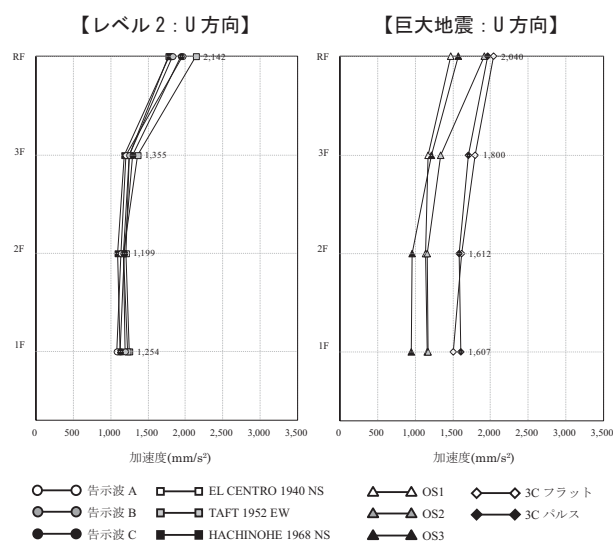


図-21 最大加速度

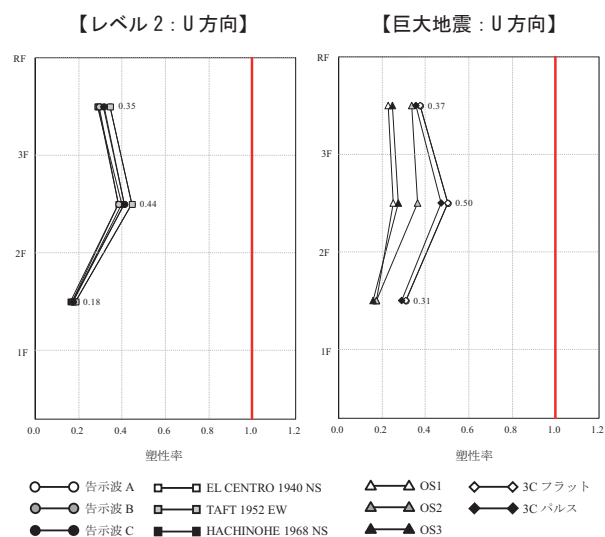


図-22 最大層塑性率

表-6 最大変形・残留変形(mm)

	告示波A	告示波B	告示波C	OS1	OS2	OS3	3Cフラット	3Cパルス
最大変形	146	161	179	357	163	111	776	799
残留変形	9	7	7	1	20	32	331	371

QTBの挙動を表す一例として、OS1地震動時のLRB部の水平変位D1の時刻歴を図-23に、QTBの変位－水平力関係を図-24に示す。図-23よりQTBのすべり出し変位は286mm（LRB部ゴムせん断歪み241%）となり、それ以上の変形がQTBに生じる場合はすべり機構がすべり出し、LRB部の変形が抑制されていることが同図より確認される。

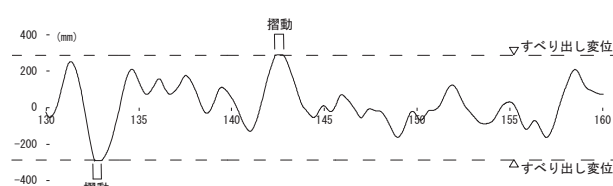


図-23 D1の時刻歴変化

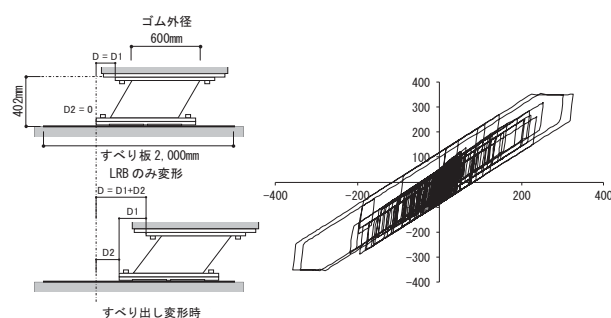
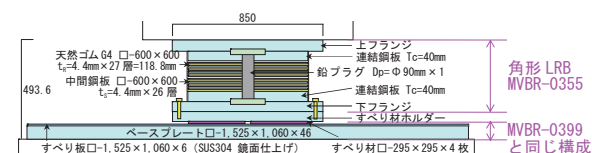


図-24 QTBの変位－水平力関係

7. QTBの大臣認定上の扱い

QTBは、免震材料の大臣認定を取得していないが、2018.6.1に改正された告示1461号に基づく法20条認定の枠組みで建物として大臣認定を取得した。図-25にQTBの構成を示す。大臣認定を取得したLRB（MVBR-0355）と弾性すべり支承（MVBR-0399）のすべり板部分の組合せで構成した。

日本建築総合試験所に、法20条認定の枠組みを使うにあたり事前相談し、国土交通省との打合せに同行していただいた。なお、性能評価機関である日本建築総合試験所には、国土交通省との事前打合せへの同行、性能評価の審査としてのQTBの性能確認試験の立会い確認などのご配慮を頂き、スムーズに大臣認定を取得することができた。



◆性能確認試験・検査など
 ・MVBR-0355
 ・MVBR-0399
 に準ずる

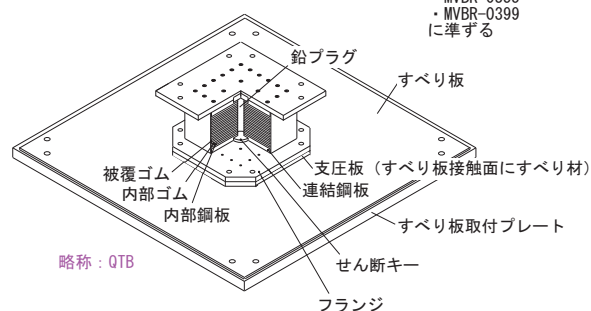


図-25 QTBの構成

8. 施工状況

写真-3～6に施工状況を示す。免震材料は設置済で、1階床を施工中である。(2018年11月中旬)



写真-3 全景施工写真



写真-4 免震材料施工写真1



写真-5 免震材料施工写真2



写真-6 1階SRC梁施工写真

9. 展望

今後、病院・行政庁舎・警察署・消防署・学校など、巨大地震直後も機能を維持する必要がある建物や、原子力発電関連施設・バイオハザード対応施設など、最上級の耐震安全性が求められる建物などへ、「THE免震[®] (Takenaka Highgrade Earthquake resistant system) ～ワイドレンジシステム～」のさらなる適用を図っていく。

謝辞

QTBの開発者である(株)竹中工務店の濱口氏、QTBの開発・実験に協力いただいたオイレス工業(株)、大臣認定を取得していない免震材料を採用するにあたり尽力いただいた日本建築総合試験所の野村氏に感謝する。

【参考文献】

- 1) 濱口他：設計想定を超える地震動に対して高い耐震安全性を有する免震構造の提案，日本建築学会構造系論文集，第82巻，第739号，pp.1349-1359，2017.9
- 2) 濱口他：フェイルセーフ機構を備える鉛プラグ入り積層ゴム支承の実用化に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第83巻，第749号，pp.1009-1019，2018.7
- 3) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針，2015.2

【執筆者】



*1 鈴木 直幹
(SUZUKI Naomiki)



*2 山本 俊司
(YAMAMOTO Shunji)



*3 赤澤 資貴
(AKAZAWA Motoki)