

**女川原子力発電所2号炉
東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた
耐震設計への反映について**

(第628回審査会合(平成30年9月25日)指摘事項に対する回答)

**平成30年11月29日
東北電力株式会社**

審査会合における指摘事項

No	審査会合日	項目
90	平成30年9月25日	新設建屋へ考慮する不確かさケースの初期剛性低下量(0.8)について、原子炉建屋のオペフロ下部の剛性低下量を考慮することとした理由を新設建屋の構造的特徴を踏まえて説明し提示すること。
91	平成30年9月25日	乾燥収縮及び地震によるひび割れを踏まえた機器アンカー一部に対する考慮において「乾燥収縮によるひびは躯体表面のひびであり・・・(中略)・・・JEAG4601に基づく設計が適用できると考えられる。」としていることについて、p5に示されているコンクリートコアのひび割れ状況、これまでに実施した耐震実験の結果等を踏まえ、当該内容が適切であることを提示すること。
92	平成30年9月25日	乾燥収縮及び地震によるひび割れを踏まえた機器・配管系の耐震評価に係る条件設定について、耐震評価への影響が小さい項目も含めて網羅的に抽出し、評価条件の設定方針を提示すること。
93	平成30年9月25日	床応答スペクトルの拡幅率10%に対するばらつきの検討について、設計基準強度と実強度の差異を終局耐力に反映する方針を提示すること。
94	平成30年9月25日	新設建屋における地震後の振動性状の確認を踏まえた検討の実施方針について、保全計画との関係も含めた申請上の位置づけ及び具体的な実施内容を提示すること。

指摘事項No.90, 94に対する回答

No	審査会合日	項目
90	平成30年9月25日	新設建屋へ考慮する不確かさケースの初期剛性低下量(0.8)について原子炉建屋のオペフロ下部の剛性低下量を考慮することとした理由を新設建屋の構造的特徴を踏まえて説明し提示すること。
94	平成30年9月25日	新設建屋における地震後の振動性状の確認を踏まえた検討の実施方針について、保全計画との関係も含めた申請上の位置づけ及び具体的な実施内容を提示すること。

新設建屋への初期剛性低下の考慮方針

- 新設建屋の地震応答解析においても、不確かさケースとして初期剛性の低下を考慮する。

【新設建屋の構造的特徴と原子炉建屋との類似性】

- 新設建屋は岩盤に設置し、地下階を有する計画としている。主たる耐震要素は原子炉建屋等と同様に耐震壁としており右図に示す通り全方向に耐震壁が配置されたマツブな構造となっている。また、基準地震動Ssに対して概ね弾性範囲に留まる設計(短期許容応力度設計)を目指している。
- 新設建屋においても既設と同様のコンクリート材料を用いる予定。

【類似建屋の3.11地震に対する剛性低下の特徴】

- 2号炉原子炉建屋のオペフロ下部は、3.11地震に対し、概ね第一折点程度の応答を示したが、その際の剛性低下は設計剛性に対し0.8倍程度となっている。



【新設建屋の地震応答解析モデル】

- 基本ケースとしては、地震の影響を受けていないことから設計剛性をういた地震応答解析モデルを採用する。
- 不確かさケースとしては、新設建屋は原子炉建屋と同等の壁厚となること、基準地震動Ssに対して短期許容応力度設計を目指していることから、初期剛性が設計剛性より低下する可能性は低いと考えられるが、今後の乾燥収縮の進展と地震による影響の重畳も考慮し、主要な耐震要素である耐震壁の厚さが同程度である原子炉建屋の3.11地震に対するオペフロ下部の剛性低下量(0.8倍程度)を考慮する。なお、具体的な低下量は今後の新設建屋の詳細設計を踏まえ決定する。



新設建屋の平面図、断面図の例(緊急時対策建屋)



