

# 橋は何故落ちたか(失われた叡智)

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

コンクリートは便利な材料であるが強度が小さいのが欠点である。金網、鉄筋を入れてこれを補う鉄筋コンクリートが発明されて応用分野が広がり、大きな橋、建物などが作られるようになった。先ず引張強度が小さいのを補う鉄筋が入れられ、せん断破壊に対して腹鉄筋や斜め鉄筋が入れられた。圧縮強度を補うために縦鉄筋も入れられたが、さらに効率がよい方法として箍鉄筋、らせん鉄筋がArmand Considèreにより考案された。しかしらせん鉄筋による補強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、最近の耐震計算と組み合わせて考えると従来考えていた以上の利点がある。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

阪神淡路大震災では多くの建物、橋などが壊れ、そのため圧死した人が多くでたし、道路、鉄道、電気、ガス、水道などが止まり市民生活は混乱した。

サンフェルナンド地震(1971.6.4)の後、日本の耐震技術は進んでいるので日本ではあんなことは起こらない、関東大震災級の地震が来ても大丈夫と一部で言われたが、現実には阪神淡路地震(1995年)で多くの橋も建物も壊れてしまった。何故か？

「世界有数の地震国であるわが国においては、構造物の設計において、耐震性に関する検討が重要な部分を占め断面が耐震性によって決定されるものが少なくない。それゆえ、耐震設計法に関する研究が盛んに行われ、その成果も世界の最高水準を行くレベルにある。しかし、こと鉄筋コンクリート土木構造物に限れば、その耐震性に関する基礎研究は、最近に至るまで、あまり行われていなかったのが実情である。……サンフェルナンド地震で鉄筋コンクリート橋脚に著しい震害を生じたことは、震度法を適用しにくい高橋脚の出現と相まって、鉄筋コンクリート土木構造物の耐震設計法に関する研究が徐々に始められる契機となった」<sup>1)</sup>。「1980年道路橋示方書・V耐震設計編は……1971年道路橋耐震設計指針当時の設計法を道路橋示方書の形式に書き改めただけの基準であった。……海外ではすでに開発されつつあったキャパシティーデザインの考え方が反映されず、従来通りの震度法と応答を考慮した修正震度法しか記述されな

った……著者は、1980年道路橋示方書からこれが改訂される1990年までの10年間で「耐震設計の失われた10年」と呼んでいる」<sup>2)</sup>。進歩を阻んだ主な原因は構造力学の知識を取り入れなかった偏狭さと、古人の知恵を忘れたことではなかろうか。今後の耐震設計にそのようなことがないようにこの一文を記した。

## 2. 構造力学の歩み<sup>3)</sup>

1638年ガリレオは「新科学対話」で、材料にはそれぞれ固有の強度があること、部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、部材の曲げ強度は矩形の桁では材料強度と桁高さの2乗と幅の積に比例すると論じたことから構造力学は始まった。同じ断面積でも角材は寸法の大きい方を縦に使う方が横に使うよりも、中実の円柱と中空の円筒では中空の円筒の方が、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注目した。フック(1678年)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。オイラー(1757年)は圧縮抵抗力は断面積に比例するのではなく、断面係数に比例し長さに反比例するとする挫屈強度の式を導いた。クーロン(1773年)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見出した。コーシーは応力やひずみの概念を明らかにし、モールは応力の図示法や破壊条件の研究を進めた。ク

ーロンの強度論では  $\tau = c + \sigma \tan \phi$  となるが、モールの強度論では  $\tau^2 = A(\sigma + \sigma_c)$  となる。

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小さな空隙があり、その周りに応力集中が起こるため強度が小さくなると論じた。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(1939年)は微小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(例えば曲げ圧縮と純圧縮では強度が違う)。鋼材などの延性材料の強度が小さいのは転位が移動するためということがOrwanなど3人の科学者によりほぼ同じ時期(1934年)に別々に発表された<sup>4)</sup>。こうしてぜい性材と延性材では破壊条件などが違うことが明らかにされた。Kármán(1892年)は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横に膨らんで降伏することを発見した。Richartら(1928年)<sup>5)</sup>はコンクリートに対して同じような実験を行いコンクリートでも同じ現象が起きること、拘束圧を加えると圧縮強度が大きくなる事などを確認した。茂木<sup>6)</sup>(1966年)は脆性から延性に移るのは拘束圧  $\sigma_3$  が  $\sigma_1/4.4$  以上の時だとした。Parkら(1971年)<sup>7)</sup>は拘束圧により降伏後の強度低下の速度が違うことを明らかにした。

こうして材料は鋼材などの延性材(降伏強度に達した後同じ強度で変形する、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)とレンガや石材などの脆性材(破壊強度に達したら直ちにコナゴナに破壊する、拘束圧を加えると圧縮強度が大きくなる、引張強度は圧縮強度の1/10程度しかない)に分けられ、破壊の様子などが違う、しかも拘束圧を加えると脆性材から延性材に変化することなどが明らかになった。

