

# らせん鉄筋は何処へ行った？

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

鉄筋コンクリートが発明されて大きな橋、高い建物などが作られるようになった。先ず引張強度を補う鉄筋を入れ、せん断破壊に対して腹鉄筋や斜め鉄筋を入れた。圧縮強度を補う縦鉄筋も入れたが、さらに効率がよい箍鉄筋(らせん鉄筋)がArmand Considèreにより考案された。しかしらせん鉄筋はいつの間にかすたれたように見える。多くの利点があるこの工法が何故忘れられたのか、最近の耐震工学その他と組み合わせると従来考えていた以上の利点がありそうで、その利点を復活させられないか、を論じた。

**Key Words** : spirally reinforced concrete, hooped concrete, A. Considère, column, earthquake resistance,

## 1. はじめに

1971年のサンフェルナンド地震では道路、ダム、建物などが大きな被害を受けた。パコイマダム(アーチダム)では1040galの水平地震動を記録した。震源が浅く被害範囲は狭かったが、オリーブビュー在郷軍人病院(震源から約8km、倒壊)での死者46名を初め64名の死者を出す大災害となった。オリーブビュー病院精神科病棟は2階建てが完全に潰れて平屋建てになった。その中で螺旋鉄筋柱を使った同病院本館建物(RC地下1F地上5F、四隅の柱は帯鉄筋柱、その他の中間柱はらせん鉄筋柱)が倒壊を免れ大きな耐震性を示して注目された。「オリーブビュー病院は、震源に近いところにあり、…倒壊しなかった秘けつは、柱の構造にあったと思われる。…隅柱の主筋にはφ57を13本使っていました。フープは貧弱で、φ9を45cmピッチで入れただけでした。…なか柱では…セン断補強筋は、φ16の鉄筋を約6cmのピッチで巻いている。このスパイラルで巻かれた中のコンクリートは、柱の上下で水平のずれが約60cm程度ありましたが、このような非常に大きな変形のもとでなお健全な状態でした。これがねばりを発揮したために、建物は倒壊を免れたものと思われる」<sup>1)</sup>。「(中柱は)スパイラルフープで補強した丸柱の周囲に鉄筋を立て、さらにその外側に普通の角形フープで巻いている。一見、長方形柱に見える。スパイラルフープで施工したため、大きな変動にもよく耐え、倒壊には至らなかった。この調査に加わった人々は、スパイラルフープの魅力に取り付けられ、帰国

後、その機能を新聞紙上に発表したりした」<sup>2)</sup>。らせん鉄筋柱は「ねばり強さが著しく改善される。現在の設計法では、このねばり強さのもつメリットを評価できないが、サンフェルナンド地震の被害を受けた病院の巻筋柱(らせん鉄筋柱)が水平方向の大変形にも堪えたことから、巻筋柱の持つじん性の効果を積極的に評価していこうとする傾向が強くなる」<sup>2)</sup>。実際に効果があったのだからOKの筈だが、しかしなかなかそうはならなかった。

◎らせん鉄筋柱にもかかわらず、その外を細い帯鉄筋で巻いて角柱に見えるようにしたのも、隅柱だけは螺旋鉄筋柱にせず帯鉄筋柱にしたのも、何故か理解不能。柱は四角に限るとするイドラがいたか?螺旋鉄筋の外側コンクリートは剥げ落ちたがそれは安全に係わるほどのことではなかった。そのために螺旋鉄筋柱が消えたのなら、「角を矯めて牛を殺す」の類いの愚行ではないだろうか?

◎パコイマダム地点の1040galの加速度は当時の最大記録である。それでもダムは無事であった。その後の地震記録ではもっと大きい加速度も得られている。日本の耐震計算では0.2g(≒200gal)前後の加速度で計算しているし、世界ではもっと小さい加速度で設計している国もある。安全率は普通2とか3とか取るのが普通である。荷重を1/5位に見積もって設計して、それで壊れなかったから良しとするなんて正気の沙汰か。それでもまともな耐震計算か?

