

橋梁崩落

地盤液状化

長周期地震動

建物倒壊

ライフライン遮断

自然災害の
記憶と教訓

地震 | 倒壊

人々が日々の暮らしを営む場所で発生する大地震は「自然災害」として甚大な被害をもたらす。しかし、その場所に人が居なければ単なる「自然現象」にすぎない。必然、地震対策を目的とする社会資本の強化、国土の強靱化も、生活と経済がめまぐるしく動き続けるそのただ中で展開されている。インフラ機能を維持し、街の息吹を途絶えさせることなく地震に負けない都市をつくる。そこに都市防災の難しさがある。その困難を克服し、大都市の橋梁で、港湾で、超高層ビル群で、「居ながら」の防災は着々と歩を前に進めていた。

現時点におけるそのインフラの強度や耐震性能が、定められた基準を満たし、制度上の、あるいは計算上の「安全」を確かなものとしていたとしても、人々の「安心」に基準はない。安全の先にある安心を求め、防災に取り組む現場を訪ねた。

1855（安政2）年に江戸を襲った大地震の被害を記録した「安政見聞誌」。深川、本所、浅草など低地で顕著だった建物倒壊、火災の様子を描いている。（提供：早稲田大学図書館）

FACT-1

橋梁の耐震化

制震・免震

FACT-2

液状化対策

FACT-3

超高層ビルの
長周期地震動
対策

耐震補強

教訓・対策

過去の震災が残した「生命線」の教訓

1964（昭和39）年の新潟地震では橋長300mを超える「昭和大橋」が液状化により落橋。被害を象徴する様子として大きく報じられた（写真上）。その30年後、我々は阪神・淡路大震災において道路や橋が命をつなぐまさに生命線であることを再び体感する（同下）。これを教訓として1996（平成8）年から全国で緊急輸送道路の指定が進められ、沿道建造物の耐震化も加速した。わが国の道路、橋の建設に関わる技術基準である道路橋示方書もこうした震災の経験、時代の要請をふまえ、より高度な安全指針とすべく改訂が進められている。