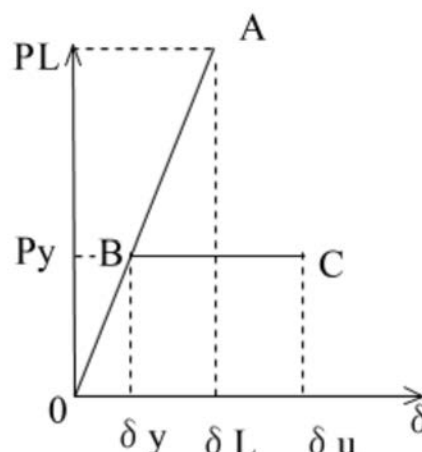
### 3. 鉄筋コンクリートの理論と研究

ポルトランドセメントが発明され、コンクリートが容易に製造できるようになるとこれを色々な方面に応用しようとする試みが始まった。まず引張強度が弱いので金網や鉄棒を入れて補強し植木鉢やボートが作られた。橋や建物への利用も始まり、曲げ材では引張側に鉄棒を入れるようになった。アネビク(1892年)はせん断力に対し腹鉄筋や斜め鉄筋を入れることを考案した。コンシデーレ(1899年)はらせん鉄筋を用いて圧縮強度を高める

方法を研究した<sup>8)9)</sup>。スパン64.9mのPlougastel橋をかけるに先だって20mスパンのPont d'Ivry歩道橋を作り載荷試験をしている<sup>9)</sup>。当時これらの研究は様々な特許になり、色々な会社が設計や工事を行った。イギリスで<sup>10)</sup>はW. L. Scot, オーストラリアでは<sup>11)</sup>E. G. Stoneがらせん鉄筋構造を強く推進した。

パリ万国博覧会会場の陸橋の崩落(9名死亡, 1900年)やアネビクの会社で建てたスイスの建物の倒壊事故(1901年)が起こり<sup>12)</sup>、各社まちまちの方法で設計することに批判が起こり、フランスやプロシヤで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、目を見張るばかりの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、1900年にセレスチャル・グローブ社によってパリのサフラン通りに架けられた鉄筋コンクリートの陸橋の事故がある……ヘンナビークはスイスのバーゼルに5階建てのホテルを設計したが倒壊<sup>12)</sup>。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。

日本では関東大震災(1923年)後レンガ造より鉄筋コンクリートの方が耐震性が良いとされた。地震の研究、耐震設計の研究も始まった。重量の1/10の水平力を考えて設計するなどが決まった。その後地震の度に設計指針が改定され、特に柱のせん断破壊が多くおきたので帯鉄筋の間隔が30cmから20cmへ、10cmへと小さくされた。或いは許容せん断強度が小さくされた。振動周期が長い高層建築では震度を小さくする(修正震度法)、地盤条件や重要度に応じて震度を変えるなどの改訂、修正が行われた。地震記録が沢山とられるようになると、震度は0.1などでなく1.0を超える場合もあることが分かってきた。



弾性計算で  $P_L$  の強度が必要でも、 $\triangle OAB$  の面積と同じ面積の  $\square OBC$   $\delta_u$  になるまで強度を保って変形できればOK。

図1. 保有水平耐力計算

これに対しN.M.Newmark(1960年)<sup>23)</sup>らは構造物の強度を大きくするには限度があり、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が塑性変形により吸収できればよいと提案した。

震度0.2で設計した構造物が震度1.0にも耐えられるようにするためには震度0.2で降伏しても、其の強度の儘で降伏時の13倍の変形をしても壊れないだけのたわみ性があれば良いことになる。弾性計算により構造物の強度を大きくするのは経済性その他で困難であるが、保有水平耐力とじん性を増せば良いことが分かってきた。そのためには鉄筋コンクリート部材が大きな変形を受けても壊れないことが(じん性が大きい事が)重要であるが、大きな変形に耐えるためにはどのような補強をすれば良いかについて十分な研究がされなかったようである。

#### 4. らせん鉄筋柱<sup>8)9)</sup>

横方向に拘束すると圧縮強度が増すことは土質力学などで知られていた。しかし金網などを入れてコンクリートを拘束しても表面から剥がれてうまく効果が上がらなかった。コンシデーレ(1841～1914年)はらせん鉄筋で拘束すればうまく拘束できることを思い付き、実験を重ねて同じ量の鉄筋を用いるならば縦鉄筋にくらべ2.4倍だけ効率がよいことを証明し特許を取りまた会社を作ってこの工法を推進した。柱だけでなく、橋桁の圧縮側に用いることも推奨した。らせん鉄筋構造は強度が大きだけでなく、大きな変形に耐える、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>8)</sup>。

アーチ橋、トラス橋、建物などが各国で作られた。日本でも渋沢倉庫に用いられ関東大震災の時耐震性が良いことが注目された<sup>13)</sup>。

#### 5. らせん鉄筋はどうなった

Considèreは特許を取った後、会社を設立してこの工法をひろめ、また研究も重ねた。彼の試験しまたは実用したらせん鉄筋柱では縦鉄筋は主にらせん鉄筋の間隔を保持し、正しい位置に配置するための組立鉄筋として位置づけられた。らせん鉄

