

山九株式会社 西神戸物流センター —球面すべり支承を用いた物流倉庫の設計—



山口 路夫
新日鉄住金エンジニアリング



中村 秀司
同



市川 康
同

1 はじめに

本建物は神戸市郊外に立つ物流倉庫である。一般的な物流倉庫と同様、積載荷重は事務所や住宅と比較すると大きく10~15kN/m²である。主となる倉庫としては4層の建物であるが、自動ラック倉庫のための吹き抜け空間や事務所用の床、自動ラック用の荷捌き床があるなど、階構成としてはやや複雑であり、7階建ての建物となっている。また西側に将来、増築が計画されている。本建物では大地震時の建物の耐震性の向上と積載物の荷崩れ軽減等を意図し、本建物は免震構造が採用された。なお建物南側の荷捌きスペースは免震化せず本体との間にはエキスパンションジョイントを設けている。

本建物の概要を表1に、外観を図1に示す。

表1 建物概要

用途	倉庫
階数	地上7階建て
軒高	29.1m
建築面積	8110.57m ²
延べ床面積	29708.42m ²
所在地	神戸市西区
構造種別、架構	鉄骨造、ブレース付ラーメン架構
基礎構造	直接基礎
設計・監理	新日鉄住金エンジニアリング(株)一級建築士事務所
施工	新日鉄住金エンジニアリング(株)



図1 建物外観

2 球面すべり支承を用いた大型物流倉庫の設計

物流倉庫という用途から、積載荷重が大きく、その偏在があり得ること、また将来の増築が計画されていることから、それらに容易に対応できるよう、球面すべり支承（Spherical Sliding Bearing 以下SSB）を用いた免震構造を採用している。SSBは、球面状のすべり板とスライダーにより構成され、すべり板の曲率半径による長周期化と摩擦力により、建物の地震応答を抑制する免震装置である。

免震層の二次剛性による固有周期は振り子の原理により建物重量に拠らずSSBの曲率半径で決まり、荷重偏在があった場合でも摩擦力は偏在した重量に応じて変化し、免震層のねじれを軽減できる。

SSBは欧米では大規模な建造物へも適用されているが、日本では積層ゴムによる支承を中心とした免震装置が主流であり、小規模建物への適用が多いようである。

SSBの特徴としては、上記の他に以下の点が挙げられる。

・安定した固有周期

支承による固有周期を決定する球面の曲率半径は機械加工によるため、高い寸法精度により小変形から大変形までバラツキの少ない安定した固有周期が得られる。

・容易な長周期化

これまでの免震装置では積層ゴムと平面系のすべり支承を適宜配置し、長周期化を実現してきたが、球面すべり支承では球面の曲率半径により長周期化が容易に実現でき、免震層の設計が簡易となる。

・免震層のコンパクト化

装置の構成要素がすべり板とスライダーであるため、高さの低い支承が実現でき、免震層のコンパクト

ト化が可能である。また、鋼材が主な構成要素であるため、大きな面圧が可能であり、平面的にもコンパクトな形状となる。

2.1 SSBの概要

本プロジェクトで用いたSSBは上下に球面状コンケイブプレートとすべり板を設けたダブルペンデュラムと言われる形式である。装置のラインナップを表2に、構成を図2に示す。免震層の二次剛性による固有周期としては4.5秒と6.0秒のタイプがあり、本建物では6秒タイプを用いている。なお、同じ建物で両者を混合して使用することはできない。

表2 SSBのラインナップ

項目	仕様	
固有周期	4.5sec	6.0sec
曲率半径	2500mm	4500mm
摩擦係数	0.047 (ばらつき±0.01)	
基準面圧	60MPa	
スライダ径	φ 200～500mm@50	
長期鉛直支持力	1885～11781kN	
限界変形	450～600mm@50	

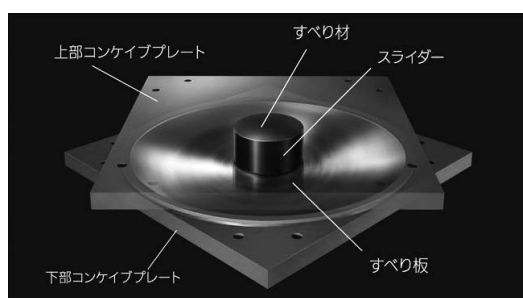


図2 SSBの構成

SSBの荷重-変形関係を図3に示す。固有周期6.0秒、面圧60MPa、限界変形である振幅±600mmまでの漸増载荷試験結果であり、安定した履歴を示している。

図4は摩擦係数 μ の面圧、速度、温度に対する依存性である。すべて繰返し回数3回の場合の摩擦係数であり、60MPa、400mm/sec、20℃の摩擦係数を基準とし、それに対する変化率で示している。

