

鎌ヶ谷市庁舎 免震レトロフィット



山口 高嗣
桑田建築設計事務所



中川 理
構建設計研究所



川上 雅也
大成建設

1 はじめに

鎌ヶ谷市庁舎は、昭和51年に竣工した建物であり、耐震診断の結果、目標性能の $I_{so}=0.90$ を満足しないことより、耐震補強が必要と判断された。しかしながら、壁やブレースを配置する従来型の耐震補強では、建物内部空間の使用制限が生じること、また、市庁舎の機能を維持しながらの補強（居ながら補強）が困難である等の理由から、これらの問題を解消すると共に、地震力も大幅に低減できる「免震工法」による改修が採用された。

2 建物概要

竣 工：昭和51年12月（既存）
 平成29年6月（改修：免震レトロフィット）
 建築面積：2,547m²
 延べ面積：10,086m²
 階 数：地下1階、地上6階、塔屋2階
 構造種別：鉄骨鉄筋コンクリート造
 架構形式：耐震壁付ラーメン構造
 施 主：鎌ヶ谷市
 設 計（既存、改修 共）：
 （意匠）株式会社 桑田建築設計事務所
 （構造）株式会社 構建設計研究所
 監 理（既存、改修 共）：
 株式会社 桑田建築設計事務所
 （協力）株式会社 構建設計研究所
 施 工（既存、改修 共）：
 大成建設株式会社

3 計画概要

居ながらの改修工事とするため屋内に支障を生じさせないこと、B1階機械室の設備機器・EVへの干



写真1 鎌ヶ谷市庁舎全景

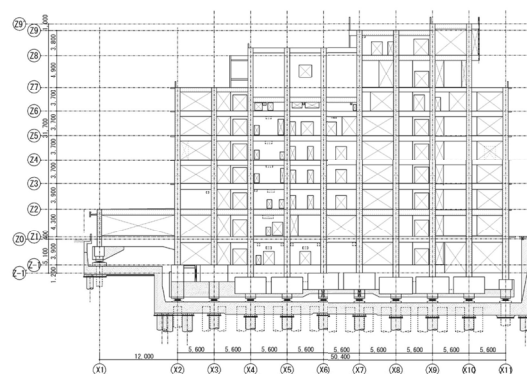


図1 軸組図（改修後）

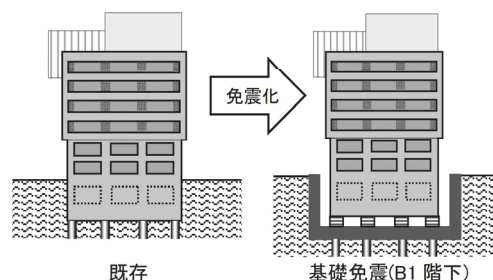


図2 基礎免震へ計画

渉が生じないこと、建物外周部で比較的深く厚い擁壁の構築やクリアランス確保が可能なことなどから、B1階下を基礎免震とする計画が採用された。

4. 構造概要

4.1 免震計画

本建物は、主体部である高層部（B1～6階＋塔屋2階）と低層部（1階のみ）から形成される。免震部材は、天然ゴム系積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムを配置するほか、高層部にオイルダンパー、低層部に弾性すべり支承を配置している。積層ゴム径はφ800以上（S2=5.0）を基本とし、支持軸力が小さい低層部ではS2=4.0部材を採用、弾性すべり支承は低摩擦タイプ、減衰部材はなるべく建物外周に配置することとし、大変形時の性能確保、建物の長周期化、免震層のねじれ抑制を図る計画としている。

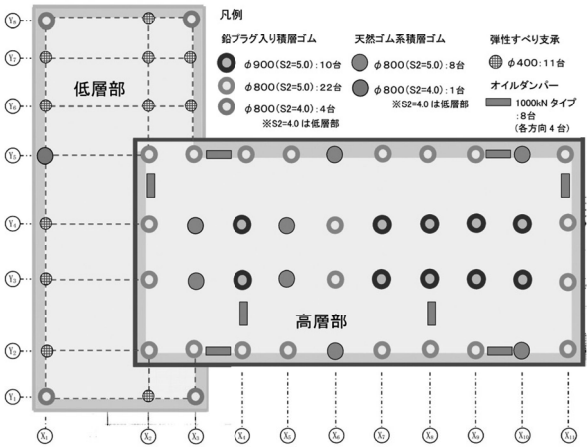


図3 免震部材配置図

4.2 設計クライテリア

設計クライテリアを以下に示す。極めて稀に発生する地震において、上部構造および下部構造（杭）を許容応力度以内としている。水平方向クリアランスは600mmとしている。