筋にはφ10mm程度の鉄筋をほぼ2.5cm間隔に(鉄筋比2.0～3.4%)用いた。それも強度を高めるために場合によっては高強度の引抜鋼を用いた。強度40～170kg/cm<sup>2</sup>のコンクリートはこれにより340～735kg/cm<sup>2</sup>まで強度を高めた。Ivry歩道橋の試験工事では30cm角の上弦材の計画を25cm八角にして高強度の柱を追求している<sup>9)</sup>。さらにくわしい試験をしたRichartら(1928～29)<sup>22)</sup>もほぼ同じようならせん鉄筋を用いて、一部では吊橋用ケーブルワイヤまで用いて、最大286kg/cm<sup>2</sup>の側圧をかけ256kg/cm<sup>2</sup>のコンクリートの強度を560kg/cm<sup>2</sup>まで高めた。縦鉄筋は組立用としている。しかるにDunn(1909年)の試験<sup>9)</sup>ではらせん筋の鉄筋比は0.3%と0.65%で縦筋0.4%と1%より少ない。軸力197kg/cm<sup>2</sup>でらせん筋が切れて壊れた。らせん鉄筋の効果をかなり高く評価しているParkらの実験(1981年)<sup>14)</sup>でもらせん筋は0.75～2.61%、縦鉄筋は1.9%で縦筋が比較的多い。高強度鋼材は使っていない。

土木学会示方書<sup>15)</sup>には鉛直力だけを受ける場合はらせん鉄筋柱が(縦鉄筋より2.5倍有効)有利と規定している。しかし曲げと鉛直力を受ける場合のらせん鉄筋柱についての規定はない。さらに152条では「短柱……(b)大きい曲げを受ける柱ははりに準じて設計するものとする……【解説】……大きい曲げモーメントを受ける柱の断面は、一般に、コンクリートの曲げ圧縮応力度または鉄筋の引張応力度によって決まるが、このような場合、はりの各条の規定も考えて設計することが必要である。この場合、らせん鉄筋の影響を考慮してはならない」<sup>15)</sup>と規定している。軸力だけの柱なんて地震国日本にはないのにこれではらせん鉄筋なんてなるべく使うなと宣言したようなものである。田辺忠顕<sup>16)</sup>はらせん鉄筋が有効に働くのは「らせん鉄筋の周囲のコンクリートがはげ落ちて大きな撓みが生じるようになってからである。偏心のある載荷の場合には、そのような大きな変形は、偏心量をますます増大させるので……らせん鉄筋量をもつ柱に偏心荷重が加わる場合の柱の終局耐力は、らせん鉄筋の有無に無関係であると考えて良い」とらせん鉄筋の利点を全否定している。なんと浅はかな判断だろうか。耐震のためには大きな撓みに耐える必要があるとしたNewmarkの指摘と逆の方向を向いている。ACI規準<sup>17)18)</sup>ではらせん鉄筋柱は軸鉄筋柱に対し25%増の強度までしか認めないとした。また最小使用量を規定し、降伏しても降伏時の強度を維持するだけのらせん鉄筋を入れるべきだとした。2～3倍くらいの強度が得られる可能性があるのに、何故こう決めたのか理由はよく分からな

い。内村三郎<sup>18)</sup>は「らせん鉄筋の間隔を余り小さくする事は、鉄筋量を増大し、且つ柱心部と外部のコンクリートとの結合を弱める事となるから実用上、無暗に間隔を狭くする事は出来ないが、普通は8cm位から3cm位の間隔とし……土木学会の標準示方書では、軸鉄筋の使用量はらせん鉄筋の使用量の1/3以上と云う規定は、いかにもらせん鉄筋の使用をすすめて居るようであるが、らせん鉄筋は極強付近においては有効に作用するけれども、普通の状態ではあまり有効に働かず、撓度を著しく大きくするから、設計者はよほどこの点を考えなければいけない……らせん鉄筋柱の有効断面積を支柱の全断面積の2/3とすれば、らせん筋を0.74%以上使用しなければ帯鉄筋柱として計算した方が許容荷重が大となり」などと述べている。阪神淡路地震で倒れた阪神高速道路の柱は直径3mもある。直径30cmくらいが普通であった時代の理論(らせん鉄筋より外側の分が利用できないのであまり有効でない)をいつまでも守っているのか。多くの教科書や設計規準には曲げと軸力が働く部材に対しらせん鉄筋の項はない。これはらせん鉄筋による拘束が曲げ引張側には効かないとの推測があったためかも知れないがParkらの実験<sup>14)</sup>では十分な拘束力が得られる事が確かめられている。塑性域にはいるとコンクリートは弾性域より遙かに大きな体積増加を起こすから曲げが働く場合も十分拘束力が働くことは十分予想できるはずだが。