◎ジョン・スノーはイギリス医学の「理由はよくわからんけど、効果があったからそれでOK」という考え方を体現した人といえる。当時ロンドンでは

コレラが流行。彼は治療法を探ろうと、患者が出た家を地図に落としとしていった。そして罹患者たちが共通の井戸を使っていることに気がついた。彼は「あの井戸を使わなくなればコレラは減るはず」と進言し、見事コレラ患者が激減した。コレラ菌の発見はその30年後、彼は病気のメカニズムが分からなくても病気の予防をし、「疫学の父」と言われている。

◎日本でもこれに似た事があった。日露戦争に出征した陸軍兵士に多数の脚気患者・死者が発生した。当時軍隊に行けば白米が食えると言うのが兵隊募集の売りだった。事情は海軍でも同じだったが、海軍軍医の高木兼寛は船が米国停泊中には脚気が発生しない事に気がつき食事に原因があると推定して麦飯を食べさせる等の対策をとった。陸軍では病原菌探しに熱中するだけで、何ら対策をとらなかった。むしろ麦飯を禁止し、その結果海軍では脚気は殆ど発生しなかった(9名死亡)のに対し、陸軍では日清、日露の戦争で4064人、28000人の死者を出した。

◎高木はイギリスに留学しイギリス流の医学「理由はよく分からんけど、効果があったらそれでOK」を学んで実行した。陸軍(森鷗外、他)はドイツ流の理屈を重んじ、病原菌を発見することを重視し、何らの対策を採らず多くの犠牲を出した。コンクリート屋も地震地域のコンクリート柱はすべてらせん鉄筋柱にしたら、その後の地震被害は大幅に減ったであろう。学者の仕事は原因を明らかにし論文を書くだけではなく、対策を推し進めてその後の災害を防ぐことではないだろうか。研究もせず、対策もとらずでは、学者の、技術者の怠慢でなくて何であろうか?今後の耐震設計に同じようなことがないようにこの一文を記す。

## 2. Armand Considereの経歴

1841.6.8 オート-ソーヌで生まれた。

1860年 理工科学学校卒。 1865年 工兵隊入隊

1870年 普仏戦争 工兵将校 論文(粉体の応力解析を基にしたランキンによる擁壁の設計法)

1871年 ランスに転勤 製鉄会社に転職?

1876年 鋼生産法の特許提出

1885年 「建設における鉄鋼の使用」出版

1885年 フィニステール県の主任技師 国道、水利 施設などを担当

1891年 座屈に関する論文発表

1898年 鉄筋コンクリートの研究を始める

1900年 パリ歩道橋事故 事故を受けてセメント委員会が開かれ委員として参加

1901年 フィニステール県任務をやめて、鉄筋コンクリートの研究を始めた

1902年 論文:鉄筋コンクリートと箍コンクリートの圧縮強度、

1903年 Irvy橋RCトラス橋スパン20.0m建設(RCトラス橋プルガステル橋スパン64.9mの予備実験) プレガステル橋は(図あり)実現したか不明

1905年 土木局退官 論文:鉄筋コンクリートの大きな伸びに耐える能力、アーチ橋と吊橋の計算、

1906年 RCと箍コンクリートの会社を設立

1906年 チョコレート工場とハルディ橋建設

1908~1909年 ヘンリー・ロシエと共同で三つのアーチ橋建設

1910年 コンシデーレ・ペナード会社を設立

1914年 パリーで亡くなった。73才

## 3. 箍コンクリートの発想

コンクリートの圧縮強度を高めるためには、先ず縦筋が入れられ、次には力の方向と直角に網目の鉄筋を入れる試みも為された。しかしこれは柱の外側から壊れて効果は芳しくなかった。Considèreはらせん鉄筋で外側から拘束すると良いと考え研究や実験を行い特許を取った。

◎ベーコンのイドラ イギリス経験論哲学の祖、政治家のフランシス・ベーコン(1561~1626)は、「知識は力なり」と唱え、自然を探求、克服し、人類に福祉をもたらせと提案した。既存の法則から事実を予見するアリストテレス流の演繹法や三段論法に反対し、実験や観察による知見を整理・総合して法則性を見出す帰納法を提唱した。その一方で実験・観察にも誤解や先入観、偏見がつきまとうので、その要因を分析し、あらかじめ錯誤をおかさないような理論(イドラ論)を提案した。4つのイドラ(謬見、偏見、先入観)があると説いた。

①種族のイドラ(自然性質によるイドラ) 人類一般が共通して持つ誤りで、例は、水平線・地平線近くの太陽や月は大きく見えるなどがあげられる。

②洞窟のイドラ(個人経験によるイドラ) 狭い洞窟の中から世界を見るような、各個人がもつ誤りである。個人の性癖、習慣、教育や育ち、狭い経験などによってももの見方がゆがめられて生まれる。

③市場のイドラ(伝聞によるイドラ) 「人類相互の接触と交際」から生ずるイドラで、言葉の不正確、不適当な規定や使用によって引き起こされる偏見を指し、噂などはこれに含まれる。

