

橋は何故落ちたか？(その3)－柔剛論争の顛末

福島啓一

正会員 技術士 博士(工学) (〒270-1163 我孫子市久寺家1-23-8)

E-mail : kei1fukuq@outlook.jp

日本の耐震技術は進んでいると言われるが、阪神淡路地震では多くの建物や橋梁が壊れ必ずしもそうでないことが証明された。耐震構造の研究史を少し調べると当初の段階での素晴らしい、正しい方向の研究の芽生えが途中でねじ曲げられた様に見える。その時の着眼点を伸ばしていれば耐震工学は正しい方向に進みあの惨劇を防ぐことが出来たのではないかと思われる。研究の経過をたどり直し今後の耐震研究の方向を考えて見た。

Key Words : earthquake resistance, rigid structure, flexible structure, resonance, Kenzaburo Majima, Toshikata Sano, dispute on rigid or flexisible structure, method of seismic coefficient

1. 耐震研究の歩み

日本は地震の多い国である。耐震問題は土木建築に携わる人にとっては遙か昔から重要な問題であった。今に残る住宅、五重塔、寺院、城などのかかなり大きな高層の構造物は立派な耐震性を備えている。

近代科学技術の導入後は、横浜地震(1879)を経験した御雇外国人が主導して地震学会をつくり、地震計を作ったことから始まる。佐野利器はサンフランシスコ地震の視察(1806)その他の経験から震度法による設計、三角形の理により筋違いを入れた剛構造を提案した。関東大震災(1823)の惨状を見た真島健三郎は五重塔などの高い耐震性に学んで振動周期を長くした柔構造を提唱した。剛構造派と柔構造派の論争は10数年続いたが真島の死、日中戦争などで中断し、その後建築基準法その他では震度法による設計を行うことが無条件に求められるようになった。真島の着眼点は忘れられてしまった。その結果が阪神淡路震災でのあの惨禍ではなかろうか？

2. 地震による構造物の挙動

柱の上に重量mが載っている構造物に地震力が働くとダランベールの法則により次のような釣合式が成り立つ。

$$m d^2y/dt^2 + 2h \omega dy/dt + \omega^2 y = -m d^2y_g/dt^2 \quad (1)$$

ここで y :柱のたわみ y_g :地震による地盤の変位 $h=c/cc$:減衰比, $cc=2\sqrt{mk}$:限界減衰, c :減衰 $\omega = \sqrt{k/m}$:構造物の固有円回転数 $T=2\pi/\omega$:構造物の固有周期: ω_g =地震動の円回転数。(1)式を解くと

$$y = -\frac{a}{\omega^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\{1 - (\omega_g/\omega)^2\} + 4h^2(\omega_g/\omega)^2}} e^{i(\omega t + \Psi - \phi)} \quad (2)$$

地山の振動数と構造物の固有振動数が同じ場合には地震の振動エネルギーが構造物に100%有効に伝えられるので小さい(弱い)地震でも振動回数毎に構造物の振幅はどんどん大きくなる。これが静力学の問題と振動問題の一番大きな違いである。

構造物の固有周期がゼロの時(完全な剛構造)は地盤と構造物の運動は全く同じになる。しかし周期が少し違えば地盤と構造物の振動の位相が少しづつ違い始めやがて振動は増えなくなり減り始める。このような計算を周期比を変えて行くと振動の共振曲線がえられる。 T/T_g が1に近いほど長い時間動きと同じ方向に力が働き振動は大きくなるが、1から離れるとこの時間が短くなる。外力の振動周期よりも構造物の固有周期の方がうんと長くなると構造物が1回揺れる間に外力は何回も揺れ最後の1/4分だけが有効に働く。すなわち固有周期が長くなると振動は構造物に殆ど伝わらない。この様にして図1の共振曲線と(2)式が得られる。構造物の固有周期と地震の振動週期が一致すれば(2)式の分母は零になる、つまり構造物の振動は無限大になる。

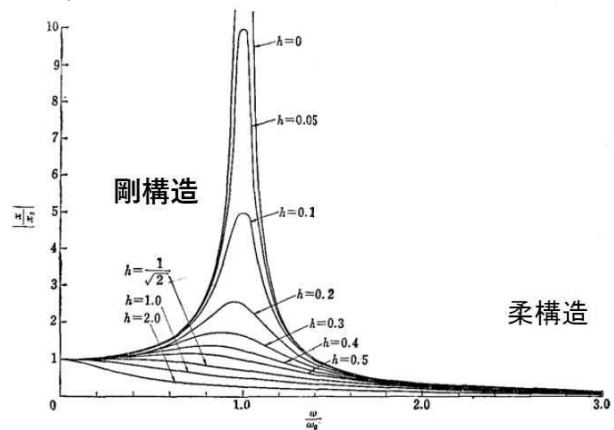


図1 共振の振幅倍率

実際には減衰があるので共振時の倍率は $=1/2h\sqrt{1-h^2} \approx 1/2h$ になる。 $h=3\%$ なら16倍、 $h=5\%$ なら10倍になる。また地震の振動は無限に続くわけではない。地震の継続時間や振動回数が分かればそれを受けた構造物の実際の振幅を計算出来る。このような地震振動の性質を知った真島は柔構造の利点を主張するようになった。