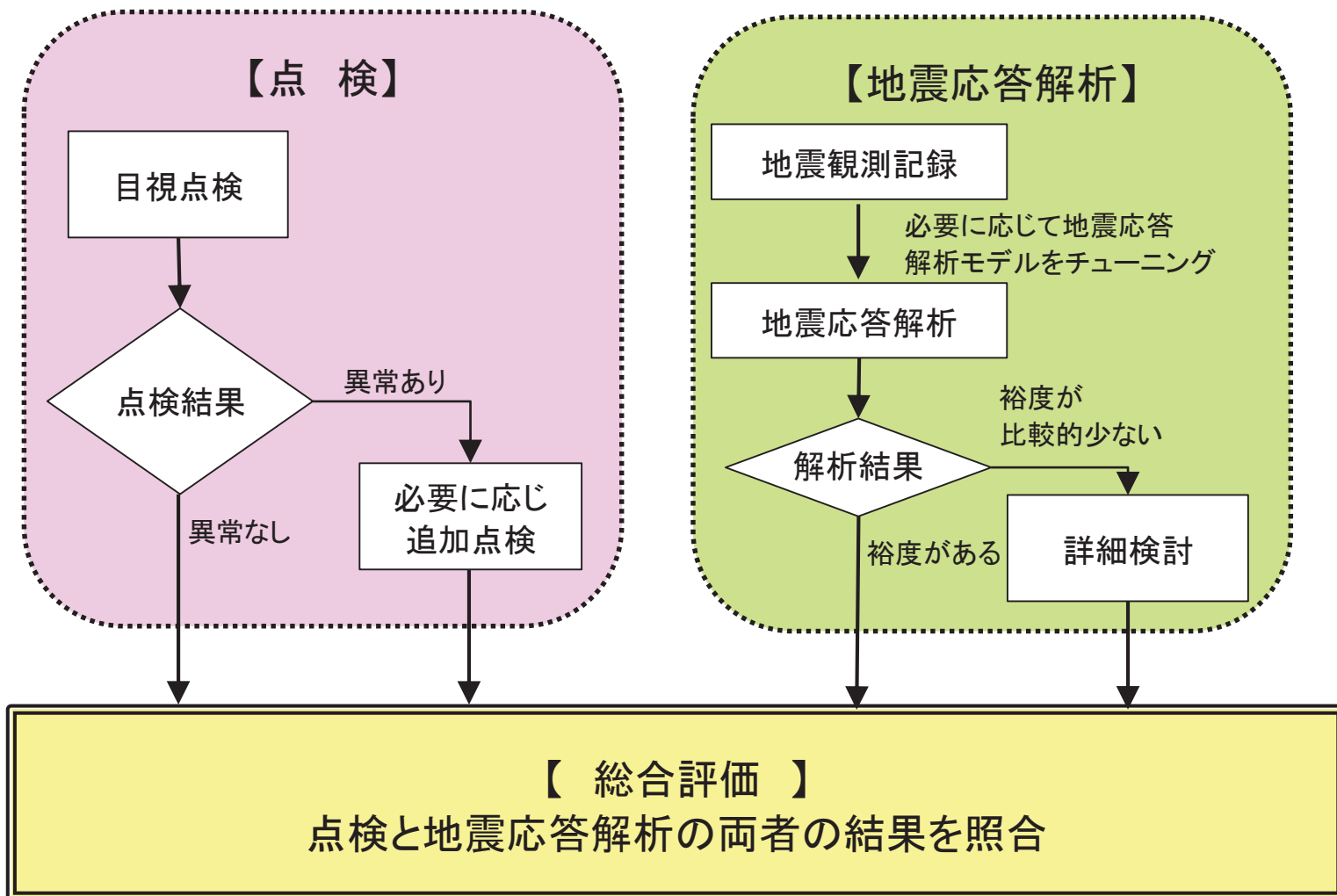
原子炉建屋の平面図、断面図

枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません

【地震後の振動性状の確認を踏まえた検討の実施】

- 将来地震に見舞われた時は、特別な保全計画に基づく地震後健全性評価※に加え、当初設計(剛性低下の見込み等)との関係について確認し、その結果を踏まえた基準地震動Ssに対する健全性確認を行う。※地震後健全性評価フローの例を次頁に示す。

特別な保全計画に基づく地震後健全性評価の全体フロー



指摘事項No.91に対する回答

No	審査会合日	項目
91	平成30年9月25日	乾燥収縮及び地震によるひび割れを踏まえた機器アンカー一部に対する考慮において「乾燥収縮によるひびは躯体表面のひびであり・・・(中略)・・・JEAG4601に基づく設計が適用できると考えられる。」としていることについて、p5に示されているコンクリートコアのひび割れ状況、これまでに実施した耐震実験の結果等を踏まえ、当該内容が適切であることを提示すること。

乾燥収縮ひび割れによる機器アンカーへの影響検討概要

乾燥収縮によるひび割れの機器アンカーへの影響について、文献レビュー、実機のひび割れ傾向の確認等から乾燥収縮ひび割れが機器アンカーに及ぼす影響は小さいことを以下のとおり確認した。

■乾燥収縮ひび割れの特徴の確認

(1)乾燥収縮ひび割れの特徴に関する文献レビュー

一般的に、コンクリートの乾燥収縮ひび割れが躯体表面に多いことを、乾燥収縮ひび割れ発生メカニズムにより確認。

■試験・実験による確認

(2)ひび割れがあるアンカー部の耐力試験(文献レビュー)

電力共通研究の試験から、ひび割れ幅が0.4mmの場合、ひび割れが存在しても引張力が伝達されること、各種合成構造設計指針(日本建築学会)によるアンカー部の許容耐力およびJEAG4601の許容耐力を上回っていることを確認した。

(3)地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験(文献レビュー)

JNESの試験では、事前加力後の状態で、本加力によるひび割れを受けたアンカーの耐力を確認しており、仮に女川の乾燥状態のひずみ(約800 μ)が全てせん断力による生じたひずみとみなした場合でも、設計で考慮する低減係数を採用することは妥当であることを確認。

(4)機器アンカーの鉄筋による拘束効果(文献レビュー)

アンカー部の埋込長さがかぶり厚さよりも長い場合には、アンカー部にひび割れを生じさせても鉄筋の効果でコーン状破壊の破壊面積が増大する傾向が認められており、ひび割れの無い無損傷の試験体ではアンカーボルトが先に破断。