④劇場のイドラ(権威によるイドラ) 「哲学の学説や、間違った法則からきた」イドラで、思想や学

説の誤りや、権威や伝統を無批判に信じたり幻惑され事実を直視しないことから生じる偏見を指す。教会が唱えた天動説など。人間は一旦こうだと思ひこむと(先入観),その考えに反する事例が表れても,それらを見ないし軽視しがちである。これ等4つのイドラを取り除いて初めて,人は真理にたどり着き,本来の姿を取り戻すことができると説いた。

◎ベーコンは政治,哲学の世界でイドラを説いたが技術の世界にもこれに似たイドラが住み着いている。そのような観点から見直してみよう。

#### 4. 構造力学の歩み<sup>3)</sup>

構造力学はガリレオが角材の引張強度は材料固有の強度と断面積の積で表される,曲げ強度は材料強度と桁高さの2乗と幅の積に比例する等と論じたことから始まった。彼は角材は同じ断面積でも寸法の大きい方を縦に使う方が横に使うよりも強い,中実の柱と中空円筒の柱では断面積や材料が同じなら中空円筒の方が曲げ強度は大きく,動物の骨や麦わらはこの原理にかなった形をしていることにも注目した。フックは力と変形量(応力とひずみ)が比例することを,ヤング(1807年)はその比率は材料により決まることを発見した(ヤング率)。クーロンはレンガなどのぜい性材は圧縮力を受けると斜めせん断されて破壊する,強度はせん断面に働く摩擦力と粘着力からなる事を発見した。彼の説ではぜい性材の強度は  $\tau = c + \sigma \tan \phi$  (1) となる。モールは応力の図示法や破壊条件の研究を進めた。モールの強度論では  $\tau^2 = A(\sigma + \sigma_t)$  (2)  $\tau^2 = 4\sigma_t(\sigma_t - \sigma)$  (2') となる,ここに  $\tau$ :せん断強度,  $\sigma$ :直応力,  $\sigma_t$ :引張り強度。

◎構造力学が始まった頃主な材料は石や木で,荷重は主に自重であった。1856年ベッセマー式製鉄法(大きな金属製の転炉の中に激しい勢いで空気を注入し溶けた鉄から炭素分を取り除く)が発明された。さらにここに多量のマンガンを混ぜることによって圧延ができる強靱な鋼鉄を生み出された。それ以前の鐵(鑄鉄)は弾性限を超えると直ちに壊れた。鋼材は直ちには壊れず,ある応力で降伏した。鋼材の大量生産が始まり橋や建物などの大型構造物は鋼で作られるようになった。構造力学も鋼材(延性材料)を使うことが前提となった。50年ほど後,鉄筋とコンクリートを組合せて鉄筋コンクリートが発明されたが,材料力学は従来の習慣・考え方を適用した。

◎構造力学(材料力学)は弾性体を主な対象にして発達した。力は静的に働く,力が働いても部材は大きくは変形しない,等々の仮定が含まれていた。それは当時の學問水準から(今日でも)計算式を導くためのやむを得ぬ仮定であったが,そのことはいつの間にか忘れられこれが正解,厳密解であるかのごとき誤解が生じた。その代表例がナヴィエと考えられる。「ナヴィエは,前々から,構造物に在留変形が残らない弾性限界を知るのは非常に重要であるという考えであった。弾性域では変形は力に比例すると仮定できるから,変形を計算するには比較的簡単な式で良い。しかし,弾性限を超えると,力と変形の関係は非常に複雑になり,簡単に極限荷重を求めることができない。……」<sup>3)</sup>。その後構造力学では弾性限度内に応力を納めることを推奨するような風潮が出来た。ナヴィエは構造力学者として今でも高く評価されている。彼は「吊橋のケーブル形状としてなるべく垂みの少ないもの(1/12~1/15)を採用することをすすめた……アンヴァリッド橋はナヴィエの直接の指導の下に工事が開始された……竣工を目前に……アンカーが滑り出し,工事は無残にも中断された……亡くなる時まで,彼はいつもこのことを気にしていた」<sup>4)</sup>と彼の弱点に触れる人は少ないが。

◎正確なことは良いことか?新潟地震では古い萬代橋(RC連続アーチ橋)は無事だった。新しい昭和大橋は落ちて大災害になった。この橋は計算の正確さを求めて連続桁を避け単純桁にした結果落橋した。正確過ぎて「角を矯めて牛を殺す」結果になった。