らせん鉄筋はこうして話題にも上らなくなって消えていった。

## 6. あるべき鉄筋コンクリートの設計法

鉄筋コンクリートの計算はコンクリートと鉄筋の弾性率の比  $n$  により力を分担するという仮定で弾性計算を行っている。軸力だけを受ける場合は鉄筋もコンクリートも同じだけ変形し、 $n$  の比に従い力を分担する。従って

$$\sigma_c = P / (A_c + n A_s) \quad \sigma_s = n \sigma_c \quad (1)$$

この他長柱の場合は挫屈を考慮する。しかしオイラーの式によると、 $P = \pi^2 EI / r^2$  で、 $\pi^2 \doteq 10$ 、 $\sigma_y / E \doteq 1/1000$  とすると  $r/l \doteq 1/200$  以下の間隔で、径の約100倍の間隔で横方向に拘束しないと鉄筋は挫屈するとなる。コンシデーレも次のように疑問を提出している。「コンクリートを相互に十分に結びつけるには弱いまたはあまりにも間隔が遠い帯筋や繋ぎ筋で結ばれた縦鉄筋入りコンクリートの圧縮に対する合計抵抗力はコンクリートと鉄が弾性限まで圧縮された時の抵抗力の合計よりも小さくなる」<sup>8)</sup>。

従って十分にらせん鉄筋で拘束した場合以外は鉄筋はないものとするべきである。コンシデーレは挫屈について研究し論文も書いているので<sup>3)</sup>、らせん鉄筋の発想にはこのような縦鉄筋の効果についての懸念もあったようである。

曲げ材の場合、中立軸からの離れに比例した変形をすると仮定する(平面保持)。コンクリートの引張強度は信頼性に劣るとして無視し、引張力は鉄筋だけで負担する。これをまとめると軸力、曲げに対し

$$P/A \pm My/I \leq \sigma_{cs} \quad \text{or} \quad \sigma_s \quad (2)$$

を満足するように設計する。Iの計算にはコンクリートの引張部をゼロとする。Aの計算に鉄筋を無視する方が良いのは圧縮の場合と同じ。

せん断力に対しては先ずせん断応力  $\tau = S/(bjd)$  を計算し、許容せん断強度を超える場合は超過分を腹鉄筋、折曲げ鉄筋で負担するとした。しかし「せん断に対しては、曲げとは異なり、コンクリートと鉄筋でせん断力を分担する。このため、あばら筋や帯筋が降伏してもはっきりした降伏現象は表れず、コンクリートが破壊すると大幅な耐力低下が生じてもらい破壊性状を示す。特に、軸力比が高く太短い柱のせん断破壊は激烈で、これを防ぐには特別に拘束能力の高いせん断補強筋を多量に配置しなければならない……帯鉄筋を増すと強さが増し、粘りも多少増加するが、どの場合も最大耐力以後の耐力低下が著しく、粘りを期待できるほどではない」<sup>13)</sup>。あまり耐震的な構造物が出来そうではない。せん断力も分解すれば引張力なのに、曲げ引張に対してはコンクリートの引張強度を無視したのに、せん断の時は利用してよいのか疑問が残る。

柱の場合曲げ上げ鉄筋はないので帯鉄筋で対処する。柱の帯鉄筋ははじめは計算上は意味のない、単なる組立鉄筋と考えられ、後にはせん断補強筋と考えた。福井地震(1948年)で帯筋の少ない柱が壊れ、十勝沖地震(1968年)では函館大学などで柱のせん断破壊が沢山おきた。当時の帯筋間隔は20cmであった。この反省から1971年に建築のRC設計規準が改定され帯筋間隔は10cmとされた。しかし1967年の土木学会示方書<sup>15)</sup>でははり・スラブについての許容応力度規定はあるが柱についてはその規定さえない。6mm径以上の帯鉄筋を柱の横寸法以下、軸方向鉄筋径の12倍以下、帯鉄筋間隔の48倍以下の間隔で入れるよう規定しているだけである。6mm帯筋に対し28.8cm、9mm筋なら43.2cm間隔に入れば良いことになる。建築に比べて帯筋量がかなり少ない。1980年に道路橋示方書では許

容せん断強度が  $\sigma_c = 240 \text{ kg/cm}^2$  のコンクリートに対し  $7 \text{ kg/cm}^2$  から  $4.5 \text{ kg/cm}^2$  へ下げられた。

軸力とせん断力は別々に考えられた。「部材が曲げと同時に軸方向力をうける場合は、せん断応力度にその影響を加えなければならない」<sup>15)</sup> (118条解説)と小さな文字でつけ加えてあるが多くの人は無視したようである。ちゃんと計算すると以下のようになる。

$$\sigma_{n\max} = (1/2) \sigma \pm \sqrt{\sigma^2/4 + \tau^2} \quad (3)$$

$$\tau_{n\max} = \sqrt{\sigma^2/4 + \tau^2} \quad (4)$$

つまり同じせん断力でも軸力が加わるとせん断応力は増える。しかしコンクリート屋はせん断力だけで壊れる、壊れないを判断した。純粋にせん断力だけが働く場合でも視点を変えれば圧縮と引張が働くというのに。

