

柏崎刈羽原子力発電所  
新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る  
点検・評価について

(せん断ひび割れ発生時の応力とひずみの関係)

【改訂版】

平成 21 年 12 月 18 日

東京電力株式会社

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造の耐震壁にせん断力が作用した場合のせん断力とせん断ひずみを考えた際に、現在実施している評価では設計配筋量のみで負担できる短期せん断応力度との比較の他に参考として、せん断ひずみ  $0.25 \times 10^{-3}$  という値を用いている。これは、せん断ひずみ  $0.25 \times 10^{-3}$  に対応するせん断応力が  $2 \sim 3 \text{N/mm}^2$  程度、その時の剛性低下率は、既往の実験結果から、コンクリートの初期剛性に対して  $0.9$  程度<sup>[1]</sup>であり、ほぼ弾性状態にあると考えられる。

しかしながら、これまでの審議の中で、鉄筋コンクリート構造の耐震壁に発生しているひび割れの点検結果と、シミュレーション解析に基づく構造評価との間の関係が分かりにくいところのご指摘をいただいているところである。

これまでにいただいたコメントは、以下の2点に大別されるものと考えている。

- ① シミュレーション解析に基づく構造評価において、ひび割れが発生する目安値として  $0.25 \times 10^{-3}$  というひずみの値を採用している。一方で、例えばこの目安値の半分程度の解析結果であるにも関わらず、現場の点検結果ではひび割れが確認されている。この両者の関係が矛盾したことを言っているようで分かりにくい。
- ② シミュレーション解析に基づく構造評価においては、ひずみの数値比較とは別に各階の平均せん断応力との数値比較についても行っているが、この時の指標としているのは「鉄筋のみにより負担できるせん断応力」であり、コンクリート寄与分は基本的に無視して評価を行っている。一方で、例えば鉄筋量が比較的少ないタービン建屋や海水熱交換器建屋の場合には、シミュレーション解析による平均せん断応力がこの「鉄筋のみにより負担できるせん断応力」とほぼ同じかまたはわずかに上回る階が確認されているものの、コンクリートの応力寄与分も考慮に入れた復元力特性では第一折点を超えていないので弾性範囲であるという評価結果があったが、この説明は分かりにくい。

以上のコメントに対して、鉄筋コンクリート構造の耐震壁に強い地震力（水平力）が作用した場合の応力-ひずみ関係の変化について、以下に示すように整理を行うこととした。

- a. 鉄筋コンクリート構造の基本的構造及び設計の考え方
- b. 耐震壁の剛性変化とひび割れの関係
- c.  $0.25 \times 10^{-3}$  というひずみの値をひび割れ発生目安値として採用した経緯
- d. 原子炉建屋の耐震壁を対象に過去に実施した実験結果と  $0.25 \times 10^{-3}$  という目安値との関係
- e. 鉄筋が比較的少ない建屋の耐震壁の評価内容について
- f. コンクリートの収縮等に伴う存在応力について

[1]：日本建築学会「建築構造物のリミットアナリシス」、1963年

## 2. 鉄筋コンクリート構造の基本的構造及び設計の考え方

鉄筋コンクリート構造は、鉄筋とコンクリートを組み合わせた複合構造形式で、お互いの長所を生かし、短所をカバーするものである。

### ○コンクリートの短所

圧縮力には比較的強いが、引張力はほとんど期待出来ない。この短所をカバーするために鉄筋が引張力を負担することになっている。

### ○鉄筋の短所

鉄筋は錆びやすいという短所を、アルカリ性のコンクリートの中に入れることでカバーしている。また、鉄筋は火災時等の高温時には強度が弱くなるが、水分を含んだコンクリートの中に入れることで温度変化が緩和される（建築物としての耐火構造）。なお、鉄筋とコンクリートの線膨張係数はほぼ同じであるため、高温時にお互いに分離することは無いという特長を有している。

以上のような構造特性を踏まえ、原子力発電所の耐震壁の設計においては、次のような考え方を採用している。

### ○短期許容応力度設計（静的地震力などに対して）

地震力を作用させた場合に壁に生じるせん断力とその他の荷重を組合せ、その発生応力に対しては全て鉄筋で負担させる設計とし、使用する鉄筋の短期許容応力度に基づき必要鉄筋比を算定した上で、それを上回る設計配筋を決定する。

### ○終局耐力及び変形能力の確認（基準地震動 $S_s$ に対して）

耐震壁の復元力特性（せん断応力-ひずみ関係）を仮定した上で弾塑性解析を行い、その結果算定されたひずみが許容値である  $2 \times 10^{-3}$  よりも小さいことを確認する。この復元力特性を仮定する段階では、コンクリートの応力負担分と鉄筋の応力負担分を取り入れている。

