

《女川2「ひび割れ・剛性低下」問題 その2-2》

本稿では、《その2-1》「初期剛性低下問題」の「1. 剛性」に続いて、素人には“超難題”である「2. 強度への影響」について‘それなり’に検討してみます。

【2 初期剛性低下問題】

☆ 2. 強度への影響 ☆

東北電力は、2.21 協議会資料-3-2<17 頁>で、マスコミ等の「耐震強度7割低下」報道は「誤認」で、「鉄筋が健全であれば、地震に対する抵抗する力（強度）を失うことはない」として、「初期剛性」が低下＝原子炉建屋等が「変形し易く」なっているも、安全上の問題（強度への影響）はないと断言し、同様に3.24 第11回検討会資料-3<25 頁>では「大きなひずみで耐えられる力は変わらない」と述べています（*前号指摘の25頁「2階の図」脱落は勿論ケアレスミスで、HPで訂正済み）。

3.24 資料-3<41 頁以下>の‘東北電力ミニミニ解説’にあるように、「鉄筋コンクリート構造は、コンクリートはもともと引張力に対して弱いため、引張力を鉄筋で、圧縮力をコンクリートで負担するような複合構造物」なので、「コンクリートのひび割れは引張力が作用することにより発生するが、ひび割れ発生後は鉄筋が引張力を負担するため、鉄筋が健全であれば、ひび割れが生じても直ちに健全性を損なうことはなく、地震に対して抵抗する力を失うことはない」として、解析の結果、3.11・4.7地震のいずれでも「鉄筋は弾性範囲」（各3割・4割の余裕あり<28,29 頁>）で健全だったから問題なし、としています。

そして、「大きなひずみで耐えられる力は変わらない」という根拠は1.17 資料1-3<26~35 頁>に示されており、そこでは、文献レビュー・コンクリート強度の確認・耐震壁実験などを基に検討した結果、「初期剛性」が低下しても‘終局耐力に影響しないこと等を確認’した、としています。

この点の検討は後述することにして、その前に前号原稿の補足をします。

《東北電力が「概ね弾性範囲」にこだわる理由》

3.24 資料-3<42 頁>では、地震の「水平力により耐震壁に変形が生じると、引張力によって…ひび割れが発生」し、「変形が増大すると、ひび割れ幅も増大」するので、その「ひび割れ幅により地震時の被災度を評価できる」としています。

1.17 資料1-4 や3.24 資料-3【参考資料】に詳細に示された地震後点検（目視）で確認されたひび割れは、いずれも地震後の「残留ひび割れ」で、耐震壁の地震力による変形が完全に元に戻らない（弾性範囲から外れた＝塑性変形した）からこそ「残留」しており、「被災度を評価できる」のです。3.24 資料-3<23 頁>で東北電力自身が「力の解放後には変形が残らず元に戻ることができる範囲」が「弾性範囲」だと明言して

いますので、残留ひび割れが（数本程度ではなく）多数発生している状態を「概ね弾性範囲」と表現することは、誰が見ても不適切だと思います。

でも、東北電力はなぜこの表現に“こだわる”のでしょうか。

『実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則（設置許可基準規則）』第4条1項で、設計基準対象施設は「地震力に十分に耐える」ことが求められ、同第4条3項で、耐震重要施設は「基準地震動による地震力」に対し「安全機能が損なわれ」ないことが求められます。

そして、同規則の『解釈』第4条1項の「別記2」では、

第4条（地震による損傷の防止） <以下は抜粋。下線は筆者>

1 第4条第1項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、ある地震力に対して施設全体としておおむね弾性範囲の設計がなされることをいう。…上記の「許容限界」とは、必ずしも厳密な弾性限界ではなく、局部的に弾性限界を超える場合を容認しつつも施設全体としておおむね弾性範囲に留まり得ることをいう。

3 第4条第1項に規定する「地震力に十分に耐えること」を満たすために、耐震重要度分類の各クラスに属する設計基準対象施設の耐震設計に当たっては、以下の方針によること。

一 Sクラス（津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）

- ・弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えること。
- ・建物・構築物については、…発生する応力に対して、建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とすること。

6 第4条第3項に規定する「安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない」ことを満たすために、基準地震動に対する設計基準対象施設の設計に当たっては、以下の方針によること。

