

建設業の技術経営 (MOT)

第6章 CTOの技術知識と安全・安心の基本

藤盛紀明

芝浦工業大学大学院 工学マネジメント研究科 客員教授
FT テクノロジー 代表

1 | CTOに必要な建設技術知識の基本

建設業は幅広い技術に支えられた産業である。大手総合建設業の技術総指揮者 (CTO) ならば扱う技術の多くに一応の見識が必要である。若い時には専門分野を極めることは必要であり、その道ではあるレベルの研究者・技術者、少なくとも国内ではリーダー的存在であるべきであると考えられる。レベルの高さはともかく、一つの分野を深く鋭く研究した経験、専門の技術分野を深く追求した経験が技術哲学の根幹となり、専門研究者・技術者の心情の理解にもつながる。CTOやR&Dマネジャーは多くの技術分野の研究者・技術者を束ねて方向を定め成果を出す義務がある。その場合に研究者の本質、技術者の本質を実感しているか否かは成果に大きな影響を与える。

CTOはいろいろな場面で重要な技術判断を迫られることがあり、安全・安心の基本思想を問われる場面も多い。価格と品質のバランスをどのように考えるか、時間との勝負を迫られた場合、性能・機能をどの程度、犠牲にすることができるか、先端技術と従来技術をどのようにバランスさせるかなどである。ビジネスは時間との勝負であり、少ない情報の下で多くの判断を日常的に行う必要がある。その判断には幅広い技術知識と深い技術哲学がCTOに必要な能力である。(図1, 2)

近年、多くの産業で商品の品質・機能・産地が問題となり、現在でも時々報道で取り上げられる。ビジネスを全面に出すと品質よりも経済優先となりがちで、営業・製造担当はその魅力に引き込まれがちである。しかしCTO、技術担当者は常に品質・機能で正しい判断を行い、経営トップはもちろん、事業部門にも強く主張する姿勢が必要である。長寿命建設業の基本は「品質第一」、「お客様第一」の姿勢であった。筆者も既に打ち上がったコンクリート床を全面やり直してもらったことがある。その時の現場所長の顔を今も思い出すが、正しい判断と主張であったと思っている。「どんなに安くても悪いものは駄目！」は、筆者の役員時代にトップから言われ続けた言葉である。

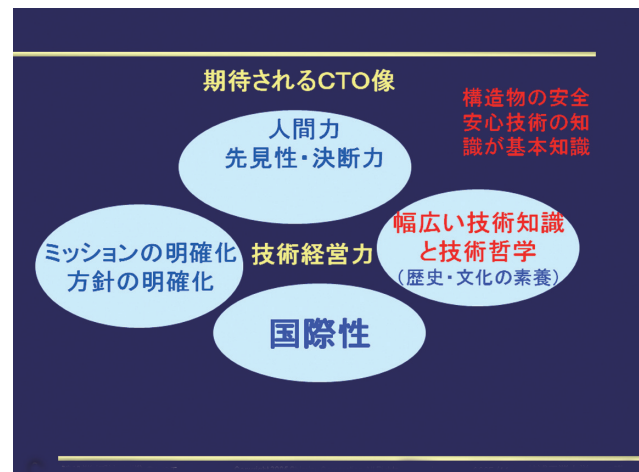


図1 CTOの重要資質は幅広い技術知識



図2 建設業の重点技術分野例

2 | CTOの技術知識とキャリアパス

CTOに必要な技術知識は幅広い(図3)。これらの全てに精通することはもちろん無理であるが、これらの技術について基本的な知識、基本的な考え方を知っている必要があると考える。例えば建設業の基本材料であるコンクリートの場合、コンクリートの強度発生メカニズム、耐久性・耐火性のメカニズム、施工に関係する流動性、乾燥収縮メカニズム、セメント硬化メカニズム、リサイクル技術などである。コンクリートは古い材料であるが、今でも技術開発競争が激しく行われている。研究開発提案指示やテーマ提案への評価などには、これらの基礎知識の保有が必要である。さらには国内外の主要研究者の専門分野の把握なども重要である。長い研究の歴史を持つコンクリートの研究範囲は幅広く詳細にわたっており、今では1社ですべての研究開発分野をカバーすることは困難である。産学連携が主流の現在、共同研究、委託研究の相手の選択は重要である。

大手建設業の研究所の場合、専門が細分化され技術・研究開発の管理者レベルになっても狭い技術分野しか知らないと言う状態が多いと思われる。一つの専門に一応の成果が上がった時期に、その人物の将来象を描きトップ管理層への発展が期待されるならば、意識的に配属転換を考える必要がある。技術分野の配置転換もあるが、むしろ研究企画、知的財産、開発、事業部門などへの転換も考慮する必要がある。さらには研究企画、全社技術企画、技術販売、経営企画への配転も効果的である。研究企画、技術企画を担当すると多くの技術に接する機会が増え、直接研究開発を行わなくても一応の知識を有することができる。

筆者が大学入学以来、大手建設業退任までに直接研究・開発に関わった技術分野を図4に示す。大学の研究室は伝統のあるコンクリートの研究室で、工業材料研究所の中にあった。建築材料研究所が隣りにありコンクリートの材料実験、構造、調合・練り混ぜと日常的につきあっていた。セメントやコンクリートの臭いが衣服や身体に染みついていく状態であった。

会社に入って研究所に配属となったが、30名程度の規模で多くの分野を担当させられた。当時出始めた鋼製仮設の安全性・耐久性判定なども担当したが、PC版プレファブの研究開発は入社当初から担当した。PC版製作のための新しいシステム開発、スケジュール管理、さらには構造実験、特許申請と多くの経験が得られた。途中から溶接、鉄骨構造・工場の研究開発に転換した。鉄を切断する時の甘い匂いや溶接のヒュームの匂いが好きになったものであった。建設産業の二大重要材料に関与したことになる。溶接の研究を通じて3次元熱伝導論解析、溶接の検査に超音波探傷を研究し固体中弾性波解析に取り組んだ。材料研究



図3 CTOに期待される基本技術知識

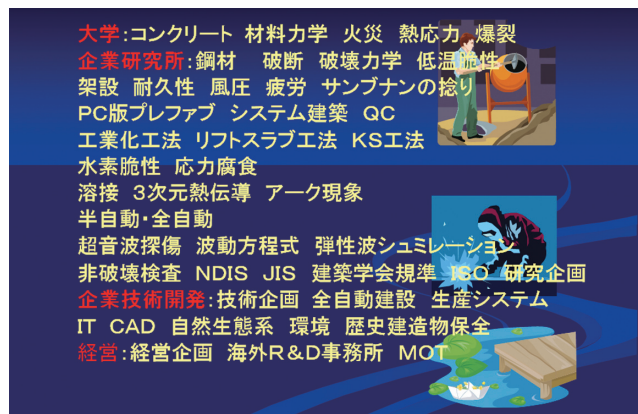


図4 大手建設業CTOの技術経験例

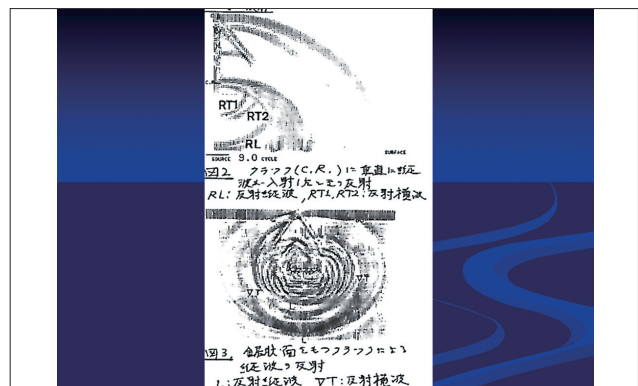


図5 固体中弾性波の可視化研究(解析は現斉藤環境大臣担当)