表1 設計クライテリア

		レベル1	レベル2
		告示波:稀に発生する地震 既往観測波:25cm/s	告示波:極めて稀に発生する地震 地震既往観測波:50cm/s
耐震性能 目標	上部構造	許容応力度以内	許容応力度以内
	免震部材	せん断歪み125%以下、 基準面圧の2倍以下 引張応力を発生させない	せん断歪み250%以下、 基準面圧の2倍以下 引張応力-1.0N/mm ² 以内
	下部(基礎梁)構造	許容応力度以内	許容応力度以内
	下部(杭)構造	許容応力度以内	許容応力度以内

4.3 基礎計画

改修後の基礎には、既存杭（場所打ちコンクリー

ト杭）と新設の場所打ちコンクリート杭および部分的に鋼管杭を併用している。免震化により地震時の上部構造からの慣性力は軽減するものの、応答変位法による地盤変形を見込んで設計していることや、免震層の荷重増より、新設杭の追加が必要となる。杭の設計クライテリアは許容応力度以下であり、配筋の少ない既存杭の応力負担を軽減するため既存より太径（1500φ）の新設杭を多く配置している。既存杭はGL-30m程度を支持層としているが、新設杭はN=50以上が確認できる中間層のGL-22m付近としている。

杭頭部は厚さt=1200～1700mmの耐圧板で一体化し、杭や免震部材の曲げ応力および擁壁からの土圧による曲げ応力を十分負担できる断面としている。杭の設計では、擁壁の側面摩擦抵抗を見込むなど実状に合った各杭の応力負担を適切に評価している。擁壁の地盤抵抗力は「鉄道構造物等設計標準・同解説－基礎構造物 平成24年度版」に準拠し算定している。なお、狭い免震層で施工性に優れる細径鋼管杭を併用することで、部分的な新設基礎重量の支持を合理的に行う計画としている。