面圧依存性については基準面圧60MPa、軸力変動±40MPa程度の範囲では、摩擦係数の変化は小さい。

速度依存性については約20cm/sec以上では安定した摩擦係数を示している。20cm/secは周期6秒、振幅±20cmの最大速度に概ね相当する。

温度については周辺温度が高くなるに従い摩擦係数は低下する傾向にある。図5は±10cmの繰返し回数と摩擦係数の関係であるが、ここで示すように

すべり板下面温度は数回の繰返し回数以降上昇する。周辺温度と比較すると摩擦熱による温度上昇の方が顕著であり、周辺温度が低い側ではその影響は小さい。また、図5に示すように、繰返し载荷は150サイクル（撓動距離約120m）まで行われており、別モデルでの応答解析結果ではレベル2地震動3回分の撓動距離が約50mであることから十分な耐久性を有しているといえる。

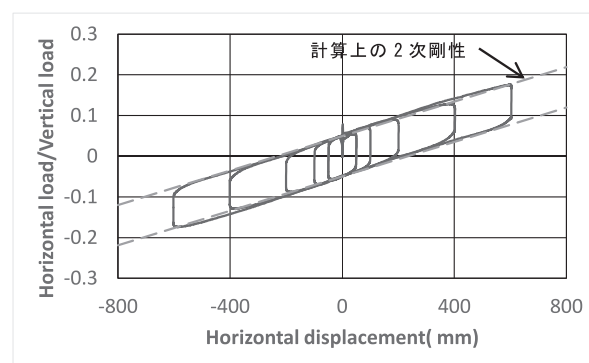


図3 漸増载荷試験結果

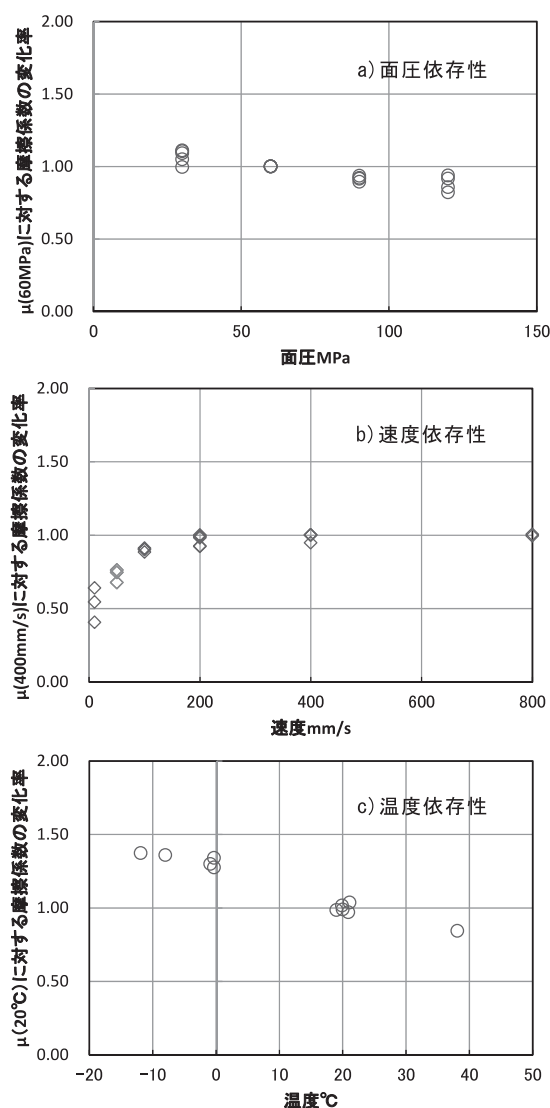


図4 摩擦係数の各種依存性

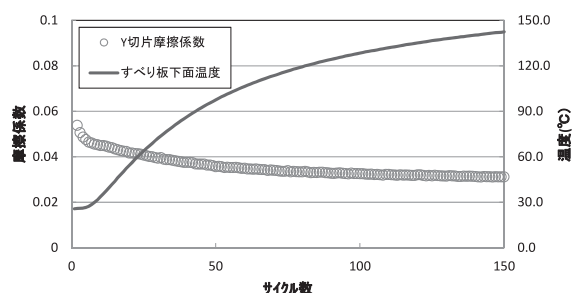


図5 摩擦係数と繰返し回数

2.2 構造概要

本建物の構造概要を図6に示す。基礎は直接基礎、上部架構は1階梁を含めて鉄骨造であり、高い階高と大きな積載荷重でも剛性を確保できるようにブレースを適宜配置している。