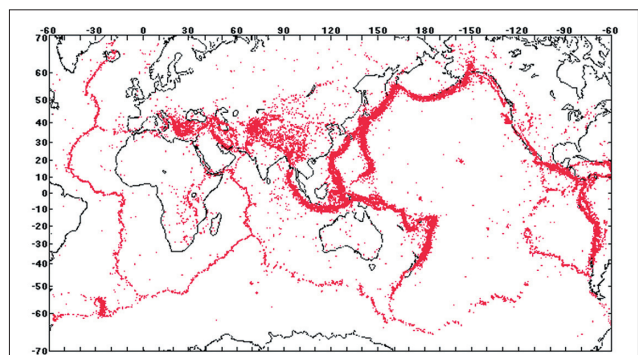


図6 世界の震源分布(M > 4.0, 100km以浅)
「理科年表2002(CD-ROM版)国立天文台(丸善)」



から数理的解析に転換した。固体中弾性波の研究では初期のシミュレーション、画像化・可視化に取り組んだ(図5)。材料施工分野と理論・解析分野では基本的な発想が異なるところがあり、従事する研究者の気質・習慣も違う。この両者の経験は良い体験であった。

さらには、研究企画、経営企画、海外R&D独立事務所経営、全社技術企画と幅広いポジションを歩かせて頂いた。CTO候補には経営企画、海外企画の経験は重要と考える。

3 | 自然の力に学ぶ (過去の地震被害)

発注者・利用者が建設構造物に求める最大の性能・品質は安全である。自分の家は地震で大丈夫かは人々の一番の関心事である。日本は地球の地震帯の上にある地震国(図6)であり、最近でも図7のような地震があった。「地震でも壊れない」は全ての構造物に期待される。しかしながら第3章の図26で示したように地震の都度、予期せぬ破壊現象が発生し、設計基準の不備が指摘されてきた。新しい破壊現象に対応する研究が行われ、規準改訂が行われる繰り返しであった。

筆者は企業に就職した1964年に液状化現象(図8)がクローズアップされた新潟地震に遭遇した。地震発生は6月で昭和大橋の崩壊写真、昭和石油新潟精油所からあがる煙の写真に驚いた。この年は10月に東京オリンピック開催の年で、筆者はオリンピックに間に合わせるために代々木の体育館工事に駆り出されていた。オリンピックが終わると直ちに液状化で傾いたアパート(図9)の調査と復旧工事に駆り出され、吹雪の中、大きく傾斜したアパートの建て起こしのために数ヵ月、新潟に滞在した。傾いた建物の中を歩くと神経に異常を来たすような感覚を覚えるものである。固い地盤が水になるという現象は誰にも予測できなかった。それがどのようなものか、それによって建物や土木構造物にどのような被害が生ずるかは現地で被害状況を実見しなければ体感できないものである。自然は未知の部分が多く、あなどってはいけないと思ったものであった。

1968年の十勝沖地震では柱のせん断破壊が発生した。函館大学の惨状(図10)を見た時には柱のせん断破壊の恐ろしさを実感した。この破壊現象は建物の崩壊をもたらし、人命に関わる破壊であり、建築関係研究者は全力をあげてRC柱のせん断破壊対策に取り組んだ。

その結果、1971年に建築基準法が改定され、柱のせん断補筋が強化された。この地震では八戸工専、三沢商業高校などの学校建築の被害にも新たな発見をした。学校建築によくある多くの校舎を廊下でつないだ平面配置で校舎の先端が振り回され、破壊されたような感じだった(図11)。

十勝沖地震の10年後の1978年に宮城県沖地震が発生し、

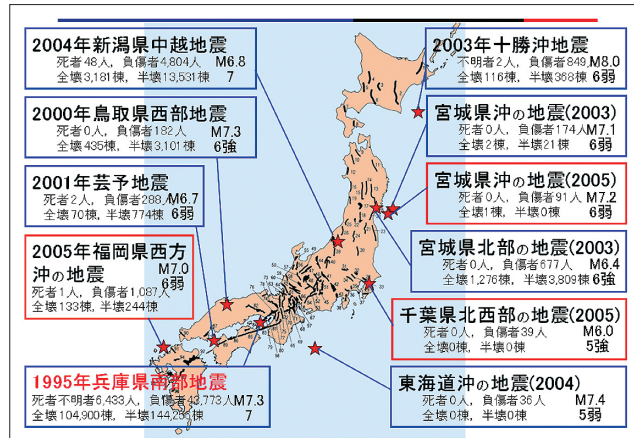


図7 最近の主な被害地震(1995-2005、柴慶治氏提供)



図8 液状化現象(福武毅芳氏提供)

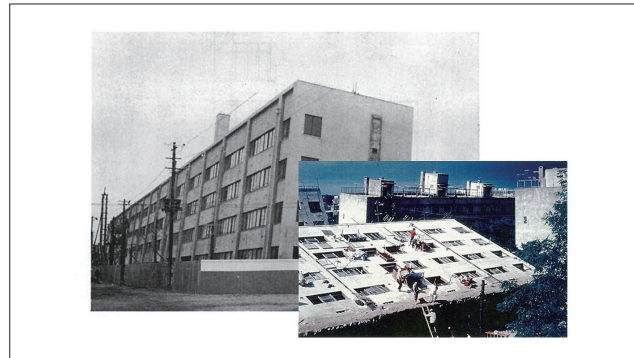


図9 1964年の新潟地震で傾いたアパート(福武毅芳氏提供)



図10 1968年十勝沖地震時の函館大学の柱せん断破壊・余震後(清水建設提供)

再び柱のせん断破壊が発生した。この地震で脚光を浴びたのは腰壁などで実質、長さが短くなった「短柱」のせん断破壊であった。すでに解決されたと思っていた「柱のせん断破壊」でも「予期せぬ」破壊現象が発生したのである。

十勝沖地震調査を行った段階で、これまで多くの地震被害を調査してきた感想は「鉄筋コンクリート」は繰り返し加重の地震には課題が多く、靱性のある鉄の方が良いのではないかという印象であった。コンクリートが研究生活の原点であった筆者としては、卒業論文で手掛けた「コンクリートの引張強度」の印象もあった。コンクリートの引張耐力は構造計算に考慮されていないとしても、破壊現象を考えると脆性材料ということには疑問を抱いたのである。

