

メガブレースを用いた超高層免震鋼構造建築物の設計

DESIGN OF HIGH RISE SEISMIC ISOLATED STEEL BUILDING WITH MEGA-BRACING SYSTEM

菊地岳史 —*1 藤森 智 —*1
竹内 徹 —*2 和田 章 —*3

Takeshi KIKUCHI —*1 Satoru FUJIMORI —*1
Toru TAKEUCHI —*2 Akira WADA —*3

キーワード：
免震構造, 超高層, 鋼構造, ブレース

Keywords:
Seismic Isolation, Tall Building, Steel Structure, Brace

Application of seismic isolation techniques for slender tall steel building requires several attentions in structural design. One is the horizontal stiffness of superstructure to maintain seismic isolation effects, and another is the uplift effect of the isolation bearing with overturning moment caused by earthquakes. In this paper, a practical design of the tall seismic isolated steel building with high aspect ratio is reported. To satisfy the above conditions, single-span moment frame structure with mega-braces on both sides are introduced, and their efficiency is discussed.

1. 序

塔状比の高い超高層鋼構造建築物に免震構法を適用しようとする場合、一般的に以下のような点が構造計画上問題となる。

- 1) 免震効果を発揮させるために必要な上部架構の水平剛性の確保
- 2) 地震時の転倒モーメントにより発生する免震支承部の引抜き力への対処

鋼構造の特長である大きな無柱空間を平面計画上確保した場合、柱梁によるラーメン架構のみでは免震効果を発揮できる十分な水平剛性を確保できない場合が多い。水平剛性確保のためには外周部にブレース等の剛性部材を配することが効果的であるが、このような対処は地震時の水平力を鉛直荷重の小さい外周部に集中させることになり、この部位の支承に引抜き力が発生し易くなる。従って上記1) 2) の条件を双方ともに満足させながら免震構造の設計を行うことには工夫が必要となる。

本報告は東京工業大学すずかけ台キャンパス構内に建設された高さ91mの免震高層研究棟の構造設計に関するものである。同建物は図1, 2に示すように2段階で建設される計画であり、第1期が完成した段階の建物は塔状比が5に達し、免震鋼構造では前例のないスレンダーな構造物となる。現在は第1期棟の施工が完了しているが、第2期工事が完成するまでの間の耐震安全性を確保するため、上記1), 2) の条件を満足する設計がなされた。その対処の方法として、特殊な持出し部材を介して外部に露出した構面外のブレースにより適度な上部架構の水平剛性を確保し、かつこれらをデザイン要素として利用しながら構造設計を行った。また、地震時に生じる柱脚部の引抜き力に対し、免震支承を浮き上がらせ、他の支承部に軸力を再配分する仕組みを採用した。本報告ではこれらの剛性部材および免震装置の詳細を含めた構造設計の概要について報告する。

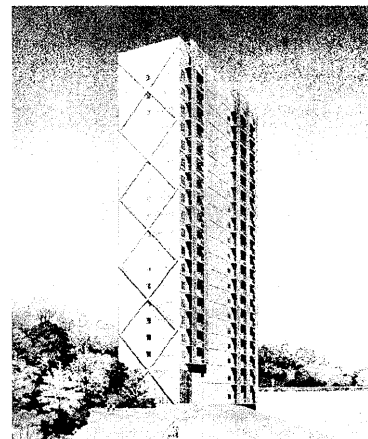


図1 完成予想図(第1期完成時)

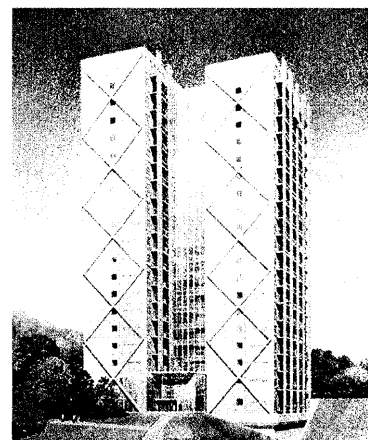


図2 完成予想図(第2期完成時)

*1 ㈱松田平田設計
(〒107-8448 東京都港区元赤坂1-5-17)
*2 東京工業大学建築学専攻 助教授・博士(工学)
*3 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

*1 MHS Planners, Architects & Engineers
(1-15-17, Motoakasaka, Minato-ku, Tokyo 107-8448)
*2 Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology
*3 Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology

2. 構造計画

本建物は、20階建て、高さ91.35mの超高層建築物であり、標準的な階高は4.0m、標準的なスパンは6.6m×15.8mである。実験室を有するキャンパス内の拠点施設としての高い耐震性能を確保するため、免震構造を採用した。図3に軸組図を、図4に基準階梁伏図を示す。本敷地は傾斜地に位置しており、1階の半分以上が周囲の土に埋もれる状態になる。そのため、1階と2階の間に免震層を有する中間層免震構造を採用し、免震層より下に位置する1階の架構全体でその土圧力を負担させている。第1期棟完成時の免震上部架構の塔状比は約5.0となっている。

本建物の構造種別は、基礎及び1階に鉄筋コンクリート造を、2階より上の階に鉄骨造（柱にはコンクリート充填鋼管を使用）を採用した。地盤は第1種地盤であり、基礎形式は硬質の土丹層を支持層とする直接基礎とした。

図5に免震装置の配置図および各免震装置の概要を示す。免震層は直径1100～1200mmの天然ゴム系積層ゴム支承と免震用オイルダンパーおよび鋼製ダンパーで構成されている。鋼製ダンパーは積層ゴムと一体型のもので別置き型のを併用している。極めて稀に発生する暴風時の風荷重に対する免震層の設計は、鋼材ダンパーの降伏は許容するが疲労性能上問題のない変形量に留める設計とした。

3. メガブレースの設計

内部空間の自由度を確保し、各柱の支承部において高軸力とするために、上部構造の短辺方向は1スパンのラーメン架構としている。短辺方向の水平剛性を確保するため、両妻部には4層を1ユニットとして架け渡すメガブレースが設置されている。このメガブレースは鋳鋼ブラケットを介してPC外壁の外に配置され、外観デザインを特徴付けている。ブラケットを介して架け渡すことで、ブレースの剛性を適度に緩和し、ブレースの軸力負担を抑制する。後述する嵌合型免震支承との併用により、隅柱の免震支承の引抜力を最小限に抑えている。

ブレースの断面は500mm×160mmの扁平BOX形状で、板厚は下層の32mmから上層の19mmへ変化させている。メガブレースの端部は鋳鋼ブラケットの芯材と取り合い、直径200mmのピンにより構面内方向にピン支持されている。地震時に入るブレースの圧縮力による座屈を防