◎「非常に一般的に言うと,材料を破損するメカニズムは常に二通り存在している。一つは塑性的流動であり,もう一つはひび割れによる破砕である。材料は二つのメカニズムのうち,抵抗力の弱い方に屈してしまう。もし割れる前に変形するなら'延性的',もし変形するまえに割れるなら'脆性的'と言う。どんな材料にも,この二つの破壊形態が可能性として潜んでいるのである」<sup>5)</sup>。螺旋鉄筋はコンクリートの圧縮強度を増やすために考案されたが,単に圧縮強度を増すだけではなく,コンクリート(脆性材)を延性材に変える作用もある。むしろその方が重要な点である。それを多くの人が見落としている。

◎物理学が進み原子間に働く力が分かってくると,実際の材料の強度はそれより遙かに小さいことが問題になった。Griffith(1920年)はぜい性材料の中には楕円形の小さな空隙があり,その周りで

は応力集中が起こるため強度が1/10以下に小さくなる……とエネルギーの釣り合いから強度を論じた。この議論を発展させるとモールの破壊論と一致する(2)式が導かれる。横方向に拘束すると圧縮強度が大きくなることなども分かる。Weibullはひび割れの大きさの影響について統計的に研究し、強度が部材の大きさや応力勾配に関係することを研究した(例えば曲げ引張りと純引張りでは強度は1.4倍も違う)。鋼材などの延性材料の強度が小さく、降伏するのは転位が移動するためということがOrowanなどにより発見(1934年)された。von Karmanは本来脆性破壊する大理石に大きな横圧力を加えて圧縮すると延性材のように樽形に横に膨らんで延性的に降伏する(脆性破壊をしない、ある程度以上拘束圧を増やしても強度は変わらない)ことを発見した<sup>3)</sup>。茂木は脆性から延性に移るのは拘束圧 $\sigma_3$ が $\sigma_1/4.4$ 以上の時であることを発見した。

◎Griffith理論によるとクラックを作るのに必要なエネルギーはクラックの長さAに比例し、クラックの進行に伴い解放される歪みエネルギーはクラックの長さLの2乗に比例する。従ってクラックを進行させる正味のエネルギーEはこの差になりひび割れが自然に進行する臨界長さは  $L_g=2WE/\pi s^2$  で求められる。ここにW:クラック表面の破壊仕事(J/m<sup>2</sup>),E:ヤング率,s:クラック近傍の平均引張り応力(応力集中を考慮しない値),L<sub>g</sub>:臨界クラック長さ(m)。応力が作用している材料には切り欠きなどから目に見えない小さなクラックが発生し、次第に成長する。臨界長さまで成長すると、クラックの成長はいきなりスピードを増しあっという間に破壊する。この現象は金属に対して、引張り応力についてはかなり研究されているがコンクリートについて、圧縮や剪断応力についての研究は無いようである。

L<sub>g</sub>は材料によって違い脆性材では小さく、延性材は1000倍以上大きい。

◎Griffith理論によると振動の度にひび割れば伸びて一旦出来たものは閉じない。螺旋鉄筋でしっかり締め付けてあるとひび割れは力が働かなくなると閉じる。これが螺旋鉄筋の効果であろう。

◎いま簡単にするために平面だけで考える。原子には4本の腕があり固体では互いに手を繋いでいる。手の長さ・強さは物により変わるが、所で流体状態の時は自由に移動し互いに位置を変えていた原子は冷却すると互いに四方の相手と結合し固体になる。この時冷却速度が速いと手を伸ばした所に相手がない場合も生じる。このため4本の結合

の手があっても1本は相手がないということが生じる。力が加わり変形すると、この結合の手が空いていたところに隣の粒子が来てこれと手を結ぶ場合が生じる。これを外から見ると結合の相手がなくて空いている場所が移動するよう見える(転位の移動)。転移が移動すると全体では変形が起きるが結合数は変わらないから、形は変われど、強度も体積も変わらない。これが延性変形(降伏)である。一方脆性材には割れ目があり、力が働き変形すると割れ目が伸び、強度は減り体積は増える。脆性破壊か延性変形かは主に材質による。

こうして材料は延性材(弾性限に達した後、強度低下しないで同じ強度で降伏・変形する、圧縮強度と引張強度は同じ、拘束圧を加えても強度は変わらない、多少切り欠きがあっても影響を受けにくい)と脆性材(破壊強度に達したら、直ちに、突然コナゴナに破壊する、四方から拘束圧を加えると延性降伏する、引張強度は圧縮強度の1/10程度しかない)に分けられ、それぞれ破壊の様子などが違う。ガラス繊維等は非常に細くするとその中には小さなき裂だけになり引張り強度は大きくなる。◎脆性材は断崖絶壁の近くに野球だかサッカーのコートがあるのに似ている。ちょっとでもコートからはみ出せばボールも人も崖から落ちて、危険である。広く平らな場所に作ればボールがコートをはみ出しても危険ではない。脆性破壊と延性降伏の差はこれに似ている。従って安全率等も変えるべきでは無いだろうか?