SSBは図7に示すように、柱下に加え荷重の小さい片持ち梁下等にも配置し、全69基を使用している。架構用積載荷重に対する個々の支承の最大面圧を70MPa以下、平均的には60MPa程度となるようスライダ径を設定した。結果として地震用積載荷重に対しては平均面圧は50MPa程度となっている。長周期化により応答加速度を低減できるよう免震層の二次剛性による固有周期は6.0秒となるタイプを選定した。摩擦係数は4.7%である。

RC造となる支承下部には高さ500mm、強度60MPaの高強度コンクリートの礎柱を設け、60MPaの面圧の緩和を図っている（図8）。

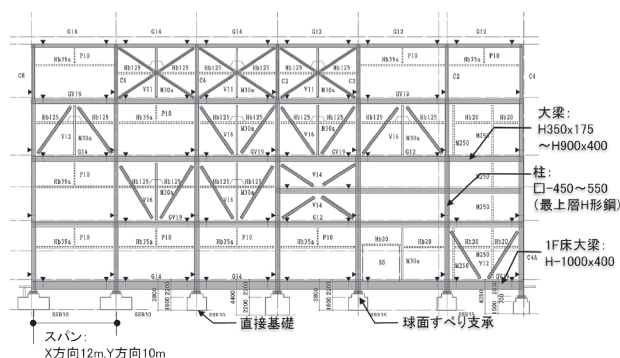


図6 構造概要

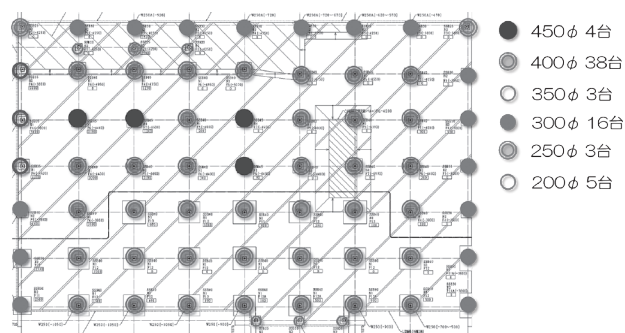


図7 SSBの配置

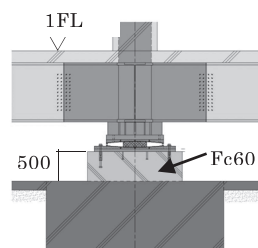


図8 球面すべり支承周辺部

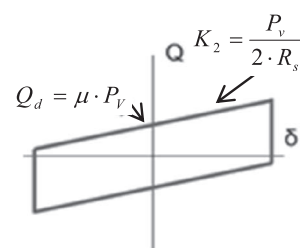


図9 免震層のモデル化

2.3 地震応答解析

免震層は図9に示すようなバイリニアモデルにモデル化している。第1折れ点は摩擦力、第2剛性は球面の曲率半径 R_s 、鉛直荷重 P_v から求まる剛性である。

摩擦係数については、製造バラつきとして、3.7%~5.2%で検討している。上限値を製品仕様の摩擦係数の上限値5.7%に比べて小さくしているが、出荷前製品検査により全製品の摩擦係数が5.2%以下であることを確認している。

採用地震波は図10に示す6波、振動モデルは6質点の質点系モデルである。

摩擦係数4.7%での地震応答解析結果を図11に示す。免震層の最大変形は約23cm、最大加速度は5階床で300gal程度を示している。

図12は摩擦係数のバラつきを考慮した最大応答変位である。下限となる3.7%でも免震層の変位は約25cmであり、摩擦力による応答変位の変化は小さい。

本建物では、SSBにおいて、スライダがすべり板の角に接触する場合を限界変形、その70%を許容変形とし、限界変形50cm、許容変形35cmと設定している。レベル2の応答変位は許容変形に対して十分余裕のある値となっている。なお、本建物の免震層クリアランスも50cmである。