(5)乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響

当社実施の耐震実験の結果から、加力前に生じている乾燥収縮ひび割れは、地震時のひび割れの発生の仕方には大きな影響を与えないことを確認。

■実機による確認

(6)実機における乾燥収縮ひび割れの傾向

2号炉原子炉建屋の乾燥収縮ひび割れ調査結果から、ひび割れ密度は鉄筋間隔と同等であり、また、ひび割れ幅0.1mm以下の乾燥収縮ひび割れが圧倒的に多く(95%)、地震によるひび割れ幅と比較して有意に小さいことを確認。

(7)機器アンカーと躯体の位置関係

実機の標準的な埋込金物では、アンカー部の端部は鉄筋位置よりも深くなっている。

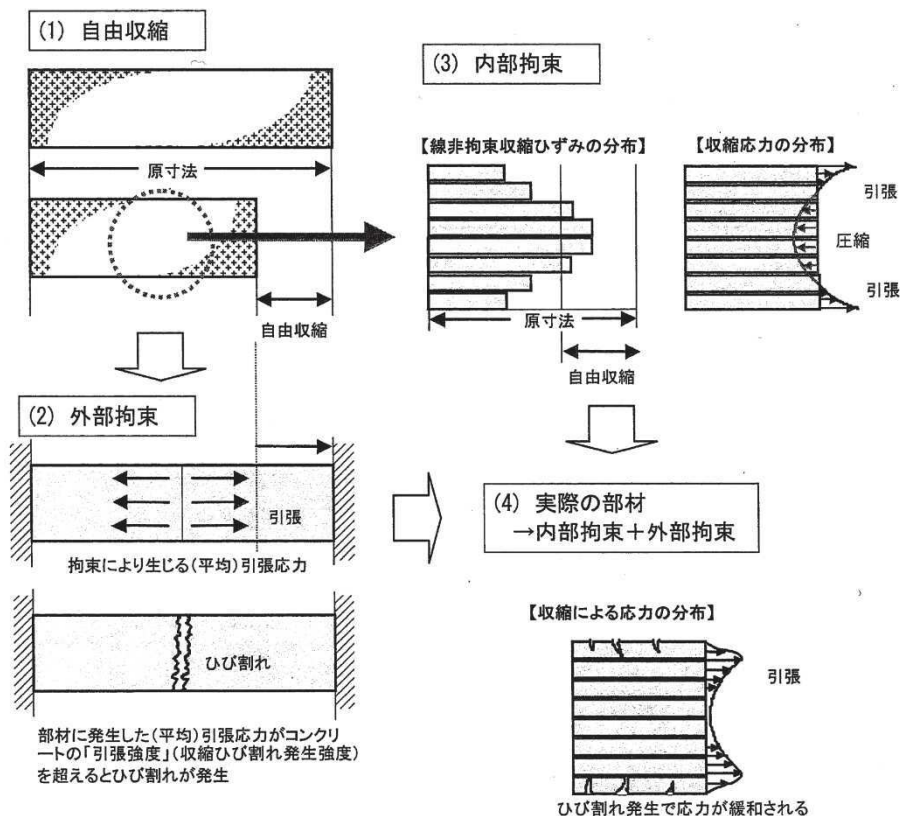
■まとめ

- (2),(6)より、電力共通研究のひび割れ幅が0.4mmの場合の試験結果から、引張力が十分伝達されること、AIJ指針およびJEAG4601の許容耐力を上回ることを確認できたが、実機の乾燥収縮ひび割れ幅は0.4mmに対して有意に小さく、その影響は小さいと考えられる。
- (3),(5)よりJNESの試験結果を踏まえた考察として、女川の乾燥状態のひずみがJEAG4601による設計に与える影響は小さいこと、また、当社実施の耐震実験から、乾燥収縮ひび割れは地震時のひび割れの発生の仕方には大きな影響を与えないことを確認した。
- (4),(7)より、実機においては標準的なアンカー部はかぶり厚さより深いことから鉄筋の拘束効果もあり耐力に余裕があると考えられる。
- 以上のことから、乾燥収縮ひび割れが生じていても、アンカー部への影響は小さく地震力が大きくなりひずみが進んだ状態においては、地震によるひび割れが支配的となり、JEAG4601に基づく設計が適用できると考えられる。

(1) 乾燥収縮ひび割れの特徴に関する文献レビュー

- 「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)によれば、コンクリートは乾燥に伴い収縮する性質を有しており、収縮ひび割れはコンクリート部材が自由に収縮しようとしたときに、それが何らかの形で拘束されることによって生じる。
- 拘束には外部から受けるもの(外部拘束)と内部から受けるもの(内部拘束)とがあり、拘束を受けることによってコンクリートに引張応力が生じ、コンクリートの引張強度を超えたときにひび割れが発生する。
- 外部拘束を引き起こす例としては、壁を取り囲む柱や梁、さらには内部の鉄筋等がある。
- 一方、内部拘束はコンクリート部材内部で生じる拘束である。表面部分と内部とでは、乾燥の程度に応じて収縮する量が異なるが、実際には部材は一体となって収縮するため、表面は引張力を、内部は圧縮力を受けた状態となる。(右図(3)の状態)
- 一般に、乾燥収縮試験において測定されているコンクリートの自由収縮といえば、右図(3)右側に示す状態での収縮を意味している。
- したがって、たとえ自由収縮の場合であっても表面にはひび割れが発生する可能性がある。
- ひび割れ発生により応力が緩和される。