◎コンクリートの強度が横拘束により増えるのなら何故強度試験をするときc、φや引張り強度を求めないのか。それは多くの(殆どの)コンクリート屋がコンクリートはちゃんと拘束すれば強度が増え、延性降伏することを知らないか、そんな性質を利用しようと考えてもいないことを示している。これではせん鉄筋の利点をどんなに説明しても聞き入れて貰える見込みは無い。

◎脆性材では力が働くと割れ目が伸びる。地震の時は何回か力が働きそのたびに割れ目が延びる。割れ目には小さなコンクリートの粒が挟まって力が小さくなくても閉じることはないだろう。力が小さくても回数が多ければ(地震の時間が長ければ)割れ目が伸びてついには壊れるのではなからうか。単に震度の大きさだけで論じても間違いでは?(松代地震では震度は大きかったが継続時間が短く被害は小さかった)。まして地震荷重に対しては許容応力を50%増しにするなんて、大丈夫か! 正気の沙汰か

◎パリ万国博での陸橋の崩落事故(9名死亡,1900

年)やスイスのRC建物の倒壊事故(1901年)の後<sup>6)</sup>,各社まちまちの方法で設計することに批判が起こり,スイスやプロシヤではコンクリート構造物の設計示方書が作られた。「コンクリート設計規準が生まれたのは……崩壊事故が続出したからであり,その結果設計者は「建築家(棟梁)」としての権利であり特典でもあると考えられていた自由を全く剥奪されることとなった。このようなケースには,パリの……RC陸橋の事故……スイスの5階建てのホテル……倒壊した。」<sup>6)</sup>。それまでの色々な特許工法や各社まちまちの設計方法は示方書に従った統一された設計へと変わっていった。しかし示方書や法律で構造を制限することは技術水準を一定に保つ,不良構造物を制限するなどの利点と,技術の進歩を止める欠点がある。

## 5. らせん鉄筋柱<sup>7)8)</sup>

Considèreはらせん鉄筋で外側から拘束すればうまく拘束できることを考えつき,実験を重ねて縦鉄筋にくらべ2.4倍だけ効率がよいことを証明し,特許を取り,会社を作ってこの工法を推進した。

らせん鉄筋はその他,大きな変形に耐える(たわみ性が良い,延性降伏する),強度のバラツキが減る,自重が小さくできる,破壊する前にらせん筋の外側の被りコンクリートが剥がれ予兆があるので危険予知が出来る,急激な破壊をしないので安全率を小さく出来る,鋼材にくらべ変形が少ない(6/10位,交通荷重による振動の影響が小さくなる),鋼材にくらべさびに強いなど多くの利点もあげている<sup>7)</sup>。Considèreは特許を取った後,会社を設立してこの工法をひろめ,さらに研究も重ねた。彼はらせん鉄筋には $\phi 10\text{mm}$ 程度の鉄筋をほぼ2.5cm間隔に(鉄筋比2.0~3.4%)用い,強度~ $170\text{kg}/\text{cm}^2$ のコンクリートを $340\sim 735\text{kg}/\text{cm}^2$ まで高め,リベット穴などの影響を考えると鋼橋と同じ大きさで同じ強度を得られるとした。Richart<sup>9)</sup>は最大 $286\text{kg}/\text{cm}^2$ の側圧をかけコンクリートの強度を $560\text{kg}/\text{cm}^2$ まで高めた。しかるにACI規準ではらせん鉄筋による強度増加はらせん鉄筋より外側のコンクリートが剥がれて強度が落ちるのを補うだけに限る,軸鉄筋柱に対し25%増の強度までしか認めないとした。少なくとも降伏しても強度低下しない量のらせん鉄筋を入れるべきではないか?