### 3. 耐震壁の剛性変化とひび割れの関係

個々の鉄筋コンクリート構造の耐震壁（以下、「RC耐震壁」とする）にせん断力が作用した場合の平均的なせん断応力とせん断ひずみの関係の模式図（標準的なRC耐震壁を想定）を、図1に示す（図1は弾塑性解析で仮定する復元力特性と類似した形状であるが、第一折点以降は一致していないので注意のこと）。耐震壁にせん断力が作用した場合、コンクリートに目視確認できるようなせん断ひび割れが発生するまでは、コンクリートでほとんどのせん断力を負担する。せん断力がさらに増加した場合には、コンクリートのせん断ひび割れが発生し、このひび割れによる変位量の分だけ鉄筋が伸びることにより応力負担をすることになるので、コンクリート側から鉄筋側に引張応力が配分され、せん断力は徐々に鉄筋で負担され、その後鉄筋が降伏するメカニズムとなる。鉄筋が降伏した以降については、RC耐震壁全体の剛性は低下するものの健全な部分との応力再配分を繰り返しながら負担するせん断力は増えていき粘りのある構造特性を示すこととなる。

なお、図1には模式的なせん断応力とせん断ひずみの関係を太い折線で示しているが、実際の実験等から得られる実際の両者の関係をやや細い曲線状の線で示す。模式的な折線の第一折点は  $0.2 \times 10^{-3}$  程度であるが、実際の剛性変化はそれ以前から始まっていることが多く、RC耐震壁の評価上は第一折点まで直線で近似しているということであり、第一折点のひずみまでひび割れが発生しないということの意味している訳ではない。

また、ここで注目している第一折点については、軸応力度とコンクリート圧縮強度によって数値が変動するが、図中に示しているような標準的なRC耐震壁の場合には、ひずみが  $0.21 \times 10^{-3}$ 、せん断応力が  $2.5 \text{ N/mm}^2$  となる。

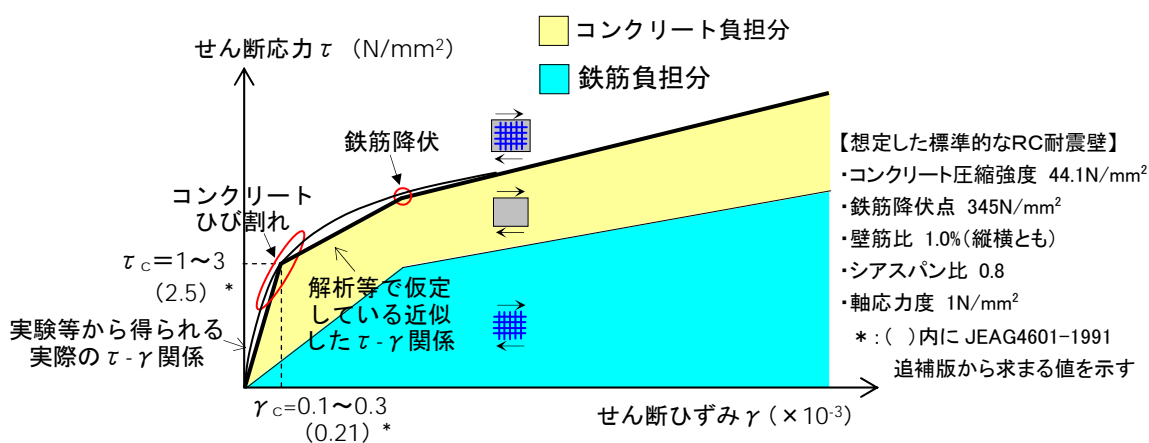


図1 RC耐震壁の平均的なせん断応力とせん断ひずみの関係の模式図  
(標準的なRC耐震壁を想定)

一方、BWR Mark II 改良型原子炉建屋の4層内部ボックス壁を模擬した水平加力実験<sup>[2]</sup>によると、最下層から2層分の平均変形角  $0.5 \times 10^{-3}$  の加力ピーク時には最下層にせん断ひび割れが既に発生していることが図2から分かる。せん断ひび割れが発生した最下

層のせん断応力とせん断ひずみの関係を、図3に示す。実験結果だけから明確な剛性変化点（第一折点）を読み取るのは難しいが、復元力特性評価式から求めている $\tau_c$ の点よりも前から穏やかな剛性変化が起きていることが分かる。また、図4に示すせん断応力と全体変形角の履歴性状を観察すると、全体変形角 $3 \times 10^{-3}$ においても、残留ひずみのほとんどない紡錘形の安定した履歴性状を示していることが示されている。

