

難所に浮かぶ「ブラックボックス」 大阪中之島美術館の構造デザイン

Black Box lifted into the air above the troublesome land / Structural Design for Nakanoshima Museum of Art, Osaka

佐藤 淳*1

1. フワッと浮かぶブラックボックス

中之島は、建築物を構築するには日本屈指の難所と言える。後述するいくつもの難点を抱えるこの立地条件のもと、軽量な鉄骨フレームの「ブラックボックス」を免震でフワッと浮かせた構造デザインを、ブラックボックスで秘密にするのではなく、その全貌を紹介する。



写真-1 外観（提供：遠藤克彦建築設計事務所）

建築、構造概要

建築設計：遠藤克彦建築研究所

構造設計：佐藤淳構造設計事務所

tmsd萬田隆構造設計事務所

施工：銭高・大鉄・藤木特定建設工事共同企業体

規模：地上5階、延床面積20012m²、高さ36.9m

構造形式：鉄骨造、筋違付きラーメン構造

基礎免震、杭基礎

免震装置：天然ゴム系積層ゴムアイソレーター

鋼材U字ダンパー

この漆黑に包まれた箱型は平面形が約60m×60mで、鉄骨造の筋違付きラーメン構造とし、十分にブレースを設けることによって剛強で軽量なフレームを形成している（図-1）。その骨組に、

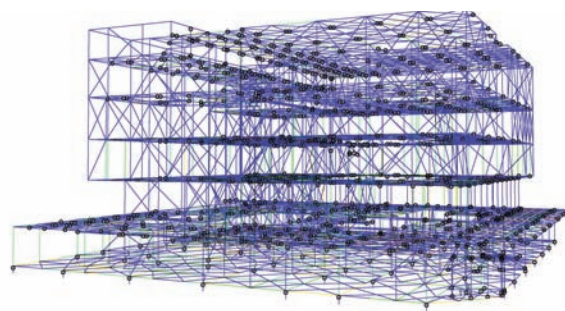
「2層にまたがるブレース」「ピン柱」「トラス梁」を駆使することによって

「くねくねと立体的につながる空間」

「自由度の高い開口位置」

「開放的なピロティ空間」

を実現している。



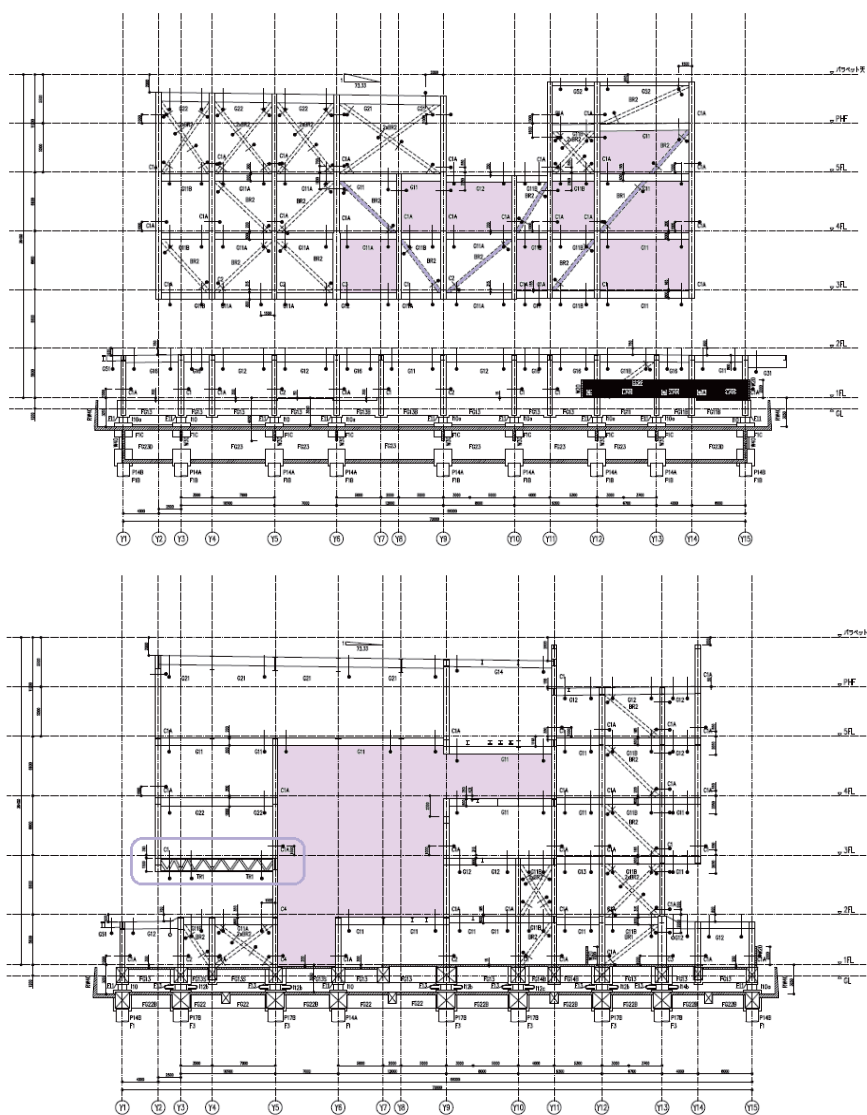
表示材料：柱、梁、ブレース、壁、床
Input : osaka00.inl
Output : osaka00.out
Form : 16, 200 22, 300 17, 800
Phi=1.000 Theta=200, 000
R=120, 000 C=500, 000
Dfmax=100, 000