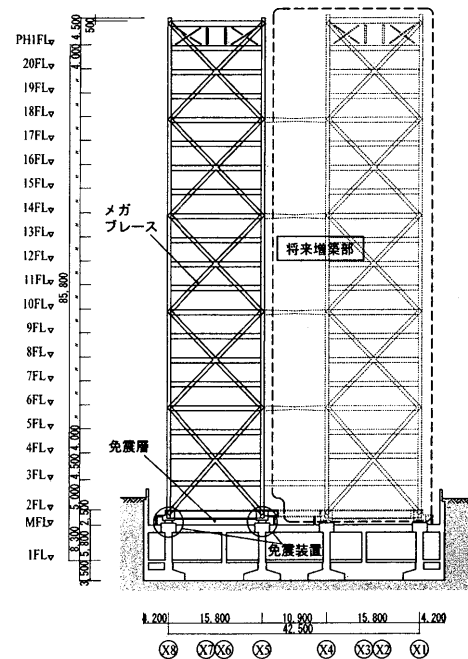


図3 軸組図

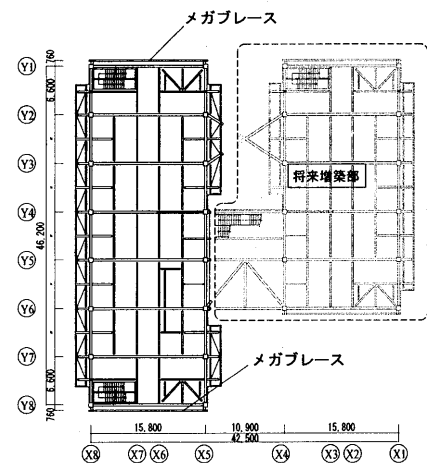


図4 基準階梁伏図

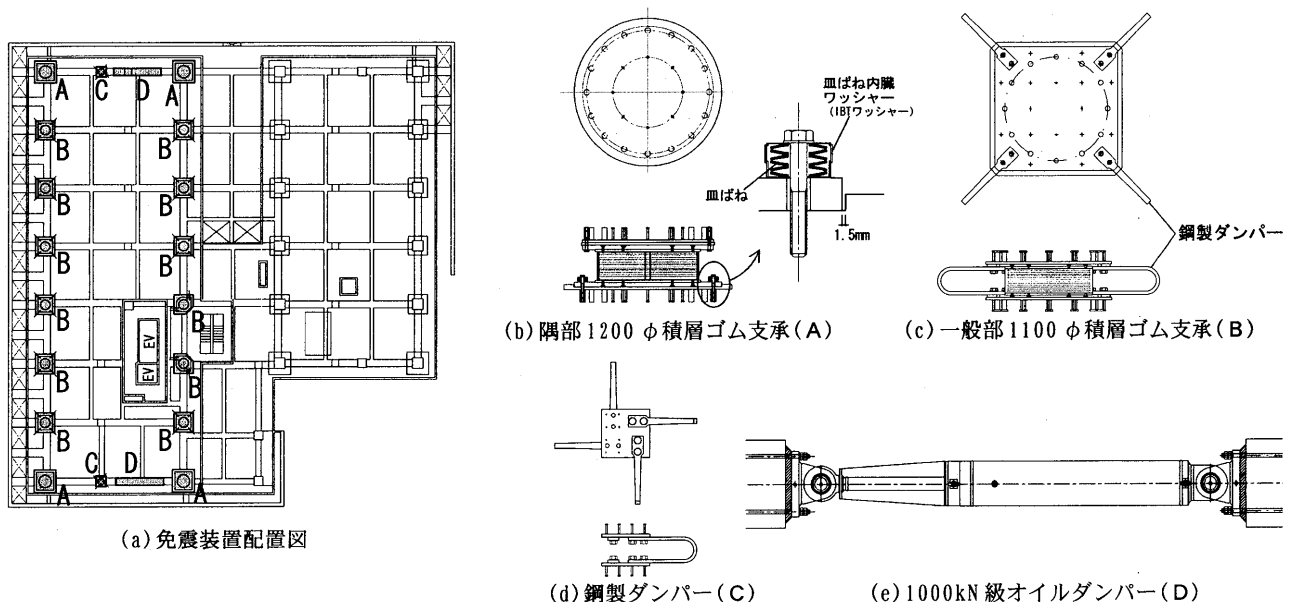


図5 免震装置概要

4. 嵌合型免震支承の採用

構面外メガブレースの剛性調整による免震支承の引抜力の低減に加え、四隅の積層ゴム支承については、さらに引抜力を抑える目的で、積層ゴム支承の下部フランジプレートと取り付けプレートとの取合いを、鉛直方向にルーズな嵌合型の納まりとしている（図10, 11）。図12に地震時に免震支承にかかる鉛直軸力を示す。地震荷重時に、長期軸力の小さい隅柱に引抜力がかかり積層ゴム支承が浮き上がり始めると、積層ゴム支承直上の大梁にせん断力がかかり、隣の構面に力が流れる。隣の積層ゴム支承は大きな長期軸力が作用しているため、引抜力が問題になることはない。

また、この四隅の積層ゴム支承においては、フランジプレートを留める16本のアンカーボルトのワッシャーに、衝撃力を緩和する目的で皿ばねを内臓している。1枚の皿ばねは、外径145mm、板厚6.9mmのもので、交互に6枚重ねて使用している。積層ゴム支承に引張力が働くと、アンカーボルトヘッドと積層ゴム支承の下フランジに挟まれた皿ばねは圧縮される。皿ばねがフラットにつぶれた時の積層ゴム支承の引張面圧がちょうど許容引張面圧となるように皿ばねの剛性を決定している。積層ゴムの引張特性は、1200φ積層ゴム支承の実大引張試験の報告³⁾を参考にし、許容引張面圧は 1.0N/mm^2 とした。なお、嵌合深さ30mmに対し、アンカーボルトヘッドまでの最大浮き上がり量を20mmとしており、引張力作用時も嵌合部から積層ゴム支承が外れることはない。

浮き上がる免震支承のメカニズムにより、通常の固定方法とした場合に $2\sim 3\text{N/mm}^2$ の引張面圧を生じる箇所、 0.8N/mm^2 まで引張面圧を低減することができた。このような嵌合型の免震支承は中低層免震建物への採用の実績はあるが⁴⁾、超高層免震建物に適用した事例は初めてである。採用にあたっては、支承に働く引抜力を過小評価しないこと、支承浮上がり時の上部構造の状態を適切に評価して部材設計を行うことが必要である。