(もちろん、RC構造の研究は大きく進歩し、現在では耐震性は十分確保されている)

1978年の宮城県沖地震までの観察では、鉄骨造には大きな被害がなかった。せいぜい体育館のブレース(図12)の破断や鉄骨柱と基礎部分の破断程度であった。

しかしながら、1995年の兵庫県南部地震(図13)では鉄骨造も大きな被害を受けた(図14, 15)。この地震では高速道路にも大きな被害が発生した(図16, 17)。1984年の米国のノースリッジ地震(死者57名、負傷者約5,400人、高速道路倒壊)を調査した時には、日本の土木工学者はあのような破壊は日本の高速道路では発生しないと話していた。やはり自然の力は図り知れず、常に人智を超えることが発生する。

2004年の新潟県中越地震では地盤移動、地滑り、崩落が大量に発生した(図18)。地盤は動くということは案外忘れられ勝ちである。建物全体を乗せて一様に動くのであれば問題は少ないが、建物平面形の中で異なった方向に地盤が動くことは大きな被害をもたらす。

1999年に発生した台湾集集地震では、石岡ダムを断層が走りゲートが大きく破断した。

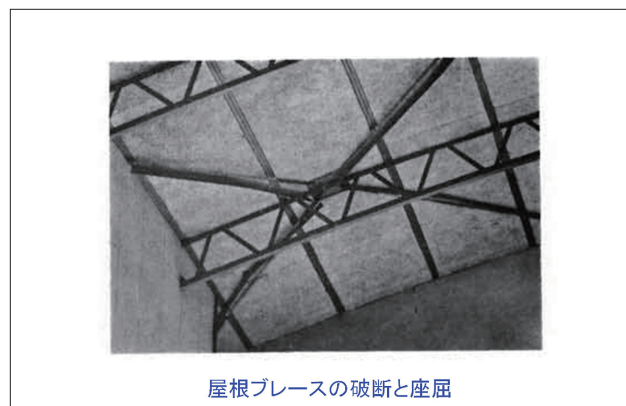
2004年にインドネシアで発生したM9.0の超巨大地震は巨大な津波を起こし20万人以上の方が犠牲になった(図19)。この地震の断層は巨大であり、地球が壊れたという感じであった。

地盤・地面が動くと言う認識は十勝沖地震でも宮城県沖地震でも感じていたことであった。平屋の鉄骨造工場が上部構造は大丈夫であったが基礎部分が大きく移動し、梁間方向にまた裂きのような状態になっていた。鉄骨構造は変形能力があり柱基礎が大きく移動しても建物は崩壊してはいなかった。

自然の力は計り知れないものがある。我々は経験によって地震に耐える構造技術を開発し続けてきたが(図20)、まだまだ自然の力を克服したとは言えない。



図11 1968年十勝沖地震での三沢商高の破壊(清水建設提供)



屋根ブレースの破断と座屈

図12 1968年十勝沖地震の鉄骨被害 軽微な被害のみ(三沢商高体育館、清水建設提供)



図13 1995年兵庫県南部地震(清水建設提供)



図14 1995年兵庫県南部地震での鉄骨造の被害(清水建設提供)



図15 1995年兵庫県南部地震における鉄骨柱、柱・梁接合部脆性破断(清水建設提供)



図16 1995年兵庫県南部地震 高速道路被害(清水建設提供)



図17 1995年兵庫県南部地震 高速道路路鋼管の脆性破壊(清水建設提供)



図18 2004年新潟県中越地震地盤被害(清水建設提供)

4 | 安全・安心の基本思想

原子力施設建設では「絶対安全ですか?」という問いかけが行われる。「絶対安全とは言えません」などと応えれば建設計画はたちまち頓挫する。安全とは何だろうか。絶対安全はあるのだろうか。

機械分野や労働安全の分野では「安全」とは何かについてかなり深く検討されており、一般技術者も関心が高い。建設業界は災害死亡率のかなり高い業界であり、地震国で構造安全が最大の課題であるにもかかわらず、「安全とは何か?」について深く議論したことはないのではないか。

ダイキン工業は大変、興味深い調査を行っている(参考文献3)。日本人は何を無料(タダ)と思っているかという調査で、1位「空気」、2位「水」、3位「太陽エネルギー」、4位「安全」であった。60歳以上では「安全」が3位であった。日本人は安全を無料と思っているようである。なぜであろうか。

古代では、民族や国家の対立で民族全員を抹殺することなどが日常的に行われていた。旧約聖書でもモーゼはカナンの地へ到達するために、途中の民族を家畜に至るまで滅ぼしたと言われる。一方、日本列島は島国で他国から攻め

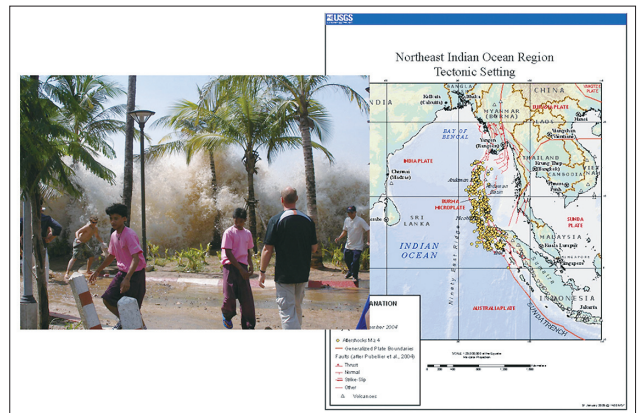


図19 自然の力は計り知れない(2004年12月、スマトラ沖地震-Wikipedia)

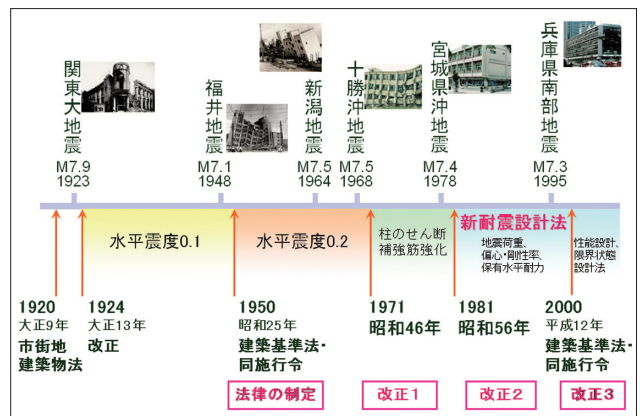


図20 被害地震と建築基準法の変遷(柴慶治氏提供)

られたことが少なく、常に安全であったことが「安全は無料」と言う国民意識の一つの要因ではなかろうか。その象徴的歴史が韓国・白村江（現在の錦江）での戦いとその結末である。

4世紀から7世紀の韓国は高句麗、新羅、百済の三国に分かれ、互いに激しく争っていた。倭国（日本）は古い時代から百済と良好な関係にあり、百済で最も有名な武寧王は倭国（日本）で生まれたと伝えられている（図21）。平安京（京都）を造営した桓武天皇の母高野衣笠は、百済王族の子孫と言われている。その百済が660年に唐・新羅連合軍と戦い、大敗して滅亡した。倭国は百済復興のために倭国に滞在していた百済王の太子豊璋王を擁立し、百済支援を行った。