図-1 静的解析モデル

この箱型の内部には、最下階から最上階までくねくねとクランクしながら、大きな吹き抜け空間が立体的に繋がってゆく（図-2上）。その吹き抜け空間を、展示室や倉庫といった大きな空間が取り囲んでいる。

このイレギュラーに「えぐられた」ラーメン構造は、壁面にも床面にも十分にブレースを設けて面剛性を持た

*1 SATO Jun：東京大学大学院新領域創成科学研究科 准教授／佐藤淳構造設計事務所 技術顧問

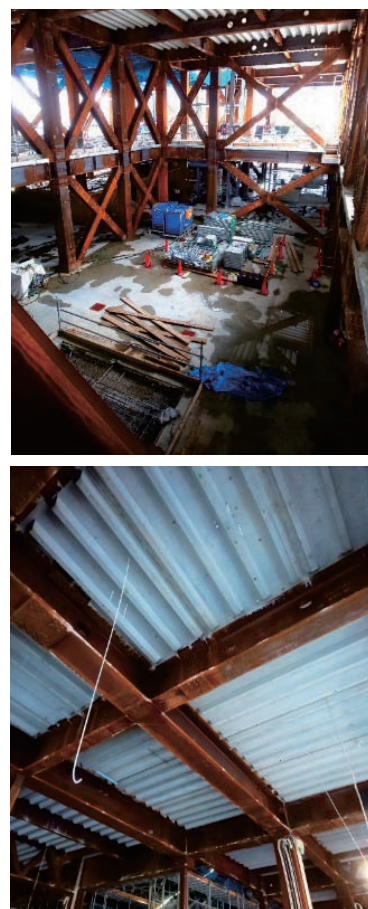


上：ハイライト部分がクランクしながら繋がってゆく吹抜空間
下：ハイライト部分が市松状に抜けた開口

図-2 代表的な軸組図

せることによって立体的に素直に応力伝達させることができる。できれば部材を軽量化することができる。その際に「2層にまたがる」ようにブレースを仕込むことを考えた。すると軸組で見るとブレースのない部分が市松状に現れる（図-2下）ので通路など大きな開口を設けることができる。こうして立体的に繋がる空間の応力伝達を確保しながら「自由度の高い開口位置」を実現している。

最下階は人工地盤状になっていて、2階のメインアプローチ部分がピロティ状になっている。それ以外の耐震コアとなる領域にブレースが十分に設けられれば、ピロティ状の部分では両端ピン接合の「ピン柱」で鉛直荷重のみ負担すればよい。今や常套手段ともなったこの手法で柱をか細くして視界を確保し、さらにピン柱の数を少



上：筋違つきラーメン構造の内部を
えぐった大空間
下：ハーフPCスラブ

写真-2 鉄骨建方

なくして空間に透明感を生み出すために「トラス梁」で片持ち部やスパンを大きくしている（図-2上）。こうしてブラックボックスの浮遊感が生み出されている。

これらほとんどの構造体は隠蔽されてしまうものの、この空間を生み出している「隠れてなお生きる」構造デザインと認識できる。美術館ということで比較的開口が少ないおかげでできている様子はあるが、この構造デザインは開口が多めに必要な建築物にも応用できるものと感じる。

2. 簡素な免震

2.1 油圧ダンパーを使わない簡素な免震

ここから免震システムについての工夫を挙げてゆく。
この計画地に適用される数多くの地震波を用いてレベ

ル1～3の時刻歴応答解析を行うため、また私が油圧ダンパーの特性にあまり精通していないこともあり、免震システムはできるだけパラメーターを少なくして簡素化し、各パラメーターの振動性状への影響を把握しやすくすることにした。

免震デバイスは「天然ゴム系積層ゴムアイソレーター（昭和電線ケーブルシステム製、 $\phi 1000\text{mm}$ 、 $\phi 1200\text{mm}$ 、 $\phi 1400\text{mm}$ ）」と「鋼製U字ダンパー（新日鉄住金エンジニアリング製）」のみとし、「油圧ダンパー」は使用していない（図-3、図-6、写真-3）。