◎何故ACI規準では鉛直強度の増加(2~3倍まで可能)を25%程度までしか認めないのかよく分からないが,HognestadらがACI規準の限度までの試験しかししないのかの理由は更に分からない。示方書は設計者や施工業者は守るべきだが,学者は自己の学識や良心に従って判断し,更により良い設計や構造を探求すべきである。これをやらないのでは学者失格である。(聖書にそう書いてあるからと一切の議論を認めようしなかった中世のキリスト教会と同じではないか?これでは進歩はない)。

◎柔剛論争 関東大震災で大きな被害を受けた後,共振を避けるため撓みやすく振動周期を長くすべきとする眞島と,筋交いや耐震壁も入れなるべく振動周期の短い剛な構造物にすべきとする佐野利器らとの間で論争がおきた。「Dynamical Actionをstaticallyに取り扱った所に其の主要なる點が存する……水平震度Kが横に向かって作用と考ふる……實際に當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,鐵筋コンクリート家屋に於ては施工の真面目であり,鐵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」<sup>10)</sup>と論じた。佐野の意見はアリストテレス流の三段論法である。他の地震学者も含め劇場のイドラに取り付かれていたのだろうか?

これに対しA.S.Veletsos,N.M.Newmark<sup>11)</sup>は構造物のたわみ性を増して弾性応答したときと同じエネルギー量を塑性変形により吸収できればよいと提案した。「たわみ係数が約4位だったら……作用力は現行の弾性系に対する計算値の約1/4にするのが作用応力と材料の降伏荷重の関係を考えるなら合理的だろう」。これには螺旋鉄筋が最適では。

◎螺旋鉄筋は耐震構造物にとって願ってもない性質を持っている。先人も次のように語っている。「長い間らせん鉄筋柱の強度は大きな変形を伴うこと,さらに前述の無筋とらせん補強の柱の荷重-変形関係は縦鉄筋とらせん鉄筋を用いる柱には利用できないと考えられてきた。しかしながら,ここに示したことからそのような部材のよりよい理解とそのような部材のより合理的な設計方法が得られる。そのためには変形や応力についてのよりよい理解が必要である」<sup>9)</sup>。しかし大勢は弾性計算にこだわりらせん筋量を制限する方向(剛構造)に向かった。

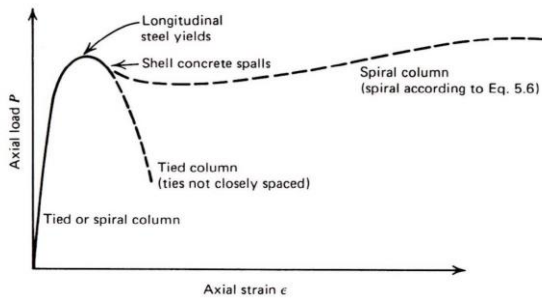


図1 帯鉄筋柱とらせん鉄筋柱のたわみ性の差

◎φ3.00mの橋脚はらせん筋を用い有効強度が倍以上になればφ2.00の柱で十分である。柱径が小さくなり振動周期も長くなり地震の影響はさらに小さくなる。そのためには地山の卓越振動数や橋脚の振動周期の測定法、計算法を開発し構造物に作用する震度を予測する研究をすべきであろう。しかし官庁とか権威ある高名な学者は専門分野に立てこもりなかなか意見を変えたがらない?これもイドラ?

◎阪神淡路地震では高架橋の柱が激しく壊れ、その復旧には多くの場合鋼板巻立て工法が採用され成功した。従って今後はらせん鉄筋が採用されるか考えたがそうはならなかった。コンクリート屋の頭にはイドラが住み着いていて、この成功は見えなかったようである。彼らの提案・実施した案は天動説の改善案の周転円説と同じでとても信じがたいが。

◎共振を起こすと(減衰がない場合)構造物の振動は無限大になる、と振動の本には書いてある。そんなことが起きたらどんなに頑丈に作っても地震で壊れてしまう、困ると多くの地震学者は考えたのか?まさかそんなこともあるまいが。1919年にはビル高さの100尺制限なるものをつくった。戦後高いビルを作りたい関係者は100尺制限を止め、共振には目を瞑って高いビルでは震度が減るという修正震度法なるものを作った。超高層の曙を囁し立てた。

◎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階を越す超高層建物(一次周期は4s以上)もラテンアメリカンタワーを始めとして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(岩盤上には低レベルであるが含まれている)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<sup>16)</sup>。このメキシコ地震の被害を見ると8F~18Fの中高層ビルは共振して強い被害を受け、5F以下の低いビルと、より高い23F,43Fの超高層ビルは被害無し。