661年に阿部比羅夫が第1陣として1万余人を率いて大使豊璋王を護送し、第2陣（本体）として662年に近江の毛野稚子が2万7千人を率いて出発した。さらに1万余人が第3陣として出陣した。663年、倭国軍は1000隻の船で白村江の入り口に突撃して唐・新羅連合軍と戦ったが大敗した（図22）。倭国・百済連合軍は陸でも大敗した。逃げ帰った倭国軍は唐・新羅が攻めてくるのに対処するために九州に大規模な水城を築いて備えた。しかしながら結局、日本国内には攻めて来られなかった。従って日本国内にいた人は「日本にいれば安全」と思ったのではなかろうか。

13世紀の数度にわたる蒙古襲来でも神風が吹いた。第2次世界大戦で米国の空爆があったが、戦後の米国の日本戦略で親米国になっていた。

「日本は他国に攻められることはない」と言う諸外国では信じられない楽観的な国民性の本質の由来は「日本人形成」のプロセスにもあるのではないだろうか。BC7世紀頃（BC5世紀か10世紀かで議論中）、縄文人の世界に弥生人が入り込んで来た時、稲作を行う弥生人は狩猟・採取生活の縄文人と異なる地域に住んだ（図23）。従って彼らはほとんど戦わなかった。関東以西ではそのうちに縄文人と弥生人は融合し一体化し和人となった。

第二次世界大戦後は憲法九条、核アレルギー、進歩的教育環境、騒然とした社会環境、日米安保条約寄りかかきなどで国の安全・防衛を自ら守ることを語ることが少なくなり、安全は誰かが守ってくれると言う認識になった。さらに世界に追い付き、追い越すために人々は超多忙で安全のことなど考える暇がないと言う状態が続いている。これらの総合として日本人は安全を真剣に考えてこなかったと考える。

過去には地震の際の建物安全とは人命を大事にすることであった。建物が倒壊してもその前に人間が脱出できれば良いと言う考えであった。



図21 4世紀の朝鮮半島 (Wikipedia) と百済・武寧王陵



図22 663年、唐・新羅軍と戦い数万人の倭軍が散った夕日に映える白村江（錦江）-2009年3月、筆者撮影



図23 縄文人の竪穴住居・弥生人の掘立柱住居



神戸の地震では倒壊したマンションのそばで呆然と立ちつくしていた新婚間もない夫婦に会ったことがある。借金して購入したばかりのマンションが倒壊し、途方に暮れて私に泣きついてきた。建物の安全は人命だけではなく「財産・資産を守る」ことが大切であることを痛切に認識させられた。

2004年の新潟県中越地震では避難場所の体育館の天井や照明が落ちてきて問題となった。人命の安全だけではなく住み続けることの大事さが認識され、仕上げや設備の安全性が問題にされるようになった。(図24)

この新潟県中越地震では三洋電機の子会社の工場が停止し、その製品を利用していた会社の工場も止まってしまった。朝日新聞は、被害額は503億円に上ると報道し、三洋電機は企業の存亡に関わる事態に発展した。そこでBusiness continuity Plan (BCP) が盛んに言われるようになった。地震被災後にも工場機能が維持されるかが課題となった(図25)。BCP対策ができるか否かは工場受注のキーとなり全ての建設会社がBCP技術確立に殺到した(図26)。

さらに最近では一工場、一企業の機能を越えて地域の機能(ガス、水道、電気などのインフラ機能)維持を地震後にいかに維持するかが議論されるようになってきている。「安全」の持つ意味が人命確保から社会の機能維持へと拡大している。この潮流を先んじて予見し技術開発する先見性がCTOに求められる能力である。

最初に掲げた「絶対、安全はあるか」であるが、1999年の改定版でISO/IECガイド51は安全の定義から「絶対的」と言う制約を取り除いた(IECは「国際電気標準会議」で電気及び電子分野の国際規格を作成している)。「絶対安全」を主張すると科学的な議論を封じ込めることとなり、ガイド51は現実的な議論を可能とすることとなった。

しかしながら、ISOやIECがどのように定めても人々の「絶対安全神話」は消えることはない。NUMO(原子力発電環境整備機構)は日本で発生する「高レベル放射性廃棄物」の地層処分(深層地下埋設、図27)をする組織であるが、候補地の調査さえもできない状態である。ガイド51も「重大なリスクは絶対に許容しない」ことを条件としている。しかしながら「高レベル放射性廃棄物」は確実に処理する必要がある。このようなジレンマ・矛盾をどのように解決するか、不可能と思われることをいかに解決するかがCTO、MOTに課せられたテーマでもありと考える。

原子力施設の規格は米国機械学会のASME規格が原点である。この規格が従来の決定論的に加えて確率論的な判定を追加することを議論している。米国規格の改定は世界の安全議論に大きな影響を与えると予想される。CTOは主要な世界規格の動向にも意を配する必要がある。



図24 新潟県中越地震 被害例(清水建設提供)

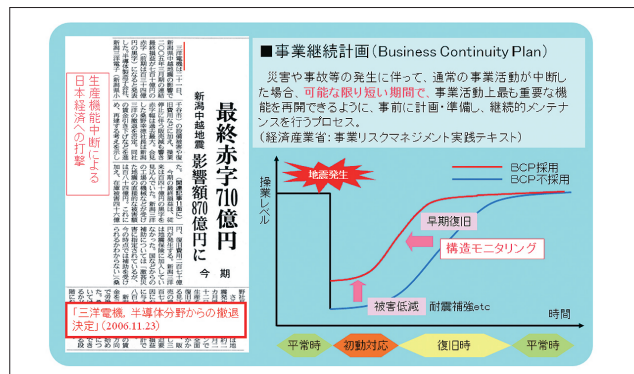


図25 地震被害と事業継続性(清水建設提供)

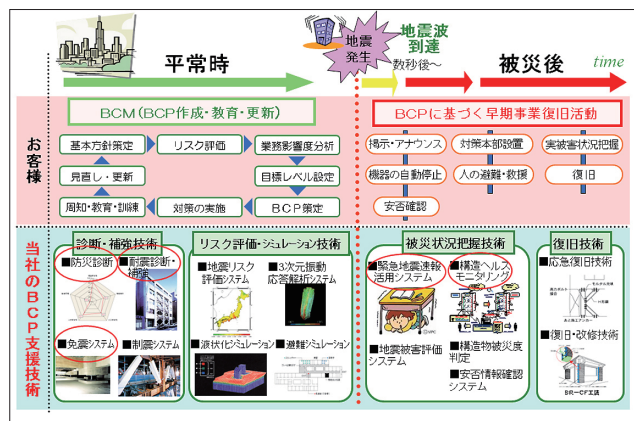


図26 BCPを支える技術(清水建設提供)