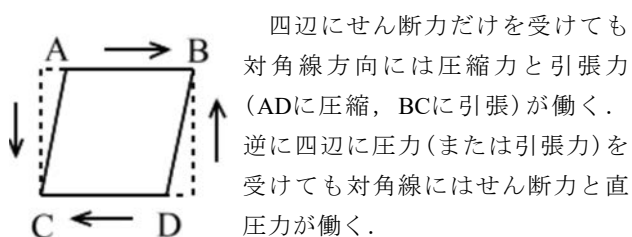
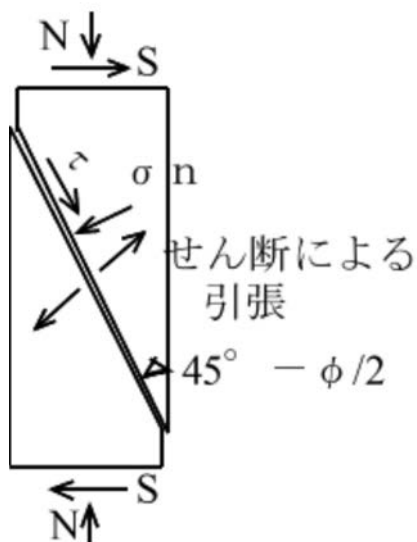


図2. せん断力を受ける部材

せん断力と軸圧縮が同時に働く場合を考えると次の図3に示すようになる。



圧縮強度は斜めの面のせん断強度  $\tau =$

$c + \sigma_n \tan \phi$  により決まる ( $c$ : 粘着力,  $\phi$ : 内部摩擦角)。せん断力  $S$  による引張力が働くと  $\sigma_n$  が減るので強度は落ちる。

図3 圧縮による斜めせん断

せん断力による破壊といわれているのは、斜め引張による引張破壊(桁、版の支点に近い部分)と、柱などで斜め滑り面に働く直圧力  $\sigma_n$  が減少し、圧縮強度が弱くなる圧縮破壊(柱)の二つがあることになる。これをせん断破壊と一括りにして考えているので有効な防止策が出来ないのではないかな。

純せん断の場合でも斜め方向には引張力と圧縮力が生じるし、逆に直角方向に引張り(または圧縮)力だけが働いても斜め方向には法線方向の力  $\sigma_n$  と

これに直角方向のせん断力  $\tau$  が生じることは構造力学の知見から疑う余地がないのに、鉄筋コンクリートの分野ではせん断力  $S$  だけに対する補強を考えていることは非科学的であると言えよう。

桁の斜めひび割れと柱の斜めせん断とは違う事はMohrの応力円を描いてみるとよく分かる。純引張では力の方向に対し直角に切断され、純せん断の時はせん断力と  $45^\circ$  方向の引張で切断される。圧縮では  $45^\circ + \phi/2$  の方向に斜めにせん断される。鉄筋は圧縮でも、引張でも  $45^\circ$  方向に斜めにせん断されるなどがこのMohrの応力円図から分かる。

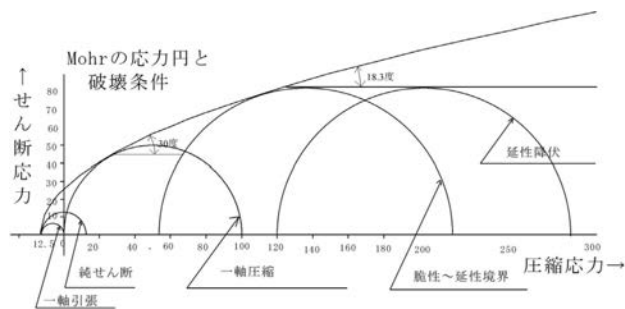


図4 Mohrの応力円と破壊条件

ニュージーランドの示方書(SANZ)は軸力が増えると帯鉄筋、らせん鉄筋を増やすべきだという規定になっている<sup>14)</sup>。それ以外の国ではすべて軸力に関係なくせん断力だけに対する帯鉄筋やフープ鉄筋を考えている。コンクリート界の趨勢は軸力とせん断力の協同作用を考えていないようである。

以上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。圧縮に対して十分にらせん鉄筋などで拘束されていない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。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、設計の結果が現状のものと大きく変わるとともに建設費用もさらに大きな額となる。こうした変更が好ましいかどうかは本質的には安全性と経済性の兼ね合いの問題であり」<sup>19)</sup>と専門家の腰は重い。今まで危険なものをつくっていた、或いは過剰に安全なものをつくっていた場合もあるのではないかな。それを検討するのが学者の使命ではないかな？金に合わせて学説を変えるのでは耐震偽装の犯人より悪い。民間会社で何かの製品を作っていて問題があれば、