なお、今回の建物で使用する皿ばねの性能を確認するため、図13に示される皿ばねの単調加力実験および繰り返し加力実験を実施し、設計通りの剛性および変形性能を有することを確認している。

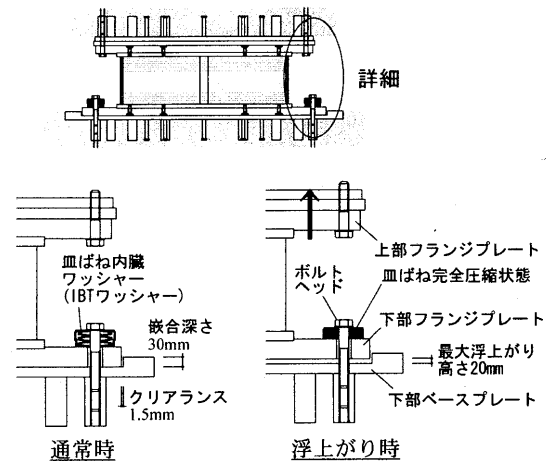


図10 嵌合型免震支承詳細



図11 嵌合型免震支承写真

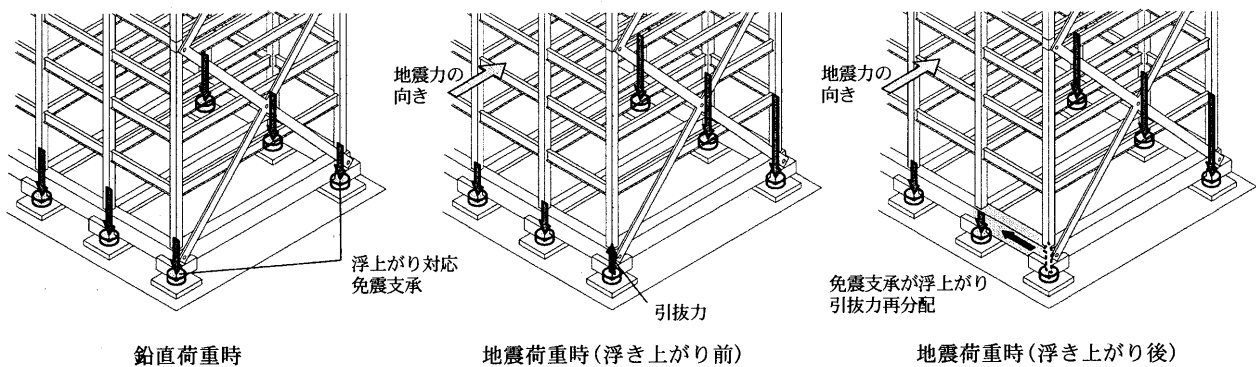
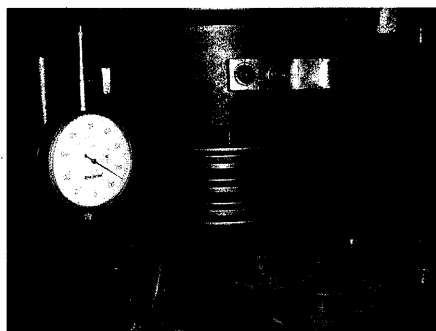
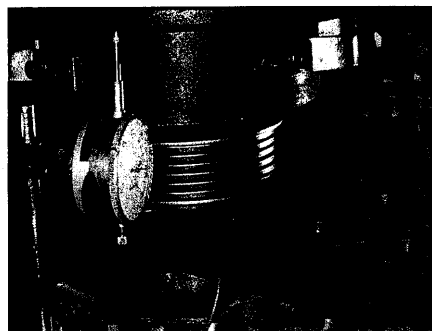


