

日本郵政グループにおける PCaPC 造の設計と施工の取り組み 「PC-S 構造を採用した免震事務所ビルの構造設計を中心として」

日本郵政株式会社 不動産部門施設部 城戸 隆宏

1. 建築物概要

本建物は地上 7 階、地下なしの事務所ビルで、平面形状は約 79.2m×43.2m の長方形である。7 階で南側中央にセットバックした立面となっており、建築面積は 3,957m²、延床面積は約 22,310m² の規模を有している。

階構成は、1 階にエントランスホール、倉庫および事務室、2 階に更衣室、食堂、売店等の共有施設、3～6 階は事務室関連諸室、7 階は電気室および機械室が計画されている。主要な用途は事務所となっている。階高は基準階高（3 階～5 階）が 4.4m、1 階は 4.8m、2 階は 4.5m、7 階は 5.4m、最高高さは 33.3m となっている。

図 1 に建物完成予想パース、図 2～3 に建築図、以下に建築物概要を示す。

【建築物概要】

- ・建物名称：名古屋ビル（仮称）
- ・設計者：日本郵政株式会社一級建築士事務所
（設計・工事監理協力 石本建築事務所）
- ・施工者：大林組名古屋支店
- ・所在地：愛知県名古屋市
- ・用途：事務所
- ・規模：地上 7 階、地下なし
- ・延床面積：22,309m²
- ・最高高さ：33.3m
- ・構造形式：純ラーメン構造、基礎免震構造
- ・構造種別：PCaPC 造、PC-S 構造、RC 造
- ・工期：2017 年 10 月～2019 年 10 月
- ・PC ファブリケーター：黒沢建設
- ・鉄骨ファブリケーター：東亜鉄工建設



図 1 建物完成予想パース



図 2 基準階平面図

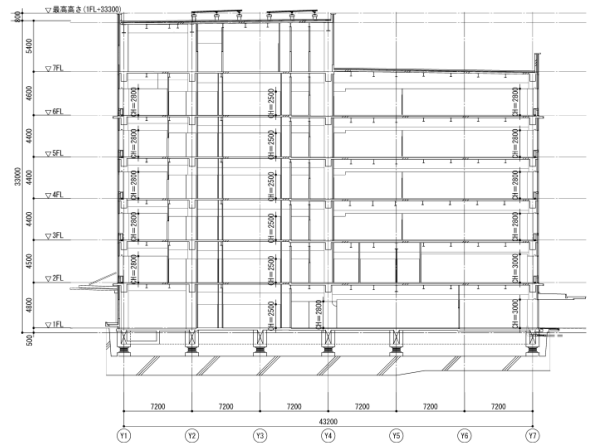


図 3 断面図

2. 構造概要

2-1 構造計画方針

本建物は建物の用途を勘案し、高度な耐震性能値を確保すること（重要度係数は免震構造なので1.5以上）に加え、南海トラフ沿いの地震対策も視野に、基礎免震構造を採用している。

また、無柱空間を確保しながら免震効果を最大限発揮させるため、柱の構造種別をPCaPC造、コア部および外周の短スパン梁をPCaPC造として層剛性を確保し、ロングスパン梁をPC-S造とした。

すなわち、免震構造を採用することで上部構造への地震力を低減し、入力された地震力は短スパン部のPCaPC造でほとんど抵抗することで、PC-S梁は長期荷重のみを主に負担させる計画とした。

架構形式は、将来対応としてのフレキシビリティを確保するために、XY両方向とも純ラーメン構造としている。スラブは、デッキプレート捨て型枠を用いた在来工法および事務室の一般部を合成床版とすることで建物全体の軽量化を図っている。