免震層のクリアランスは鋼製ダンパーの限界変形相当の85cmとした。

2.2 PCスラブによる軽量化

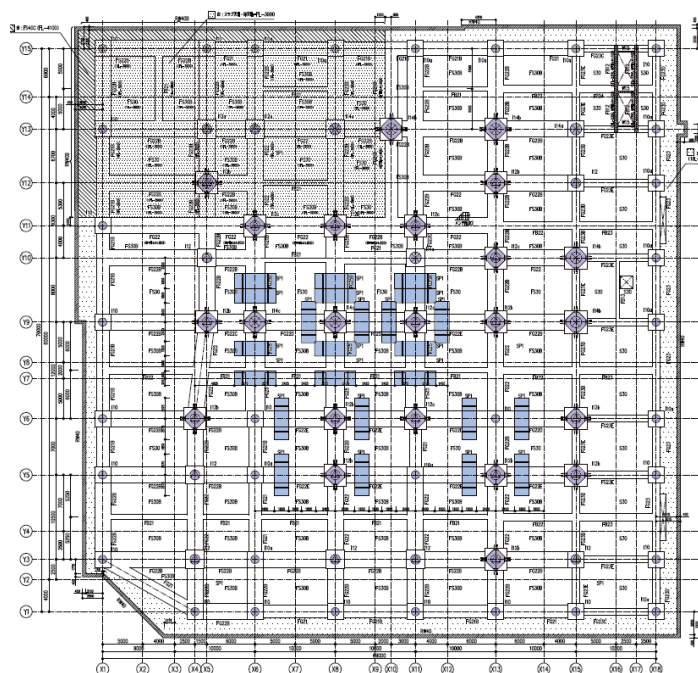
長周期地震への対策で固有周期をあまり伸ばさなくてよいこともあり、免震デバイスにとっても鉄骨骨組にとっても建物を軽量化することが負担を軽減することになる。そこでスラブについては、フランジ部が70mmのリブ付きPCスラブに現場打ちのトップコンクリートを80mmのみ載せたハーフPCスラブ（図-5）としている。これによりスパン5.3mを架け渡すことができ、鉄骨小梁をかなり少なくすることができている。各階でスラブ開口が多く必要なエリアについての鉄骨小梁を架け、捨型枠デッキスラブとしている（図-4）。

2.3 少し硬めの固有周期3.5秒

建物全体の固有周期は、後述するように、長周期地震動への対策として従来の免震構造よりも少し短めの3.5秒を狙うことにした。

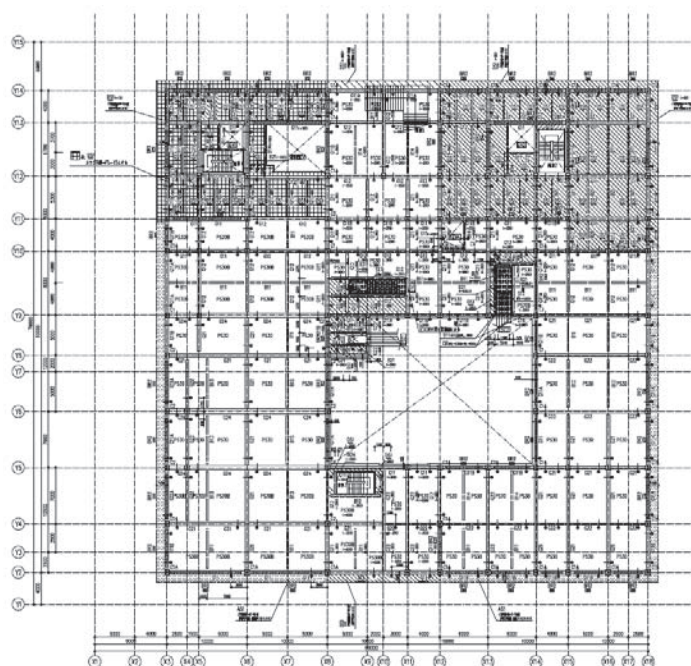
2.4 ショックアブソーバー

これも後述するように、大阪には「上町断層帯」が縦断している。ここでは「レベル2」を超える「レベル3」の地震動の発生確率が高い、と予想されている。その対策のためショックアブソーバーとして鋼製バネを設け（図-18）、レベル3の地震動発生時にはこれに衝突させる設計としている。



紫色が免震デバイス
青色の長方形がショックアブソーバー

図-3 構造伏図（免振層）



スラブのほとんどはハーフPCスラブ
ハッチング部分のみ捨型枠デッキスラブ

図-4 構造伏図（4階）

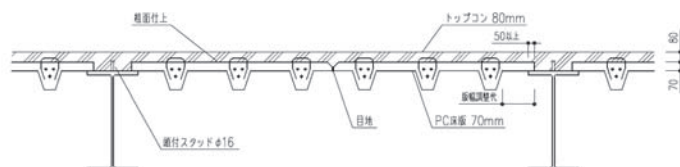


図-5 ハーフPCスラブ（黒沢建設製）

積層ゴム一体型免震U型ダンパー114b, 114c製品図

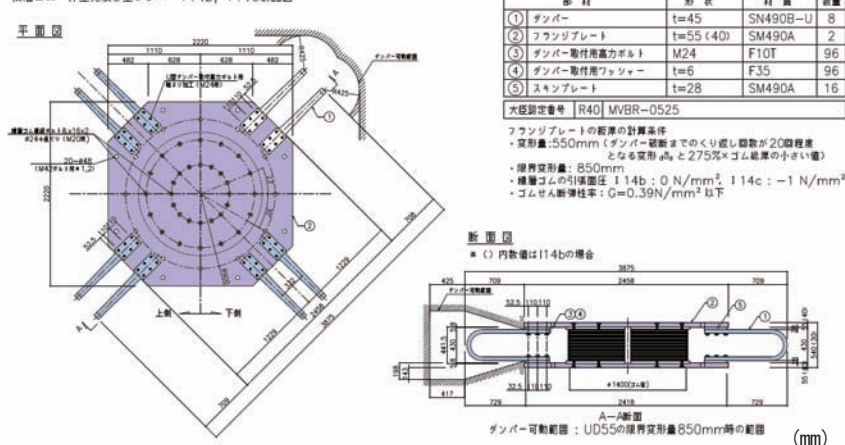


図-6 免振装置：天然ゴム系積層ゴムアイソレータ＋鋼材U字ダンパー



写真-3 免振装置

3. 屈指の難所

3.1 長周期地震動

「南海トラフ」ではマグニチュード8～9の巨大地震が100～150年程度の間隔で発生するとされている。そして、これまで設計の目安とされていた地震動よりも長周期・長時間な地震動が発生すると予想され、国土交通省より「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について」(2016年6月24日)が交付された。中之島はそれが発生する可能性が高い地域のうちOS2に含まれている。