◎江戸時代に津波の被害を受けた三陸海岸の人たちは後世の人のために「此処より下に家を建てるな」の石碑を残した。これに倣い今後再び震害を受けないためには「8F~18Fの中高層ビルはつくるな。8F前後のビルには筋交いをいれより剛に、18F前後のビルはより柔構造に」とだけ建築基準法が何かで決めて耐震設計は終わり、で難しい計算は不要ではないか(但し地盤がメキシコ市と同じ場合)。三陸の石碑は草に埋もれ誰も見なくなった。その後人々は交通の便利とか駅近とかで住居を選ぶようになり石碑より下に家は増え再び津波災害は起きた。今後は石碑を見ない人(専門家だけでなく都市計画をする人に、政治家に)どう伝え教えれば良いか?、一考を要する。

◎「全ての地は、同じ言葉と同じ言語を用いていた。東の方から移動した人々は、シナルの地の平原に至り、そこに住みついた。そして、「さあ、煉瓦を作ろう。火で焼こう」と言い合った。彼らは石の代わりに煉瓦を、漆喰の代わりにアスファルトを用いた。そして、言った、「さあ、我々の街と塔を作ろう。塔の先が天に届くほどの。あらゆる地に散って、消え去ることのないように、我々の為の名をあげよう」。主は、人の子らが作ろうとしていた街と塔とを見ようとしてお下りになり、そして仰せられた、「なるほど、彼らは一つの民で、同じ言葉を話している。この業は彼らの行いの始まりだが、おそ

らくこのこともやり遂げられないこともあるまい。それなら、我々は下って、彼らの言葉を乱してやろう。彼らが互いに相手の言葉を理解できなくなるように」。主はそこから全ての地に人を散らされたので、彼らは街づくりを取りやめた。その為に、この街はバベル(乱れ)と名付けられた。主がそこで、全地の言葉を乱し、そこから人を全地に散らされたからである。」(旧約聖書「創世記」11章1-9節より)

◎近代文明は分業化、専門化を進めている。技術分野は特にそうである。しかし特定の分野の研究が進んでも、全体としては退歩にしかならない。らせん鉄筋柱が撓みやすいことは利点でなく欠点になってしまう。(剛性の高い、がっちりしたものが良いとするイドラが住み着いている限り?)。

◎「井の中の蛙大海を知らず」とは専門馬鹿を揶揄することわざである。しかしこれには続があるという。「大海を知らずして井の深さを知る」と続くという。専門化は避けられないが、それなりの利点もある。専門家間の連絡を密にし、専門知識の和を生み出し、協力し、意見交換して仕事を進めるべし。

◎人生に失敗はつきものである、失敗は避けられない、しかし失敗を教訓にして以後改善改良を試みるか失敗を隠して知らぬ顔をして切り抜けるかで以後の世界は変わる。そのために歴史に学ぶべき、土木史も学ぶべし。失敗学も学ぶべし。

◎構造力学では材料には固有の強度(引張り、圧縮、剪断)があり、計算した応力がそれ以下になるように設計する。破壊力学では応力拡大係数を考えて衝撃エネルギー吸収量を求める。地震に対してもシャルピー試験機を(改良して)用いて、構造物の吸収エネルギーを求めるべきでは?

◎「近代建築物が、何故こうももろく破壊してしまうのであろうか、その仕組みをみると、次のようである。地震動により、繰り返し水平力を受けると、柱には剪断応が生ずる。これがコンクリートの許容剪断応力度を上まわれれば、柱に斜めき裂が入る。今まで、剪断応力の大きさ、許容剪断応力度の評価に問題があったため、き裂が揺れている間にしだいに幅を広げ、帯筋の外側のコンクリートは剥落、柱筋に囲まれた内部コンクリートは、丁度すりこぎ運動によって玉石状に加工されてしまう。そんなコンクリート塊が、帯筋の間から外側にこぼれ落ち、主筋は露出し、コンクリートは上・下にとんがる、これでは、上部の荷重を支えきれずに、主筋は提灯の骨よろしくパンクしてしまう。最悪の時は、完全に落階する」<sup>12)</sup>。やや見てきたような話である

が、あり得る話である。繰り返し荷重が働くと静荷重とは違った現象が起きることは馬車の時代から注目されていたが、鉄道時代になると更に問題になった。「鉄棒は、静的破壊荷重の3分の1を繰り返して加えると、ほとんど破壊する、といわざるをえない。」と論じた人もいる<sup>3)</sup>。地震の影響を考えた場合には許容応力度を1.5倍まで高めて良いなどと言っていて良いのだろうか。