図4に構造伏図、図5に構造軸組図を示す。

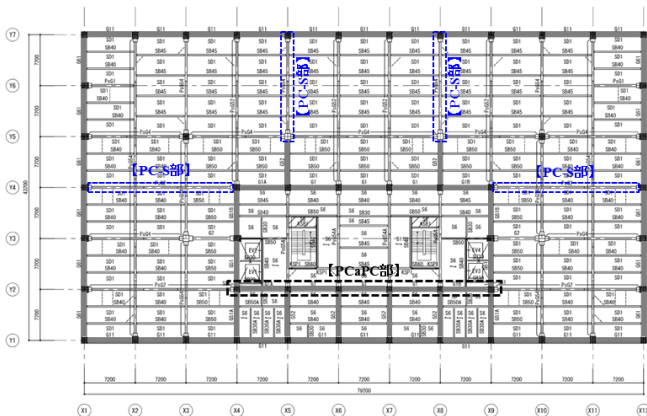


図4 構造伏図（3階）

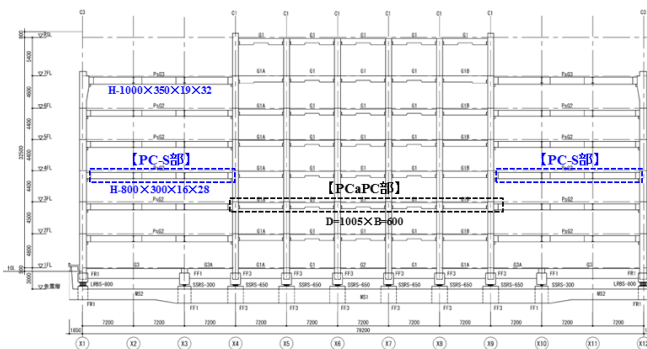


図5 構造軸組図（Y2通り）

2-2 構造概要

■基礎構造概要

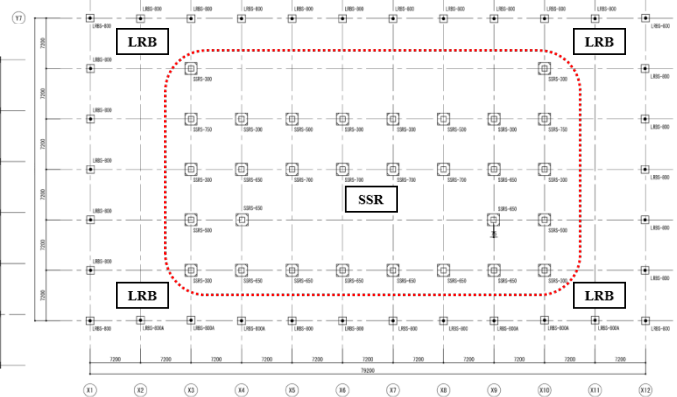
基礎構造は地盤改良体に支持された地盤に平均的に上部構造の重量を支持させることと工期短縮の観点からマットスラブ構造とした。スラブ厚は応力状態に応じて1500mm~2000mmとした。

■免震装置

使用する免震装置は、鉛プラグ入り積層ゴム支承（34基）、弾性すべり支承（30基）とする。各支承材は柱直下および、1F梁の中間部に合計で64基設置する。設置位置は1階柱直下とし、基礎免震構造とした。

免震層のねじれ剛性を高めるため、鉛プラグ入り積層ゴム支承を建物外周部に配置するとともに、偏心率が極力小さくなるように配慮している。また、長周期化を図るため、建物中央部は全て弾性すべり支承とした。図6に免震装置概要図を示す。

各支承は、デバイスメーカーの全数性能検査の性能値を反映して再配置し、更なる免震層の最適化（偏心率の極小化）を図っている。



免震材料の種類	鉛プラグ入り積層ゴム：LRB	弾性すべり支承：SSR
符号	LRB-S800/LRB-S800A	SSR-S300, 500, 650, 700, 750
基数	28基/6基	10基/4基/10基/4基/2基
1次形状係数：S1	41.2	35.5~39.1
2次形状係数：S2	4.0	8.3~20.8
ゴム面圧(N/mm ²)	10	20
ゴム層厚×層数(mm)	5×40=200	35.1~36.0
鉛プラグ径(mm)	130φ/90φ	—
被覆ゴム(mm)	10	10
装置高さ(mm)	527.7	166.7~204.3
せん断弾性率(N/mm ²)	0.392：G4	0.588：G6