3. 真島健三郎と佐野利器の人と業績

真島³²⁾は1873年香川県で生まれ、1896年7月札幌農学校を卒業した。同年道庁に就職し、函館港工事に従事、1896年には小樽港防波堤工事に転じ、起重機タイタン担当になった。1899年海軍技師になり佐世保建築科所属。佐世保では第1船渠を完成し排水した所積み石が押し出し修理を要することになった³³⁾。当時横浜港、大阪港でもコンクリート崩壊事件が起きていた。真島は火山灰(五島産)を混ぜる方法を発見し問題を解決した。第三船渠(第二船渠は実現せず)、水雷艇船渠築造も亦真島を主任として始った。これ迄我が国の船渠は皆表面を石積として混凝土は直接海水に接触しないようにしたが水雷艇船渠計画に当たり戸当階段に石材を使用した他は全部混凝土面の露出とした。当時国産の購入セメントは海水に対し不十分との疑があった。真島は五島産火山灰をセメント容量の1/4混入したところ短期試験で好結果を得たので本工事にも之を混用しひび割れ防止に成功した訳である。この船渠附属の卿筒所及び其の煙突(H=80尺)は鉄筋混凝土で建設された。之我が国における最初の試みで1904年に竣工した。当時まだ鉄筋コンクリート造建物の採用を危ぶまれていたが成功を収めた。(※鉄筋コンクリートの命名は広井勇、日本最初の実施は広井の教え子(真島の4期先輩)の十川嘉太郎である。台湾で基隆築港工事に従事し1900年陸軍兵舎の屋根を始めてRCで設計した)。真島は鉄筋コンクリートに興味を持ち、外遊中も情報を集めた。上司に頼み30尺のT形桁を作り載荷試験をした。フランス語の書籍を読みながら卿筒室の柱に用いた。1905年には第1船渠の烹水所、潜水器具格納庫をRCで施工した³⁴⁾。1905年には50tクレーンの岸壁補強の床板をRCで施工した。1904年H=80尺、1905年にはH=150尺、1909年には築地に80尺と120尺の煙突2本を施工した。築地は真島の縄張りでありがRC専門家として担当したのであろうか³⁵⁾。1903年9月~1904年3月欧米出張
1905年~1916年に立神係船場(565m×360m深さ10.61mの係船場)をつくった。計画吉村長策、主任真島健三郎。1905年~汐留工事。1906年4月から本工事

に着工した。先ず周囲に堤防をつくり数ヶ月をかけ排水した後20万m²、平均7~8mを陸上工事で岩盤を掘削し、水深を確保した。堤防の下に真島式矢板(新案特許)を打設した。矢板は木と鉄でできたもので長さ4.7m~21.2m、その上に全周で1,878m、高さ15.8mの締め切り堤防を作った。掘削した土砂は埋立てなどに利用した。締め切り内を排水した後、1911年よりコンクリート岸壁工事、岸壁は基礎コンクリートの上に中心間隔6mで厚さ1.5m、幅6.0m高さ9.7mの壁状柱を立ち上げ長さ12.0mのRC桁を載せた。柱の下部は岩盤に掘り込んだ。柱の間はコンクリートの壁と切石積み。幅1.2m、高さ1.5mの暗渠を巡らせ、その中に電源線、水道管、圧縮空気を敷設した。混ぜ練りしたコンクリートは底開き運搬車6台を小型蒸気機関車で引張った。さらに3基の、径間212m、塔高さ16.7mのケーブルクレーンで運んだ。クレーンは石材の運搬にも使った。運搬設備も真島の考案で工事は3年で終わった。コンクリートは耐海水コンクリート(火山灰入り)を使用した。1914年4月3日入水式。約2ヶ月かかって満水した。締め切り堤撤去は大型バケット式浚渫船で行い矢板は100t起重機船で引き抜いた。1916年12月竣工、11年近い年月を要し完成した。

1909年~艦船の燃料が石炭より重油に移るに至り石油タンクを作った。先ずRC覆土式2000t(川の谷φ34×H8m×6基)を新設した。亦之と同時に其の海岸に鉄筋混凝土矢板を以て岸壁を作った。之は海軍に於いて油槽及び海水工事に鉄筋混凝土を使用した最初である。川ノ谷油槽に次ぎ庵崎に地下式角形、□136m×44.7×H5.6×1基、135×63×6.65m×2基他、呉市広にφ20×34.8×120基(地下円筒式、水畜式、現存)他を造った。「特殊な形式のものとして、真島健三郎が考案建設した水畜式油槽が注目される。氏は広海岸付近の干拓地帯が粘土層の深いことに着眼し、この形式の構造を考案した。すなわち鉄筋コンクリートの井筒を沈下して、その中に地下水上に油を貯めたものである。本形式の油槽は一基の容量5,000~1万tで1926年から1942年まで約120基建設されている」³⁵⁾。底を砂礫層のままとし油面を一定高さにするという画期的な考案である。1919年工学博士1316号。1922年呉建築部長に転勤(広の石油タンクは呉転勤後)、針尾送信塔無線塔H=135×2、H=137×1(真島の呉転勤後の工事、主任は吉田直)、1920年建築本部部長、1922年呉建築部長。1923年海軍省建築局長。9月関東大震災発生、海軍の施設もかなり被害を受けた。土木学会の震害調査委員、耐震の研究、柔剛論争に参加。海軍の建築物に柔構造を採用した。1932年海軍退官、その後日立造船他のドライドックの設計他に従事、1941年逝去。コンクリートのひび割れ問