[2] 鈴木ほか：原子炉建屋模型の水平加力試験（その1）、（その2）、日本建築学会大会梗概集、pp. 1839-1841、昭和55年

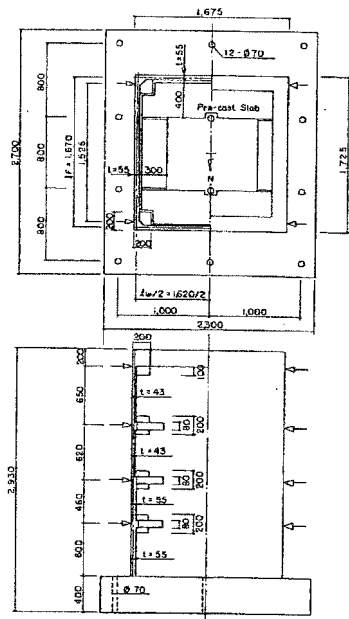


図3 IB試験体形状

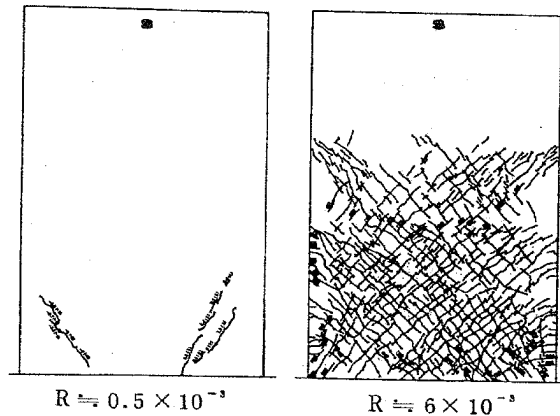


図8 IBウェブのきれつ状況

図2 試験体形状とウェブ壁のひび割れ状況<sup>[2]</sup>

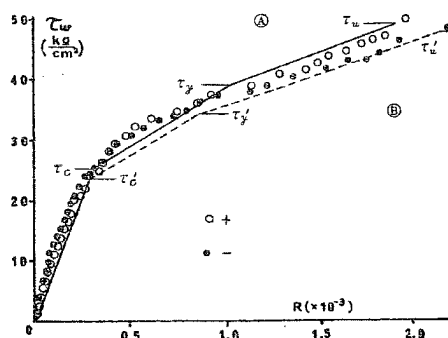


図11  $\tau \sim R$ s 関係 (IB 1層)

図3 最下層のせん断応力とせん断ひずみの関係<sup>[2]</sup>

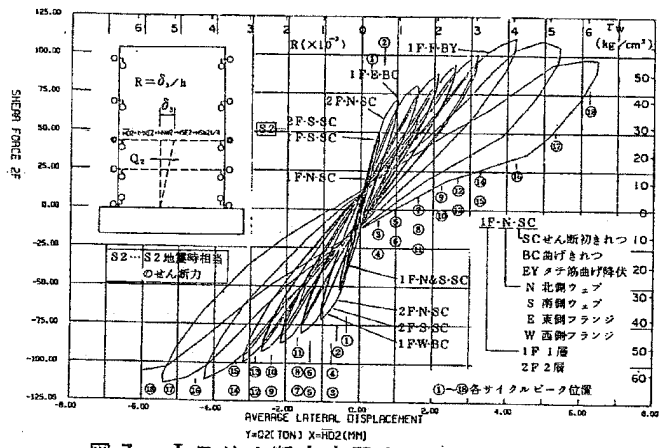


図7 IBせん断力水平変形関係

図4 せん断応力と全体変形角の履歴性状<sup>[2]</sup>

#### 4. $0.25 \times 10^{-3}$ というひずみの値をひび割れ発生を目安値として採用した経緯

これまで新潟県中越沖地震を経験した建物のRC耐震壁の健全性評価の際には、シミュレーション解析により求めた各階の平均的なひずみの値と、 $0.25 \times 10^{-3}$  というひずみの値を比較している。この時に  $0.25 \times 10^{-3}$  というひずみの値についてひび割れ発生を目安値という表現をしており、この数値よりもかなり小さな発生ひずみにも関わらず、実際の壁には量はわずかながらひび割れが発生している現実とが一致しないため、分かりにくいとの指摘を受けている。

この  $0.25 \times 10^{-3}$  というひずみの値は、日本建築学会編「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（以下、RC規準と呼ぶ）に記載された「せん断初ひび割れが壁板に発生するときの耐震壁のせん断変形の平均」の値を引用したものである。このRC規準の中で説明に使われているのが、図5である。この図は、コンクリートの圧縮強度とひび割れが初めて発生するせん断応力の関係を示したものであるが、その時のひずみとしては  $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$  という値がRC規準に記載されている。RC耐震壁といっても、同じ圧縮強度でも壁の形状などでひび割れの発生するせん断応力は大きくばらつくものであるということが、この図から読み取れる。