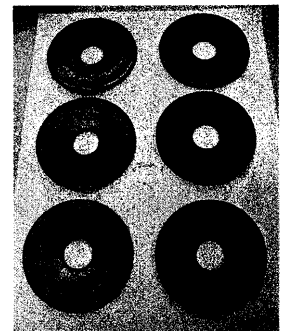
図12 免震支承部の引抜力伝達



(a) 圧縮前



(b) 圧縮時



(c) 試験後の皿ばねの状態

図13 皿ばね圧縮載荷実験

5. 地震応答解析

第1期棟免震建物の地震応答解析結果を以下に示す。表1に建物の動的特性を示す。メガブレースの設置により、上部構造の短辺方向の固有周期は、長辺方向よりやや短い程度に調整されていることが分かる。設計用地震波には最大速度50cm/sに規準化した既往の観測3波(EL CENTRO NS, TAFT EW, HACHINOHE NS)、これらの地震波の位相を用いた告示波及び建設地の地盤特性を考慮した模擬波(想定南関東地震)を用いた。表2に設計クライテリアを示す。

図14に極めて稀に発生する地震(レベル2)に対する免震装置のばらつきなしのケースの最大応答分布を示す。また、表3に免震装置のばらつきを考慮した応答結果のまとめを示す。積層ゴム支承の応答面圧の数値は鉛直震度±0.35Gを考慮している。

最大応答加速度は両方向とも概ね200cm/s²程度に抑えられ、十分な免震効果を発揮している。免震層の変形は安全余裕度レベルを想定した水平クリアランス60cmに対し、20～30cm程度に納まっている。また、応答層せん断力は、許容応力度設計の外力である設計用層せん断力(C_B=0.10)を下回っている。さらに、層間変形角についても各階で1/200以下となっており、応答解析においてそれぞれのクライテリアを満足することを確認した。

積層ゴム支承に生じる引張応答面圧は、免震装置のばらつき考慮時、斜め方向加力時、鉛直震度考慮時に、許容値である-1.0N/mm²以上を満足している。なお、隅部の積層ゴム支承の浮き上がり量は、免震装置のばらつきを考慮した上で、長辺+45°方向地震力、鉛直震度-0.35Gの条件で最大となり19mm程度と評価される。

表1 架構の動的特性

	免震層固定時	微小変形時	$\gamma=50\%$ (レベル1相当)	$\gamma=150\%$ (レベル2相当)
短辺方向	2.179 秒	2.869 秒	3.608 秒	4.231 秒
長辺方向	2.507 秒	3.099 秒	3.785 秒	4.379 秒

表2 設計クライテリア (レベル2)

上部構造・下部構造	層間変形角	1/200 以下
	部材応力	短期許容応力度以内
免震層 (免震装置)	せん断ひずみ	性能保証限界変形 (250%) 以内
	面圧	-1.0 N/mm ² 以上 30 N/mm ² 以下
	変形	60 cm 以下

表3 レベル2地震動 最大応答値

項 目	短辺方向	長辺方向	短辺+45°	長辺+45°
最上階最大加速度 (cm/sec ²)	199.8	232.0	227.5	227.5
免震層直上階 層せん断力係数	0.093	0.096	0.095	0.095
最大層間変形角 (rad)	1/280	1/241	1/277	1/278
免震層最大変位 (cm)	26.2	30.3	30.4	30.6
積層ゴム支承 最大応答面圧 (N/mm ²)	25.29	19.78	26.32	25.45
積層ゴム支承 最小応答面圧 (N/mm ²)	-0.62	-0.09	-0.79	-0.83