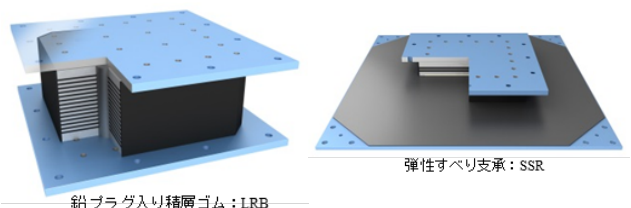


図6 免震装置概要図

3. 耐震設計方針

3-1 入力地震動

地震時設計用層せん断力の設定は、地震動に対する応答解析を実施して行う。設計に用いる地震動波形は、平成12年建設省告示第1461号に示されている方法から求めた地震動波形3波、既往の観測波3波および建設地の地盤特性を反映したサイト波6波の計12波を選定した。

サイト波に関しては地震環境調査の内容を踏まえ、発生メカニズムとして異なる、海溝型地震1波（南海トラフ5地震）、活断層型地震1波（加木屋断層帯地震）、また調査地との相対的位置で内陸直下型として地震波1波（南海トラフ最大陸側地震）を選定した。サイト波は、統計的グリーン関数法により作成した。

表1に採用地震波の一覧を示す。

3-2 耐震性能の目標値

告示平12建告第1461号に示されている稀に発生する地震動のレベルをレベル1、極めて稀に発生する地震動のレベルをレベル2とする。各地震動入力レベルに対して設定した耐震性能の目標値を表2に示す。PC-S構造端部の離間についても設計クライテリアを設けていることが特徴的である。

4. 時刻歴応答解析

4-1 解析モデルおよび解析手法

水平動に対する時刻歴応答解析に用いる構造物モデルは、各レベルの地震動に対して共通であり、各方向別に1階以上の各床位置に質量を集中させた8質点の等価せん断モデルとし、1階床下部に免震層をモデル化している。上部構造および下部構造の減衰は内部粘性型とし、減衰定数は1階床下をそれぞれ固定としたときの1次固有振動数に対して2%とする。なお免震層は、鉛プラグの履歴減衰および弾性すべり支承の摩擦以外の減衰を考慮しない。

4-2 固有値解析結果

各方向の上部構造基礎固定時の免震層の層間変形が2.5cm（微小変形）、15.0cm（レベル1）、45.0cm（レベル2）、50.0cm（余裕度）としたときの等価剛性による固有周期を表3に示す。レベル2地震動時の固有周期は方向に関わらず概ね4.7sec程度である。

4-3 免震材料の力学的変動を考慮した地震応答解析

免震材料の剛性および降伏荷重は、出荷時の製品誤差・温度変化・経年変化によりばらつきが生

じる。本検討では、免震層のこれらのばらつきを考慮した場合の時刻歴応答解析を行い、ばらつきを考慮した場合の上部構造および免震層の応答結果が、前述した耐震性能の目標値を満足することを確認する。

各免震材料のばらつきをまとめると表4のようになる。これらのばらつきを考慮してHard (CASE1) とSoft (CASE2) の2ケースについて検討を行う。

表1 採用地震波一覧

種類	地震動波形 (略称)	稀に発生する地震動		極めて稀に発生する地震動		解析時間 (s)
		速度 (cm/s)	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)	加速度 (cm/s ²)	
告示 スペクトル 適合波	告示1: 八戸位相	13.4	75.6	61.5	332.6	327.68
	告示2: 神戸位相	11.8	77.8	58.8	296.8	163.84
	告示3: ランダム位相	10.0	66.4	53.7	291.8	163.84
観測 地震波	EI Centro NS	25.0	256.0	50.0	511.0	53.76
	Taft EW	25.0	249.0	50.0	497.0	54.38
	HACHINOHE NS	25.0	175.6	50.0	348.9	234.00
サイト波	南海トラフ5地震 NS	-	-	30.2	227.0	327.68
	南海トラフ5地震 EW	-	-	29.8	129.0	327.68
	南海トラフ最大陸側 NS	-	-	39.0	301.0	327.68
	南海トラフ最大陸側EW	-	-	39.9	283.0	327.68
	加木屋断層帯の地震 NS	-	-	14.7	142.8	163.84
	加木屋断層帯の地震 EW	-	-	11.0	123.0	163.84