発生すると予想される地震動の強さは応答スペクトルで示されている。OS2の領域では、固有周期4.5～7秒で最大となり、その疑似速度応答は従来の「極めて稀に発生する地震動」の1.5倍程度の値を示している(図-8)。

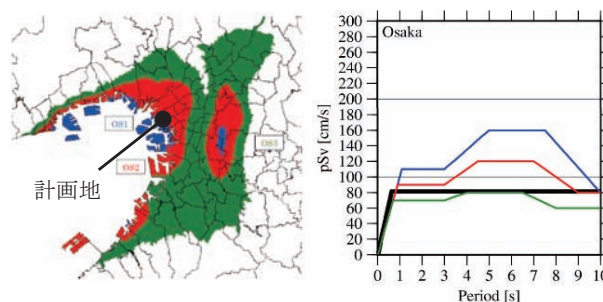
一方、従来用いられてきた「観測波」は固有周期2秒以下の領域で応答が突出する傾向がある(図-12)。

これらの地震波の性状から、本計画では固有周期3.5秒程度を狙うことにした。このような応答スペクトルの谷間を狙うことの是非を問う必要はあるものの、得られた変位応答値は極端な谷間とはなっていないかったため採用して差し支えないと考えた(図-12)。



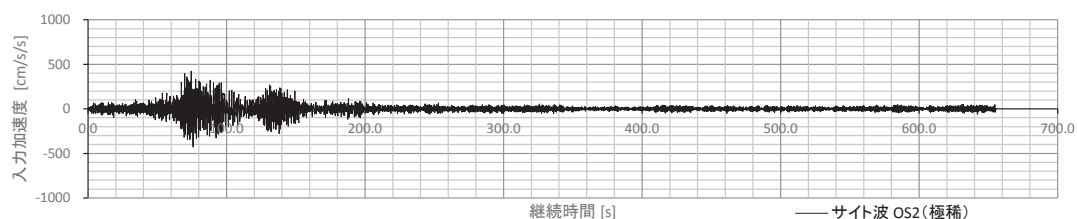
フィリピン海プレートがユーラシアプレートの下に潜り込む境界部の溝が「南海トラフ」
 近年「相模トラフ」も注目されている

図-7 日本近辺の大陸プレート



中之島はOS2に該当し固有周期が長いと従来の1.5倍の応答値を想定することになる

図-8 長周期地震動が従来の地震動を上回ると予想される地域(大阪地域)¹⁾とその設計用擬似速度応答スペクトル¹⁾



最大加速度 $342.45 \times 1.25 = 428.1 \text{ gal}$

継続時間 655.3 sec

継続時間500秒以上が要求されるため計算時間が従来の60秒よりも9倍近くかかる

図-9 OS2の目標スペクトルを満たすよう作成した上で地盤増幅を考慮された地震動

3.2 上町断層帯

「上町断層帯」は、大阪豊中市から大阪市を経て岸和田市に至る断層帯（図-10）で、断層全体が1つの区間として活動した場合、マグニチュード7.5程度の地震が発生すると推定されている（図-11）。そして地震動レベルとして、建築基準法に示されている「極めて稀に発生する地震動（レベル2）」を超えるレベル（レベル3A, 3B）が設定されている。

幸い、本計画で構造設計のサポートをしてくださった東畑建築事務所の近藤一雄氏がこの上町断層帯についてのエキスパートだったのでこのような背景を短時間で把握することができた。

この上町断層帯を想定して既に地震波が数多く提案されており、本計画ではそれらのうち18波を使用した。例えば「レベル3B」を想定した地震波は12波を使用している（表-1）。

表-1 レベル3Bで採用した地震波

（※は衝突設計対象）

加速度データ名	最大加速度 gal	継続 時間 sec	地震動タイプ
UTMTA2_B1NS1	449.5	81.9	フラット
UTMTA2_B1NS2	449.0	81.9	フラット
UTMTA2_B1NS3	423.1	81.9	フラット
UTMTA2_B1EW1	600.6	81.9	フラット
UTMTA2_B1EW2	646.8	81.9	フラット
UTMTA2_B1EW3	491.8	81.9	フラット
UTMTA2_B2NS1	264.1	81.9	パルス
UTMTA2_B2NS2	283.3	81.9	パルス
UTMTA2_B2NS3	259.7	81.9	パルス
UTMTA2_B2EW1	490.7	81.9	パルス ※
UTMTA2_B2EW2	256.0	81.9	パルス ※
UTMTA2_B2EW3	422.8	81.9	パルス ※

これらの地震波に対し、レベル3Aでは変位が基礎のクリアランス85cmに達しない。レベル3Bでは一部このクリアランスを超える地震波があり、これについて鋼製のショックアブソーバーに衝突させる設計とした。