1964（昭和39）年の新潟地震にて落橋した「昭和大橋」（提供：（公社）土木学会附属土木図書館、撮影：倉西茂・高橋龍夫）



1995（平成7）年の阪神・淡路大震災で橋脚が破壊された阪神高速道路（提供：阪神高速道路株式会社）



聖橋（文京区・千代田区、1927年架設）



蔵前橋（台東区・墨田区、1927年架設）



白鬚橋（台東区・墨田区、1931年架設）



勝鬨橋（中央区、1940年架設）



清洲橋（中央区・江東区、1928年架設）



永代橋（中央区・江東区、1926年架設）

FACT-1

東京の橋梁の
長寿命化・耐震化
高齡化した橋梁を
架け替えずに
寿命を延ばす

— 自然災害の記憶 —

耐荷、耐腐食、耐疲労といった長寿命化対策において大きな比重を占めるのが「耐震」だ。耐震補強は、橋脚部の曲げやせん断など

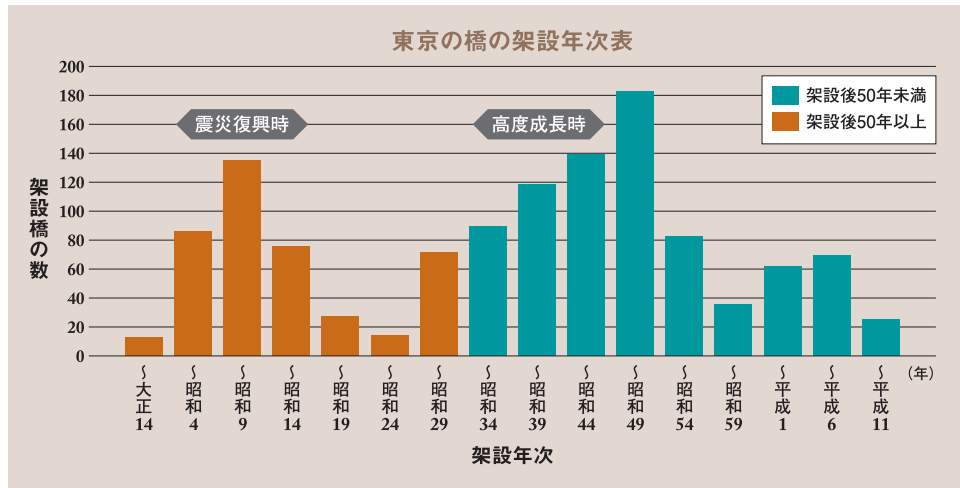
独自の計画に基づいた耐震

「対症療法では都内の橋をあまねく守ることは難しい。現在、橋の状況を照査して区分けし、それぞれの橋に相応しい対策を進めています。『予防保全型管理』という考え方に基づいた一橋ごとのオーダーメイド補修です」。長大橋や幹線道路橋、著名橋など主要な橋梁約二〇〇橋を長寿命化橋梁と位置づけ、適切な対策により、一〇〇年以上の延命化を図るという。未来を見据えてインフラの維持を目指すという首都東京の精神はしっかりと受け継がれている。

東京都がその管理下にある橋梁の点検を開始したのは今をさかのぼること四〇年以上前、一九七一（昭和四十六）年のことだ。「当然のことですがインフラは時とともに老朽化します。都はその対策を前提とした点検調査を早期から行ってきました。当時の担当者たちの先見の明に敬意を表しています」と語るのは東京都建設局の川合康文道路保全担当部長だ。一九八七（昭和六十二）年以降は全国に先駆けて独自に策定した「橋梁の点検要領」に基づき、全橋梁の定期点検と、定量的な健全度の評価を行っている。対象となる橋は一、二〇〇橋を超える。日常点検、異常時点検に加え五年に一度の定期点検を実施、適宜、補修や補強を施し、損傷による事故を未然に防いできた。

未来を見据えた橋梁の調査・点検

しかし、都内の橋梁の多くが関東大震災の復興時、高度経済成長期の二つの時期に集中してつくられたため、更新時期を一斉に迎えて



高度成長期に建設された橋は竣工から半世紀を迎えようとしている。さらに震災復興のシンボルとして建設された橋は80年が経過。これらの橋梁の対策が一時期に集中しないよう、東京都はアクションプログラムに沿った計画的な対策を講じている。(出典：東京都建設局)



東京都建設局
道路保全担当部長
川合康文

交通と環境を 維持しながら施工

関東大震災の復興のシンボル、隅田川に架かる永代橋、清洲橋で

を精査し、落橋防止を目的として行われる。阪神・淡路大震災では橋梁をはじめとする都市施設が甚大な被害を被った。「高速道路の橋脚でせん断破壊が生じ、桁ごと倒壊した写真を覚えていてほしい？」道路や橋の崩壊は被災直後の避難救助、消防活動に支障をきたした。これを教訓として都では震災時の『緊急輸送道路』の確保を最重要課題として捉え、計画的な耐震補強を実施しています」と川合部長は話す。一九九六(平成八)年より、これら緊急輸送道路に加え、跨線橋、跨道橋なども対象として、都は補強を行い、二〇〇三(平成十五)年度までに緊急輸送道路の中でも重要度の高い一次路線上に架かる一六五の橋梁の対策を既に完了している。現在、二〇一五(平成二十七)年度末までに耐震補強の対象とする約四〇〇橋の完遂を目指し、事業を展開中だ。

自然災害の 記憶と教訓

阪神・淡路大震災では主に、一九八〇(昭和五十五)年より前の耐震基準でつくられた橋が倒壊等の大被害を受けた。清洲橋、永代橋では今年度から長寿命化工事に着手。既に一九八〇年の基準はクリアしており、ダンパーの設置、支承部の補強といった小規模な対策工事で十分な強度を保つことが確認されている。(完成予想パース、提供：東京都建設局)



五輪橋 (渋谷区、1964年架設)



外苑橋 (渋谷区、1928年架設)



葛西橋 (江東区・江戸川区、1963年架設)



曙橋 (新宿区、1957年架設)



船堀橋 (江東区・江戸川区、1971年架設)