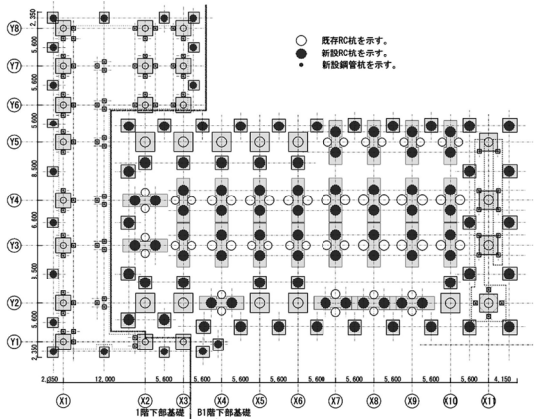


図4 杭伏図（改修後）

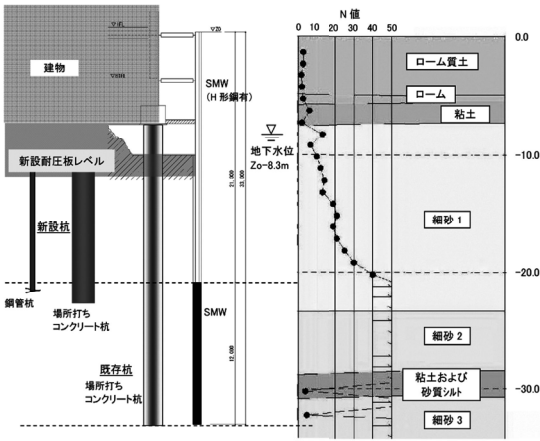


図5 地盤と杭との関係

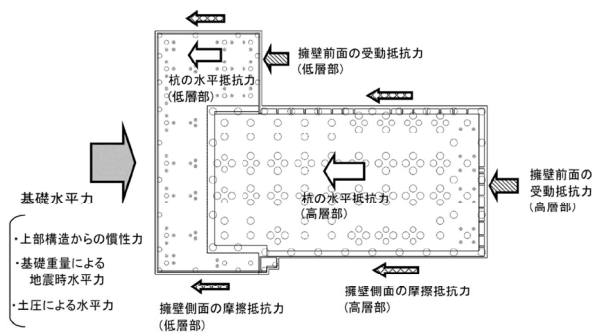


図6 杭の水平抵抗

5. 応答解析

5.1 設計用入力地震動

設計用入力地震動を以下に示す。告示波3波、既往観測波3波を採用している。工学的基盤はGL-23.5m以深の細砂（下総層群第二砂質土:Vs=461m/s）としている。その他、長周期地震動「区域4」に対し、最大応答変位10cm以下であり、問題ない範囲であることを確認している。大地震時（免震層変位 $\delta=20\sim30\text{cm}$ 程度）の本建物の実行周期（免震層の等価剛性に対する建物周期）は3.0～3.5秒程度である。

表2 設計用入力地震動

地震動名称	原波形		基準化加速度 (cm/s ²)		継続時間 (秒)
	最大加速度 (cm/s ²)	最大速度 (cm/s)	レベル1 稀に発生	レベル2 極めて稀に発生	
①: 告示①(HACHI-EW)	328.8	40.8	70.2	314.0	120
②: 告示②(KOBE-NS)	380.1	46.4	77.3	463.1	120
③: 告示③(RANDOM)	327.1	40.6	81.5	361.8	120
④: EL CENTRO-NS	341.7	33.5	255.4	510.8	54
⑤: TAFT-FW	175.9	17.7	248.3	496.6	54
⑥: HACHINOHE-NS	231.0	34.4	174.5	349.0	234

※告示波(①～③)の「原波形」は工学的基盤への入力地震動(極稀地震動)を示す。
告示波(①～③)の「基準化加速度」は基礎底レベルの入力地震動を示す。

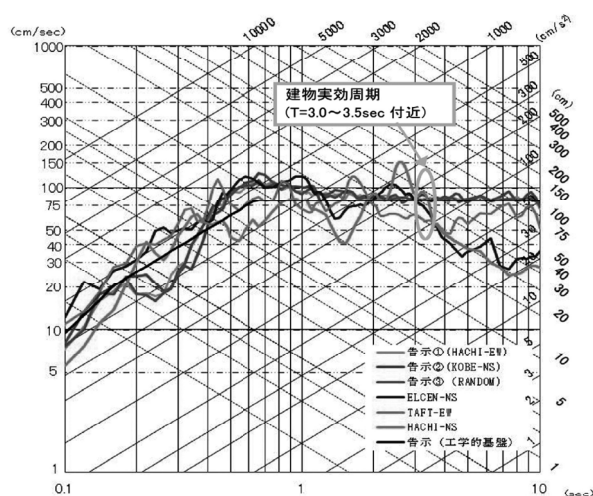


図7 擬似応答スペクトル (レベル2, h=5%)

5.2 応答解析モデル

解析モデルはB1～6階+塔屋2階を考慮した10質点系の等価せん断型モデルとする。免震部材は、鉛プラグ挿入型積層ゴム、天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承、オイルダンパーの各復元力を考慮し、免震層に並列配置する。免震部材はB1階下および低層部1階下に配置されるため、配置をモデル化に考慮する。上部構造は地震時にも許容応力度以内であるため、フレームには顕著な剛性低下は生じないと考え、比較的小さな変形でも剛性低下が生ずる耐震壁の影響を考慮して上部構造の復元力は劣化型トリリニアモデルを採用している。

表3 解析モデル概要

解析モデル	10 質点系の等価せん断型モデル 免震層は各免震部材に分離した並列バネ
復元力特性	上部構造: 劣化型トリリニア 免震部材: 鉛プラグ挿入型積層ゴムは、歪み依存型バイリニア 天然ゴム系積層ゴムは、弾性 弾性すべり支承は、完全弾塑性型バイリニア オイルダンパーは速度比例型減衰 (Maxwell モデル)
減衰定数	内部粘性系 (剛性比例型) 上部構造の減衰定数は $\eta=0.02$ (上部構造の1次固有周期に対し) 免震部材は無視