題に対しては火山灰を入れる解決を、無線塔を建てるに当たり鋼製とRCを比較しRC塔を採用、石油貯蔵に対しては矩形、円筒形のRC構造、円筒形で底盤を省略し水圧と油圧を釣り合わせる構造等、立地地点の特性を考えた構造形式を考えた。施工機械を工夫し、矢板を工夫し、地震に対し振動学を学び対策を考えた。海軍の舞鶴基地ほかの建物に真島式柔構造を採用した。

論争の相手佐野利器は1880年生まれ、東京帝国大学建築科卒業。1906年サンフランシスコ震災の被害調査団に加わりRC構造の耐震性を実感した。3年間の欧米留学の後1914年東京大学に鉄骨およびコンクリート構造についての構造工学講座が開設され助教授に就任した。「日本の大学の建築学科は欧米の school of Architecture に則って作られたものだから、主として芸術教育になって仕舞った。即ち建築家は芸術家で、その難しい構造は、土木技術のなかの構築技術 (Structural Engineering) に委ねられるべきものと考えて居たのである。しかし私は斯くの如き考え方は日本では社会の通念に合わないと思強く思っている。即ち日本では建築家は家を建てる技術家というものでなければならぬ」と述べ耐震構造、近代的建築構造の研究に邁進した³⁶⁾。建築学科の中に構造工学が入るのは日本だけで佐野の意見がかなり反映されたためのものである。1915年～東大教授、耐震構造の権威とされた。佐野は、東京駅の設計者・東大教授である辰野金吾のあとを受けて若くして大正・戦前昭和の建築界に君臨した。……震災後帝都復興院が設置され後藤新平が総裁になった。後藤は、「理事、建築局長となってやってくれ……復旧などではなくてこれからは復興だ。」といった……1926年7月まで永田秀次郎、中村是公と二代の市長に仕え、区画整理の啓蒙と復興建築と都市不燃化の推進に活躍する。……特に鉄筋コンクリート造の立派な建物として小学校を新築した…… どんどん設計を進めたため、教育局との間で紛糾する事態となった。……佐野は「水洗便所は小学校内の衛生ということだけでなく、子供を通して市民の衛生思想を高めたい」と念願していたため、譲らなかった。³⁷⁾「建築家は主として須く科学を基本とするエンジニア (技術家) であるべきことは明瞭であり」「形や色の善し悪しは婦女子のなせる業にして、男子一生の仕事に非ず」と徹底して割り切った思想を表明した……佐野を中心とする構造学派の研究者、技術者たちが建築学会を席卷する勢いを示していた³⁸⁾……よく言えば熱心、悪く言えば強引であった。

4. 柔剛論争の経過

関東大震災1923.9.1の惨状に大きな衝撃を受けた真島は振動論を研究し論文を発表して²⁴⁾²⁹⁾、振動を受け流す柔構造、鉄骨架構を推奨した。自らが日本の鉄筋コンクリート構造物の創始者³³⁾³⁸⁾であるが欠点もよく知っていたようである。「鉄筋コンクリート架構建築は……本来尚脆弱なるコンクリートを以てその1/100にも足らぬ而も点在せる鉄筋を包被連続して柱や梁を構成するもので混凝土は腹材の用もなせば綴鋸の用も兼ねるものである。而して両者の共同作用を助くるものは主として相互間の膠着力に過ぎないものである。その力は当初から混凝土の配合や出来不出来や寒暑乾湿で思はぬ大きな不同があるのみならず力を受けても鐵と全く同じ様に伸びたり縮んだりする事は出来ない」³⁹⁾。地盤も堅いだけが良いとは限らない。「一般に下町の地盤の悪い所に建って居る煉瓦造りは成績が良い。例へば司法省や海軍省……満足なものが多い。然るに地盤のよい山の手方面に於ては慶應義塾の大講堂や図書館……人目を惹くものは大概大きな被害があった様で下町とは全く反対の結果を呈して居る」と地盤の影響にも目を配っている。「基礎はなるべく強固にし架構は凡て鐵材を使用し壁を軽装し幾分の犠牲を払う事あるも確實に倒壊を免るるが最上の策と考へらる」という。「壁が無くとも鐵骨架構のみで大きな地震に耐抗し得るは次の例で明に推定される……正金銀行は壁が施工中でもかき立てるほどに被害は無かった」³⁹⁾という。

佐野は剛構造の利点、鉄筋コンクリートの耐震性を信じ、論文を発表する他、法令の作製に荷担し筋違いや壁、アンカーボルトを多用する剛構造、震度法による設計を推し進めた。これに対し真島は「現今の建物は剛性建築の部類で其自己振期 (固有振動周期) は大地震の振期 (振動周期) に可なり近いもので……両者の振期はぶつつかるのであります。……今回改正公布されました市街建築物取締規則の震度0.1以上と云う様な一定の横力のみを元として計画を致しますと……震害を受くる程度も多様」²⁴⁾になると疑問を提出した。共振曲線を計算し、共振を避けるべきとし、さらに「古くなると緩みが出たり又地震動中多少の負傷は免れない所であるから剛度は減ずる振期は延びるものと見なければならぬ」²⁴⁾として柔構造を推奨した。