さらに、この図5の基になったオリジナルの文献まで遡ると、コンクリートの圧縮強度とせん断ひずみの関係を示す図があり、図6に示す。この図から、 $0.25 \times 10^{-3}$  というひずみの値はほぼ平均的な値であることが分かるが、その値にも大きなばらつきがあることが分かる。

また、この大きなばらつきが発生する原因には、日本建築学会編「鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料」に記載の通り、コンクリートの硬化・乾燥収縮、温度変化による伸縮、拘束条件の違い、水平断面上の鉛直力および曲げモーメントの影響などが挙げられており、耐震壁にせん断ひび割れが発生するせん断ひずみの平均値で  $0.26 \times 10^{-3}$ 、中央値で  $0.22 \times 10^{-3}$  と示されている。（図7、図8参照）

以上のように、一般的なRC耐震壁の構造特性を専門家が理解するための指標としては良いものであるが、これらの値は大きくばらつくものだとことを理解して使用する必要があると考えられる。

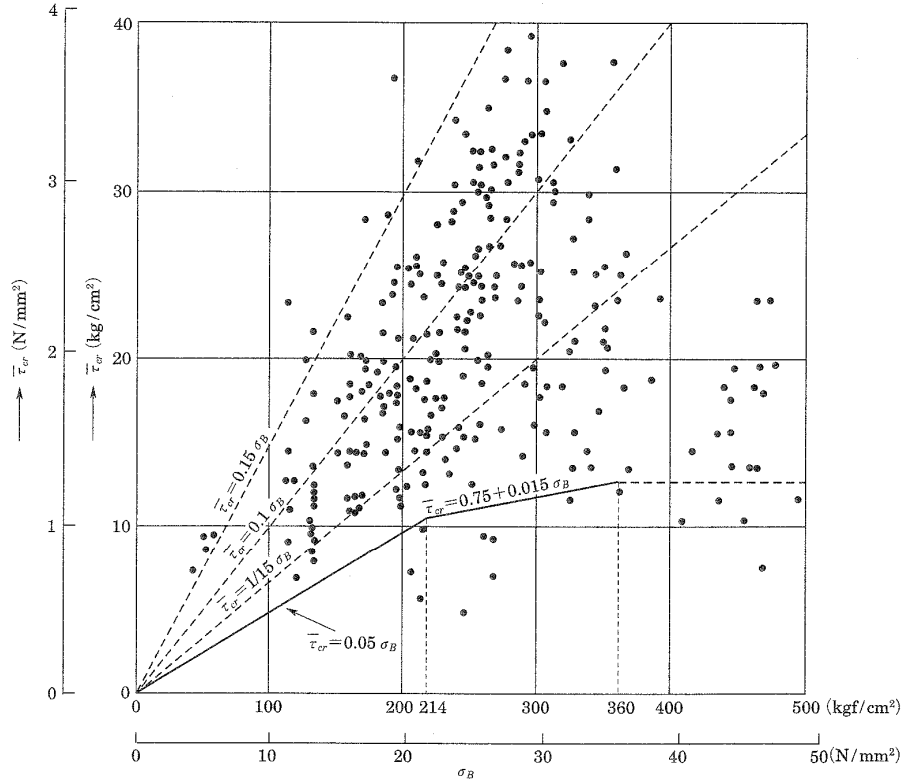


図 19.1 無開口耐震壁の初ひび割れ平均せん断応力  $\bar{\tau}_{cr}$  とコンクリートの圧縮強度  $\sigma_B$  の関係<sup>5)</sup>

図 5 RC耐震壁のせん断ひび割れ発生時のせん断応力とコンクリート強度の関係 (RC規準より抜粋)

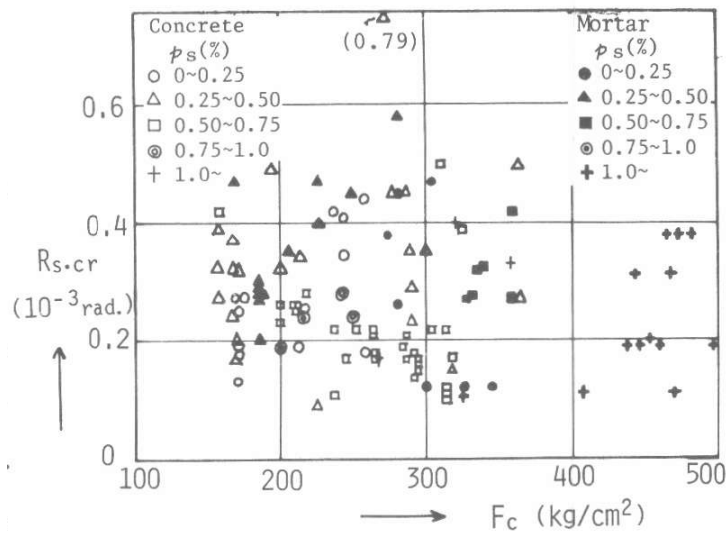


図-6  $R_{s.cr}$  と  $F_c$  および  $p_s$  の関係

図 6 RC耐震壁のせん断ひび割れ発生時のせん断ひずみとコンクリート強度の関係 (江崎、富井ほか<sup>[3]</sup>)