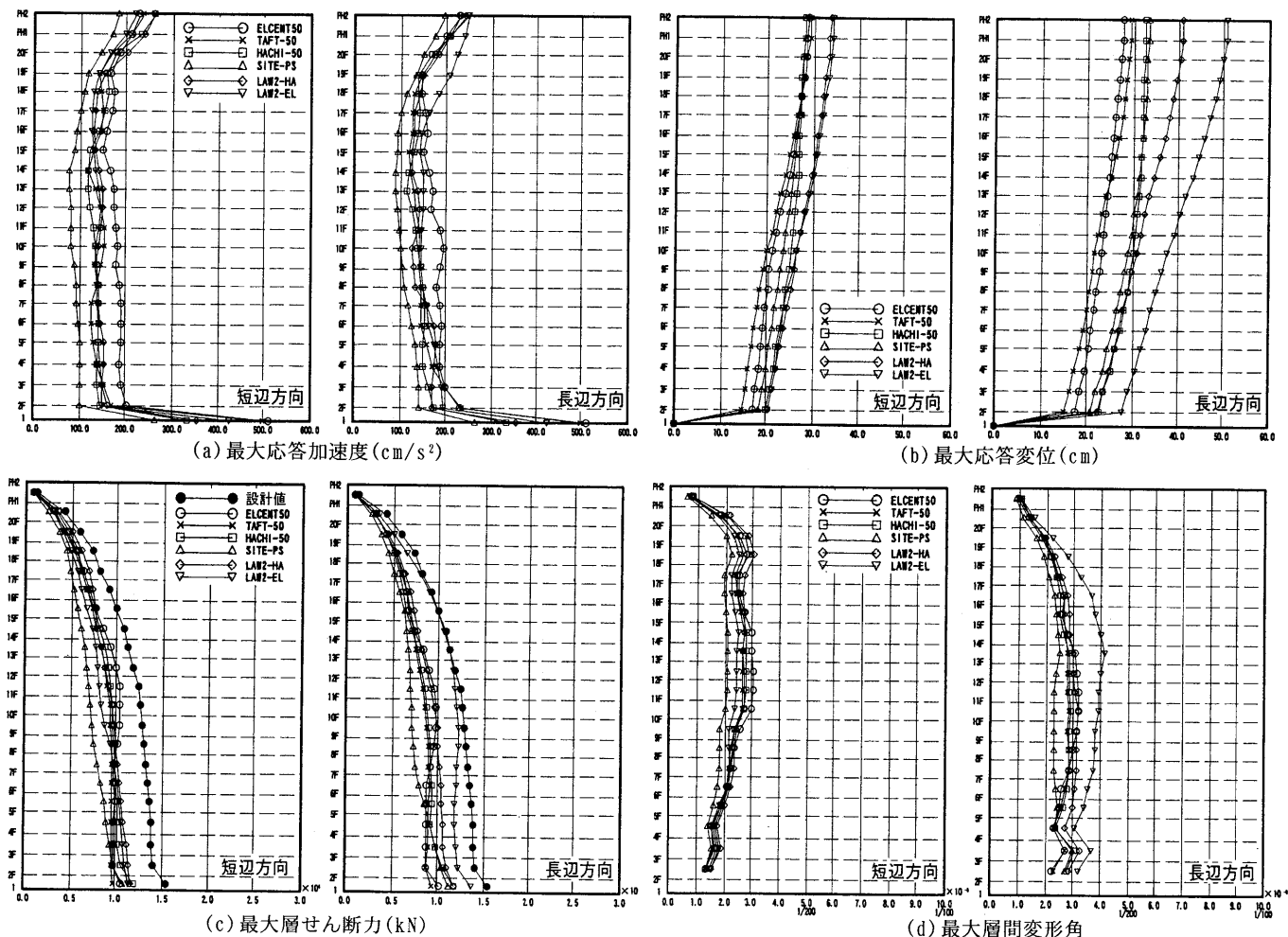
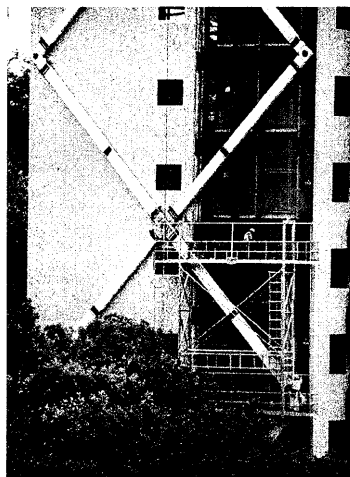


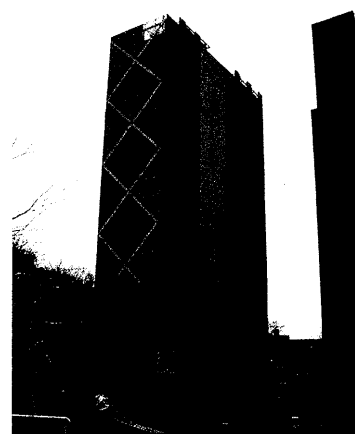
図14 レベル2地震動 最大応答分布



(a) ピンブロックの取り付け



(b) 仮固定完了時



(c) 建物全景

図15 メガブレースの施工状況

6. メガブレースの施工

メガブレースの施工は、本体の柱梁鉄骨の建方およびPC版外壁の取り付け完了後に行った。ピン軸部のクリアランスを両側で合計1mmとしているため、ブレースの製作および施工計画の立案は慎重に行う必要があった。また、施工誤差による地震時の付加応力の発生を極力抑えるため、軸部材の製作精度の確保に注意を払うだけでなく、建方時にブレースの直線性を確保することが課題となった。