■ 乾燥収縮ひび割れの発生メカニズム ※1



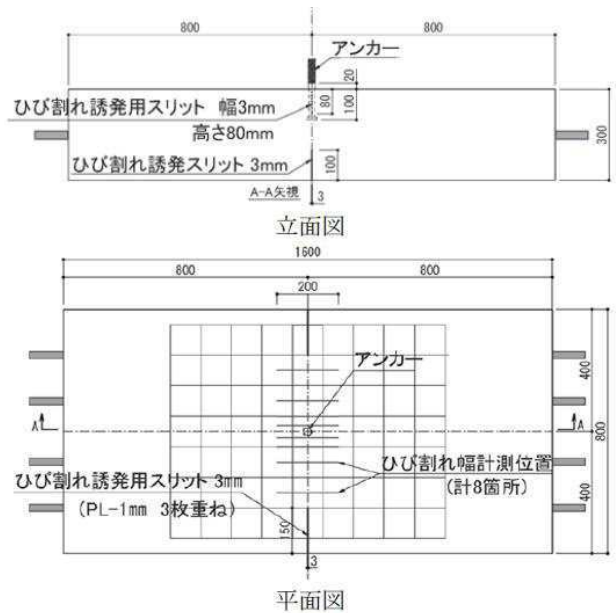
※1 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮制御設計・施工指針(案)・同解説,2006.2 P.51-52記載抜粋

(2) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験(文献レビュー)

- ▶ 電力共通研究※1として、乾燥収縮ひび割れが機器支持部アンカーに与える影響を把握するために、アンカー部試験体にひび割れを導入し、ひび割れがアンカーのコーン破壊挙動に及ぼす影響を把握するための耐力試験を実施している。
- ▶ その結果、アンカー部を貫通するひび割れのひび割れ幅が0.4mmの場合では、貫通ひび割れが存在するにもかかわらず、円形ではないものの貫通ひび割れの両側にひび割れが進展しており、ひび割れが存在しても、その幅によっては引張力が伝達されることを示していると考えられる、とされている。また、ひび割れが無い場合の70%程度の耐力を示し、各種合成構造設計指針(日本建築学会)によるアンカー部の短期許容引張力※2を上回っていることが確認されている。

※1 中村ほか(2018) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験(その1:試験計画・ひび割れ導入), 日本建築学会大会学術講演要旨集(東北)
 水谷ほか(2018) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験(その2:ひび割れがアンカー耐力に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演要旨集(東北)

※2 短期許容引張力の算定式: $\frac{2}{3} \times 0.31 A_c \sqrt{F_c}$
 (参考) JEAG4601 におけるコンクリート躯体がコーン状破壊する場合の基礎ボルト1本当たりの許容引張荷重は、
 $0.31 K_1 A_c \sqrt{F_c}$ ($K_1 = 0.6$ [許容応力状態: IV_AS]) で算定されることから、実験結果はJEAG4601の許容引張荷重を上回っている。



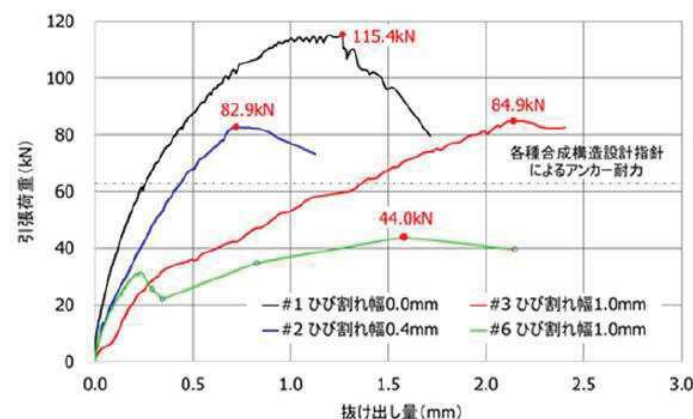
・曲げ加力によりひび割れを導入するために試験体を長方形とし、ひび割れがアンカー一位置を貫通するように、試験体の上下面および側面にスリットを設けている。
 ・アンカーを貫通するひび割れ幅をパラメータ(0.0, 0.4, 1.0mm)とし、ひび割れ幅の違いがアンカーのコーン破壊挙動に及ぼす影響について検討している。

ひび割れアンカー試験体の概要

アンカー試験結果(アンカー耐力検討)