表2 耐震性能の目標値

項目	稀に発生する地震動 (レベル1)		極めて稀に発生する地震動 (レベル2)	
	層間変形角	部材応力	層間変形角	部材応力
上部構造	層間変形角	1/300以下	層間変形角	1/200以下
	部材応力	短期許容応力度以内	部材応力	短期許容応力度以内
	PC-S部材	圧着部: 離間モーメント以内 ^{※4} 鉄骨梁部: 短期許容応力度以内	部材応力	短期許容応力度以内
免震層	PCaPC部材	短期許容応力度以内 ^{※3}	部材応力	短期許容応力度以内
	水平移動量	240mm以下	水平移動量	480mm以下 ^{※1}
	積層ゴム系支承	せん断歪み 120%以内 引張応力度 生じない	積層ゴム系支承	せん断歪み 240%以内 ^{※2} 引張強度 -1.0N/mm ² 以内
	弾性すべり支承	変形 600mm以下 引張力 生じない	弾性すべり支承	変形 600mm以下 引張力 生じない
基礎構造 (マツスラフ)	支持力	短期許容支持力以内	支持力	短期許容支持力以内
	部材応力	短期許容応力度以内	部材応力	短期許容応力度以内

※1 積層ゴムの終局限界歪み×2/3×ゴム総層厚 (=240%×200mm=480mm)で決定する

※2 積層ゴムの終局限界歪み×2/3 (=360%×2/3=240%)とする。

※3 終局耐力の0.9倍としている。

※4 上下動を考慮した場合は、圧着部、鉄骨梁部とも終局耐力以内とする。

表3 固有値解析結果

状態	次数	X方向			Y方向		
		1次	2次	3次	1次	2次	3次
上部構造 (免震層固定)	固有周期T (sec)	0.864	0.302	0.203	0.961	0.341	0.236
	刺激係数β	1.321	-0.581	0.475	1.339	-0.64	0.5
2.5cm変形 (2.5%歪)	固有周期T (sec)	2.077	0.494	0.258	2.107	0.548	0.292
	刺激係数β	1.102	-0.128	0.041	1.127	-0.161	0.058
15cm変形 (75%歪)	固有周期T (sec)	3.692	0.513	0.26	3.708	0.574	0.295
	刺激係数β	1.032	-0.04	0.012	1.041	-0.051	0.016
45cm変形 (225%歪)	固有周期T (sec)	4.742	0.516	0.26	4.754	0.578	0.295
	刺激係数β	1.02	-0.024	0.007	1.025	-0.031	0.01
50cm変形 (250%歪)	固有周期T (sec)	4.972	0.516	0.26	4.983	0.578	0.295
	刺激係数β	1.018	-0.022	0.006	1.023	-0.028	0.009

表4 免震材料のばらつき

項目	Hard (CASE1) (%)				Soft (CASE2) (%)				
	製造	温度	経年	合計	製造	温度	経年	合計	
LRB	降伏後剛性 Kd	10	5	10	25	-10	-3	0	-13
	切片荷重 Qd	10	15	5	30	-10	-7	0	-17
SSR	一次剛性 K1	30	5	15	50	-30	-3	0	-33
	摩擦係数 μ	50	0	0	50	-50	0	0	-50

*想定温度: 名古屋市の月別平均気温の最高・最低気温と年平均気温から想定(気象庁HP)

・(1981-2010年 標準: 20.0°C, 最高: 27.8°C, 最低: 4.5°C)