[3]江崎、富井ほか「無開口耐震壁の壁板にせん断初ひび割れが発生する時の層間変形角」、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1981年



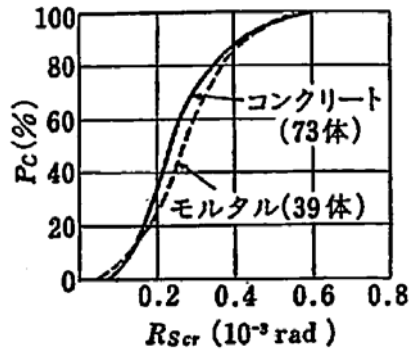


図7 せん断ひび割れ発生直前の層間変形角  $R$  のせん断成分  $R_{scr}$  に関する累積確率  $P_c$   
 (日本建築学会編「鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料」より抜粋)

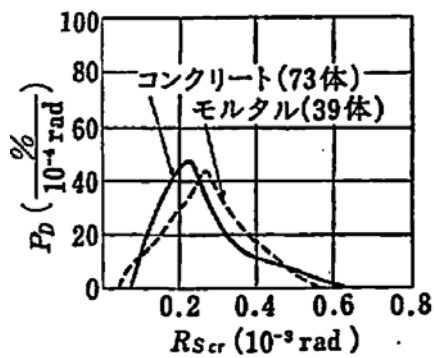


図8 せん断ひび割れ発生直前の層間変形角  $R$  のせん断成分  $R_{scr}$  に関する確率密度  $P_D$   
 (日本建築学会編「鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料」より抜粋)

5. 原子炉建屋の耐震壁を対象に過去に実施した実験結果と  $0.25 \times 10^{-3}$  という目安値との関係

RC規準に示された指標というのは、一般的な建築物を対象としたものであるため、今回原子炉建屋の耐震壁を対象に実施された過去の実験結果を整理して検討を行った。これは、公開されている文献のデータベース（42体）から初めてひび割れが観測されたひずみの値を整理したもので、表1及び図7に示す。こちらでもある程度のばらつきは生じているものの、平均的なひずみレベルは一般的な建築物と類似しており、 $0.21 \times 10^{-3}$  というひずみの値は原子炉建屋の復元力特性の第一折点とほぼ対応した数値となっている。また、平均的なせん断応力は  $1.80 \text{ N/mm}^2$  であり、JEAG4601の方法により算定する復元力特性上の第一折点に相当するせん断応力と比較すると、やや小さめの数値となっている。

図7によると、一般建築物の場合と同様に、 $0.25 \times 10^{-3}$  というひずみの値よりも小さなひずみでひび割れが発生している事例も相当数あることが分かる。

表1 せん断ひび割れ発生時のせん断応力及びせん断ひずみの統計値

	平均値	標準偏差	変動係数
せん断ひび割れ発生時のせん断応力 $\tau_{cr}$	$1.80 \text{ N/mm}^2$	$0.57 \text{ N/mm}^2$	0.32
$\tau_{cr} / \text{JEAG4601 式}$	0.95	0.17	0.18
せん断ひび割れ発生時のせん断ひずみ $\gamma_{cr}$	$0.21 \times 10^{-3}$	$0.06 \times 10^{-3}$	0.30