品質を下げる事なく、価格をなるべく上げないようにして、努力、工夫を重ねて新製品を作ろうと努力するが、鉄筋コンクリートが専門の学者、技術者はそうはしなかったのだろうか。超概算すると同じ力を負担するならコンクリートは圧縮に対しては1/4の工費で済むが、引張に対しては2.5倍の工費がかかる。しかしらせん鉄筋は圧縮鉄筋より3倍くらい有効である。つまり縦鉄筋をやめて(減らして)その分らせん鉄筋を用いれば、強度が増えるだけでなく、従来とほぼ同じ工費で済み、しかもダンパーの役もするので、じん性や耐震性は大幅に大きくなる。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良い理解が必要である」<sup>9)</sup>。

多くの人が弾性設計に固執した余りらせん鉄筋の利点が見えなくなってしまうようである。地震のような振動問題に対しては強度をあげるだけでなく、バネとダンパーを組み合わせで対処すべきである。日本には五重塔のような素晴らしい耐震構造物があるが、そのような知恵は忘れられてしまったようである。耐震に最適な構造がらせん鉄筋コンクリートではないかと考えられるのにこれを無視してしまったのは残念の極みである。

これらの問題点を考えると、今後は設計に当たって次の点を考慮すべきであろう。

①拘束圧により圧縮強度が増加する。Richartらは  $f_c = f_c' + 4.1 f_{con}$  (5) の実験式を導いている(拘束圧が高いところではこの直線より僅かに小さく、曲線になる)。4.1の係数は  $(1 + \tan \phi) / (1 - \tan \phi)$  にあたり  $\phi = 31^\circ 20'$  に相当する。Griffith理論では  $\sigma_1 = \sigma_3 / 8$  で、これにより計算すると  $\phi = 30^\circ$  になる。 $\sigma_1$  は実測ではもっと小さい。モールの式は  $\tau^n = A(\sigma + \sigma_1)$   $n = 1.5 \sim 2$  と修正する必要があるようである。

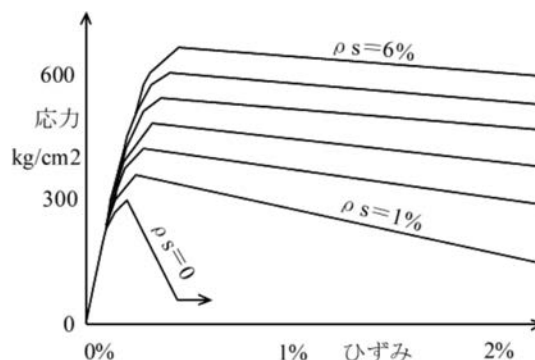
②コンクリートがぜい破壊すればたわみ性はなく危険である。Newmark理論によれば降伏後も十分なたわみ性があることが必要である。茂木の式とGriffith式を組み合わせると

$$\sigma_3 = 0.467128 \sigma_c \quad (6)$$

以上の拘束圧で延性降伏する。つまり延性降伏させるためにはコンクリート強度の47%以上の拘束

を加える必要がある。このとき三軸強度は一軸強度の2.055倍になる。現場ではコンクリート強度のバラツキを心配してこの目標強度より高い強度のコンクリートを作ることが多いので、拘束圧もこれより十分高くする必要がある。

脆性破壊では加えた力によるエネルギーは破壊面を作るのに使われるが、拘束圧を加えるとかなりの部分が摩擦に使われ熱となり、破壊に使われる分は減り、ぜい性破壊ほど急激に強度低下しない。このためParkらに示すように拘束圧を加えると降伏後の強度低下の程度がゆるやかになる。



らせん鉄筋で拘束された圧縮コンクリートの応力－ひずみ挙動に関する修正 Kent and Park モデル

図5. 鉄筋比  $\rho_s$  と降伏後の強度低下

阪神淡路地震の後全国の鉄道や道路の高架橋の柱が鉄板や鉄筋を巻き立てて補強された。そのためその後起きた中越地震や東日本地震での高架橋などの地震被害は少なかった。横拘束の効果は明らかだと思われる。工事費や施工性などを考えると新しく作る時はらせん鉄筋を用いるに限られると思われる。

しかし次のような文を読むとまだコンクリート学者の頭は本当にコンクリートの設計を見直す気にはなっていないと見られる。

「コンクリート橋脚における構造細目については、現行(昭和61年以降)の土木学会コンクリート標準示方書の規定、すなわち、

- ① 耐震にとって重要な部材では、帯鉄筋比を0.2%以上とするとともに、せん断力に対する安全率を、曲げモーメントのその1.2倍から柱幅の高さの範囲では、さらにその1.25倍とする。
- ② 帯鉄筋の端部は135°以上折り曲げて、内部のコンクリートに十分定着するか、あるいは連続したらせん鉄筋形式とする。
- ③ 引張主鉄筋の引張部定着、いわゆる段落としは、同一断面では全引張主鉄筋の1/2以下とし、計算上不要となる点から部材の有効高さを延長し、そこから定着長以上を延ばす必要がある。その間