佐野は振動に就いて殆ど考えない。静力学的な力の釣合だけしか考えない。従って剛の方が良い、筋違い、壁は多いほどよいとした。

当時、地震問題を振動論の立場から研究したものは国内にも外国にも殆どなかった。地震の殆ど無い

西洋生まれの構造力学では風力(水平力)を考へて設計すれば良いとした。佐野の発明は面積に比例する風圧に変えて重さに比例する静的な地震力を考へた事である。真島は言う「……然るに諸家は、地震の様な力は下底に働くが、上体には直接働かない、上体の運動は凡て下底から伝わらなければ動き得ない、之れを伝ふるには先ず歪曲を要する、歪曲がなければ上体は動き得ない、故に歪曲のみを原動力とする(1)式でよいと言うのであります」⁴⁰⁾。物部他も振動周期の研究をしていたが強制振動も共振曲線も考へないのだから、何の為に振動周期を求めているのか良く分からない。これが当時の土木建築学界の地震問題、振動問題に対する研究レベルである。

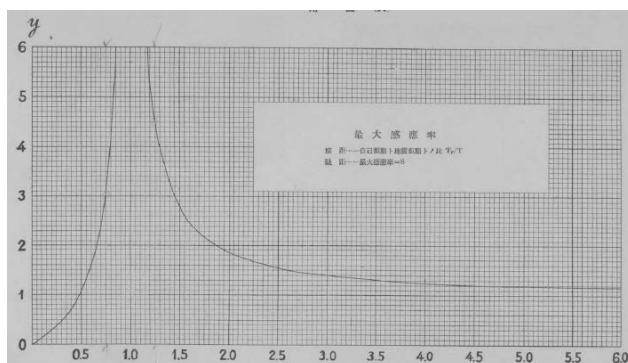


図2 真島の描いた共振曲線

真島の求めた共振曲線を図2に示す。図1と比べると横軸が逆数になっていることが分かる。この曲線は真島が独自に計算し描いたものの様である。しかし式(2)の共振の式は真島;「地震と建築」その他には出てこない。真島は式(1)の計算を T/T_g の比を変えて数値積分で計算したのではないかと考へられる。真島の説明は次のようである。「体系の自由振動と地震の強制振動の種々な比を取って、夫れの y に対する影響量を算出し之に刻々の地動を加えて縦距とし、時を横距として曲線を描くと、附圖第一から第五の如きものが得られる。又其最大影響量を縦距とし振期比を横距として現はすと附圖第六の如き割合となる」⁴¹⁾。付圖第六は図2である。コンピュータの無い時代にこれだけの計算をし(数値積分のはしりか?)グラフを描いた労には感心するばかりである。佐野等はこんな計算は露知らなかったようである。「博士の数学は私には實に難解です……遂に強制振動の算式を案出せられている。之に依れば強制振動を受けた結果と雖も……数式を拵へて計算された結果として、真島博士も又自ら非常に惧を抱かれてゐる。即ち Elastic Vibration の理論で考へると、地震と構造物とが近い週期を持って居る場合には到底構造物破壊を免る途なしと断定せらるに至って居る」⁴³⁾。佐野には真島の展開した式が良く分か

っていなかった様である。しかし全くウソだと否定もしていない。しかし佐野は共振による破壊の恐れに目を瞑ってしまった。目を瞑ってどこまでも震度論を押し通した。目を瞑っても共振は起きる筈であるが。

真島の共振の図に対する説明は少し疑問がある。「附圖第四(図2)は振期比(振動周期比)を横距とし其比の場合に起る最大歪曲を縦距として表はしてありますから振期比が判れば直に其最大歪曲量が判る事になって居ります、即ち比が0の場合は極端に剛強の場合でありまして、歪曲は零であります、夫れから比が1/3,1/2,3/4と云う風に進むとズンズン殖えて行き、比が1の場合は ∞ となり、比が1を超すと急降して比2から先は大きな変化がないのであります」⁴⁰⁾。「附圖第六(図2)を見ると横距が0から1に増加すると、最大感応率 S が急激に増加し、横距1の場合は無限大になる。然し之は一足飛に無限大となるのではない、(37)(38)式に見られる通り t の増加に従って増加するのであるから、振期一致の場合と雖直に脅威を感じないものでない。殊に大森博士の推定する如き主要動の振期が多く数波に過ぎないものとすれば、其脅威は差して大なるものとならぬ。例へば初波の場合に於ける振期一致は、感応期間が短いから感応量は他の区間より多くならぬが如きである。若し横距が1.5から2.5に進むと感応率は急に扁平となり、夫れより先は増加率が極めて微小で無限距に至って縦距は1に接近する。之に依って建物に対する地震の作用が大體察知されると思ふ」⁴¹⁾。しかしこれは全くの間違いで横距(廻転振動速度比)が0の場合とは極端に柔な場合であり、比が非常に大きい場合とは構造物が殆ど変形しない剛な場合である。極端に剛強ならば変位は地震動と同じ、つまり構造物の変位と地面の変位は同じ筈である。最近のように(図1のように)横軸に構造物の固有振動周期/地震の振動周期をとれば真島の説明通りである。こうすれば振動周期を長くすれば、柔構造にすれば地震の影響を受けにくくなるし(感応率は0になる)、剛構造にすれば振動比率は必ず1以上になり地震の影響を受けやすい。(墓石のごとき剛体では地面の動きと構造物の動きはほぼ同じである、つまり感応率は1である)。しかも僅かな振動周期 T の変化で感応率(振動影響率)が1から無限大まで急増する。柔構造では振動周期比が1から無限大になる間に感応率は無限大から0まで変化するが、振動周期比が約1.4で感応率は1になりその後更に柔になるほど小さくなり殆ど0になる。その他真島は強い振動を受けた後では剛性低下が起こるので剛側では危険と強調している。そんなあまりよく分からぬ