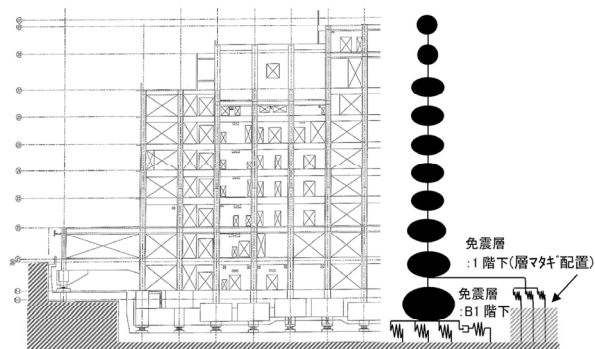


図8 解析モデル

5.3 応答解析結果

レベル2（極稀地震、既往波50cm/s）における免震部材のバラツキを考慮した応答結果は、免震層の最大応答変位は32.5cmである。最大床応答加速度は1階で143cm/s²、一般階（PHを除く階）で245 cm/s²、最上階のPH屋根部で385cm/s²である。上部構造の最大応答層間変形角は1/1110である。図9に上部構造で最大の応答加速度が生じているY方向（長辺方向）の応答解析結果を示す。

本建物では、主要構造部材が建物の継続利用が可能な無被害あるいは軽微な損傷に留まることを目標としているが、各階とも主要構造部材は許容応力度以内であるとともに、層間変形角が1/1000以下（PHを除く一般階では1/1200以下）であり、目標を満足

しているものと判断する。上部構造の床応答加速度は500gal以下（一般階は250gal程度以内）で、設備機器への損傷が大きく低減されるため、レベル2において市庁舎としての機能継続が可能な改修がなされているものと判断する。応答変位は32.5cmと日標の40cm以内およびクリアランス60cmに余裕のある変位であり、大変形時にも性能が発揮できるクリアランスが確保されている。

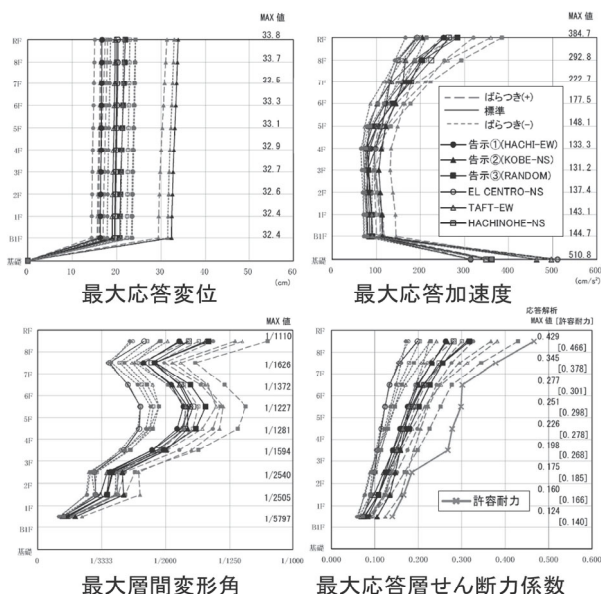


図9 応答解析結果

地震時の各部のエネルギー吸収量の負担率は、上部構造はほぼ弾性範囲内で剛性も高いため履歴減衰はほぼ0%、内部粘性減衰が1%程度である。エネルギー吸収の殆どはダンパーで吸収している。全波平均の負担割合は、鉛プラグ入り積層ゴムが85%程度、オイルダンパーが12%程度、低摩擦の弾性すべり支承は2%程度となっている。以下に告示波（位相八戸-EW）の入力エネルギーの時刻歴推移を示す。