試験体番号	ひび割れ幅(mm)	圧縮強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)	割裂強度(N/mm ²)	最大荷重(kN)	拔出量(mm)
#1	なし	35.6	33.0	3.19	115.4	1.27
#2	0.4	34.1	33.0	3.23	82.9	0.72
#3	1.0	34.1	33.0	3.23	84.9	2.14
#6	1.0	34.5	34.5	3.11	44.0	1.58

AIJ 各種合成構造設計指針による 4 試験体のアンカー耐力平均値: 62.9kN、
 4 試験体のアンカーの短期/長期許容引張力平均値: 41.9kN/21.0kN

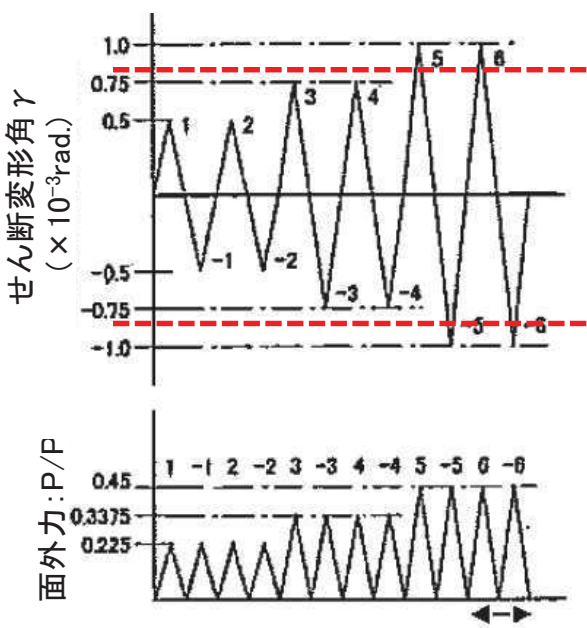


アンカーボルトの抜け出し量-引張荷重関係 より、そう、ちから。東北電力

(3)地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験(文献レビュー)

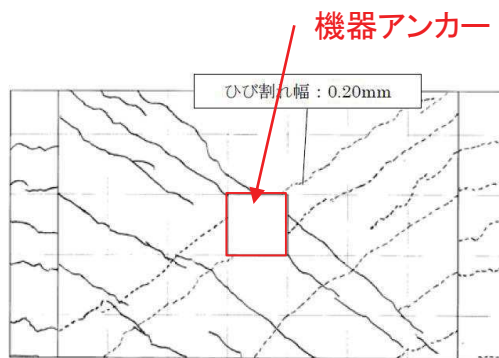
- JNESの試験※¹では、機器アンカー部に事前に初期加力によるひび割れを生じさせた状態で試験が実施されており、その状態であってもJEAGの許容耐力の低減値を満足することが確認されている。
- また、女川2号炉建屋のコンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリートの試験結果より最大約800μと測定されている。仮に、このひずみがすべて地震により生じたと仮定した場合であっても、JNESの試験における初期加力条件に含まれていることから、その影響は、JEAGにおける許容範囲内のものになり、特にアンカー耐力の低下につながるものではない。

※1：JNES 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験に係る報告書、※2：一部加筆



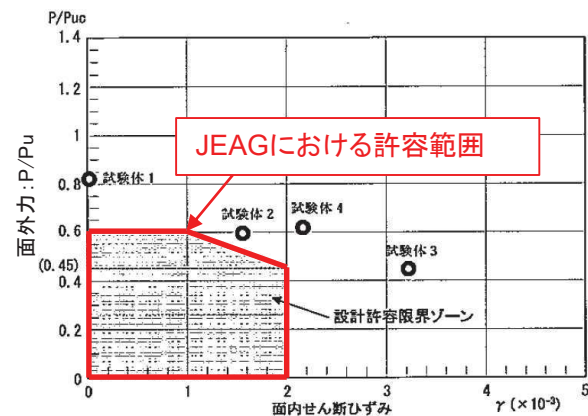
JNES試験における初期加力条件※²
(事前にひび割れを付与)

約800μ
(女川2号炉建屋のコンクリート材料試験結果)



初期加力後の試験体のひび割れ状況※²
(試験体1, せん断ひずみ度: 1.0 × 10⁻³付与後)

P: 面外引張力
Pu: 定着部コンクリートのコーン破壊耐力
 $P_u = 0.31 \cdot A_c \cdot \sqrt{F_c}$

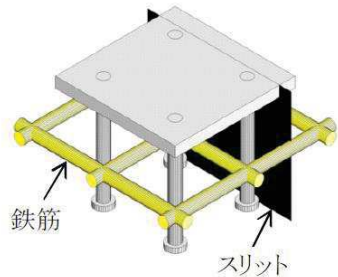


JNES試験結果※²

(4) 機器アンカーの鉄筋による拘束効果(文献レビュー)

- ▶ 松尾・金津(2014)では、鉄筋コンクリート部材に生じる曲げ損傷がアンカーの破壊性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、アンカーの引き抜き実験を実施している。
- ▶ その中で、アンカーの埋込長がかぶりよりも長い場合には、鉄筋の効果でコーン状破壊の破壊面積は増大することが確認されている。