の設計せん断耐力は、設計せん断力の1.5倍以上としなければならない、

で基本的に問題はないと思われる」<sup>20)</sup>。

そうだろうか。まだ根本的な問題がたくさん残されて居るのではないか。このような視点からあるべき設計方法を見てみる。

①曲げと圧縮が働く場合には挫屈を考えないという現行規定はおかしい。ω法などを用い挫屈を取り入れるべきである。ここにωは座屈係数(Knickzahl)と呼ばれ、細長比λの関数として定める。このような形式の設計法をω-法(ω-Verfahren)と言う。この他荷重の偏心、施工誤差などを加える事も考えるべきであろう。偏心圧縮柱に対しては次のような直観的に導かれた設計公式を用いる。

$$\omega P/A + My/I \leq \sigma_{ca} \quad (9)$$

コンクリートの引張を無視するとコンクリートの圧縮側の応力が危険側の計算になる場合は引張強度を考慮した計算もしてみる必要がある。

②曲げ圧縮と単純圧縮の違い 許容圧縮応力度 $\sigma_{ca}$ と許容曲げ圧縮応力度 $\sigma_{ba}$ と異なるときは

$$\omega P/A + (\sigma_{ca}/\sigma_{ba})(M/W) \leq \sigma_{ba} \quad (10)$$

などで用いて計算する。コンクリートは曲げ圧縮と純圧縮では1.5~2.0の差があり、これを考慮すべきである。らせん鉄筋などで十分な拘束力があるときは曲げ圧縮と純圧縮の差はない。

③せん断力とせん断応力をはっきり区別すべきである。鉄筋コンクリートの破壊は軸力、曲げモーメント、せん断力より鉄筋の補強効果を考慮した応力を求め、モールの破壊則に従い検討すべきである。そのためには軸力、曲げモーメント、せん断力が働く場合について(FEMなどを用いてもよい)応力を計算する。鉄筋は主応力に対し斜めになるので、これを考慮する。

④らせん鉄筋による拘束でコンクリートの強度が増加する。曲げ引張側では拘束力が多少少ないがそこでは圧縮力も小さいので問題ない。

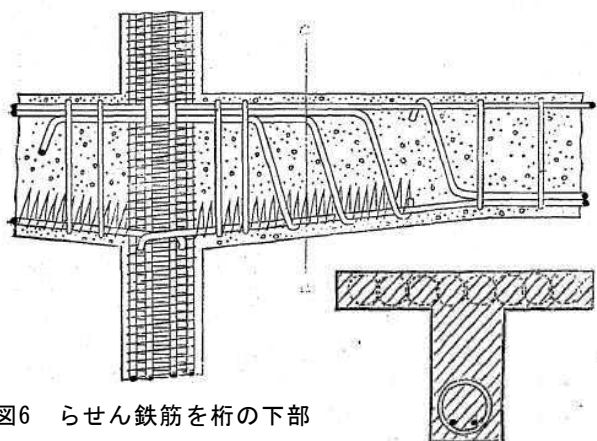


図6 らせん鉄筋を桁の下部や上部に用いた例

⑤らせん鉄筋を柱だけに用いるのではなく梁・桁の圧縮応力を受ける側にも用いる。勿論塔、吊橋や斜張橋の主塔、アーチ、トラスなどにも用いる。

⑥ぜい性破壊は危険であるから鉄筋の降伏以前にコンクリートのぜい性破壊がないかを相当大きな安全を見てチェックする(従来曲げ破壊よりせん断破壊が先に起きない事をチェックしていたが、それでは不十分であるからこの様に改める)。その上で強度計算をした後強度を保ったまま、Newmarkの要求する変形に十分耐えられるか?たわみ性を検査する。らせん鉄筋で十分拘束し延性降伏をする場合は鋼材と同じ安全率を適用する。

⑦地震により大きな力を受ける部分は繰り返し荷重でコンクリートの強度低下がない程度のらせん鉄筋を用い繰り返し荷重に対する強度を確保する。(少なくともコンクリート強度の50%以上の拘束圧を確保する)。Considère<sup>8)</sup>やRichart<sup>22)</sup>は載荷試験をした後でらせん鉄筋を外しコンクリートの試験をして当初の半分~84%の強度があることを確認している。しかし100%でないことはまだ拘束力が不足なのか、途中で引張力が働くためか、脆性破壊か延性降伏かの判断基準に問題があるのか今後研究の必要がある。