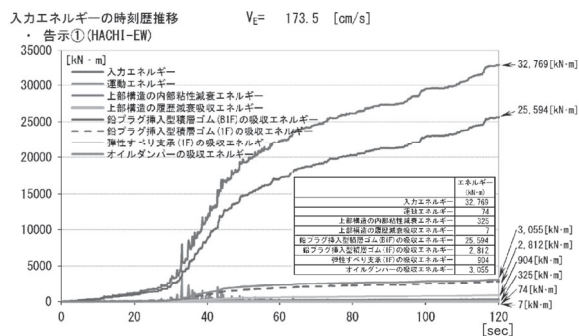


図10 入力エネルギー時刻歴推移

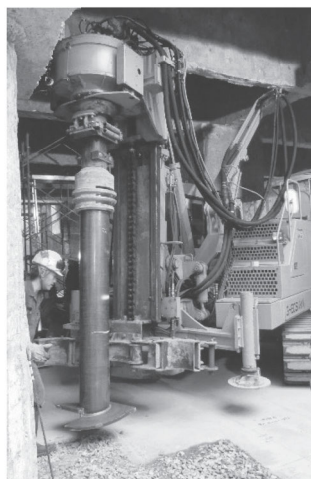
6. 施工時の対応と安全性確保

基礎下に免震層を設けるにあたり、現場の地下水位が地下1階付近にあるため止水対策が必要となる。このため、建物外周部にSMW（ソイルミキシングウォール）を止水層（粘性土）のあるGL-30m付近まで構築している（図5参照）。建物外周部の擁壁構築前（建物外周掘削時）の土圧に対してはSMWに挿入したH形鋼および建物からの切梁によって土圧応力に対する安全を確保している。

狭い免震層の新設杭の施工において、場所打ちコンクリート杭（TBH杭）は配筋を短いピースに分け免震層に搬入し、数の多い主筋継手には機械式継手を用いて効率化を図っている。鋼管杭は免震層で施工可能な小型施工機（回転貫入）にて施工し、鋼管を短いピースに分けて搬入、各ピースは現場溶接とした。



(杭配筋の分割施工)



(鋼管杭の施工)

写真2 免震層での杭施工



写真3 既存杭（掘削後、新設杭施工前）

免震層構築中の地震対策は、外周部に水平拘束スラブを構築して擁壁と接続することで主に抵抗する

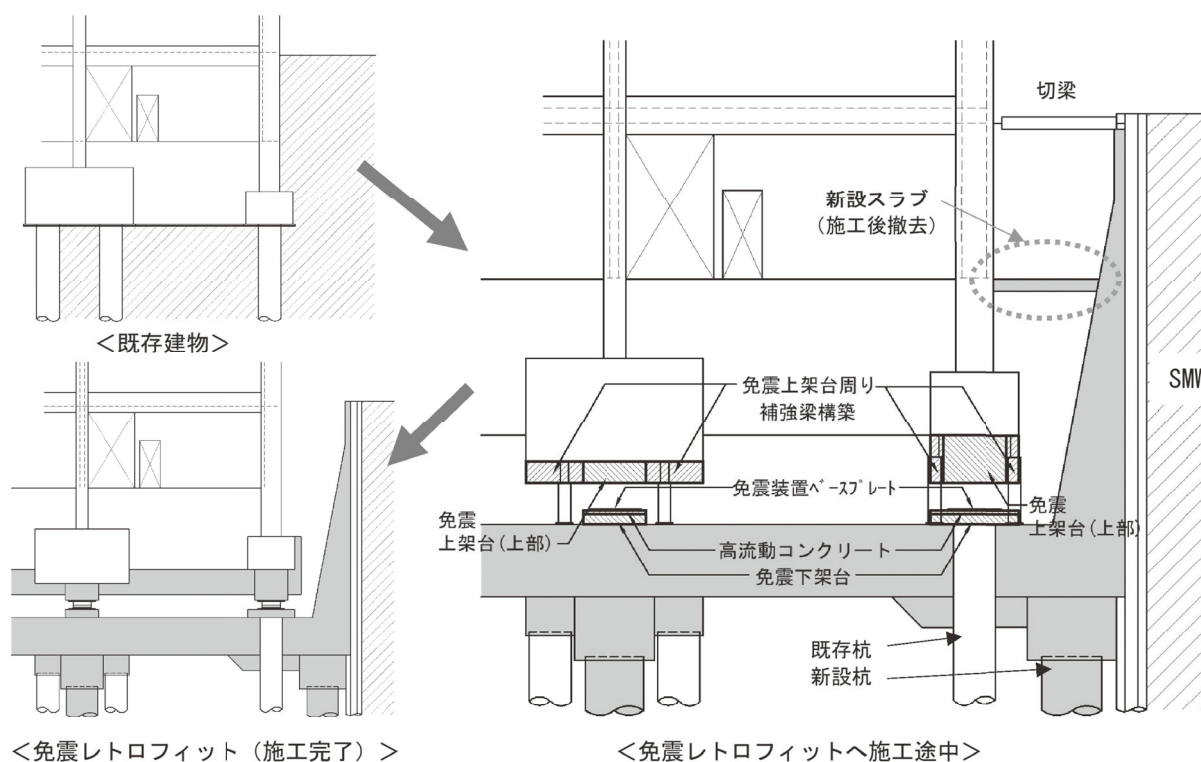


図11 免震レトロフィット施工途中図

こととした。このスラブは、平面的に各方向共にバランスよく配置し、主にスラブと擁壁の面内方向でのせん断力による応力伝達に期待する計画とした。スラブ構築の範囲は、施工時の安全性と施工動線確保などをもとに、各工程で合理的な範囲を協議しながら進めた。なお、この施工時のみ必要なスラブは免震層構築後に、ワイヤーソー工法にて撤去した。