(ボルトの緩みなど有ればそうなるが溶接構造や鉄筋コンクリートではそうならない)現象に期待するより、この共振曲線の間違いが無ければ剛構造は地震の周期が少し変わったり、構造物の施工誤差などがあると共振を起こし破壊する危険が多いことがはっきりする。だから剛構造は避けるべきなのに、何故こんな間違いが生じたのか？この間違いがなければ柔構造の利点をもっと説得力を持って説明出来たはずであるが、何故現在普通にするように(図1のように)横軸に構造物の固有振動周期比をとらなかつたのか。振動周期0の構造物(完全剛体)は先ずないから剛構造物の共振の感應率は必ず1以上、1よりかなり大きく危険である。周期比が1以上になると(柔構造になると)急激に感應率は減る。この他に振幅の制限装置をつければ立派な免震構造、心柱付きの五重塔の様な構造が出来たはずである。残念な話である。そこまで行かない低級な議論に巻き込まれて真島はこの間違いに気が付く暇もなく論争は戦争で中断した。真島はこの議論だけしていた訳でなく海軍技師としての仕事もありかなり多忙であったと考えられる。

佐野は震度法を主張した。「今地面の上に m といふ質量を有する一物体が静止して居りまして、此物体は地面と運動を共にするものであると考へます。地殻が或方向に a 量の加速度を持ったとすると、其時刻に於て此物体は地の加速度と反対の方向に働く所の ma 量の力に依て其の静止を乱されんとするのである。その ma は即ち地震の単純な破壊力であります。名付けて震力と云ふのである」⁴²⁾と論じた。これは地面に直接乗った墓石の様に剛な、余り大きくなく振動周期がかなり短いものでは成立つ理論であり、大きな建物や土木構造物にはとても成り立たない理論である。

佐野は「地震動は如何に不規則な性質のものであるか」⁴³⁾を強調する。「単一弦振動などとしたら飛んだ間違いを生じませう」というが、この反論はそっくり本人に返したい。フーリエ解析を知らないと思える。あらゆる振動曲線は \sin 曲線の和で表せるというのがフーリエの研究である。「地震動其者は、……平滑なるSimple Harmonic Motionなどと称すべきものでは、全然ありませぬ。Dynamical Theoryの困難の第一は茲にあります」と彼は主張する。「一切の複雑、煩瑣、不明確問題を打ち混じて以て之を一丸となし、震度なる単一概念に之を統一し、Dynamical Actionをstaticallyに取り扱った所に其の主要なる點が存する」⁴³⁾とする。「但し如何にしてもDiviationの大なるもの、即例えば煙突のやうなもので、単一觀念中に包含しても余りに差の多いものについては、之に

依り難きものとなし居た」という。物によって力学的挙動が違うというのではガリレオ以前、ニュートン以前のアリストテレス力学に帰ってしまう。真島の論については「流石実務家だけありまして、構造上のご意見には實に傾聴すべきものが多々あります……困った事には博士の数学は私には實に難解です。私には遂に飲み込み得ない節が少なくない」⁴³⁾として、真島の説に異見を述べる。数学が理解出来なくても皆得意不得意があるのだからやむを得ないが、だからといって真島の理論は間違っているとは言えないはずである。何故か良く分からぬが「要するに可及的に構造を剛にし週期を出来るだけ小にするの確實なるを信ずるのであります」という。信ずるだけでは學術上の話では無いと言わざるを得ない。結論として次のように言う。「然して今日事の実際に当たる我々として特に忘るべからざるは、木造家屋に於ては筋違の普及であり、鉄筋コンクリート家屋に於ては施工の真面目であり、鉄骨高層建築に於ては可及的に之を剛ならしめんが為にコンクリート Solid Wall の潤沢なる使用である事を切に感ずるのであります」⁴³⁾と結んでいる。理論でも計算でも実験でも実績でもなく信じるだけ感じるだけである。こうなれば佐野教の信仰でしかない。当時の建築界のエリートは御雇外国人から教わった「三角形不変の理」を信じ、ひたすら筋交いや火打ちを入れ基礎をボルトで緊結するのが良い、水平力に対抗できればよいと考えていた様で佐野も例外でなかつただけのようである。なぜかその後土木建築の多くの学者が佐野教を信じ震度法を金科玉条として細かい計算をした。真島以外は誰も震度法の根拠を確かめようとしなかつた。

建物では固有周期 $T=(0.12\sim 0.03)\times H$ になり、中高層ビルでは多くの場合共振しやすい。真島はこれを避ける柔構造の具体的な構造も提案した。また海軍施設の建物(舞鶴、横須賀)に応用した³²⁾。真島の提案²⁹⁾は建物の数多い柱の内何組かの4本を梁で連結してラーメンにして水平力に抵抗させ、残りの柱と梁はピン接合とし垂直力だけを負担するようにし振動周期を長くするにある。

5. 脚氣論争との類似

柔剛論争とよく似た論争が起きた例として脚氣の原因・対策論争⁴⁴⁾をあげることが出来る。脚氣はビタミンB1の不足が原因であるが陸海軍で特に患者が多くでた。海軍では高木兼寛(海軍医務局長)が、練習船竜驤の乗組員が米国碇泊中は1人も発病しないことに注目した。彼は停泊中のパン食に原因があ