橋ごとに異なる 状況、状態を 把握して、 オーダーメイドで 補修する

緊急輸送道路に加え、幅の広い河川にかかる長い橋(長大橋)、鉄道や道路の直上を跨ぐ陸橋(跨線橋・跨道橋)等を含めた主要な401橋を対象に耐震補強を実施している。

それに加え河流を阻害しない、近隣住民に対する負担感を低減する、そうした技術、工法が求められています」。都市部における構造物の補修、補強工事は、周辺に迷惑をかけないように騒音防止など環境保全も大きなテーマになると川合部長は話す。

橋梁の補修工事では「人や車両の往来を止めることのない施工」が大前提となる。長期にわたる交通、物流の遮断が社会に与える影響、経済損失は莫大なものになる。道路の機能を継続しながらいかに確実に安全性を高めていくか。「河川での工事は渇水期に限定されるため施工の効率化が必要です。

も今年度から長寿命化工事が始まる。勝間橋とともに重要文化財に指定されている橋梁だ。永代橋は橋を支える支承の追加、清洲橋は慣性力を吸収するダンパーの設置が行われる。米寿を迎えようとしている橋たちだが、こうした最低限の補強で十分な耐震性能を維持できる。これは、震災復興で用いられた橋梁の設計基準が、むしろ戦後より厳しかったことが幸いしたという。改めて両橋のフォルム、ディテールに目を凝らす。その武骨ともいえる姿から頑丈さが伝わってくる。川合部長は「関東大震災で復興を支えた橋は国民の財産です。これらを健全な形で次世代に引き継いでいくことも我々の重要な責務です」と語る。



橋脚を補強する際は、橋脚の周りを仕切り、排水して河床を露出させる。工事は水量の少ない時期に限られるため、工期が何年にもわたることもある。(提供：東京都建設局)

神戸港の 液状化対策

コンテナの
荷役を妨げずに
耐震性を強化

阪神・淡路大震災の液状化被害

一部の耐震岸壁をのぞき、港のほぼ全域で港湾施設が被災。液状化、噴砂の被害が生じた。想定基準の2～3倍の地震動による慣性力と土圧が原因と考えられている。岸壁の傾斜、防波堤の沈下をはじめ、地下の貯油タンクの浮き上がり、路面の波打ちが港内各エリアで確認されている。港湾土木に求められるのは地盤の改良、強化である。そしてその技術はより強靱かつ機能的な支持地盤の構築を目指し日々進化している。



液状化によりコンテナヤードでは噴砂現象が発生。ヤード内に積まれていたコンテナも崩れた。(提供：国土交通省神戸港湾事務所)



岸壁背後が大きく陥没したコンテナバース。コンテナを荷役するガントリークレーンも使えなくなった。(提供：国土交通省神戸港湾事務所)

自然災害の 記憶と教訓

神戸港にコンテナが戻ってきた。接岸する大型船の勇姿、絶え間なくコンテナを抱えるガントリークレーン、活気に満ちた神戸港に震災の痕跡を探すことは難しい。



— 自然災害の記憶 —

100年の港が崩壊

その激震は一九九五（平成七）年一月十七日早朝に、阪神一帯を襲った。淡路島を震源として震度七を記録した阪神・淡路大震災である。近畿圏の広い範囲に及ぶ大きな揺れは、ここ神戸港にも激甚な被害をもたらした。「一〇〇年という時を超えて先人たちが築き上げてきた一大港湾が一瞬にして崩壊したんです。言葉を失いました」。国土交通省近畿地方整備局神戸港湾事務所の齊藤安立副所長は、被災直後の港の様子をこう振り返る。ほぼ全域の大型岸壁が沈下、ヤードも陥没し巨大なガントリークレーンが倒壊した。コンテナがおもちゃの積み木のように散乱した惨状が目に見え付いている。港湾施設は事実上閉鎖され、工場は操業を停止。国内外にわたって広範囲な産業を支える電気、自動車などの部品供給も途絶える。サプライチェーンの破断は世界的な規模で多大な影響を及ぼした。それまで日本一のコンテナ取扱量を誇っていたが、翌年には半減。「コ

ンテナが他の港にシフトしてしまっただ」と齊藤副所長は話す。

液状化に耐える港を造る

運輸省港湾局（当時）は震災後わずか一カ月後に復興の基本的な指針を策定、直ちに神戸港再生に着手する。軸となるのは「港湾機能の早期回復」「港湾施設の耐震性の強化」「市街地復興との連携」「国際拠点港としての復興」という四本の柱だ。