図-10 上町断層帯²⁾

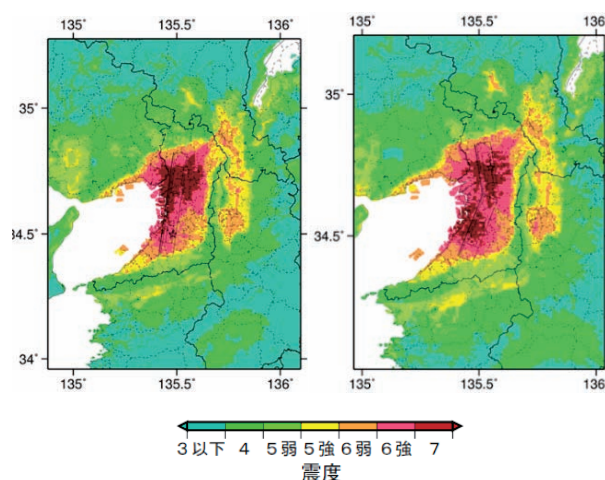
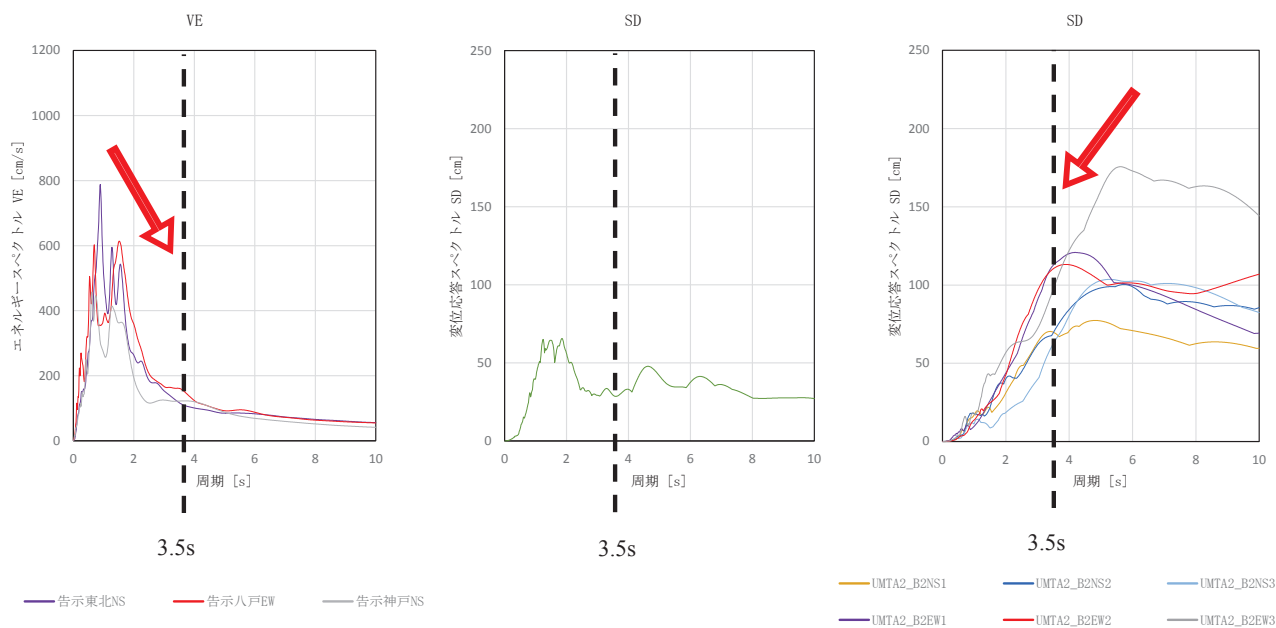


図-11 予想震度²⁾



矢印のように、告示波では固有周期を長くするのが良く、上町断層の波では短くするのが良い
これらの地震動を総合的に見て固有周期が3.5秒になるよう設計した

図-12 応答スペクトル 告示波3波 / サイト波 (OS2) / 上町断層 (レベル3B、パルス波)

3.3 液状化

中之島は、さらに「液状化」にも注意が必要となる。

杭頭部から深さ5mまでの砂質土層で、地震加速度350galに対するFL値の最小が0.518と算出され液状化の可能性が高いと見られるため、水平地盤反力係数を低減して設計した。

杭は深さ35m付近の中間層を貫通させ、深さ50m付近の礫混り砂層を支持層とした太径の場所打ち鋼管コンクリート杭（軸径1400mm+拡底径1700～2500mmおよび軸径1700mm+拡底径3100～3400mm）とした（図-13）。