※1：曲げ損傷を受けた鉄筋コンクリート部材に定着されたアンカーの引張耐力に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.2, 2014



(b)実アンカー-200mm

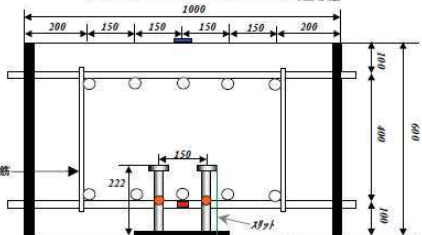
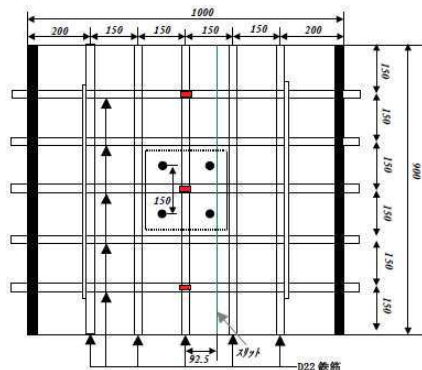


図-3 RC 試験体の断面図(横断面と縦断面)

ひび割れアンカー試験体の概要

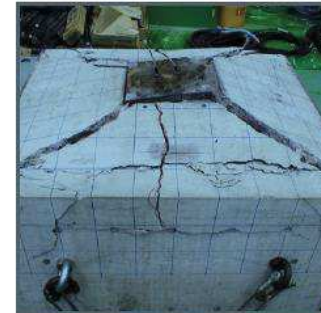
実験ケース

(b)実アンカー

ケース名	ボルト長(mm)	損傷程度	スリット
JA0N	100	なし	なし
JA0A	100	なし	あり
JA1N	100	鉄筋降伏	なし
JA1A	100	鉄筋降伏	あり
JA2N	100	コンクリート剥離	なし
JA2A	100	コンクリート剥離	あり
JB0N	200	なし	なし
JB0A	200	なし	あり
JB1N	200	鉄筋降伏	なし
JB1A	200	鉄筋降伏	あり
JB2N	200	コンクリート剥離	なし
JB2A	200	コンクリート剥離	あり

・実アンカーの検討パラメータは、ボルト長、損傷状態、スリットの有無・位置としている。

・スリット(2mm幅)の設置位置はアンカー位置と一致させた場合(スリット中央)およびアンカー位置からボルト長の半分だけ水平方向に離れた位置とした場合(スリット偏心)としている。



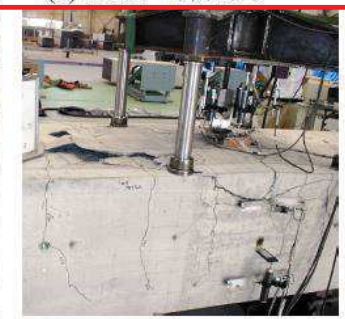
(a) JA0N<スリットなし>



(b) JA0A<スリットあり>



(c) JA1A<ボルト長 100mm>



(d) JB1A<ボルト長 200mm>

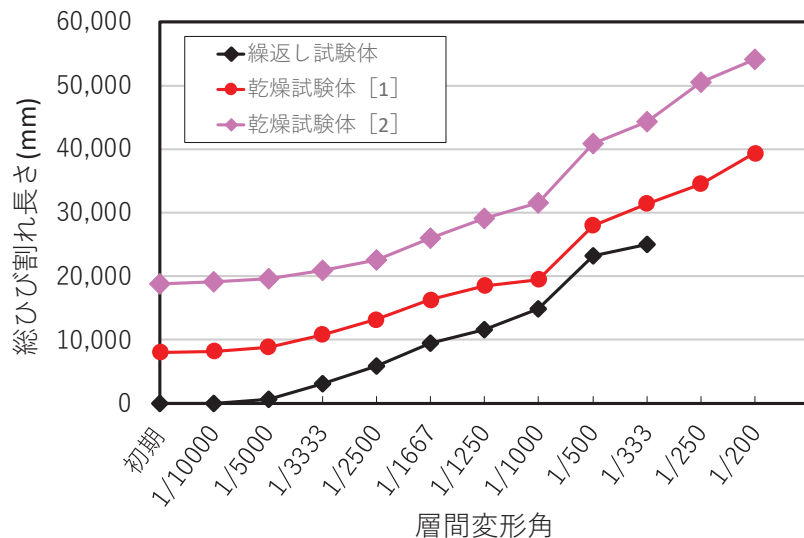
終局状況

- ・鉄筋が降伏する段階では、ボルト長が100mmの場合、コーン状破壊後に割裂ひび割れを伴って終局に至っているがボルト長が200mmの場合は、主筋が持ち上がり、破壊面が部材全域に広がるような状況が観察された。
- ・これは、コーン状の破壊面が主筋にかかるため、主筋ごと引っ張りあげられるためと考えられる。このため、ボルト頭部が主筋や配力筋の内側に位する場合には、通常のコーン状破壊よりも引き抜き破壊面積が大きくなると考えられる。