一 耐震重要施設のうち、二以外のもの

- ・基準地震動による地震力に対して、その安全機能が保持できること。
- ・建物・構築物については、常時作用している荷重及び運転時に作用する荷重と基準地震動による地震力との組合せに対して、当該建物・構築物が構造物全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し、建物・構築物の終局耐力に対し妥当な安全余裕を有していること。

<中略>上記の「終局耐力」とは、構造物に対する荷重を漸次増大した際、構造物の変形又は歪みが著しく増加する状態を構造物の終局状態と考え、この状態に至る限界の最大荷重負荷をいう。

とされています（東北電力の『用語』を理解しやすいよう、多めに引用）。

すなわち、「Sクラス」施設が‘地震力に十分に耐えるかどうか’は（厳密な「弾性限界」ではなく）おおむね弾性状態に留まる範囲の「許容限界」で判断し、さらに「耐震重要施設」が‘安全機能を維持できるかどうか’は変形・歪みが著しく増加する終

局状態に至る限界の「終局耐力」で判断してよい、ということのようです。だから、東北電力は、前者を満たしていることを強調するため、(意見聴取会では問題視された)「概ね弾性範囲」という表現に固執するのです。また、**3.24 資料-3**<27 頁>では、最大応答せん断ひずみ (3.11 地震： 0.63×10^{-3} 、4.7 地震： 0.62×10^{-3}) が評価基準値 (2.0×10^{-3}) 以下だから、「終局耐力 (耐震壁が負担できる最大の強度) に対し妥当な安全余裕を有し、機能保持限界との対応も考慮された評価基準値以下であった」と記載しているのです。【注：この表現は、栗田委員の指摘を受け、6.8 第 12 回検討会資料-4 で修正。前号の最後に触れたように、東北電力は表現に関する“指摘”は(本質に無関係なため) すぐ受け入れるのです。でも、各委員は‘表現を完璧にする’ことに傾注せず、もっと「安全性の中味の検討」を行なうべきです。】

そして、「コンクリート」が多数ひび割れて「耐震壁」が弾性範囲を超えたことは明らかのため、「概ね弾性範囲」と言わざるを得ないものの、その表現は“印象が悪い”と考える東北電力は、「鉄筋のみで負担できる弾性範囲の耐力」=『弾性限耐力』を持ち出して、オペフロ上部でも「鉄筋については弾性範囲」であると“強調・印象操作?”しているものと思われまます<**3.24 資料-3**: 23、28-29 頁>。

でも、『鉄筋コンクリート造構造物の耐震性能評価指針(案)・同解説』(日本建築学会 2004) によれば、「修復限界 I」の耐震壁の残留せん断ひび割れ幅 0.2~0.5mm で鉄筋は「わずかに降伏する程度」<*弾性範囲を超えることを「降伏」といい、「弾性範囲=降伏していない」、「塑性域に入った=降伏した」となります>で、「修復限界 II」の同幅 0.5~1.0mm では「鉄筋の塑性化がやや進展した程度」と述べ、いずれの場合も鉄筋は(“僅か”であっても)「降伏・塑性化している」と評価することにしてありますので<74-75, 218, 344 頁>、東北電力の「鉄筋については弾性範囲」<**3.24 資料-3**>という主張は、残留ひび割れ幅との整合性からも、にわかには信じられません。

《女川原発コンクリート「高強度」の謎》

さて、いよいよ **1.17 資料 1-3**<26~35 頁>で、初期剛性が低下しても‘終局耐力に影響しないこと等を確認’したことについて、検討します。

まず、同資料<31 頁>では、3 階耐震壁から抜き取ったコア(供試体) 6 本の圧縮強度を示し、すべて設計基準強度 (32.4: 単位省略) を上回る値 (①45.9 や②56.6) が得られたとして、初期剛性低下の主な要因は「コンクリート材料の圧縮強度の低下によるものではない」と説明しています。でも、建設当初の強度(データ未公表) が今回の測定値より大きく (①50 とか②60 とか)、本当は強度

圧縮強度、静弾性係数試験結果(平成24年2月24日試験)
括弧内は設計値に対する比率を示す。
(設計値 設計基準強度:32.4N/mm²、静弾性係数26.5kN/mm²)

	①-1	①-2	①-3	平均
圧縮強度 (N/mm ²)	46.9 (1.45)	46.4 (1.43)	44.3 (1.37)	45.9 (1.42)
静弾性係数 (kN/mm ²)	30.8 (1.16)	31.7 (1.20)	29.9 (1.13)	30.8 (1.16)