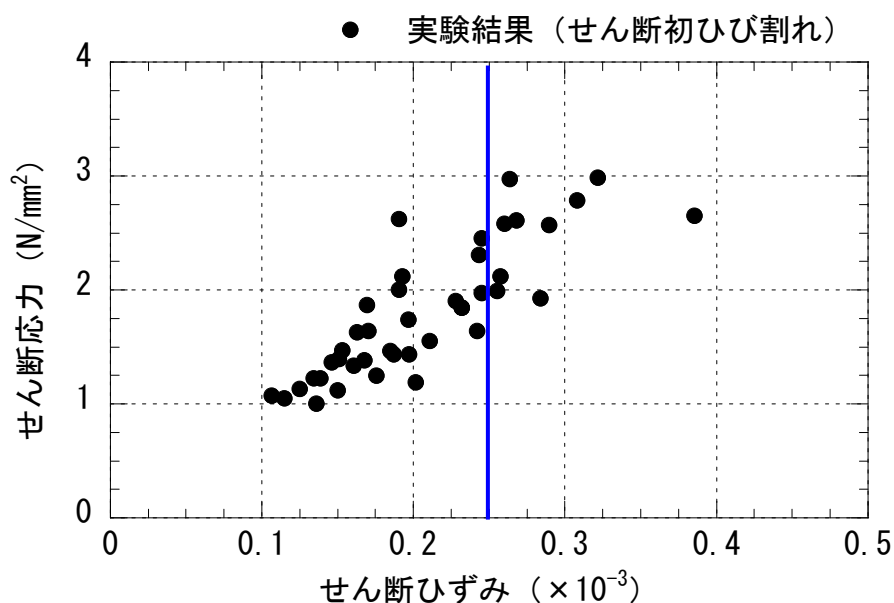


図7 せん断ひび割れ発生時のせん断応力及びせん断ひずみの関係

## 6. 鉄筋が比較的少ない建屋の耐震壁の評価内容について

2章で述べたように、原子力発電所の建物のRC耐震壁を設計する場合には、短期許容応力度設計を行う地震時応力とその他の応力を組み合わせた上で、その応力に対して全て鉄筋で負担させるという考え方を採用している。この考え方を重視し、今回の新潟県中越沖地震による建屋の健全性評価においては、シミュレーション解析により発生したと考えられる各階のせん断応力と鉄筋のみで負担できるせん断応力を比較して評価を行っている。これは、実際には相当分寄与しているコンクリートの応力負担分を無視した評価となっている。

原子炉建屋の場合は鉄筋量が多いので、見かけ上その影響度合は比較的小さいが、タービン建屋や海水熱交換器建屋のような鉄筋量が少ない場合には、その影響度合が大きくなり、場合によってはシミュレーション解析により発生したと考えられる各階のせん断応力が鉄筋のみで負担できるせん断応力を上回るような場合が生じることとなる。これらのことをイメージ化したものを、図8に示す。

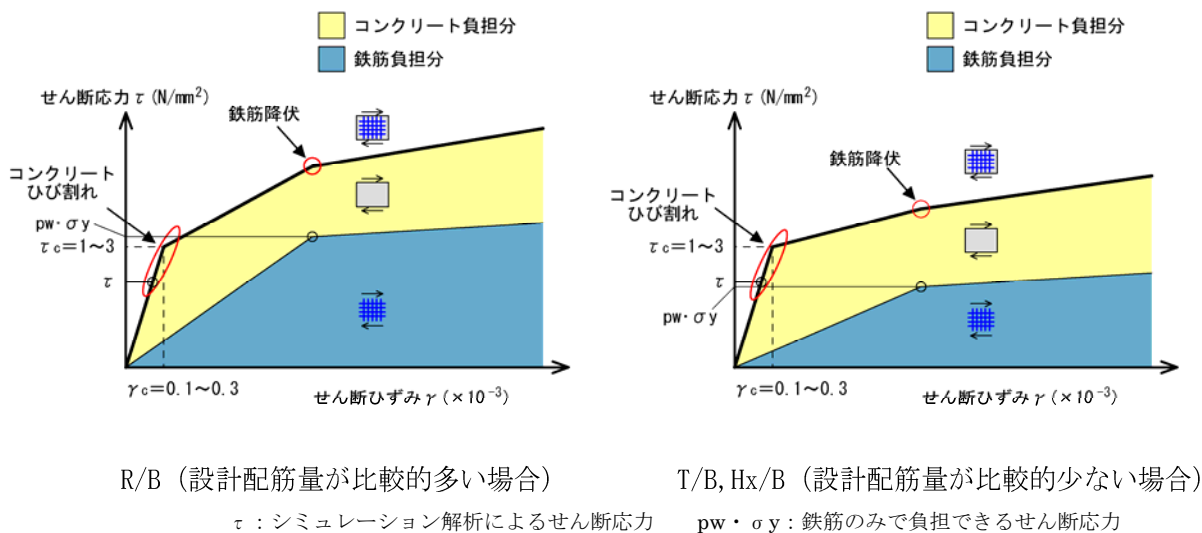
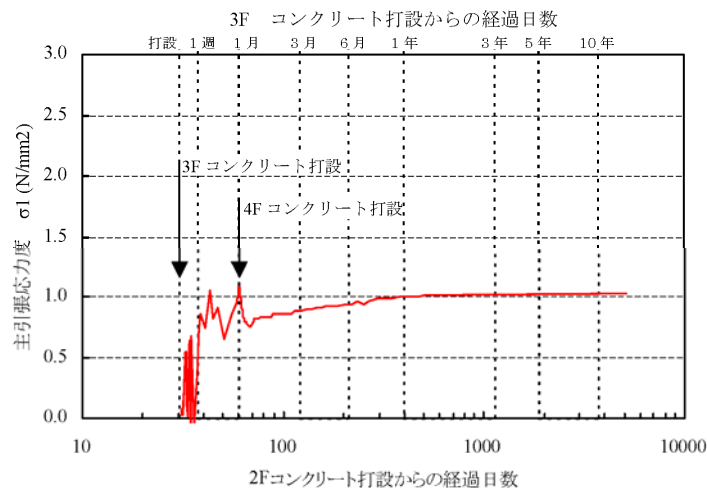