まず、ブレース仮固定前に建物側のブレース端部支持点、中間支持点の位置計測を行い、中間支持点で最大+8mm程度(1/700)の壁面外方向の相対不整を確認した。相対不整の大きな中間支持点では、ブレースの直線性を確保するために、本体建物と取り合う中間支持点のプレートの切削を行い位置の調整を行った。

ブレース取り付けの手順としては、まず始めに鋳鋼ブラケットと取り合うブレース端部の鋳鋼接合部材(ピンブロック)をセットし(図15(a))、次に工場製作された2層にわたるブレースの軸部材をエレクトロニクスによりピンブロックに仮固定した。ピンブロックとブレース軸部材の現場溶接は、PC外壁とのクリアランスが小さく、施工スペースが十分に取れないため、全て外側から行った。図16にブレースの溶接手順を示す。BOX形状のブレース断面は幅500mmの鉛直鋼板のみを軸力負担部材として設計している。したがって、まず内側の鉛直鋼板を突合せ溶接し、上下鋼板を部分溶け込み溶接した。最後に外側の鉛直鋼板を塞ぐように2箇所突合せ溶接した。現場溶接にあたっては、熱ひずみによる部材の伸縮を考慮し、片面全てのブレースをエレクトロニクスにより仮固定

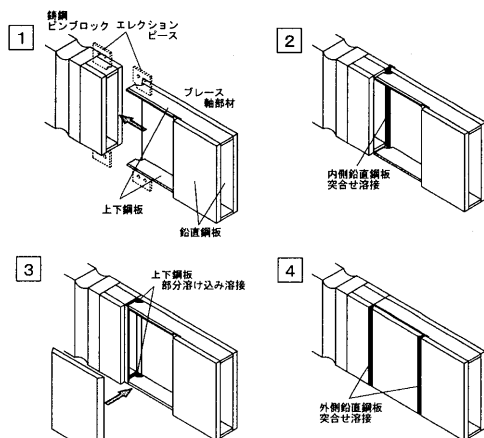


図16 BOX形状ブレース溶接手順

した後(図15(b))に行った。

以上の手順により、メガブレースの支持点間の相対不整は、ほぼ5mm(1/1200)以内の精度にて施工を完了することができた。

建物全景を図15(c)に示す。本建物の第1期工事は2005年5月に竣工する。

7. 結

塔状比5を超える鋼構造高層建物に免震構造を採用するに当たり、構面外メガブレースと浮き上がり免震支承を組み合わせた構造設計を行った。設計および施工の結果、以下の結論が得られた。

- 1) メガブレースを鋳鋼ブラケットを介して接合することにより、水平力を過大にブレースに集めることなく、レベル2地震動に対して免震支承部の引抜力の小さい設計を実現することができた。
- 2) 隅部の免震支承に生じる引張力に対しては、浮き上がりを許容する嵌合型免震支承を適用することで対処が可能であった。支承部における浮き上がり量は最大で19mm程度と予想される。
- 3) 構面外メガブレースの施工に関して、溶接、建方方法を工夫することにより、面外不整1/1200程度以下の精度で建て方を行うことができた。

謝辞

本建物の建築デザインは、東京工業大学建築学専攻・仙田満研究室の監修によるものであり、工事監理は同大学施設部によるものである。また、施工は清水・三井・工藤特定建設共同企業体によるものであり、本論文で報告された特殊構法の実現は関係者の方々の努力によるものである。ここに深謝したい。また、構造設計協力を戴いた織本匠構造設計研究所の荒氏、皿坂ねに於いて有用な知見を戴いたユウ・エンジニアリングの山崎氏、そのほか、本計画の実現にあたりご協力を戴いた方々に感謝する。

参考文献

- 1) JSSI 10th Anniversary Symposium on Performance of Response Controlled Buildings Proceedings Abstracts, pp.70, 2004.11
- 2) Warren C. Young: Roark's Formulas for Stress & Strain, 6th ed. McGraw-Hill, pp.651, 1989
- 3) 村松佳孝, 西川一郎, 川端一三, 高山正春, 木村雄一: 大サイズ天然ゴム系積層ゴムアイソレータの引張特性, 日本建築学会技術報告集, NO.12, pp.53~56, 2001.1
- 4) 高坂隆一, 増子友介, 塚田幸一: 深谷赤十字病院新病棟, MENSIN, NO.38, pp.10~15, 2002.11

[2005年4月15日原稿受理 2005年7月22日採用決定]