新港突堤や摩耶埠頭など既設の櫛形突堤は既に老朽化が進行しており、櫛形の形状も時代に則したものではなかった。この地区を含め「復旧」とはとまらない再開発計画に沿った「機能強化」が全域で図られた。都市部で発生した大量のがれきを埋立材として活用、市街地の復興を後押しする。かつての突堤は埠頭形式の岸壁として再生した。

港湾は強固な鉄とコンクリートによって岸壁、防波堤、荷役施設等を整備し、物流拠点としての機能を果たしている、しかし、その裏側で港を支えているのは水際の

災害時の緊急物資輸送と物流機能維持のために



ポートアイランドのコンテナバース（PC-16、17）。不陸抑制工法によって荷捌き地を支える地盤の改良が行われる。目的は地震時の液状化を抑制し、地表に生じる凸凹を防ぐ。荷役を停滞させることなく、期限を切って計画的に施工する。

自然災害の記憶と教訓



港内における岸壁、ヤードはそれぞれに求められる機能、役割に最も相応しい形状、工法が選択され機能強化が図られている。物流拠点としての機能強化、にぎわいを演出する親水空間。神戸港は多彩な表情を持っている。（出典：国土交通省神戸港湾事務所）



国土交通省
近畿地方整備局
神戸港湾事務所 副所長
齊藤安立

港のさらなる強靱化は今も続いている。ポートアイランドでその一端に触れた。広大なコンテナヤードで不陸を抑制する地盤改良が行われている。コンテナを支える地盤にセメント固化剤を注入しヤードを強固にする。「港湾物流という社会資本を機能させた状態で施工するためユーザーとの協力が不可欠。綿密に調整して空いたスペースから順次進めています」と語る齊藤副所長は、高品質を保ちながらさらなる短工期を実現する土木技術に期待を寄せている。

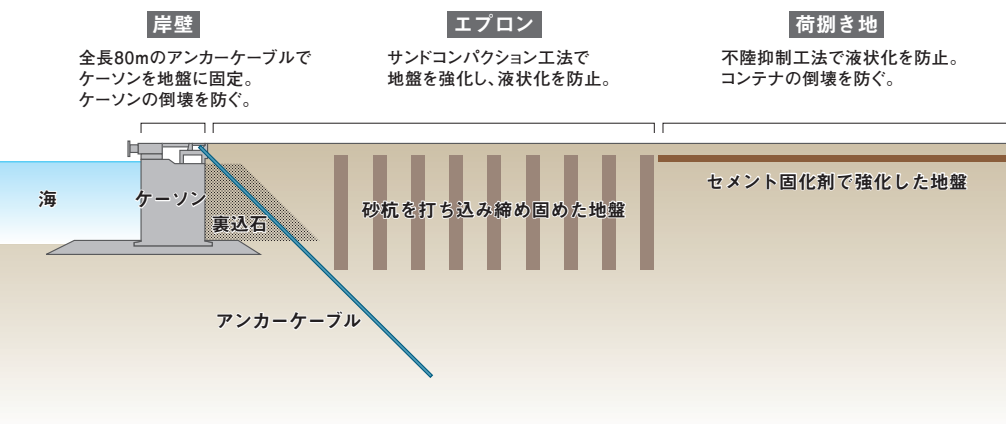
あれから一八年、神戸港は目覚ましい復興を遂げた。副所長の言う「美しい港」神戸港は、わが国の国際戦略港湾としてのプライドと実力を日々取り戻している。

ヤードを止めずに地盤を改良

地盤である。地震はこの地盤を揺り動かし「液状化」という現象を引き起こす。

神戸港の岸壁は主に重力式のケーソン（大型の鉄筋コンクリート製の箱）で構成されていた。水際にケーソンを設置し、その自重で背後の土圧と地震動などに耐える構造だ。しかし、ケーソンを支える地盤が崩れてしまえば岸壁もろとも傾斜、沈下する。神戸港はこの教訓を踏まえ、重力式にこだわることなく、様々な工法を採用して復旧事業を展開した。「ある種の地震動によって一部の港湾機能が失われたとしても、異なる構造を持つていれば多くのコンテナバースは持ちこたえることができる。港全体の崩壊は回避できます」。