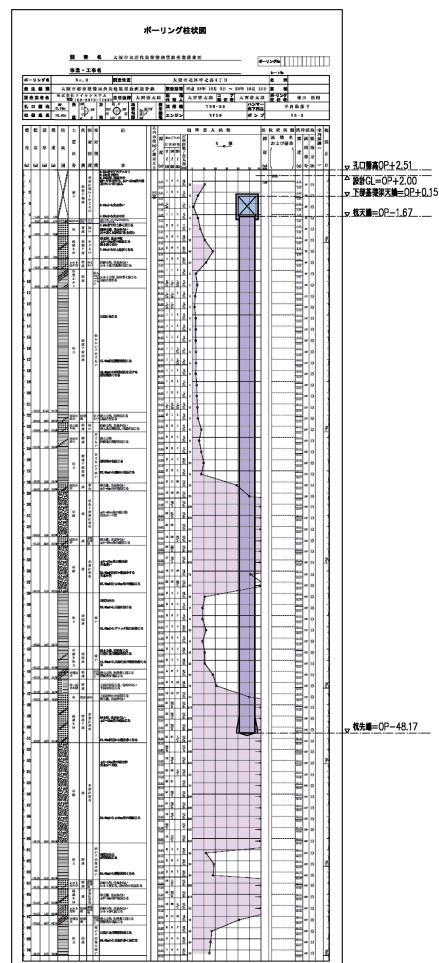
杭の到達する層は層厚6m、N値57～60、せん断波速度430m/secでありこれを工学的地盤面と見なしている。

4. 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析には免震層+5層の串団子モデルを用いている（図-14、表-2）。

水平方向の地震波は、観測波3波（El Centro NS, 八戸EW, JMA神戸NS）、告示波3波（位相特性 八戸EW, JMA神戸NS, 東北NS）、サイト波19波（OS2地域のもの1波, 上町断層帯のレベル3Aのもの6波, レベル3Bのもの12波）を用いた。

地盤増幅には串団子モデルを用いて詳細解析を行い、骨格曲線にHardin-Drnevich (HD) モデル、履歴特性にMasing則を用いた。



地表近くの砂質土で液状化に注意が必要

図-13 標準貫入試験結果（ボーリング柱状図）

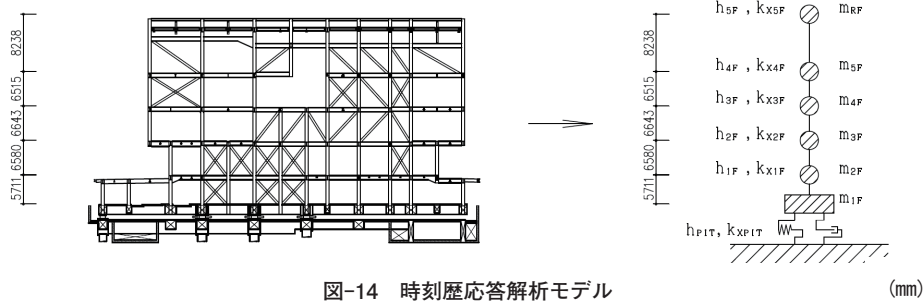


図-14 時刻歴応答解析モデル

表-2 時刻歴応答解析モデルの諸元

階	床 レベル m	重量 MN	水平剛性 X方向 kN/cm	水平剛性 Y方向 kN/cm	減衰率 %
5階	33.7	59	32772	4282	1.5
4階	25.4	50	32423	43348	1.5
3階	18.9	50	86091	45767	1.5
2階	12.3	49	27112	31048	1.5
1階	5.7	77	63623	85859	1.5
基礎	0.0	135	-	-	-

上下動については静的解析用の立体モデルから節点数を減らした縮約モデル（図-15）を作成して時刻歴応答解析を行った。地震波は告示波に習った手法を用いて位相特性が八戸UD，JMA神戸UD，東北UDのものを作成した。

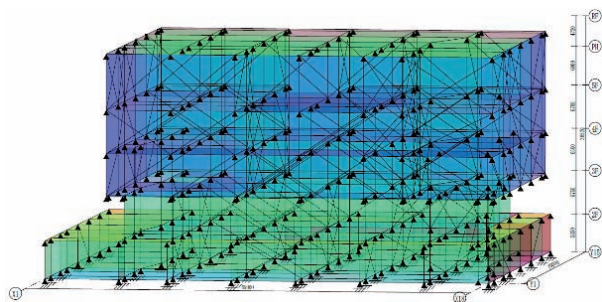


図-15 上下動の検討用の縮約モデル

レベル2における上部躯体のベースシア係数は告示波（JMA神戸NS）で最大を示し、重要度係数1.25倍を含めて、X方向で0.162、Y方向で0.161となった（図-16）。このとき免振層の変形はX方向で44.3cm、Y方向で44.6cmとなっている。最大層間変形角は告示波（八戸EW）で最大を示しX方向で1/500、Y方向で1/587となった。

地盤の履歴を描いてみると残留変形が残り、有効応力解析により液状化も発生すると見られることが分かる（図-17）。

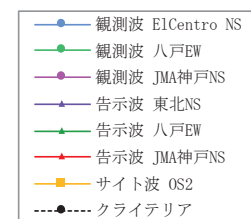
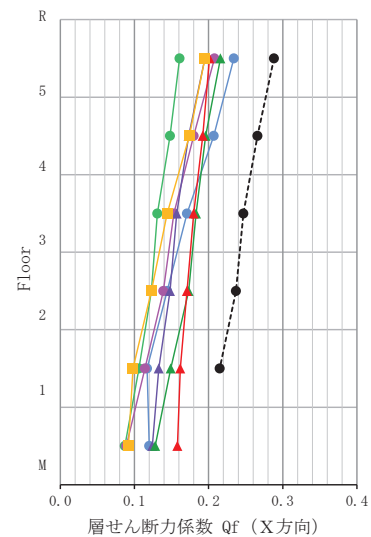
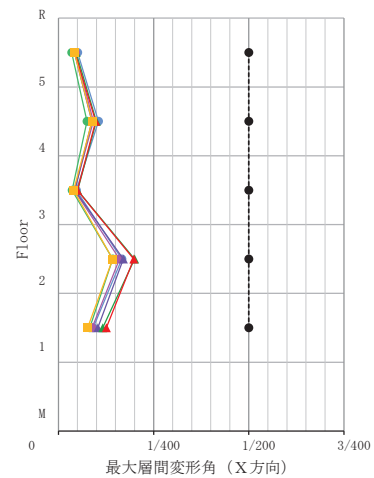