4-4 時刻歴応答解析結果

免震材料の力学的変動を考慮した時刻歴応答解析結果を図8に示す。

最大層間変形角は、X方向で1/714 (3F) <ばらつき Hard : El Centro NS>, Y方向で1/532 (4F) <ばらつき Hard : El Centro NS>である。

設計目標値の1/200を満足し、応答せん断力係数は設計用層せん断力係数以下である。X方向、Y方向共にいずれの階においても各部材が短期許容応力度以下となっている。

応答値は、Q- δ 曲線上の線形領域にあり、免震構造の上部構造の復元力特性を線形としたモデルに問題がないことを確認した。

またレベル2地震動に対する免震層の最大応答変位は、X方向39.35cm <ばらつき Soft : 告示波(神戸)>, Y方向39.87cm, <ばらつき Soft : 告示波(神戸)>により生じており、目標値の48cmを十分下回っている。

以上より、免震材料のばらつきを考慮した状態においても全ての耐震性能目標を満足しており、安全性は十分に確保されているものと判断する。

5. 長周期地震動の検討

5-1 解析概要

平成28年6月24日付で、国住指第1111号「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対策について(技術的助言)」が示された。本計画においては申請時期が本年の1月31日であったため、長周期地震動の検討義務については発生していなかったが自主的な検討を行い、参考波扱いとして日本建築センターの性能評価に提出した。以下に検討概要を示す。

<南海トラフ地震_長周期>

南海トラフ地震における長周期地震動を対象とした内閣府「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告(2015)」を受け、国土交通省が公表した「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案について(2016)」において示された地震動である。中部圏の計算には内閣府(2015)における宝永地震モデルが用いられている。

建設地である、名古屋市中区のほぼ全域がゾーン区分のうちCH3に属している(図9)。

本計画における工学的基盤面($V_s=400\text{m/sec}$ 以上)はGL-38.8mであり、工学的基盤面から基礎底レベルまで増幅させている。図10に基礎底盤レベルまで増幅させた疑似速度応答スペクトルを示す。