⑧重要構造物には帯鉄筋柱は用いない。丸または八角形の柱に円形らせん筋を用いる。X方向とY方向で必要強度が違うときは長八角形の柱にし、インターロッキングフープ筋を用いる。帯鉄筋や角形フープ筋でも拘束はできるがらせん鉄筋にくらべ効率が半分しかないと言われている<sup>17)</sup>。帯筋は継手が必要なので、余分な鋼材がいる。施工が困難で実際には殆ど役に立っていないと考えられる。「今回被災した構造物が設計された昭和40年代前半においては、必ずしもこれらのことは明確に意識されてはいなかったようである。せん断補強鉄筋量は現行の基準と比較すると少なく、せん断補強鉄筋が十分な定着を確保できる形状にはなっていなかった。すなわち、柱のせん断補強鉄筋として帯鉄筋φ9mmが柱の上端、下端では150mmピッチ、中間では300mmピッチで配置されていた。これは当時の基準を満足するものである。ただし、帯鉄筋の形状は設計図面は135°フックになって居るが、実際には直角フックであった<sup>21)</sup>。「鉄筋コンクリート標準仕様書では……すでに昭和4年より……“鉄筋の末端部は、かならず之を折曲げ、角度は180度、内法寸法は鉄筋小径の3倍以上とす”ただし“フープ、スターラップにあっては、之を135度とする”とある。しかし、135度に加工した帯筋、あるいはあばら筋を柱(またははり)に組み立てる

となると、容易ではない。特に柱筋の本数が多く、四すみ部に接近して柱筋が配置されているときは、135度の折曲げ角の帯筋は、取り付けることができない……といった理由で、折曲げ角を90度加工とすることが、施工側・監督側でも、暗黙の了解事項として推移してきたというのが実情であった<sup>13)</sup>。計算や理論で優れたものでも実際に施工できなければ駄目である。

⑨らせん鉄筋にPC用鋼材(13,000～16,000kg/cm<sup>2</sup>の強度)を用いれば、さらに大きな拘束圧を加えることができそうである。大きな高い柱では2組のらせん筋を継手位置をずらして用いるなどの工夫をする。縦筋にプレストレスを入れてコンクリートに引張力が働かないようにすれば更に耐震性が向上すると考えられる。

## 7. まとめ

技術の発展を見ていると理論家、実務家、数学が得意な人、実験が得意な人、設計や施工の専門家など色々な人の協力があって技術は初めて発展する、規準、示方書は技術の水準を上げるのに役立つことが分かる。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。

ここでは新しい設計法を提案しようとするものではない。鉄筋コンクリート発展の黎明期に生まれた素晴らしいアイデアがその後の発展、専門化、規格化、数値化の中で埋もれてしまったのではないか、それを惜しみ最近の諸学問の進歩(特にNewmarkの理論)と組合わせて見直し、復活させようと試みたものである。まだ不完全なもので実施するには詳細な研究が必要であるが、さらなる耐震性の向上に資すると考えられるので、ご検討をお願いするものである。

## 参考文献

- 1) 町田篤彦：鉄筋コンクリート構造物の耐震設計法に関する研究の現状, 土木学会論文集, No.366, 1986.2
- 2) 川島一彦：土木構造物の耐震技術の現状と展望, 土木施工, 2005.1
- 3) Timoshenko：材料力学史, 鹿島出版会, 1982(原著は1953)
- 4) 総合材料強度学講座1, 材料強度学総論, オーム社, 1984
- 5) Frank E. Richart, Anton Brandtzaeg, Rex L. Brown : A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, 1928
- 6) 茂木清夫：地球科学8 岩石力学と地震, 1978, 岩波書店
- 7) Kent, Park : Flexural members with confined concrete, J of ST. Proc. of ASCE, 1971, July
- 8) Armand Considère(traslated by Leon Moisseiff, 1906): Experimental reseach on reinforced concrete, 原書は"Considère, A. "Résistance à la compression du béton armé et du béton fretté", Génie Civil, 1903.
- 9) Charles F. Marsh, William Dunn : Reinforced Concrete, 1909
- 10) J. Sutherland, D. Humm & M. Chrimes : Historic Concrete background to Appraisal, 2001, Thomas Telford
- 11) Lewis M.B.: History of reinforced concrete in Australia, 2004. Cement and Concrete, Reinforced Concrete
- 12) ヤコブ・フェルト:建設事故の記録, 彰国社, 1972(原著は1968), p328
- 13) 耐震構造の設計, 建築学会関東支部, 1981, p89
- 14) Priestley, Park & Potangaroa: Ductility of spirally-confined concrete columns, J of ST, J of ASCE, 1981, January
- 15) 土木学会コンクリート標準示方書1967
- 16) 鉄筋コンクリート終局強度理論の参考, 土木学会, コンクリートライブラリー, No.34, 1972
- 17) 小坂義夫, 森田司郎:鉄筋コンクリート構造, 丸善, 1975
- 18) 内村三郎：鉄筋コンクリート工学, 共立全書, 1952
- 19) 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
- 20) 岡村甫:コンクリート構造物の被害特性, 土木学会誌, 1995.6
- 21) 北後征雄：コンクリート構造物の被害と復旧(鉄道構造物), 土木学会第30回夏期講習会 阪神淡路大震災・コンクリート構造物を考える, 1996年
- 22) Frank E. Richart. Anton Brandtzaeg. Rex L. Brown :The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression, 1929
- 23) A.S.Veletsos & N.M. Newmark:Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions, 2nd WCEE, Tokyo, 1960

(2018. 4. 9受付)