浮き上がりについては、鉛直振動を0.3gとし、水平振動との組み合わせで免震装置に浮き上がりが発生しないことを確認している。

免震層の限界変位は応答変位に対して2倍程度とし、レベル2応答に対して許容応力度設計を行っており、十分余裕のある設計となっている。

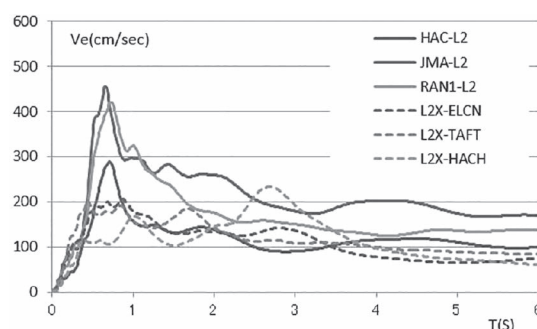


図10 採用地震波（レベル2）

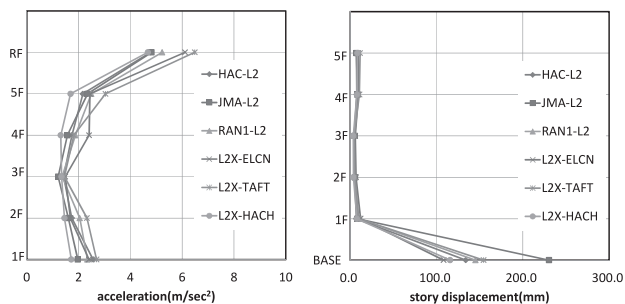


図11 応答解析結果（レベル2）

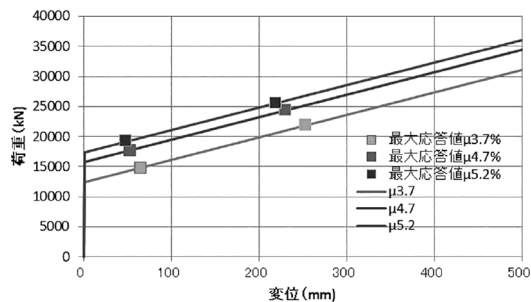


図12 摩擦係数のバラツキの影響

3 免震層の施工

本工事では地盤が強固であるため、独立フーチングによる直接基礎とし、その上に免震装置を設置している。前述のように免震装置の高い面圧に抵抗できるよう、免震装置下部にはFc60の強度の高い立ち上り基礎を設け独立フーチング基礎への面圧緩和を図っている。

免震装置は立ち上り基礎を配筋し、ベースプレート設置後にコンクリートを打設し、空気抜き孔により充填状況を確認している。その後SSBのコンケーブプレートとベースプレートをボルト接合し、1階梁の0節鉄骨の建て方を行っている（図13～15）。

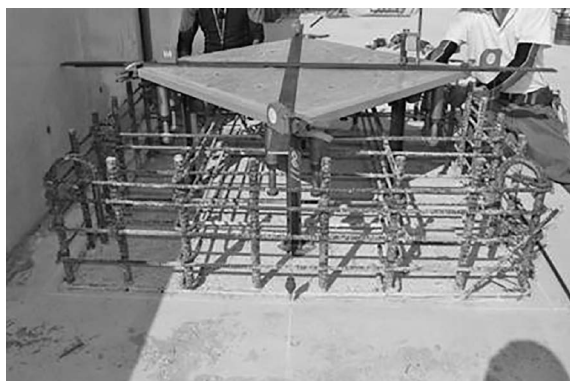


図13 立ち上り基礎の配筋

仮設時はSSBの上下コンケーブプレート間でずれが生じないように、L型金具で止めるとともに、雨水の侵入を防止するよう養生を施している。



図14 球面すべり支承設置状況

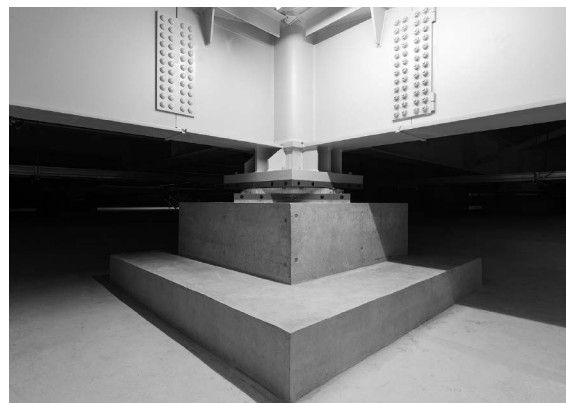


図15 建物完成後

4 まとめ

球面すべり支承は免震層の長周期化が容易であり、また、コンパクトな免震層が実現可能である。建物重量の変化や積載荷重の偏在に対しても安定した免震効果が得られるため、特に積載荷重の大きく、その変動が予想される建物には適した免震システムであると言える。

本建物は2015年3月末、無事竣工を迎えることができました。建築主様はじめ関係者の皆様には多大なご理解・ご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。