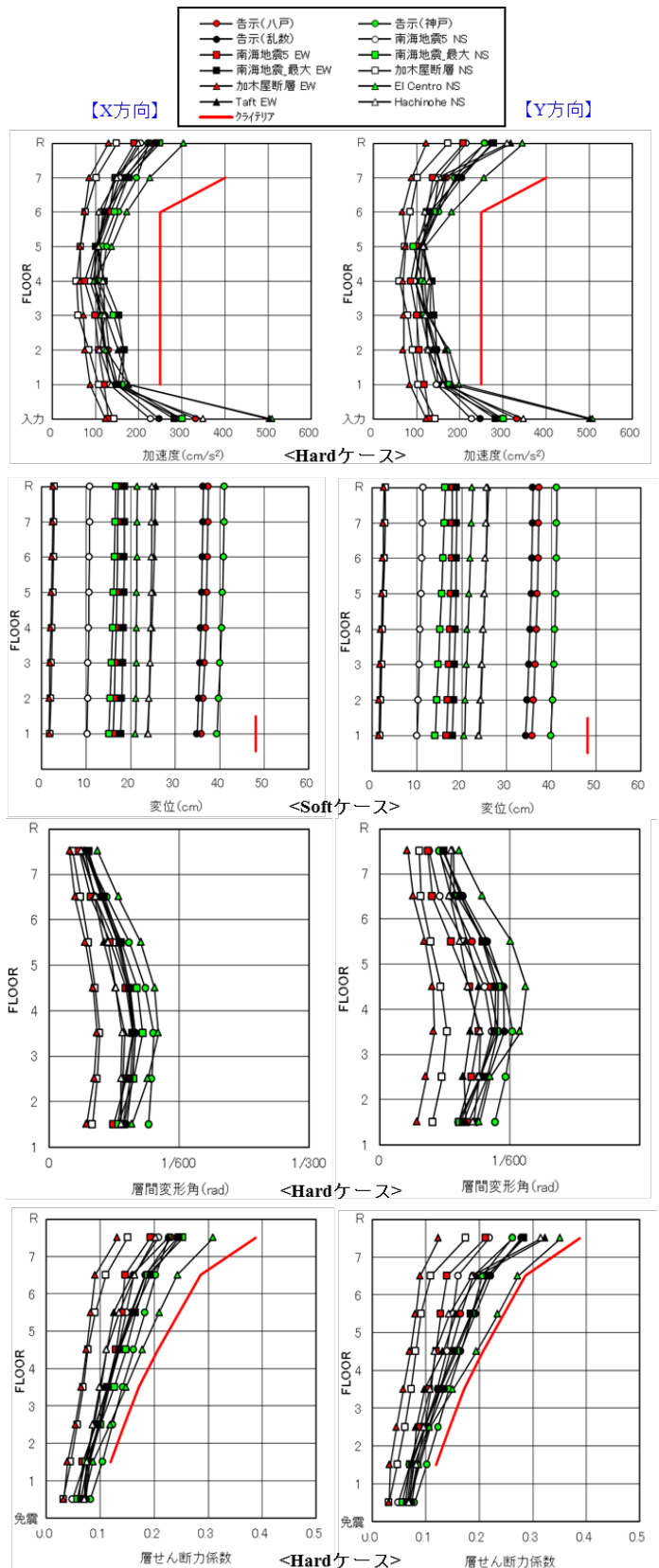


図8 時刻歴応答解析結果(ばらつき考慮)

5-2 繰返し地震動における免震デバイスの検討

長周期地震動による繰返しでは、免震材料が Soft 側に変化することが考えられる。各免震材料の繰返しの評価方法を以下に示す。

■SSR (弾性滑り支承: $\mu = 0.014$)

一連の実験結果より、 $\mu = 0.01$ タイプの SSR の最小摩擦係数は 0.005 (規格値の 50%) 以上と推測される。また、直動転がり支承 (CLB) の転がり摩擦係数の最小値は 0.0048~0.009 (カタログ値) であった。一般に滑り摩擦係数 > 転がり摩擦係数であることを考慮すると、今回使用した SSR ($\mu = 0.014$) の各種条件が重なった場合 (製造ばらつき、繰返し等) の最小摩擦は 0.0048 以上かつ $0.014 \times 0.5 = 0.007$ 以上となる。

また、SSR は応答解析時の摩擦係数のばらつきとして $\pm 50\%$ を考慮している。従って、Soft 時の応答計算では繰返しの影響はなしとする。

■LRB (鉛プラグ入り積層ゴム)

Qd の低下率 $_{LRB} k_{min}$ を計算し、得られた低下率を用いて Qd を再設定して地震応答解析を行う。このとき、基準となる Qd は製造ばらつきを考慮する。

また、温度依存性は繰返しの評価に含まれるものとする。従って、標準状態に対する Soft 時の繰返しの評価を考慮した Qd は製造ばらつき 0.9 を考慮して以下になる。

$$Qd (-) = Qd_{標準状態} \times 0.9 \times \text{LRB } k_{min}$$

表 5 に免震装置のばらつきを示す。繰返し地震動に対する LRB のばらつきは 20% 程度で、応答性状に大きな影響を与えるレベルではないことがうかがえる。

5-3 時刻歴応答解析結果

図 11 に長周期地震動の応答結果を変位について示す。解析は免震材料の繰返しの有無の両ケースについて行った。なお、東海地域のサイト波である南海地震最大、南海地震 5 を比較のために併せて示す。

免震層の最大応答変位は 18cm であり、レベル 2 時の設計クライテリアを満足している。結果として本計画地は CH3 地区でのスペクトル比較でもわかるように、応答値は増幅特性を考慮しても小さいものであることが確認できた。

また免震デバイスに関しては、

■LRB: 鉛プラグ温度 55°C ($\leq 280^\circ\text{C}$)、LRBwp/Vp = 124N/mm² (≤ 600 N/mm²)