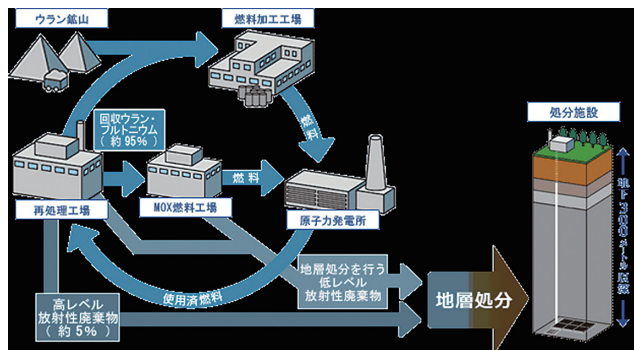


図27 高レベル放射性廃棄物の地層処分施設(NUMO ホームページ)

5 | CTOの構造知識

建設物の安全は建設の基本である。建設物の安全は第一には良い構造設計によって確保される。CTOは構造設計についてどの程度の知識を保有すべきであろうか。CTO自身が構造設計するわけではないが、設計者と議論し、新しい構造技術開発を指示できる程度の知識は必要である。それはどの程度か？

1. 関連法規の概要・目的：建築基準法・建築士法・建築確認制度・住宅性能表示制度・耐震改修促進法など
2. 学協会基準、公共仕様書・仕方書の基本
3. 技術審査機関の状況（日本建築センター、建材試験センター、日本建築総合試験所等）
4. 木造・RC造・鉄骨造の特質と材料の特質
5. トラス・ラーメンの基本
6. 柱・梁・スラブ・基礎の役割
7. 荷重・外力
8. 構造計画
9. 大スパン構造・超高層・原子力施設の設計の基礎
10. 最新耐震技術・最新免制震技術・競合他社情報
11. 最新解析技術・可視化技術
12. 設計事務所の構造部門の現状
13. 主要構造系研究者・技術者

法律や基準・規準は科学的な結論を示しているものではないと言うことを認識する必要がある。法律や規準は社会的・商業的な決めごとである（にすぎない）。筆者は多くのJIS・学会規準の制定・改定に関与してきたが、ほとんどの数値表示は多くの要素を勘案した決めごとである。社会変化・科学技術の進歩などにより変化させるべきものである。法律や規準に決められているから構造設計の基本は法規にあるが、CTOに最も必要な認識は「新しい構造技術は基準法を打ち破り、改正を促すことによって創造される」と言うことである。超高層建築は31mという建築基準法の制限を突破することによって可能となった。

学協会活動は研究者個人としての参加が基本であるが、構造設計実務は学協会の規準が基本になっているのでそれらへどのような影響を与えるかが企業力であり、ビジネス展開にも大きく影響する。また、関連委員会で委員長、幹事などを占めれば規準の考え方の基本情報入手、人脈形成などでも有効である。そのようなポジションの占められる研究者の育成が重要である。そのためには基礎的研究分野の強化も必要である。

超高層建築、免震建築、高度な耐火性能などの建設技術は大臣認定が必要である。この審査・評価を行う機関とその状況の把握は技術開発の実用化にとって重要である。発注企業は時間との戦い、激しい国際競争にさらされており

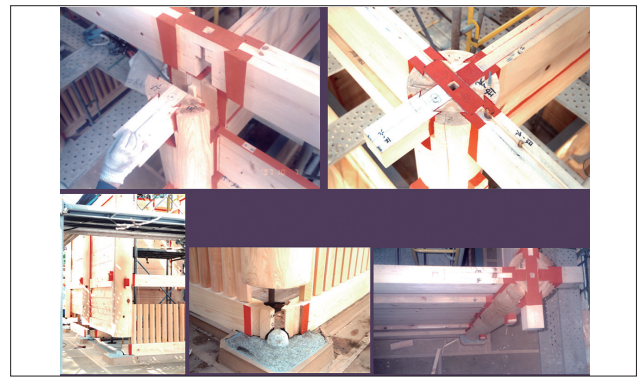


図28 木組み（木内修氏提供）

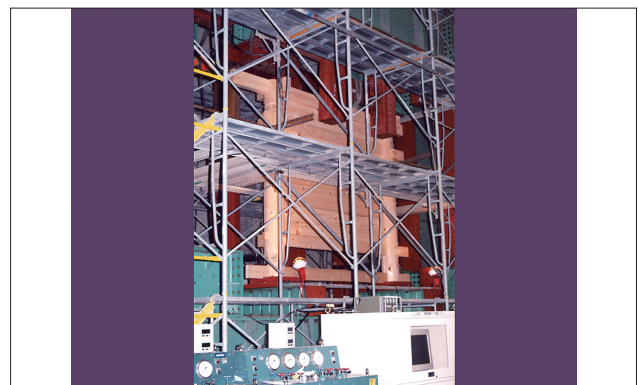


図29 木造の実験（木内修氏提供）



図30 木材とプラスチックの混合材（秋田ウッド提供）

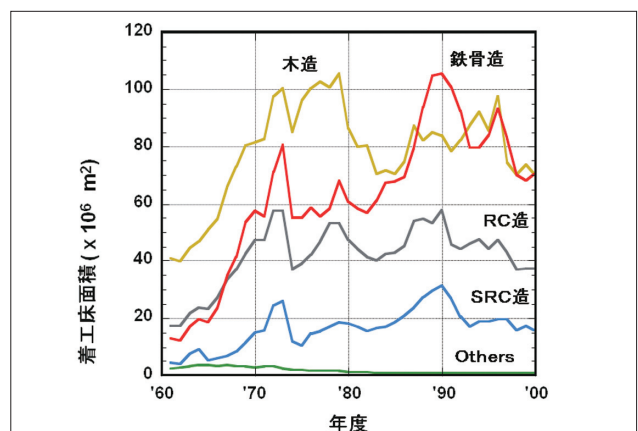


図31 構造種別着工床面積



建設工事も短工期が最大課題である。従って技術開発期間の短縮は必須の事項であり、そのためにどの機関に申請するかも重要戦略である。

構造技術は各社ほぼ同レベルで激しく競合している。競合他社情報の確保が企業競争上、重要である。そのためには大学の構造系研究者との密な情報交換が肝要である。多くの場合、各社は大学と連携しており多くの情報が著名研究者に集まっている。

日本の構造体は古来より木造であった。木造は多くの経験から発達した構法で、いろいろな構造的工夫がなされてきている。しかしながら、大手建設業の扱う躯体構造はRC造やS造が主流であり、大学でも木構造の講座はメインではない。大手建設会社の研究所でも木構造の専門家は少ないのではないのか。

21世紀は人間を大事にする世紀と考えると、優しさとぬくもりのある木造はより重要視されると思われる。伝統的な構法は柱、梁、貫を用いて互いを貫通させ車知や込栓で固定し(図28)、木材の変形やめり込みで大変形に対しても耐力があり、地震・風にも強い構法である。近年では多くの構造実験が行われ、その耐震性が明らかになっている(図29)。集成材、木材とプラスチックの混合材(図30)などの新しい木系材料も活躍を始めており、技術研究所にも数名の木材系・自然素材系の研究者は配置すべきと考えている。