図-16 各階の最大層間変形角／層せん断力係数

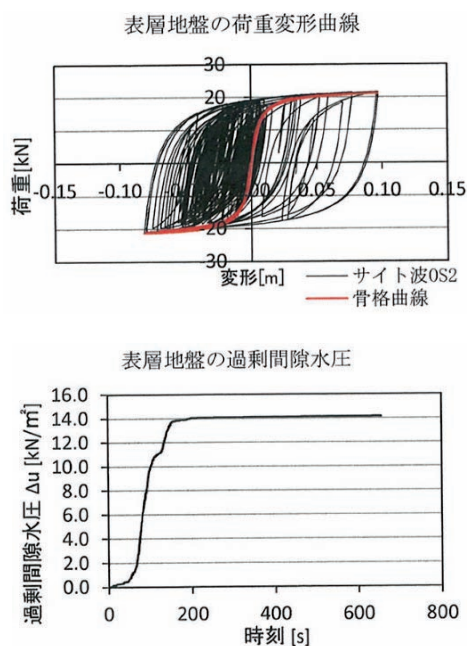


図-17 地盤の履歴曲線（サイト波OS2）と過剰間隙水圧の時刻歴（サイト波OS2）

構造各部の設計クライテリアに対して、地震動が何倍の余裕度を持つか検証してみた。検証する設計クライテリアは次の3点とする。

- 上部躯体の許容応力度設計用の層せん断力を超えるとき
- 積層ゴムの変形が設計限界変形55cmを超えると
- 積層ゴムの面圧が基準面圧 - 1N/m^2 （引張が負）を超える引張となるとき

非線形解析なので、地震動をレベル2から倍率を上げてその都度時刻歴応答解析をするしかない。地震波を告示波（JMA神戸NS）のみに限定して検証したところ、(a) に対しては1.4倍、(b) に対しては1.3倍、(c) に対しては1.2倍の余裕度があることが分かった。

上町断層帯の地震動については次のような解析結果となった。

レベル3Bで免震層の変形がクリアランス85cmを超えない地震波9波については、上部躯体のベースシア係数の最大が0.223、層間変形角の最大が1/358、免震層の変形の最大が62.2cmとなった。

一方で、免震層の変形が85cmを超える地震波が3波あり、上部躯体のベースシア係数が0.337、層間変形角の最大が

1/250、免震層の変形が105cmとなった。この3波が他のものよりも極端に大きな応答を示すため、免震層が支持する上側基礎をショックアブソーバーに衝突させる設計とすることにした。

5. ショックアブソーバー

近年の大地震での被害状況を目の当たりにして、レベル2を超える地震動に対しては建物がどのように崩壊しても仕方ないと思えるばかりでもいられない社会的な機運が高まっている。

免震の場合、免震層がクリアランス以上に变形すると外側の基礎躯体に衝突することになるが、そこに剛強なRC躯体が存在するだけではバネ定数が大きいために巨大な衝撃荷重が発生してしまう。そこで本計画では免震層内にエネルギーを吸収して衝撃を鎮めるショックアブソーバーとして鋼製板バネを仕込んだ（写真-4、図-18）。

上町断層帯のレベル3Bの地震波のうち免震層の水平変位が最大となったのは地震波UMTA2_B2EW3のときで105cmとなった。この水平変形を85cmに抑えるためには、85cmの時点で上部躯体が持つ運動エネルギーをショックアブソーバーに吸収させればよい。

$$\text{上部構造の重量 } W = 416966 \text{ kN}$$

$$\text{質量 } M = 416966 \div 9.80665 = 42519 \text{ t}$$

免震層の変形が85cmのときの上部躯体の速度

$$V_{85} = 88.7 \text{ cm/s}$$

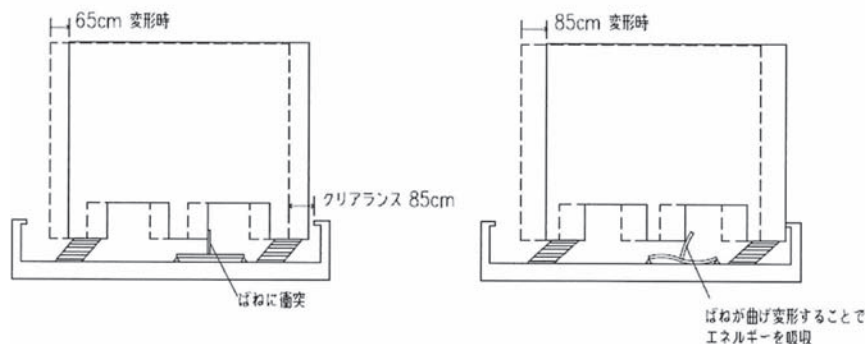
$$\text{運動エネルギー } Ek = \frac{1}{2}MV_{85}^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 42519 \times 88.7^2$$