■SSR: 累積変形量 11.42m (≤ 100 m) でありデバイスメーカーの認定条件内にあることも確認した。

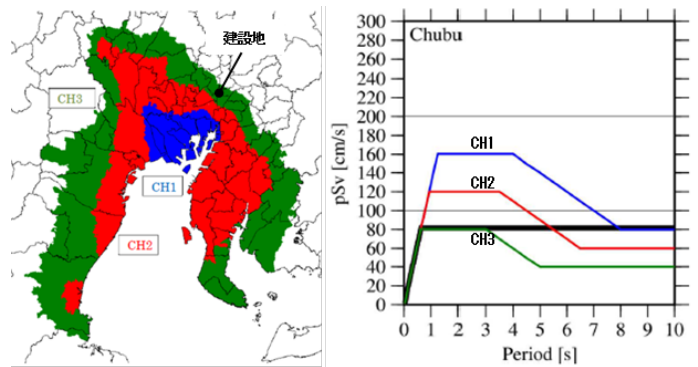


図 9 区域分けと各区域の疑似速度応答スペクトル

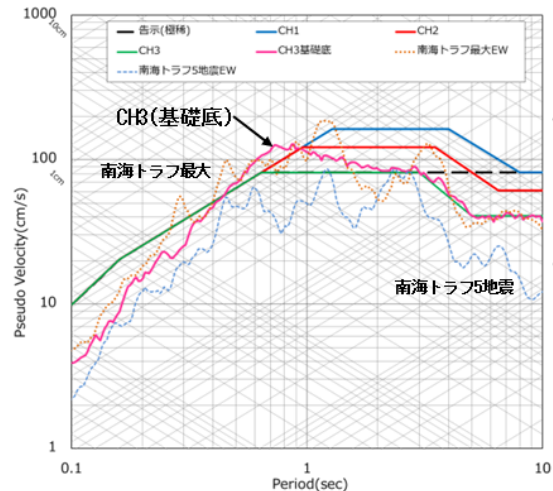


図 10 疑似速度応答スペクトル (基礎底盤レベル)

表 5 免震装置のばらつき設定値

項目		Soft時 (%)					
		製造	温度	経年	繰返し	合計	
LRB	降伏後剛性 Kd	-10	-3	0	0	-13	
	切片荷重 Qd	LRB-S800				-20.5	-30.5
		LRB-S800A	-10	0	0	-17.3	-27.3
SSR	一次剛性 K1	-30	-3	0	0	-33	
	摩擦係数 μ	-50	0	0	0	-50	

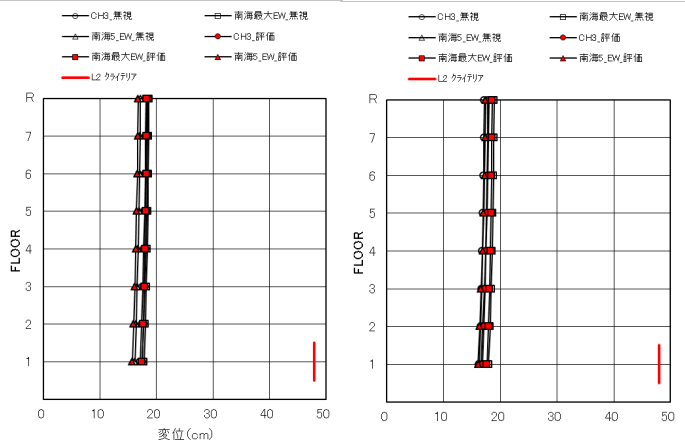


図 11 時刻歴応答解析結果

6. 実大実験による施工検証と構造性能確認

本建物で採用したPC-S構造は「PC-S工法設計指針」として日本ERI株式会社にて構造性能評価を取得している。ただし、設計者としては今までに実構造物への適用がなく、初めての採用であるため実大のモデルによる以下の実験を実施した。