ると考えた。彼は食品の窒素、炭素の比率を正しくすれば脚気を完全に予防出来ると結論づけた。パン食、麦飯などが支給されるようになり海軍から脚気はほぼ無くなった。一方陸軍でも脚気患者は多かったが、東京大学の青山胤通、緒方正規や大沢謙二、陸軍の石黒忠恵、森林太郎等は病気の原因は病原菌にあり麦飯を食うぐらいで治るわけではないと理屈ばかり言って白米食を続けた。陸軍の中にも麦飯派はいたが森等は麦の輸送を止めたり麦飯派を転勤させたりして妨害した。結果陸軍では日清、日露戦争で4064人、28,000人の脚気死者をだした。脚気患者はその10倍位いた。鉄砲の弾に当たって死ぬ者より脚気で死ぬ人が多かった。それでも病気だから病原菌があるはずだ、麦飯で治るはずがないで押し通した。ドイツ医学でこう言っているのだからと受け売りするだけで現実の患者を診て自分の頭で考える、一人でも患者を救いたいと言うことはしなかった。傍観者であった。

高木兼寛は衛生会雑誌に「脚気予防説」と題し論文を送った。その翌月緒方正規は脚気の病原菌を発見したと発表した。ドイツ留学中の北里柴三郎はこの研究のインチキさを見破り徹底的に批判した。北里はこれで東大と仲が悪くなったが福沢諭吉に救われた。大沢謙二は「麦飯の説」なる講演を行い高木君は『麦、豆の類は窒素に富み、大いに利用すべきである』と書いております『ある人は高木君の調合例にならって、犬の糞何匁、味噌何匁、木炭何匁、総量何匁として、窒素、炭素の比を高木君の主張する1対15にしたが、これで脚気は治りましょうかと申したそうであります』と牽制した。学術雑誌に載せるには余りにも品が悪い。森林太郎(鷗外)も負けていない。「もしも正確に実験するのなら、……」と統計の不備を論難した。病気で苦しむ人のことを考えれば自分で追試験をするなりして原因や対策、治療法を探すべきではないのか。石黒忠恵も「帝国陸軍の兵食は、軍医学永年の試験によって米食が最も優れていることに決まっている。……麦飯が脚気を予防するなど、一、二の遍信者(高木兼寛ら)が言っているが、このような人物はまだ学会で認められていない。……いずれにしろ現時点では、麦飯を与えることは許されない」と訓示した⁴⁾。こんな議論にあきれて高木は口をつぐんでしまった。脚気は攻撃を辞めず陸軍は台湾征討、日露戦争でますます多くの死者を出し続けた。議論は30数年続いたがビタミンの発見でうやむやの内に終わった。議論に勝つことに熱中しないで議論の中から有用な視点・考え方を学びお互いに技術の向上に役立てたら数万人の将兵は無駄に死ななくて済んだと思われる。柔剛論争の行

方、佐野利器の議論の進め方もある意味でこれに似ている。

6. 他の分野での柔剛問題

吊橋の主塔には荷重が中央スパンに働くとときと側スパンに働くとときとは逆方向の強い水平力が働く。そのため石造りの頑丈な主塔の上には滑りシューをのせ主塔の水平荷重を避けた。主塔が石作りから鋼構造になるとシューをやめて塔のたわみ性を利用した柔構造になった。

地中に埋めるコンクリート製の下水道管には強い土荷重が働く。これは管は殆ど撓まないが掘削空間を埋戻した土は締め固め不十分で沈下するため管に大きな力が働くからである。管を撓みやすいコルゲートパイプ製にすると管の上に地山アーチが出来て、管に働く土圧は小さくなる。

トンネルにもその上に乗る土の重量分の強い力(土圧)が働く。数1,000mも深い所で鉱山を掘っていたFennerは地山の押し出し量と土圧の関係式を見出し、トンネルの変形を許してトンネル周辺を塑性状態になるまで変形させると地圧は減ることを示した。Pacherはトンネル巻立てを自由に變形させると土圧は減るが、変形が大きすぎると緩んだ分の自重で逆に土圧が増えるので最適な変形量がある筈と主張した。この原理を応用してRabcewiczは新オーストリアトンネル工法(NATM)を考案した。柔構造トンネルである。現在では世界中のトンネル工法がほぼ柔構造のNATMになった。トンネル工事の大革命である。

7. 柔剛論争で失ったもの

震度法一辺倒でなく震力は構造物の振動周期と関係がある、共振を考えるべきという意見は関東大震災頃から始まったが真島以外は大きな意見としてまとまらなかった。1978年の宮城県沖地震で県庁舎は大きな被害を受けた。庁舎(1931年建設、地上4階建、高さ20.5m)の振動周期は $T=0.4$ 秒と見積もられる。地震は様々な振動数が混ざり合っている複雑な振動であるが、激しい揺れを主に伝えるのは、周期1s以下の成分とされ、県庁舎は地震が来た時共振が起こり、崩壊に瀕したと考えられる。この地震では東北大学工学部の1Fと9Fで強震計記録がとられた。1Fでの南北成分258gal、東西成分202gal、上下成分153gal、9Fでは南北成分1040gal、東西成分523gal、上下成分355galであった。共振で9Fでは地震力が2.5~4倍に増えたことになる。同じ地震で開北橋では地盤