$$= 167263156 \text{ tcm}^2/\text{s}^2$$

$$= 16727 \text{ kNm}$$

衝突設計概念図

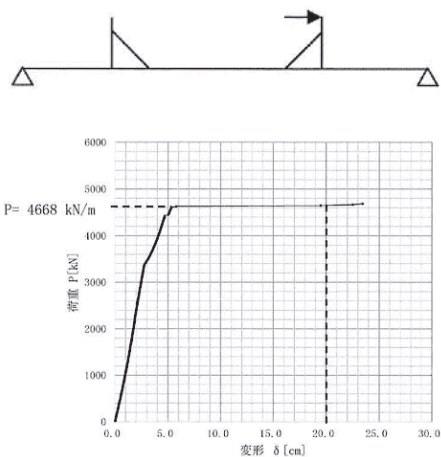


変形が65cmに達するとショックアブソーバーに衝突する。
100mmの鋼板が塑性化することによってエネルギーを吸収する。

図-18 エネルギー吸収機構



写真-4 ショックアブソーバー



上: 荷重増分解析モデル (奥行1m相当)
下: 荷重変形曲線

図-20 ショックアブソーバーのエネルギー吸収能力を知るための解析

ショックアブソーバーは厚さ100mmのTMCP鋼材 HBL385Cの板を逆T字に組み立てた板バネとした (図-19, 写真-4)。

荷重増分解析 (図-20) により、奥行1mあたりで吸収できるひずみエネルギーは827kJ/mと分かった。そこで奥行1.8mの鋼製板バネを12基設けている。

$$\begin{aligned} \text{吸収エネルギー } E_s &= 827 \text{ kJ/m} \times 1.8 \text{ m} \times 12 \text{ 基} \\ &= 17863 > 16727 \text{ kJ} \end{aligned}$$

このとき板バネの最大変形時で塑性率は4.6に達するが、この鋼材が脆性破壊に達するのは塑性率7.5程度と見られるので変形能力は足りている。

6. 隠れて生きる構造デザイン

こうして書き綴ったものの私が手掛けた免震構造はこれが2つ目であり、数々の皆様のご指導に支えられてこの設計を完遂することができた。免震に基づく構造デザ

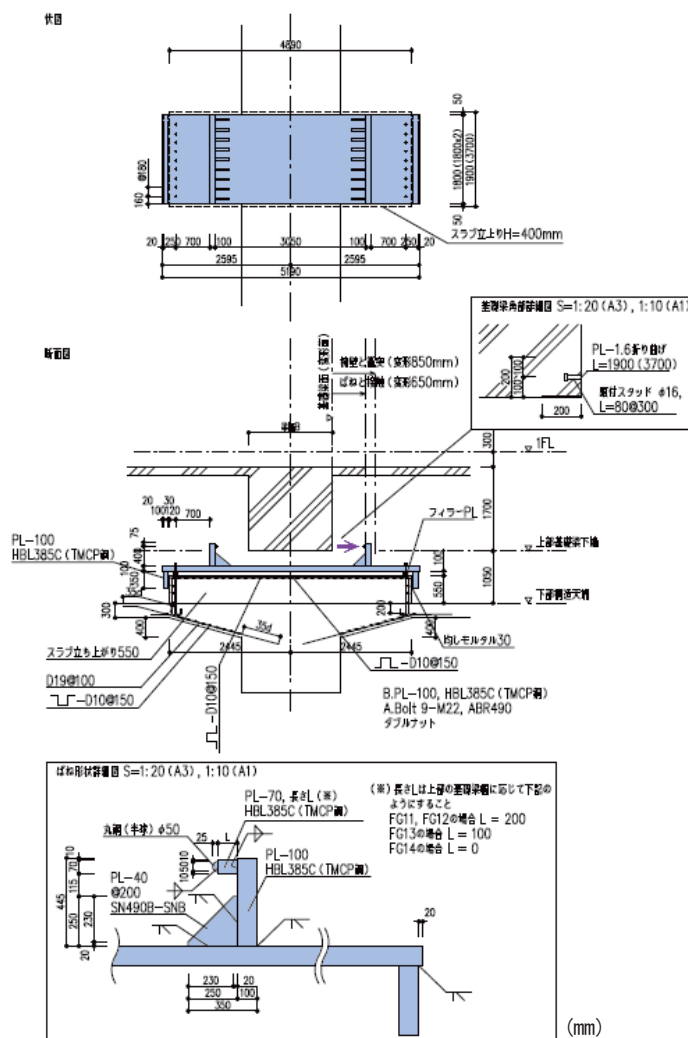


図-19 ショックアブソーバー詳細図

インをあまり思案したことがなかったが、多彩な内部空間が免震も鉄骨も「隠れてなお生きる」構造デザインによって生み出されている様子をご観いただきたい。

【参考文献】

- 1) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について, 2016年6月24日
- 2) 地震調査研究推進本部事務局: 上町断層帯, https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_katsudanso/f080_uemachi/

【執筆者】



*1 佐藤 淳
(SATO Jun)