	②-1	②-2	②-3	平均
圧縮強度 (N/mm ²)	55.3 (1.71)	59.5 (1.84)	54.9 (1.69)	56.6 (1.75)
静弾性係数 (kN/mm ²)	33.2 (1.25)	34.2 (1.29)	33.1 (1.25)	33.4 (1.26)

低下が生じていた可能性もありますから、東北電力の考察は根拠不足です。

それ以上に筆者が気になったのは、「設計基準強度を上回る値が得られた」ことに東北電力が‘安心し切っている’ことです。

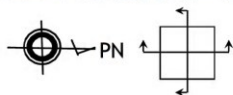
『原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説』（日本建築学会 2005）によれば、普通コンクリートの設計基準強度 F_c は基本的に「18~48」とされ<35, 54-56 頁>、発電用原子炉施設が適用すべき「JASS 5N」（建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事（2001））で、「36を超え 48 以下の範囲は高強度コンクリート」として別節を設けて記述しており、材料、調合などに特に注意を要する」とされ、原発のように現場で打設されるマスコンクリートに「高強度コンクリートのように単位セメント量の多いコンクリートを用いた場合、水和熱の上昇による（有害な）温度ひび割れを防止することが困難になる」ことなどから「 F_c の上限値を厳しくしている」<54-55 頁>ということなどを踏まえ、東北電力が F_c を（36 以下の）「32.4」と設定したものと思われます。

ところが、今回の実測値は「①45.9、②56.6」ですから（建設当初の推定実強度でも、2・3号機とも「41.7」とのこと：参考資料1の10頁）、普通コンクリートの「18~36」からは完全に外れ、②は規準の F_c 上限「48」をも遙かに‘上回る値’となっているのです。そして、その“異常”な数値に、東北電力の技術者が疑問を感じない（か口をつぐんでいる？）ことこそ、大きな問題だと思います。

これらの異常値は、2号機建設時点で単位体積重量【注】やセメント量などの品質管理（発注・施工）が極めて不十分・杜撰だったことを証明するもので、このような「高強度」であることが、今回の「初期剛性低下」や「ひび割れ（せん断・乾燥収縮）」などの様々な問題を引き起こしている可能性も否定できません（1号機でも、 F_c 「22.1」に対し、2005.8.16地震後の実測で原子炉建屋は「コア供試体 40.0-53.9」：参考資料2の45, 54枚目。このときから筆者は女川原発の「高強度」に疑問を感じていました）。さらに言えば、地震応答解析に用いた「コンクリートの物性値（設計値）」<3.24 資料-3：24 頁>自体がそもそも“実態と大きく乖離！”しているため、解析結果（剛性補正後も）の妥当性に疑問を投げかけるものですから、それらについての詳細な説明・検討結果を検討会などにきちんと示す必要があると思います。

・シミュレーションモデルを用いた応答評価（解析モデル）

観測記録と整合するシミュレーションモデルを作成し、その応答結果に基づいた建屋の健全性評価を実施した。
従来よりも固有振動数が低下していることから、剛性を補正した。



コンクリートの物性値（設計値）
設計基準強度：32.4N/mm ² (330kgf/cm ²)
ヤング係数：2.65 × 10 ⁴ N/mm ² (2.70 × 10 ⁶ tf/m ²)
せん断弾性係数：1.14 × 10 ⁴ N/mm ² (1.16 × 10 ⁶ tf/m ²)

なぜなら、東北電力自身が、今回のような初期剛性低下は、「女川の他の建屋でも認められる現象である」として、「共通して使用しているコンクリート材料が要因である可能性が高い」と考えて、いろいろと検討を行なっているのですから<1.17 資料1-3：27 頁>。

【注：規準8頁では、 F_c 「36以下」なら鉄筋コンクリートの単位体積重量は「24（単

位省略)」、 F_c 「36~48」なら単位体積重量は「24.5」とされ、目標 F_c 値に応じて骨材やセメントの量・配合比を適切に調整する必要があることが分かります。】

《本当に「鉄筋は弾性範囲」＝降伏していない？》

次に、初期剛性低下が終局耐力に影響しないことの“最大の根拠”である

1.17 資料 1-3<34 頁>を見てみると、まず、損傷度Ⅱのグラフ（緑）が終局耐力付近で消えていますが、これも‘描き忘れただけ’でしょうか？（試験体の何らかのトラブルでデータが得られなかったのなら、その原因究明が新たな知見をもたらす可能性がありますので、注書きして欲しいものです）。