図8 RC耐震壁の平均的なせん断応力とせん断ひずみの関係の模式図

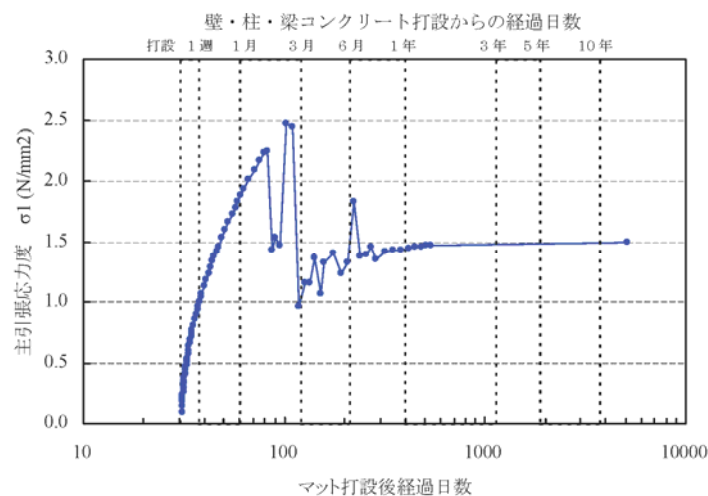
## 7. コンクリートの収縮等に伴う存在応力について

地震時にせん断ひび割れが発生する要因として、コンクリート打設時に生じる温度応力や乾燥収縮により生じる拘束応力がそもそも現場での存在応力としてあり、そこに地震時応力との組み合わせが発生することによって、せん断ひび割れが発生する可能性も否定できない。図9に示すのは、昨年実施した7号機原子炉建屋及びタービン建屋を例とした耐震壁に生じる拘束応力の試算結果である。これによると、主引張応力として1～1.5N/mm<sup>2</sup>程度、最大せん断応力として0.7～0.8N/mm<sup>2</sup>程度の拘束応力となることが示されている。ただし、現場のRC耐震壁の環境条件は複雑であり、かつ断熱材等で境界条件を明確にした実験結果のシミュレーション解析とは異なるので、精度はそれほど高くないことに関しては注意が必要である。

従って、この存在応力の数値の信頼性は必ずしも高くないが、健全性評価においてはこの存在応力の存在は無視しているので、地震時応力がそれほど大きくなくても拘束応力との組み合わせでせん断ひび割れが発生する可能性も否定できないと考えられる。



(a) 7号機原子炉建屋の試算例



(b) 7号機タービン建屋の試算例

図9 拘束応力の経時変化の試算結果

## 8. まとめ

これまでに述べたように、RC耐震壁に発生するひび割れは、様々な要因が組み合わされることによって発生すること、及び応力やひずみとの関係はばらつきが大きいことが知られている。そのため、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋等において、壁の見付面積当たりで考えるとわずかに確認されたひび割れは系統的な分布状況を示していないこともあり、このひび割れ分布からひずみや応力状態を推定することは非常に難しい状態にある。

今回の検討結果から、今後は以下のように対応していきたいと考える。

- 現場で確認されたひび割れ幅が、評価基準値である1mmを下回っていれば、点検結果としての健全性は確保されていると判断する。ただし、地震によって発生したことが否定できないひび割れは、念のため補修を行う。
- $0.25 \times 10^{-3}$  というひずみの評価基準値は、多数の実験結果にもとづくひび割れ発生時のひずみの平均的な値であり、この値以下でもひび割れが発生する場合もあり、比較的大きなばらつきを有するものである。このことを認識した上で、従前どおりひずみによる評価を行うこととする。
- コンクリートの乾燥収縮等による存在応力があることは事実であるが、
  - ・ 設計では無視していること
  - ・ 現場の環境条件を反映した精度の高い解析が難しいことから、今後もこの存在応力は無視した評価を行っていくこととする。
- 応力が比較的小さい場合には、コンクリートの応力負担の寄与分がかなりのウェイトを占めていることは事実であるが、設計の考え方の連続性を重視し、これまでと同様に「鉄筋のみで負担できるせん断応力」と発生応力との比較で評価を行っていくこととする。さらに、復元力特性上の第一折点にほぼ対応したせん断応力も参考情報として示すこととする。なお、発生応力が、「鉄筋のみで負担できるせん断応力」と比較した結果が接近しているかまたは上回っているような場合には、コンクリートの応力負担の寄与分を考慮した復元力特性上でどの程度の応力-ひずみ関係であるかを明示して健全性を評価していくこととする。