物流機能の強化と、緊急物資の集散拠点の構築が神戸港復旧の両輪となったと副所長は話す。ケーソンの据え直しや補強はもちろん、ジャケットや鋼矢板による前出しなど様々な工法が導入された。陸側からの一見では、その違いは判別しにくいですが、神戸港は港湾土木のショーケースだ。



荷捌き地での不陸抑制工法の工事状況。地表から1.5m掘り下げた地盤をセメント固化剤で強化。（提供：東洋・株木・吉田特定建設工事共同企業体）



PC-15～17岸壁では、耐震補強と増深改良のため、既設の重力式ケーソンを1基あたり5本の地中アンカーケーブル（鋼線の引張部材）で支持する工法を採用。エプロン、荷捌き地では液状化を防ぐ工事が進む。（出典：国土交通省神戸港湾事務所）



左／新港東。突堤間前面の海底地盤に鋼板セルを打設。中／摩耶埠頭東側。耐震強化岸壁への上部プレキャストブロックの据え付け。右／中突堤。短期施工が可能なジャケット（栈橋）による旅客バース。地震応答特性の異なる構造形式を採用し、同時被害を受けないようにしている。（提供：国土交通省神戸港湾事務所）

超高層ビルの 長周期地震動対策

テナントの居ながらの工事で
屋上に六八〇〇トンの
錘を設置

十勝沖地震と長周期地震動

長周期地震動という言葉が広く知られるようになったのは2003（平成15）年に発生した十勝沖地震だろう。震源から250kmも離れた苫小牧で、建物の被害がほとんどなかったにもかかわらず一部の石油タンクが炎上した。スロッシングという液体がうねる現象に起因する災害だった。その映像とともに「長周期地震動」という言葉がメディアを駆け巡る。長く、ゆったりとした揺れを指すこの奇妙な現象が衆目を集め、研究と対策が加速した。



長周期地震動と石油タンクの固有周期が一致し、タンク内の石油が振動。浮き蓋と側壁が擦れて火花を発生し、引火した。（提供：消防庁消防研究センター）

— 自然災害の記憶 —

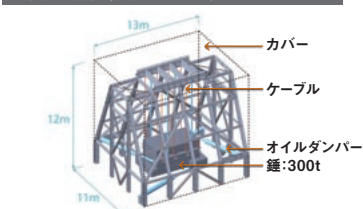
最初検討したのは窓際に設置する制震装置の採用だった。しかし、オイルダンパーが眺望を阻害し、室内工事によるテナントの負担が大きいことからこのプランは再考を余儀なくされる。「ビルの商品価値を高め、ご迷惑を少なくし、外観を損なわない工法」が求められた。鹿島建設の栗野治彦グループリーダーは「大胆な発想の転換が必要でした。未踏の領域ではありましたが、大地震対応の巨大TMDの実現に矛先を変えました。非常識に挑戦する大規模なプロジェクトです」と振り返る。従来風揺れ対策で利用されていた、振り子式の錘で揺れを吸収するTMD自体は古くから知られる

から八年後、東日本大震災で再び長周期地震が組上に上がり、この揺れを低減するというテーマに新技術で応えてくれたのが鹿島建設（株）さんでした」と原田統括は話す。三井不動産と鹿島建設。二社共同の新たなコラボレーションが始まったのは二年前の夏だ。

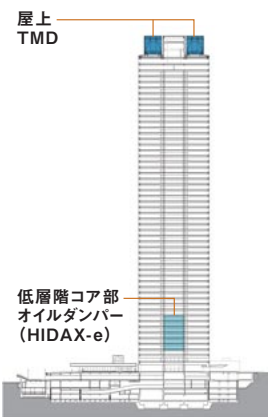
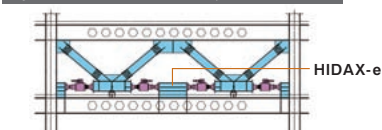
世界初の巨大TMD※2