上では192gal,下部工上では500gal以上の加速度が観測された。道路橋,鉄道橋でシュウの破損が多く見られた。

1985年のメキシコ地震では「軟弱地盤の固有周期(2~3秒)が卓越したため,同一周期の波が繰り返し作用し,この周期に近い建物(1~20階程度)では非常に大きな応答加速度(1g程度)が生じ,被害が大きくなったものと考えられる……まず第一に,軟弱地盤上の地震動がある特定の周期(2~3s)をもつ繰り返し回数の多い波形だったため,地盤上の最大加速度は0.2g程度だったにもかかわらず,2~3秒程度の週期をもつ10~20階程度の建物に共振現象が起こり,非常に大きな加速度(1g程度)が建物に発生した……建築物の挙動について注目すべきことは,20階を超す超高層建物(一次周期は4s以上)も……相当数あったにもかかわらず,これらは全く被害を受けていない点である。軟弱地盤上の地震動に4s以上の長周期成分が卓越していなかったこと,また,耐震性を配慮した設計と施工が十分になされていた等が好結果をもたらしたと考えられる。また,5階程度までの低層建物の被害数は6階以上の建物に比べて少なかった」⁴⁵⁾。最も注目された共振の影響である。

1995年の阪神淡路震災で神戸市役所1号館(30F)の被害は小さかったが,隣に立つ2号館(8F)は途中階(6F)がペシャンコになった。建物の固有周期Tは1号館は2.1~2.7秒,2号館は0.56~0.72秒,地震の週期は0.4~0.7秒程度とみられるので2号館は共振の為途中階が壊れたのである。2003.9の十勝沖地震では苫小牧石油タンクの石油液面が共振で大きく揺れ(2m以上,周期7秒以上)浮屋根と側壁がこすれて火災2件が起った。同じ様な火災は新潟地震でも起きた。2011.3.11の東日本地震では震源から770kmも離れた大阪府の咲州庁舎が長周期振動による共振で1Fで9cm,52Fでは137cmの揺れが生じ内装・エレベーターなどに大きな被害を受けた。東京の高層ビルでも遠くで起きる地震の度にエレベーターなどが被害を受けている。

水平動だけでなく上下動にも共振が生じる。縦波は $v=\sqrt{E/\rho}$ で柱沿いに進み天端で反射する。天端が自由端か固定か橋桁のような重い物が載っているかで反射の大きさ・様子は変わるがとにかく反射する。多くの方が最初強い突き上げるような上下動があり次にグラグラと水平動がきたと経験談を語るが地震記録を見ると上下動は水平動の1/2~2/3位しかない。これが床桁・橋桁と共振すると数倍に大きくなる。1978年宮城沖地震東北大学工学部9Fの記録から共振倍率を求めると南北1040/258=4.0,東西523/201=2.60,上下355/153=2.32になる。ただし多くの

場合床桁・橋桁の振動も加わり上下動はより強くなる。柱・橋脚の上下動は縦波であるが縦波では波の反射と上下から来る波の重ね合わせ(鉢合わせ)現象が起きる。この作用により倍率はさらに高まるとともに強い力の働く範囲が狭くなる(上下から来る大きな圧縮のピークが重なる範囲)。海で突然三角波が現れるのも波の鉢合わせ・重ね合わせの例であるが,建物の中層崩壊も橋脚の破壊も上下振動の共振と波の重ね合わせによるものであろう。橋梁の場合重く長い桁の上下動の影響があるので共振倍率はさらに大きくなる。RC高架橋の円形橋脚(円周沿いに数10cm範囲で鉄筋が座屈),ロッカーピア(矩形断面の橋脚が重ね板のように割れている),鋼管柱(象の足座屈)は鉛直力による⁴⁶⁾破壊例である。RC柱も鋼管柱も狭い範囲が見事なまでに軸対称に壊れている。反射してきた上からの上下動との出会い頭,鉢合わせの重複波で壊れたのである。とても左右に折れ曲がり遂に座屈したとは思えない。勿論曲げ破壊が起きた例もかなり多く見られるが,鉄道橋・高架の多くでは桁は無傷であった。そのため桁をジャッキアップし柱を補強して短期間で開通にこぎつけることができた。地下鉄大開駅のRC箱形トンネルの中柱崩壊も鉛直力によるものである。

上下動に対する柔構造としては摩擦杭,アーチ形基礎版などが考えられる。柱の圧縮破壊に対してはらせん鉄筋を用いるのが有効であろう。

阪神淡路地震では震源から少し離れて震度7の震災の帯が海岸に平行に帯状に生じた。さらに少し離れて淡路島にも,宝塚にも離れ島状に震度7の点が生じた。震度7の判定は主に木造家屋の破壊数であるが,メキシコ地震では震源から350kmと遠いメキシコ市で被害が大きかった。大阪夢咲ビルは770kmも離れた東日本震災で震害を受けた。深さ0の沖積層では $T=40/V$ の卓越周期の振動が生じるという。これらは波の特性として反射,屈折,回折,共振,鉢合わせなどが起きるためである。同じ現象は構造物の中でも起きる。支承などに震災の帯,震災の離れ島が起きる。しかし現在の耐震工学は震度法一辺倒で,共振の時如何に危険か,地震力の伝わり方は静力学とは違うことを殆ど考えていない。振動性状が違う構造物の間で反射,共振,鉢合わせ現象が起きる。(隣のビルとの衝突,ビル間渡り廊下の墜落,エレベータ,配管,内装,橋梁支承の破壊など,支承は施工上の都合もあり5mm程度の遊間がもうけられているがこれも振動性状にかなり影響する)。免震ゴム支承でも同じ事が起きないか等チャンと検討すべきである。コンピュータを使った時刻歴動的計算が大流行であるがこれが正しいかどうか保証の限りでない。