近代的な建築構造の主体はRC造と鉄骨造である(図31)。日本のRC造は明治に導入されて以来、着実な発展をしてきた(図32)。RC造は高強度コンクリートによる高層マンション建設、PCシステムなど多くの技術開発が行われている(図33)。RC造は建設業界自ら製造から扱える材料であり、今後も重要な構造材料であり、高強度化は引き続き競争が行われると思われる。

鉄骨造も明治に導入されて以来、多くの技術的開発が行われ、建築躯体構造の主流となっている。現在は超鉄鋼が研究開発されている。RC造が主体であったアジア各国も鉄骨造の活用が進んでいる。(図34)

RC造も鉄骨造も古い材料ではあるが、常に進歩をとげている。これ以上の開発課題はないと思っていると、あつと言う間に競合他社に追い抜かれる恐れのある構造材料でもある。

6 | 破壊とは！

構造物の事故とは部材の破断、破壊、大変形である(図35)。物が壊れると言う現象はどのようなことを言うのであろうか(図36)。あらためて問われるとなかなか答えることができない。筆者も鉄骨造を専門としてから多くの事故調査を行った。最初の事故はクレーンガーダーのレール



図 32 日本の鉄筋コンクリート造建物(清水建設提供)

外装の自由度向上(インナーバルコニー)、タクト工程



図 33 PC化(清水建設提供)



図 34 上海を中心に中国で鉄骨造が急増

クレーンガーダーの疲労破壊(ボルト・溶接)

鉄骨工場の火災事故・高温クレープ

冬場の鉄筋破断

鋼材貯槽の腐食

高強度鋼の応力腐食破壊

高強度鋼の水素脆性破壊



図 35 鉄骨構造によくある破壊事故

を支える部分の疲労破壊であった。筆者が入社した時期は戦後建築された工場が20年以上経過した時代で、クレーンガーダーの疲労破壊が多発した。鋼材が疲労破壊した場合は図37のようなピーチマークが現れる。

次は大島の発電所の火災事故であった。鉄はある温度以上になると強度が低下し鉛のように曲がってしまう。高温クリープ現象である。溶鉱炉の爆破事故ではすべての鉄骨がぐにやぐにやになった事故にも立ち会った。冬季に現場作業員が鉄筋につかまったらポキッと折れた事故もあった。これは鉄筋に点溶接が行われ、そこが脆性破断したものであった。鋼材の脆性は面にシェブロンパターンが見られる(図38)。高強度PC鋼棒を使用したPS構法では構造物の完全破壊につながる応力腐食破壊にも遭遇した。

鋼材の事故で追及されるべき機械的性質はJISで規定されているものとは全く別のものである。技術研究所の役割には事故への対応がある。事故は企業のブランド価値を大きく低下させる。大学では降伏点を根拠とした設計やせいぜい延性破壊しか学習していない。開発製品の事故防止のためにも破壊現象の教育、Material Scienceの教育はぜひ、徹底すべきである。

7 | 品質と計測・検査(非破壊検査、統計的品質管理)

勤務先で超高層建築が計画された時、構造体は鉄骨造、その接合部は工場も現場も溶接接合とされた。当時、現場溶接部の品質の信頼性は低くその検査方法の研究開発を担当した。第5章で示した超音波斜角探傷試験方法を実用化した(図39)。

非破壊検査にはいくつかの方法があり、得意・不得意がある。表面にある欠陥だけ検出できる方法、内部にある欠陥を得意とする方法がある(図40)。この適用を間違えると全く意味をなさない検査をすることになる。内部にある欠陥を得意とする検査方法でも欠陥の種類によって発見の得手不得ちがある。たとえば、放射線透過試験(X線検査)では空洞のある欠陥(溶接部検査ではスラグ巻き込みやブローホールなど)が得意である。逆に空洞のない欠陥(溶接部検査では割れ、融合不良)は発見困難である。一方、超音波探傷ではブローホールは発見困難で、割れは容易に発見する。すなわち、一つの検査法で全ての欠陥を発見するのは困難である。しかしながら、品質検査といえども経済性の考慮が必要であり、全ての検査方法を適用することは困難である。

卓近な例として人間ドックの胃の検査がある。胃カメラ検査とレントゲン検査があり、通常どちらか一つが行われる。初めから二つやると言う例はほとんどない。しかしながら、胃の外側に腫瘍があれば胃カメラでは発見されない



図36 破壊とは何か！



図37 疲労破面に表れるピーチマーク

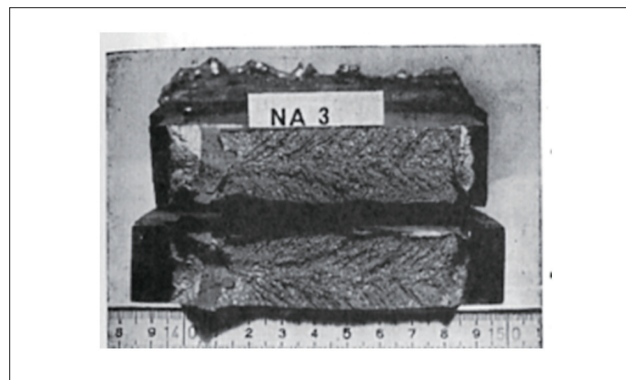


図38 脆性破面に表れるシェブロンパターン

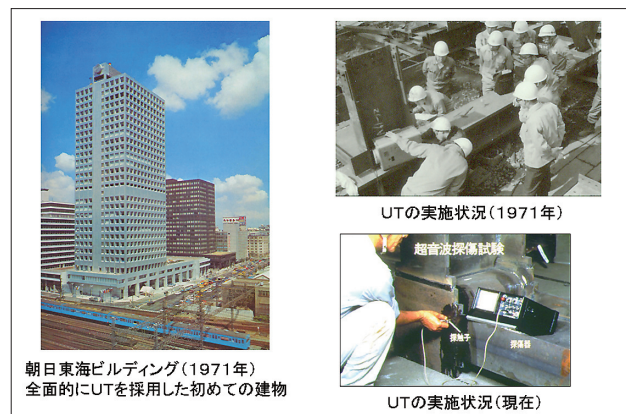


図39 溶接部の品質管理 超音波探傷検査(UT)



し、胃の形状全体の異常も胃カメラでは発見できない。このような病気はレントゲンのみで発見可能である。

さらに非破壊検査では得意とする欠陥でも見落としが存在する。人間が行う検査のバラツキに起因することもあるし(図41)、検査方法固有の問題に起因することもある。あるいは検出レベル(どの程度の信号までを検出するか)の設定にも影響される。検出レベルを厳しくすれば金属結晶粒界まで検出してしまふので、検出レベルの設定は必要である。胃の検査でOKと言われたのに数日後に吐血して入院という例や、半年後に見落としで手術という例もある。そのような見落としがあったとしても、ある確率で欠陥を発見できることが品質管理に有効である。