TMDは建物の周期に同調させた錘が揺れることで、建物の振動エネルギーを吸収する技術。これまで、風揺れや小規模地震対策として採用されてきた。「巨大」TMDは、吊り長8mのシンプルなケーブル懸垂式の支持機構と、2mの大変形を制御可能な新開発のオイルダンパーを組み合わせ、実用化を達成した。（提供：鹿島建設株式会社）

超大型制震装置TMD姿図



高性能オイルダンパー姿図



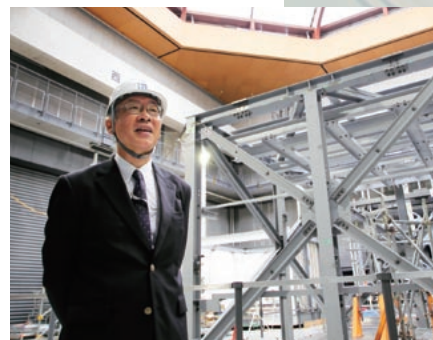
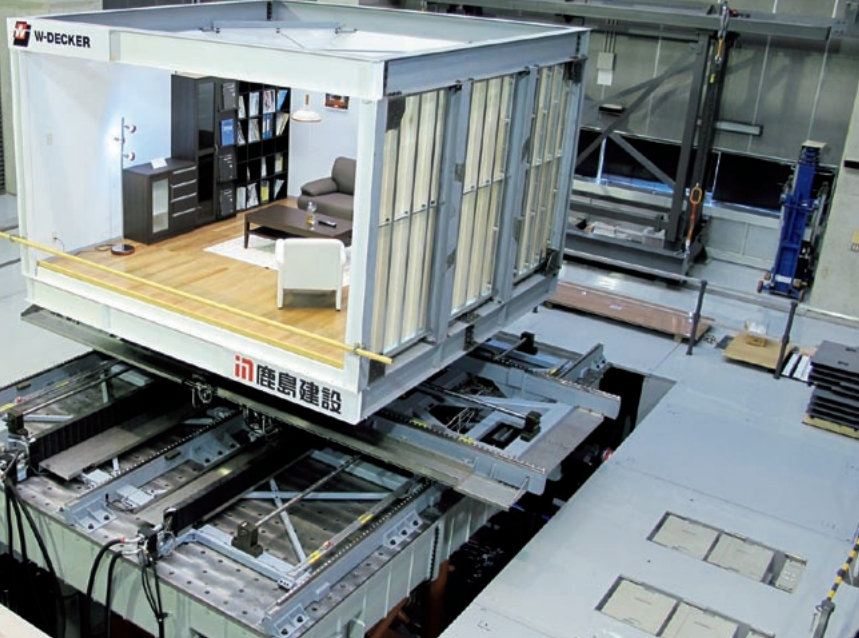
三井不動産株式会社
ビルディング本部運営企画部
資産管理グループ 上席統括
原田英利

※1 働く人にとって一番の場所であること。「安心、快適、便利で、ここら豊かに働けるオフィスこそが、個人の能力を最大限に発揮できる。そのことが企業（テナント）の成功につながる」という発想。

※2 Tuned Mass Damper：建物に減衰器（Damper）を介して錘（Mass）を取り付け、固有振動数を調整（Tuned）することで、振動を抑える装置。

W-DECKERは5m×7mの主振動台に構造物や室内模型、各種機器など60tまでの試験体を搭載可能。主振動台に「長周期振動台」を2段重ねにし、再現する揺れの範囲を大幅に拡大。近年観測された地震動を再現してその挙動、影響を調べることができる。
(提供：鹿島建設株式会社)

地震ごとに異なる「顔つき」を見極め、新たな対策を生み出す



鹿島建設株式会社
技術研究所
建築構造グループ
構造耐震チーム
上席研究員 チーフ
田上 淳



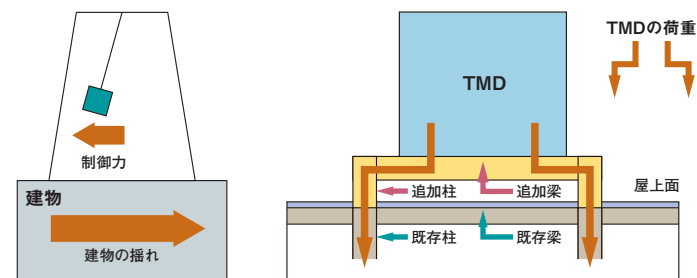
主振動台の四隅に取り付けられた高速油圧加振機（アクチュエータ）。40tの鋼製テーブルを3方向に加振して様々な地震動を人工的に発生させる。このシステム全体は空気ばねとダンパーで支えられた巨大な浮き基礎内に構築され、実験で生じた振動が周辺敷地に伝わらないよう配慮されている。