基礎免震のレトロフィットでは、地中内の既存基礎躯体は、掘削するまで既存図通りの形状であるか確認できない。掘削後、本建物の躯体が既存図より大きな箇所があったため調査を行った。その結果、躯体（配筋形状）は既存図と同様であったが、既存基礎梁やフーチング周りに無筋コンクリート（ふかし部）が存在することが判明した。これらふかし部の重量は、時刻歴応答解析や積層ゴムの支持面圧等に影響するほどの重量であったため、既存梁側面などではやり作業を行っている（写真4）。

免震層の構築手順は、ジャッキ支持、既存杭の切断（ワイヤーソー工法）、免震部材の挿入（高流動コンクリートで架台構築）、ジャッキダウンで行った。

免震部材の周辺フレームでは、免震部材の付加曲げ等による応力を負担するため補強躯体が構築される。既存建物の基礎底レベル（免震層の上部梁レベル）が場所により異なることや、スパン間が比較的短い箇所へのオイルダンパー配置などがあるため、

各所で合理的な形状の構造躯体を構築している。

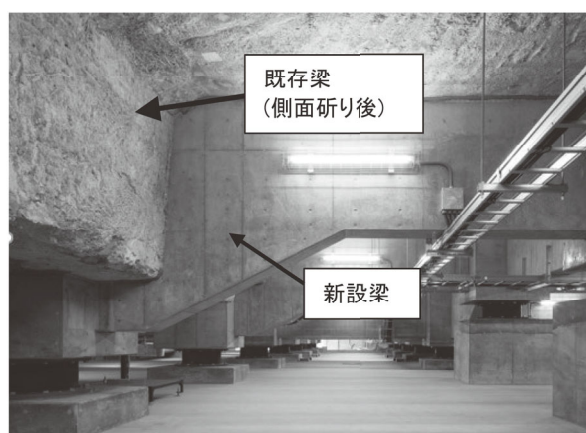


写真4 免震層（竣工後：既存梁側面ふかしを研り）

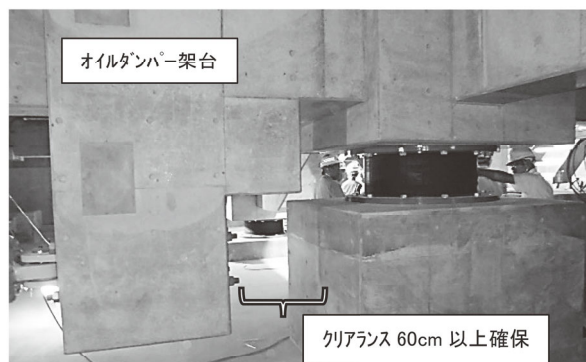


写真5 積層ゴム近傍のオイルダンパー架台形状

7. 意匠計画上の配慮

建物の耐震安全性の確保が主な工事内容だが、意匠計画において、施設利用者の利便性を確保するために配慮した点を以下に示す。

・建物外周部の有効利用

建物外周部には高さ10m程度の高く厚い擁壁が構築される。この際、水平クリアランス60cmの確保は免震層（擁壁下部）で決まるため、地上付近では3m近くのクリアランスが生じてしまう。地上部の建物外周部を有効利用するため、擁壁上部に擁壁からクランク状のスラブを構築し有効スペースを確保している。なお、スラブ下の擁壁にリブを設けることで構造的にも合理的な形状としている。