◎1952年世界初のジェット旅客機デハビランド・コメット機が相次いで2機空中爆発事故を起こし世界を驚かせた。高空を飛ぶ飛行機は内圧を与えて旅客の快適を保つが高空は気圧が低いので飛行の度に差圧が働きこの繰り返し荷重で空中で破壊したのである。繰り返し荷重試験は行われていたが、試験を急いだ?ため1000回に1回想定差圧の2倍の内圧を掛けて試験期間を短縮した。これが実際の疲労強度を反映していないため事故を起こした。また窓の角がかなり尖っていた。疲労試験をやり直し、材質を変え窓の形を円形に近くして以後事故無し。

◎リバティ船の事故後ぜい性破壊の研究は進んだ。コメット機以後同じような事故はなくなった。阪神神戸の地震被害は耐震の研究、鉄筋コンクリート工学の飛躍をもたらしたか?載荷試験の載荷速度は変えてみなくて良いのか?衝撃吸収試験をしなくても良いのか?引張り強度は?繰り返し載荷試験は不要か?地震の振動と機械の振動とでは周期、継続時間も、回数も違う。切り欠きの影響は、寸法効果は、その他いろいろと繰り返し荷重では違うが?

図2で $\tau \approx 80$ の水平な直線はぜい性から延性に変化した部分を示す。コンクリートは強度のばらつきが大きいので現場では目標強度より大きめの強度を目指して工事をする。28日後も更に強度は伸びる。軸力と曲げが同時に働く場合はらせん鉄筋の働きは効率が落ちるのでらせん鉄筋量は更に多くすべきだろう。

◎現在の設計法では弾性状態だけを考えているが、破壊するときはどうなるだろうか?引張に対しては鉄筋だけで対処するので延性降伏になる。コンクリートはぜい性材なので斜め方向にせん断され、瞬間的に破壊する。圧縮に対しては中に埋められた鉄筋は押し曲げられてその抵抗力は殆どゼロである。鉄筋とコンクリートの抵抗力を加えて考えるなどは全くの幻想に過ぎない。

しかし「例えば地震の設計荷重値として今より大きな値を採用し、安全率も他の場合との統一をはかって1.0から1.7に変更したとすると、設計の結



送,FM放送,携帯電話(放送より3G,4G,5Gと更に高周波を使う)の差をみてもその違いは著しい。地震も短周期,長周期で現象は違うはずであるが。

◎技術の発展を見ていると理論家,実務者,設計や施工の専門家,評論家など色々な人の協力があって初めて発展する。規準,示方書は技術の水準を上げるのに役立つことも進歩を妨げることもある。しかしコンシデーレの素晴らしい発想は学問の進化,技術の標準化,専門化,それに弾性論の普及・進歩の中で消されてしまったようである。それを惜しみ,見直し,復活させようと試みた。

#### 参考文献

- 1) 大崎順彦:サンフェルナンド地震と建築の被害,土と基礎,1971.8
- 2) 小坂義夫,森田司郎:鉄筋コンクリート構造,丸善,1975
- 3) Timoshenko:材料力学史,鹿島出版会,1982(原著は1953)
- 4) 川田忠樹:吊橋の文化史,技報堂出版
- 5) J.E.ゴードン:強さの秘密——なぜあなたは床を突き抜けて落ちないか,丸善
- 6) ヤコブ・フェルト:建設事故の記録,彰国社,1972
- 7) Armand Considère (translated by Leon Moisseiff, 1906): Experimental research on reinforced concrete,
- 8) Charles F. Marsh, William Dunn: Reinforced Concrete, 1909
- 9) Frank E. Richart, Anton Brandtzaeg, Rex L. Brown: A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, 1928
- 10) 佐野利器:耐震構造上の諸説,建築学会誌,491号
- 11) A.S.Veletsos & N.M. Newmark:Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions, 2nd WCEE, Tokyo, 1960
- 12) 耐震構造の設計,建築学会関東支部,1981,
- 13) 西野文夫他:許容応力度法の内容と問題点,橋梁と基礎,1983.12
- 14) 石本巳四雄:出羽村及び濱松町における地震動卓越周期の観測 地震研彙報14(1936)
- 15) 福島啓一:振動から波動へ——震度法から脱却せよ,土木学会全国大会,2022
- 16) 岩崎敏男:メキシコ地震報告(概報),土木学会誌 1985.12

(Received April 10, 2023)