観測された地震動を国内最高水準の精度で再現することができる。構造耐震チームの田上淳チーフに装置開発の背景を聞いた。「日本には様々な『顔つき』をした地震が襲ってくる。巨大地震から長周期地震動まで正確に再現することで、その影響を調べ、安全の奥行きを深くする、それがこの装置の開発目的です」。天井の脱落、家具の転倒など構造に直接影響のない現象でも、大きな揺れの渦中にある人

には危険と恐怖をもたらす。W-DECKERではそうした二次部材の耐震性の検証も可能だ。構造、材料、工法に加え、内部空間までもが安全であることを確かめてユーザーの安心感を高める。田上チーフは「鹿島建設は昭和六十年代から制震構造の研究を本格的に続けてきました。今後も過去の地震データと教訓をもとにニーズを先取りし、超高層ビルの長周期地震動対策、中低層ビルの直

下地震対策、既存ビルの耐震補強等の研究を重ねていきます」と話す。三井不動産の理念にある「ワーカーズファースト」は、「そのビルに関わるすべての人」にとって「ファースト」であることを目指しているようにも見える。そして、高層ビルに限らず大都市の橋梁、港湾、そこに人々の暮らしと就労がある。その営みを「いちばん」と捉えた地震対策が求められている。

自然災害の記憶と教訓



TMDのしくみ

架構工法

新宿三井ビルの構造は精緻な検証の結果からも現時点で現行基準を満たす強度が確認されている。錘の総重量1,800tは建物総重量の3%。屋上であっても既存の構造部に十分な耐力と剛性を持つ梁、柱を新設することで安全性は確保できる。この工法是三井不動産、鹿島建設両社の共同で特許申請がなされた。(提供：鹿島建設株式会社)

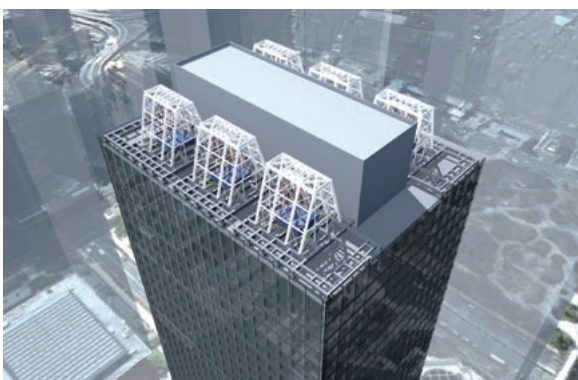


鹿島建設株式会社
建築設計本部
構造設計統括グループ
グループリーダー
栗野治彦

技術だが、今回は語頭に「巨大」がつく。「総重量一、八〇〇tもの錘を屋上に設置し、地震時の応答を半分以下に低減します」。当初は五四〜五五階を吹抜けにして錘を設置する案もあった。原田統括は「やはりテナントに対する影響が大きい。画期的な技術なら見せてしまえ！」と屋上設置を決定しました」と明かす。前例のない新技術をかたちにする。その決断力に感銘を受けたと語る鹿島建設の栗野グループリーダー。原田統括は、そこに優れた発想と技術があったからこそ、と返す。三〇〇tの錘を擁したTMDが六基、ビルの屋上に並ぶ。二年後の完成を目指す工事が始まった。

様々な「顔つき」を持つ日本の地震

両氏が巨大TMDの採用に至るまで、オイルダンパーの検証等を目的に足繁く通った場所がある。調布市にある鹿島建設の頭脳、技術研究所。ここで注目されるのが二年前に導入された高性能三次元振動台「W-DECKER」だ。近年



左上／完成予想図。六基のTMDが屋上に載る。(提供：鹿島建設株式会社) 左下／地上部に設けられた構台。ここから屋上に資材が揚げられる。右／新宿三井ビルの屋上。