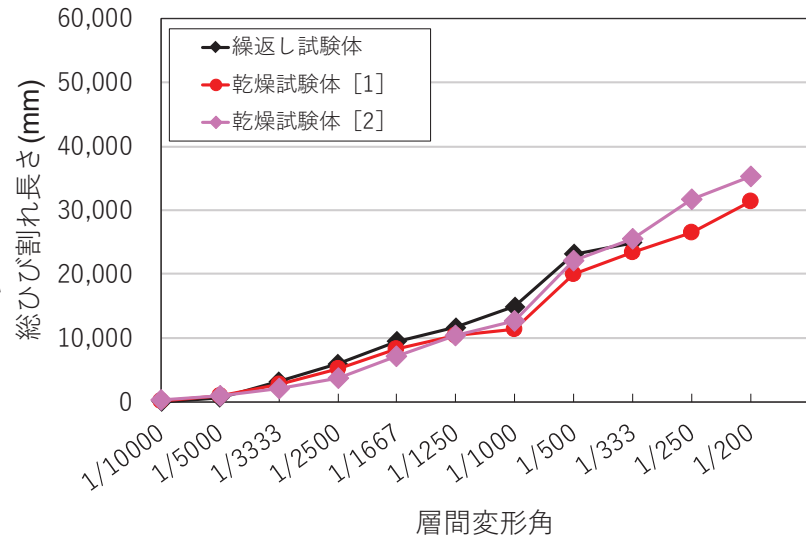
(5) 乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響①

- 当社で実施した耐震実験※1における総ひび割れ長さと同層間変形角関係の図とひび割れ状況図から、乾燥試験体は加力前に乾燥収縮ひび割れが生じているが、加力後に生じるひび割れ(地震時ひび割れ)長さは、乾燥させない試験体と同等のひび割れ長さとなっている。したがって、加力前に生じている乾燥収縮ひび割れは、地震時のひび割れの発生の仕方には大きな影響を与えないことが確認できる。
- また、地震によるひび割れが進展した状態では、ひび割れの量は地震によるひび割れが多くなるため、乾燥収縮ひび割れの影響はその点からも小さいものとなる。

※1 耐震実験 [1] 耐震実験による中小地震レベルの繰返し加力による影響検討 (第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付5)
耐震実験 [3] 耐震実験による乾燥収縮が終局耐力に与える影響検討 (第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付8)



加力前の乾燥収縮ひび割れを差し引いて、加力によるひび割れのみで比較



加力前の乾燥収縮ひび割れ有り
(加力前の乾燥収縮ひび割れ+加力によるひび割れ)

加力前の乾燥収縮ひび割れ無し
(加力によるひび割れのみ)

耐震実験における総ひび割れ長さ一層間変形角関係

(5) 乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響②

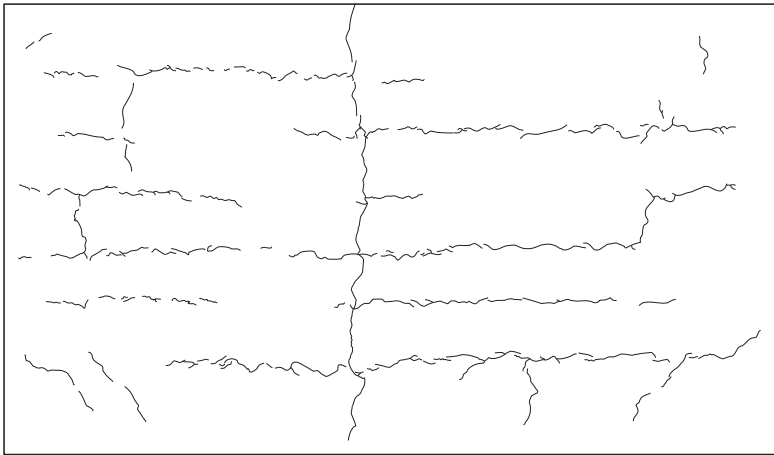
■加力前における試験体のひび割れ図

■耐震実験[1]

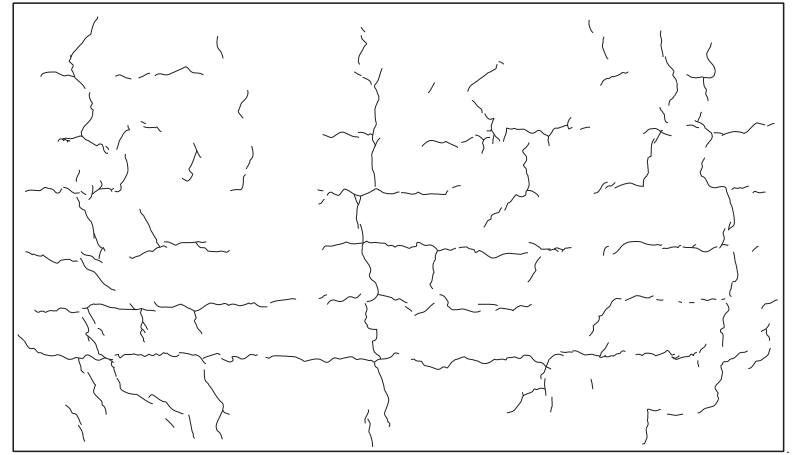


加力前における繰返し試験体のひび割れ図(ひび割れ無し)