非破壊検査の本質を良く理解して適切に活用する必要があるが、技術者の中には100%信用か、全く信用しないという人がいる。安全も確率である。非破壊検査も確率として扱う心構えが必要で、それができなければ技術者とは言えない。

筆者の開発非破壊検査に第5章で示した鉄筋ガス圧接の超音波探傷試験がある。この検査法も当然100%欠陥を発見できるわけではない。発見できない欠陥もあるし発見不能場所もある。しかしながら、かなりの確率で重要欠陥を発見できる。

従来、鉄筋ガス圧接部の検査は現物を切り取り、引っ張り試験を行ってきた。この検査方法では実際にコンクリートの中に入る圧接部の検査はゼロである。切り取ったあとの再圧接は欠陥発生の確率はより高くなる。統計学的にみても非破壊検査適用の方が圧倒的に有意義である。技術者は非破壊検査や品質管理の本質を理解する必要がある。

非破壊検査や計測では合否判定基準が必要である。検査・計測が行われたが、それが良いものか悪いものか判定できないのでは検査・計測の意味をなさない。検査の場合は設定された判定基準に照らして合否判定されるが、日本では合格となった部分についても「欠陥 Defect」と言う表現が使われる場合が多い。米国規格ではDiscontinuity(不連続部:使用上無害)とDefect(欠陥:有害)とは明確に区別される。原子力施設などでは「無欠陥」を要求し、圧縮応力しか作用しない部分でも微小不連続部一つも許容しないような議論が行われる。

筆者は講演ではチョークを例にあげ、チョーク表面を顕微鏡で見れば穴だらけであるがこのようなチョークを欠陥商品とは言わないと話す。(図42)

計測技術で気になることは市販の計測器が広い研究・技術分野に拡大したことである。計測装置を自作していた時代は計測装置の精度・性能は事前に自ら確認し、その確認データそのものが研究報告の一部であった。日常の点検方

欠陥位置 試験方法	表面に開口した欠陥	面に近い欠陥	溶接内部の欠陥
放射線透過試験	◎	◎	◎
超音波探傷試験	○ or △	○ or △	◎
磁気探傷試験	◎	○ or △	×
浸透探傷試験	◎	×	×
電磁誘導試験	◎	○	×

[注] ◎…良 ○…やや良 △…困難 ×…不可能

図40 非破壊検査の種類と発見可能傷

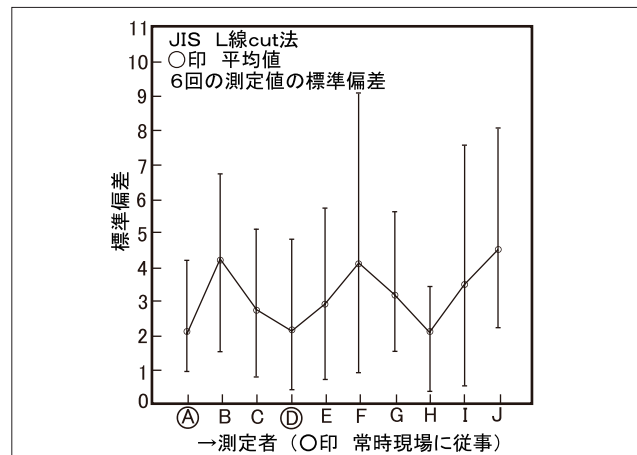


図41 超音波による欠陥長さ測定のはらつき(標準偏差)

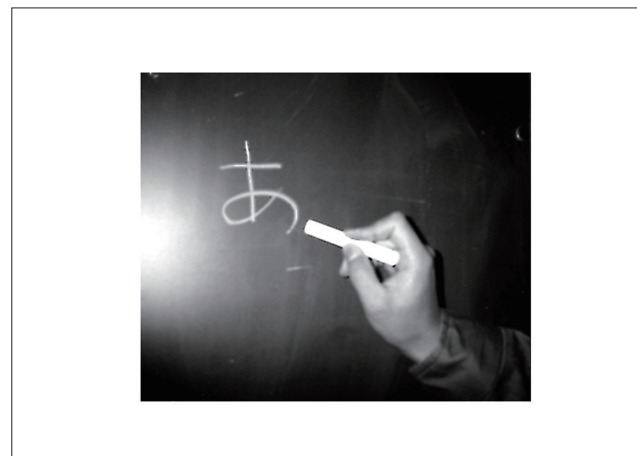


図42 チョーク表面には微小な穴があるが欠陥ではない

法や時期も自ら定めて行っていた。現在ではあてがいがぶちの装置でその精度・性能についても無知のまま使用しているケースが多い。分解能がどの程度か、直線性はどうか、ダイナミックレンジはどの範囲かなどの基本的事項が不明なまま使用可能範囲を超えてデータ採取しているケースもある。数年間、点検しないままデータ採取しているケースもある。

研究者には計測の基本を良く教育しておく必要がある。さもなければ社会的ミスを犯す恐れがある。

日本考古学では弥生時代は従来、紀元前500年に始まったとされていた。しかし、千葉県佐倉市にある国立歴史民俗博物館の研究者がC14放射線炭素の年代測定によって、日本の弥生時代は紀元前1000年に遡ると発表した。しかしながら金属学、物理学などの多くの研究者・技術者から異論・反論が出された(図43)。測定した材料の不適切さ、材料の前処理の問題、測定値から実年代を推定する方法の問題、地球上の場所による差異、海の影響(海洋リザーバー)などである。C14による年代測定は有力な方法であるが、測定方法や測定原理による精度・ばらつきに対する認識不足から社会を騒がすことになったと思われる。

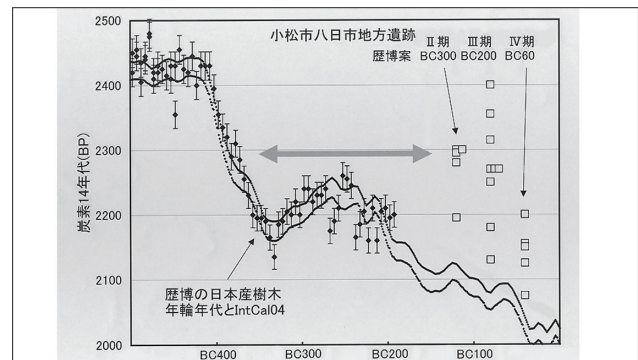


図43 八日市地方の炭素年代と日本樹木年輪年代の関係(新井宏) (歴博のキャリブレーション曲線を使用すると歴博の推定年代と合わない)

8 | 耐震技術競争

1891年、M8.0の濃尾地震が発生し、明治維新を機に導入されたレンガ造も大きな被害を受けた。これを契機に地震工学が発展していく。1894年には鉄骨構造の秀英舎印刷工場、佐世保軍港内に鉄筋コンクリート3階建てが建設された。1923年、M7.9の関東大震災が発生し多くの建物が倒壊し、10万人が亡くなった。鉄骨造レンガ仕上げなど洋風建築の多くが倒れたが、耐震設計された旧日本勧業銀行は被害が少なく耐震設計の重要性が認識された。以後、耐震技術開発が学会・業界を含めて行われてきた。最近でも高層建築などの受注競争では耐震技術が重要な決め手となっている。耐震技術・免震・制震技術は建設会社の技術レベルを判定する有力な技術分野でもある。