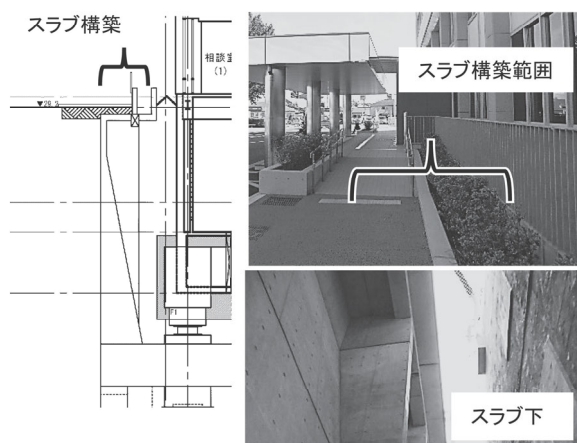


図12 擁壁上部のスラブ

・段差のないEXP.J

歩行者の安全面を考慮した段差のない形状のまま見た目を損なわないEXP.Jとしている。

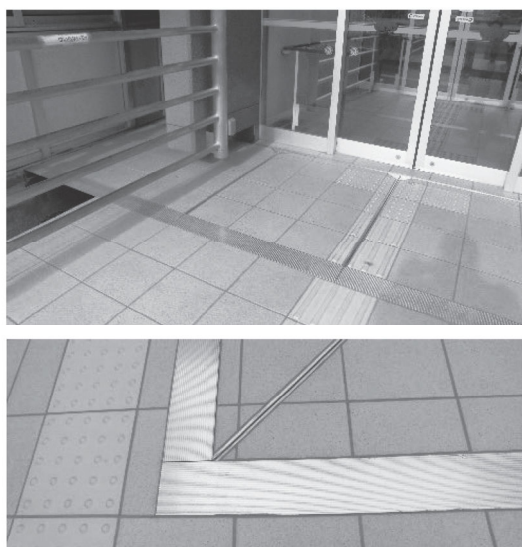


写真6 段差のないEXP.J

・免震建物のお知らせ看板（4か国語）

市役所には様々な方が来訪されるため免震建物のお知らせ看板（注意書）は4か国語で表示している。

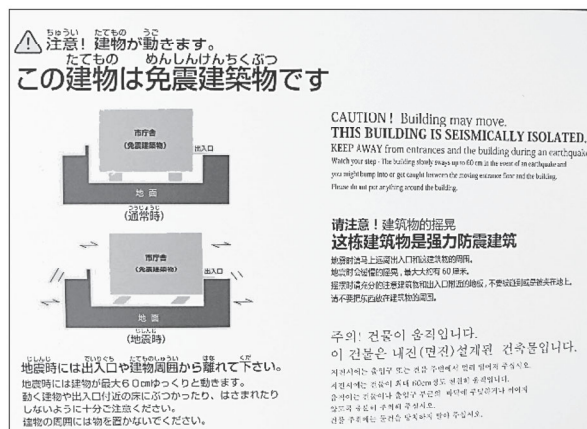


写真7 4か国語で表示した免震看板

付録

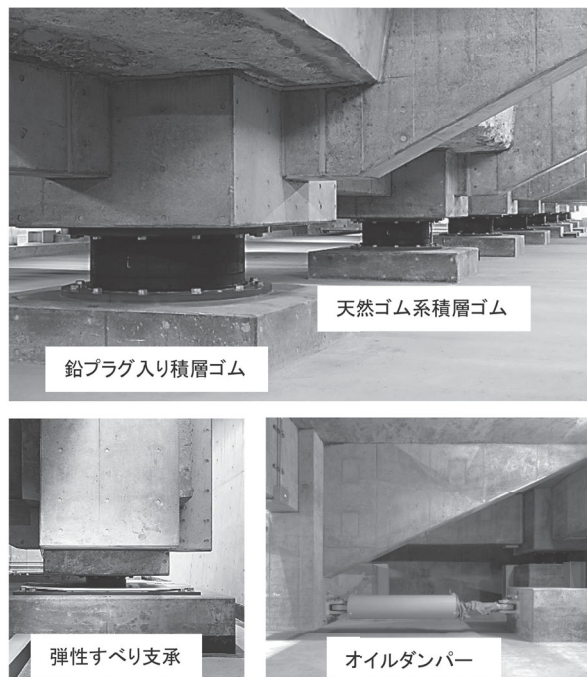


写真8 免震部材の配置状況

おわりに

本建物は、B1階杭基礎の既存建物の免震レトロフィットならではの問題解決に、設計者・施工者が協力し取り組むことで、竣工することができました。

基本設計時から竣工まで、鎌ヶ谷市のご担当者の皆様には多大なご協力を頂きました、この場をお借りして深く御礼申し上げます。