実験や実測で確かめるべきである。

震度法では加速度の大きさを問題にするものが壊れるかどうかは応力が強度より大きいかが問題の筈である。松代群発地震(1965~1970)では500galの加速度があったが被害は殆ど無かった。「この主な原因は、地震波形が非常に衝撃的なもので継続時間も1秒とか2秒という短いものだったことによる。そのような短い時間には、地震力だけは大きくかかっても、壁に小さな亀裂が入ったとたんに地震は終わってしまうという訳である」⁴⁷⁾。真島も関東大震災の時の加速度は959galで大災害を起こしたが4日後の余震の時の加速度は1184galと大きかったが何らの被害も無かった事を指摘し「加速度のみの大小は標準とするに足らぬ物である、寧ろ振幅の大小が多くの場合、克く之を表示して居ると認められる位である。震度説では地震を代表する項は加速度のみである。上記の事実は全く無視されて居る。故に地動の一波の影響をも説明し得ない事が判る」⁴⁸⁾と早くから指摘していた。

今や震度法の亡霊から抜け出し、振動論による耐震を考えるべき時である。チリで起きた地震により数1000km離れた東北に津波が起き、東北で起きた地震で770km離れた大阪のビルが被害を受けることは静力学では解けない問題である。物理学が古典力学から量子力学に進んだように古い構造力学から脱皮して新しい耐震構造力学を作るべきである。また加速度の力($F=m\alpha$)でなく構造物に生じる応力を問題とすべきである。構造計算をするだけで無く構造物の形式、部材寸法、基礎地盤、基礎の構造を含めた耐震を研究する工学が必要である。弾塑性でなく板バネのように途中で弾性係数が大きくなる構造、心柱のように隙間のある構造、ピン継手なども考える必要がある。構造材料の衝撃強度、弾塑性の性状を研究すべきである。地中・地盤内の地震波の反射、屈折、回折を含めた想定地震動を研究する必要がある。地震波は構造物の中でも部材の振動性状、継手部の性状により複雑な伝達をする筈で、それを考えて動構造力学を研究すべきである。変形防止装置、落橋防止、変形量制限の隙間付きの構造、筋違いなどを考えるべきである。震度法の亡霊から脱却し、学界の党派制を打破し、柔派と剛派の争いをやめ、構造材料、構造力学、振動問題、耐震や耐風問題に土木建築共通の課題として取り組むべきである。

8. 結論

討論・論争の目的は勝つことではなく論争により問題点を明らかにし、お互いに気づいていない問題

点を見だし、議論を深めることにある。議論の過程で新しいアイデアが生まれたり欠点が発見されたりしてより良い方向にものごとが進むだろう。それが勝つことだけが目的になり揚げ足取りの議論になれば問題点は逆にぼやけていく。さらに裏技を用いる人がいれば泥仕合になってしまう。柔剛論争は泥仕合になり結果耐震工学はあらぬ方向に迷い込んだ。当時振動論は未発達であり、真島の理論にも多くの不十分な部分が含まれていた。耐震工学は震度論の亡霊に取り憑かれて進歩を止めた。

参考文献

- 32) 西沢英和:海軍技師・真島健三郎の業績(その1~その5),施工2000.4~2001.4
- 33) 十川嘉太郎,真島健三郎:鐵筋コンクリートの思い出,土木建築工事画報,1935.12
- 34) 明治工業史第九編軍事土木
- 35) 奥村敏恵:石油地下備蓄の問題点とそのすう勢,土と基礎 1978.12
- 36) 横尾義貫:建築と土木—両分野にわたる教育経験者の随想,土木学会誌,2001.10
- 37) 越澤明:東京の都市計画,岩波新書,1991
- 38) 近江榮:光と影・蘇る近代建築史の先駆者たち,相模書房,1998
- 39) 真島健三郎:建築物被害考察と耐震構造私見,大正十二年関東大地震被害調査報告(第三卷)建築物之部,177-188,1924
- 40) 真島健三郎:耐震構造問題について,建築雑誌(491),1927-01
- 41) 真島健三郎:地震と建築,丸善,1930
- 42) 佐野利器:家屋耐震構造要梗,建築雑誌.1915.5
- 43) 佐野利器:耐震構造上の諸説,建築雑誌(491),39-66,1927-01
- 44) 松田誠:高木兼寛とその批判者たち—脚気の原因について展開されたわが国最初の医学論争,『高木兼寛の医学』,2007年12月.他に板倉聖宣:模倣の時代,武谷三段階論と脚気の歴史.吉村昭:白い航跡,坂内正:鷗外最大の悲劇など
- 45) 岩崎敏男:メキシコ地震報告(概報),土木学会誌,1985.12
- 46) 高田直俊:「突き上げるような上下動」はどこへいった,土と基礎,1996.3
- 47) 伯野元彦:地震防災・被害復旧の目標と課題,土木学会誌,1986.4
- 48) 真島健三郎:佐野博士の耐震構造上の諸説(評論)を読む,建築雑誌,No494,1927.04

(2020.4.20 受付)