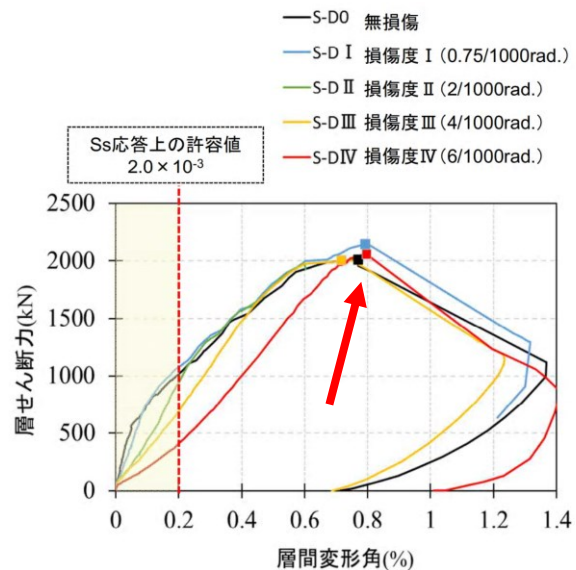
それはともかく、確かに実験結果では、（直前加振による）ひび割れに起因する初期剛性低下（損傷度）が終局耐力（強度）に大きな差をもたらしていないことが示されます（赤矢印）。

でも、試験直前の“新鮮なひび割れ”と、2003. 5. 26 や 2005. 8. 16 地震で生じた“古いひび割れ”とで、経年劣化＝鉄筋腐食（断面減少）による強度低下への影響に違いはないのでしょうか。

また、実際の建屋（上層階）には多くの機器・配管（や使用済み燃料プールなど）が設置されているはずですが、初期剛性低下によって建屋・壁・床が揺さぶられやすくなったこと＝多くの機器・配管も大きく揺さぶられやすくなったことに関する‘原発システム全体への悪影響’についても、きちんと説明して欲しいと思います。

さらに、女川原発で特に多いとされる乾燥収縮ひび割れ（No.265 参照：上記「高強度」のため？）に関して、収縮によりコンクリートにはひび割れが発生する一方、コンクリート近傍にある鉄筋は局部的に強く引っ張られるため、「構造安全性としての鉄筋降伏に対する抵抗性（鉄筋降伏抵抗性）」が問題となり、「収縮ひび割れの発生領域に存在する鉄筋の引張応力が降伏応力に達すると…それ以降のコンクリートの…たわみの増大を鉄筋によって制御することができなくなり、ひいてはひび割れ幅の制御ができなくなる」し、「耐力壁では、ひび割れ幅はせん断力の伝達に影響を及ぼすため、ひび割れ幅の制御ができなくなる鉄筋の降伏は大きな問題となる」とされています<『鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説』（日本建築学会 2006）：31, 34-35 頁。*同指針は原発には直接適用できませんが>。

そして、「鉄筋降伏抵抗性を確保するための鉄筋の許容応力は降伏点とし、鉄筋降伏抵抗性は、設計ひび割れ幅を 0.3mm 以下とすることで一般的に確保されるものとする」



事前に損傷を与えた各試験体の荷重－変形関係

<39-40 頁>とされていますが、これを逆に考えれば、(乾燥収縮が原因でなくても) 0.3mm 以上のひび割れが生じた場合は‘鉄筋降伏抵抗性に影響を及ぼしている可能性がある’ということになり、女川原発では以前の地震に加え、3.11・4.7 地震の揺れによる応力が鉄筋に加わったと考えられることから、東北電力のように、(「高強度」を考慮しない) 解析結果だけから「鉄筋は弾性範囲」にあり、鉄筋が健全だから耐震壁の終局耐力に影響はない、と断定することは危険なのではないでしょうか。

以上、本稿の課題は素人には荷が重く、ごまめの歯ぎしり・的外れな考察となったかもしれませんが、‘力尽くさずして挫けることを拒否する’思いでなんとかまとめました。あとは検討会などの専門家・有識者にお任せしたいと思います。

<時間も力も尽きて「完」>

◎参考資料

- 1 2005.12.22 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 耐震・構造設計小委員会 (第3回) 資料3-4
- 2 2006.5.31 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 耐震・構造設計小委員会 (第4回) 資料4-5 別紙8