しかしながら、現在ではアイデアはほぼ出尽くし、新しいものの提案が困難になっている。清水建設技術研究所のリニューアルで採用されたパーシャルフロート構法、やじろべえ構法、柱頭免震、構造モニタリング技術などはその障壁を越える技術であった。(図44, 45)

耐震補強は通常、外見上は見苦しい場合が多い。そこで「魅せる耐震補強」として耐震補強に建築美的感覚を求めたことも新規性を持たせる工夫であった。清水建設が「安震」を商標登録し、鹿島は「居ながら耐震」を商標登録したのも新感覚のアイデアであった。構造解析分野も競争が激しい分野で、清水建設の液状化と建物の連成解析は画期



図44 新しい免震技術(清水建設提供)

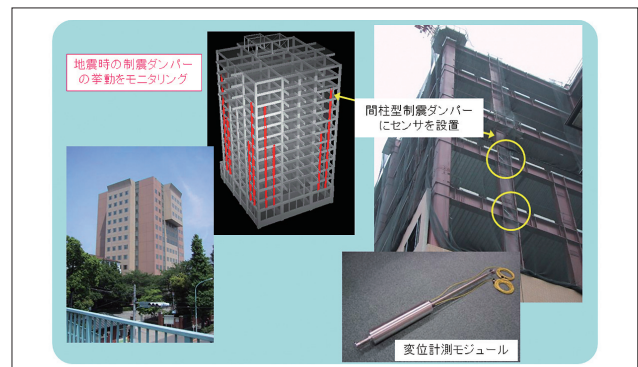


図45 構造モニタリング(日本女子大学百年館、柴慶治氏提供)



図46 アクティブ制震技術の歴史(柴慶治氏提供)



的な構想であった。ニューヨークの世界貿易センターの崩壊についての鹿島の解析は、鹿島の解析技術レベルの高さを世界に示したものであった。

9 | 技術哲学

制震技術開発競争が激しかったころ、アクティブ制震が良いか、パッシブ制震 (図46) が良いかの議論があった。建物は長期間使用されるものであり、災害は突然起こるものなので、免震・制震システムはメンテナンスフリーであるべきである、半永久的に維持管理必要な技術をコンピューターで管理するのはメンテナンス上問題が大きいと言う議論があった。技術的にはこの考えの方が正しいと言える。しかし、技術の発展を考えればアクティブ制震に取り組みレベルの高い技術を確立し、その技術を頂点として幅広い制震技術を整える方がよりCTO的判断とも考えられる。事実、早くからアクティブ制震に取り組んだ鹿島は充実した耐震・免震・制震技術を整備している。

完全自動化ビル開発が建設会社各社で競われた時期があった。自動化・機械化・ロボット化技術の粋を集めて行われた開発であったが、生産性が課題となり、改善が多く行われ、既存工法との融合・混合が行われた。いくつかの完全自動化ビルシステムは生産システムとしては失敗に終わったが、この技術を頂点として (あるいは反省から) 新たな生産システムが生まれている (図47, 48)。技術の発展のためには先端技術に常に挑戦する意欲が必要である。

●参考文献

1. 春海佳三郎、斉藤鉄夫、藤盛紀明「固体内超音波の数値実験と映画化」1980
2. 新見芳男他『新潟交通独身寮復元工事施工記録』清水建設研究所報第6号, 1965.10
3. 清水建設十勝沖地震研究会『十勝沖地震報告』清水建設研究所報第12号, 1968.10
4. ESPEC技術情報NO.31 (2002.10.1発行) 特集: 信頼性試験・安全規格
5. ダイキン工業広報部CORPORATE NEWS
「第2回現代人の空気感調査<日本人の3大無料モノ編>」2002.12.2
6. 清水建設免震研究会『耐震・免震・制震のわかる本』彰国社, 1999
7. 「理科年表2002 (CD-ROM版) 国立天文台 (丸善)」
8. 平野道勝、阿部宏正、藤盛紀明『大学過程 鉄骨構造学』オーム社, 1998
9. 鋼材倶楽部編『鉄骨工事検査の手引き』フジビ出版, 1993
10. 新井宏「歴博プロジェクト「弥生農耕起源」について」『季刊邪馬台国』101号, 2009.4
11. 『超音波探傷試験B』 日本非破壊検査協会, 1979

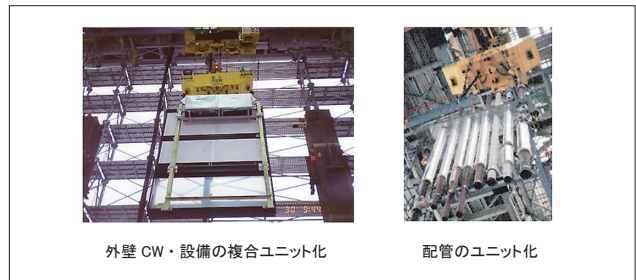


図47 全自動工法で開発されたユニット化は現在でも利用されている (清水建設提供)



図48 サイトPC工法は全自動工法の「現場の工場化」思想を受け継いだと言える (清水建設提供)

編集部注: 第5章 (8月号) の図2点を以下のように差し替えます。

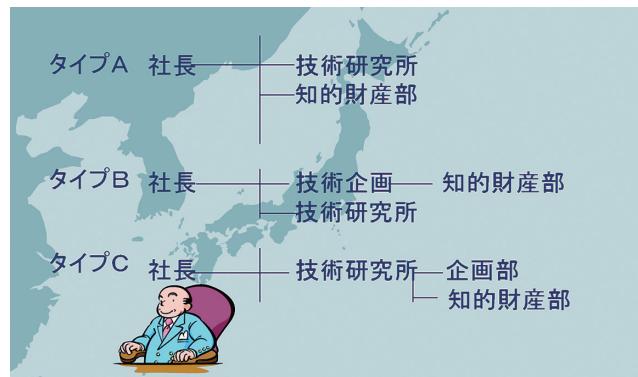


図23 大手建設業の知的財産組織

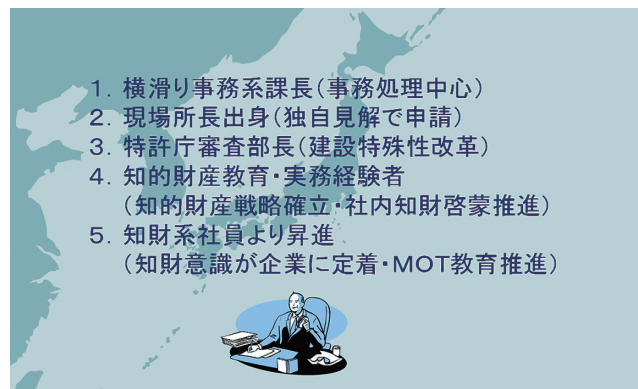


図24 A社の特許組織の長の変遷