最初に実験に当たっては施工者の協力により、BIMにより詳細な確認を行った（図12）。



図 12 BIMによる実験計画の検討

6-1 PC-S端部溶接施工試験

本システムは鉄骨大梁端部に各種プレート（内エンドプレート、外エンドプレート、サイドプレート、底板）を溶接した箱型断面を有している。

特に両エンドプレートの溶接歪によってPC鋼棒定着版の接地精度に影響を及ぼさないか、溶接施工試験を行い確認した（写真1）。

両エンドプレートの溶接（完全溶込み溶接）に伴う最大の歪量は0.1mm程度で、クライテリアである1.0mmよりも微小なものであり問題ないことを確認した。



写真 1 溶接施工試験

6-2 PS導入による組立施工実験

柱：PCaPC造、大梁：PC-S造の実大モデル（断面構成は全て設計断面と同一）により、実際の施工を模擬した組立実験を行った（写真2、3、4）。

PC鋼棒は通常の柱に使用しているもの比べて短尺での使用となっているが、PS導入に伴う伸び量もほぼ計算値と同等であった。

なお、リラクゼーションを考慮して、導入量は設計値×105%と設定した。



写真 2 組立施工試験（全体）



写真 3 組立施工試験（PCS 端部）



写真 4 PC 鋼棒への PS 導入

6-3 加力実験

明治大学理工学部の協力を得て、実大モデルに対する加力実験を行い、最終的な破壊モード等の確認を行った（写真5、6）。

本構造計画では免震構造の採用により、極めて稀に発生する地震動時の応答層間変形角は最大で1/530程度であるが、1/15程度までの挙動について実験的に確認した。

実験結果としては、想定通り目地部（圧着部）が離間するのみであった。

このことは想定外の地震に遭遇しても、当該部分の安全性能が十分に確保できていることを示すものである。

所定の層間変形からPC-S端部は離間するが、除荷すると当該部分はプレストレスの復元力により元に戻り、ここにプレストレス構造による有用性について確認した。

また目地部（圧着部）自体においても本実験では顕著な損傷は見られなかった。



写真5 加力実験



写真6 $r_s=1/15$ 時の目地の離間状況

7. 施工計画

本計画における地上躯体の建方は本年7月の予定である。施工的な留意点については以下に示す事項が考えられる

- ・鉄骨大梁のスタッド溶接は内蔵されるPC鋼線もしくはPC鋼棒に電氣的な悪影響を与えないように、当該部材を設置する前に施工する必要がある
- ・PC-S大梁の端部充填コンクリートについては梁を柱に架設するまでに地組時に実施する
- ・圧着のためのプレストレス導入は床スラブ打設前に実施する
- ・P C柱の建方精度は $\pm 5\text{mm}$ を限界許容値とするので、大梁の架設には精度上の大きな問題にはならないと思われるが、梁端部の目地幅管理を行って十分な精度管理を行う必要がある。

8. おわりに

免震構造を採用することで上部構造が水平力から解放され、用途に応じた最適な構造形式を採用することができる。本計画ではスパンによって異なる構造形式を選択し、外力に対して明確な抵抗システムとした。

特に本建物の構造システムであるPC-S構造は他に例を見ない効率的なものである。

結果として、高レベルの耐震性能を備えた、ローコスト免震が可能となった。

名古屋ビル（仮称）は日本建築センターによる構造性能評価、国土交通大臣による認定を受けているが、更なる検討として、実大の施工試験や加力実験を本プロジェクト用に実施し、その有用性を詳細に確認している。

【謝辞】

最後に、実大実験を実施するにあたり、多大なご協力を頂きました、明治大学理工学部高木仁之専任教授、施工者である株式会社大林組名古屋支店、黒沢建設株式会社、東亜鉄工建設株式会社の関係者の皆様には厚く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 長周期地震動に関する情報のあり方報告書
平成24年3月
- 2) 建築研究資料 No. 170 号「免震部材の多数回繰り返し特性と免震建築物の地震応答性状への影響に関する研究」
- 3) 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告、平成27年12月
- 4) 建築技術 No. 815 2017年12月号
- 5) 鉄構技術 No. 356 2018年1月号
- 6) MENSIN No. 100 2018年5月号