## 参考資料 地震応答解析の評価項目の見直しについて

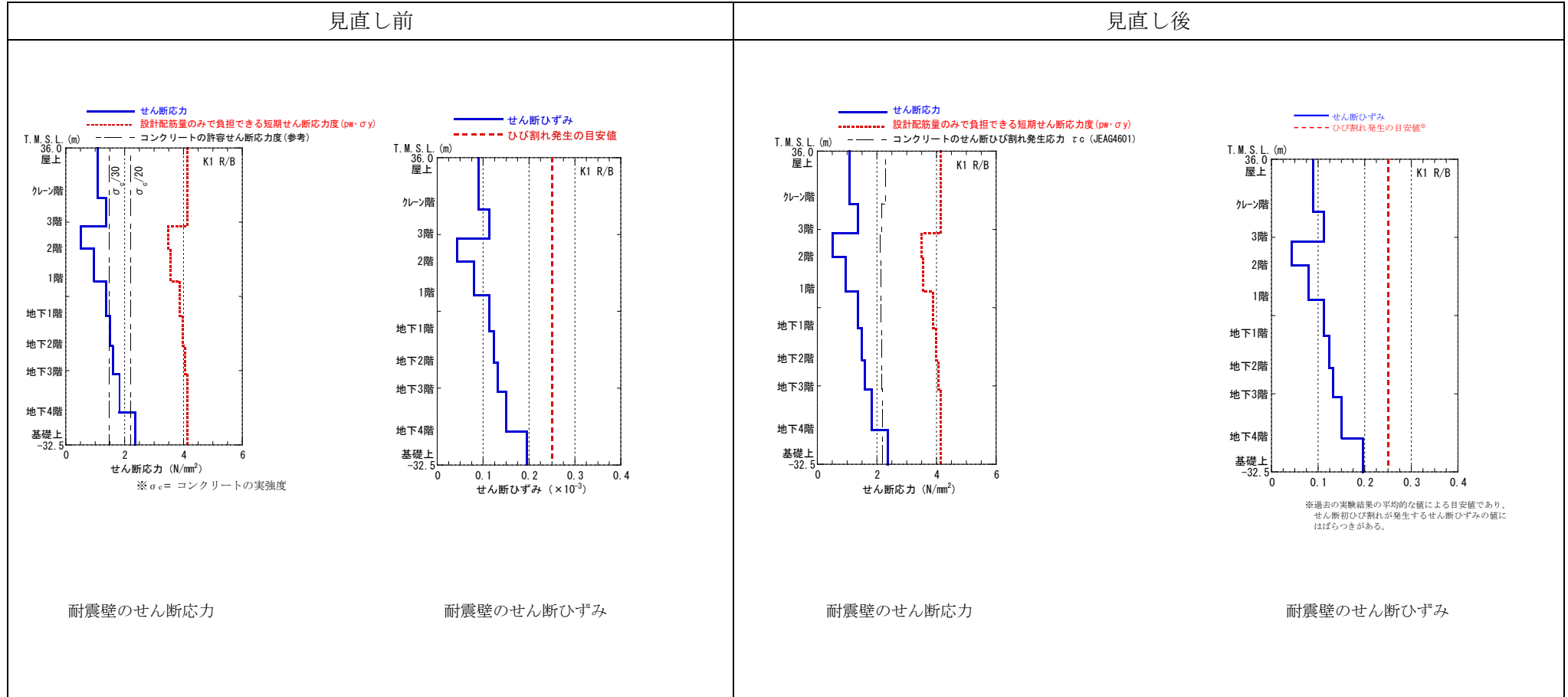
地震応答解析にあたっては、各階の耐震壁について、以下の 2 通りの評価を実施することとしている。

- ① せん断応力を算出し、設計配筋量のみで負担できる短期せん断応力度と比較する
- ② せん断ひずみを算出し、ひび割れ発生の目安値( $0.25 \times 10^{-3}$ )との比較する

ただし、せん断ひずみの評価基準値を「ひび割れ発生の目安値( $0.25 \times 10^{-3}$ )」とすることは、目安値以下ではひび割れが発生しないという誤解を与えやすいというご指摘もあり、注釈を追記することとした。また、参考情報として、JEAG4601 の方法により算定する復元力特性上の第一折点にほぼ対応したせん断応力についても記載することとする。

見直し前後のシミュレーション解析における記載項目の比較を参表-1 に示す。

参表-1 地震応答解析の記載項目の比較 (1号機原子炉建屋の例)



以 上