■耐震実験[3]



加力前における乾燥試験体[1]のひび割れ図



加力前における乾燥試験体[2]のひび割れ図

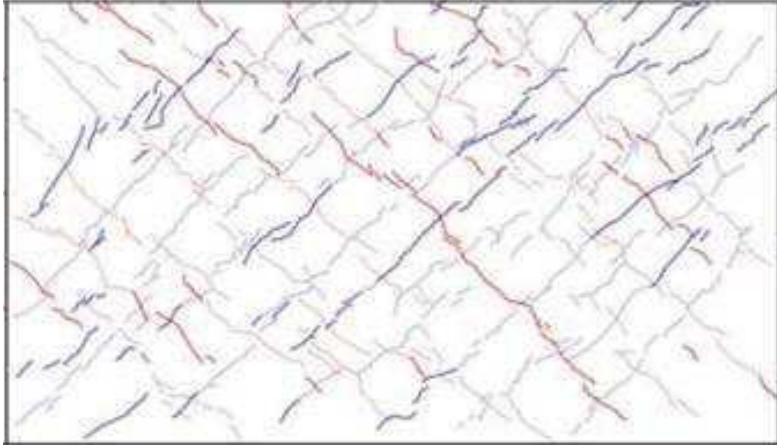
※耐震実験 [1] 耐震実験による中小地震レベルの繰返し加力による影響検討 (第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付5)

耐震実験 [3] 耐震実験による乾燥収縮が終局耐力に与える影響検討 (第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付8)

(5) 乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響③

■ 2.0×10^{-3} における試験体のひび割れ図

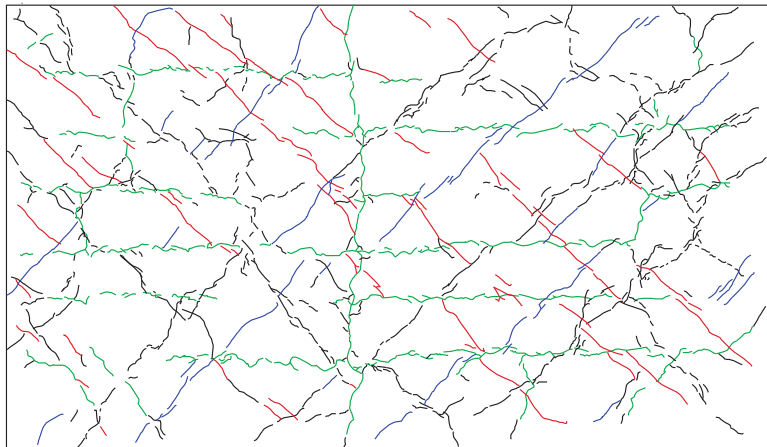
■ 耐震実験[1]



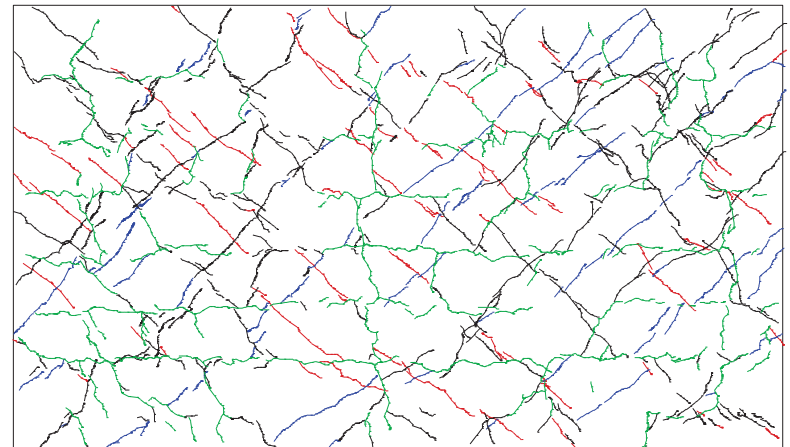
- 初期ひび割れ(乾燥収縮ひび割れ)
- 当該ステップ(1/500rad.)で発生したひび割れ(正側加力)
- 当該ステップ(1/500rad.)で発生したひび割れ(負側加力)
- 当該ステップ(1/500rad.)以前に発生したひび割れ

繰返し試験体 1/500rad.(2.0×10^{-3})におけるひび割れ図

■ 耐震実験[3]



乾燥試験体[1] 1/500rad.(2.0×10^{-3})におけるひび割れ図



乾燥試験体[2] 1/500rad.(2.0×10^{-3})におけるひび割れ図

※耐震実験 [1] 耐震実験による中小地震レベルの繰返し加力による影響検討 (第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付5)

耐震実験 [3] 耐震実験による乾燥収縮が終局耐力に与える影響検討 (第628回審査会合 資料1-1-3 別紙11添付8)

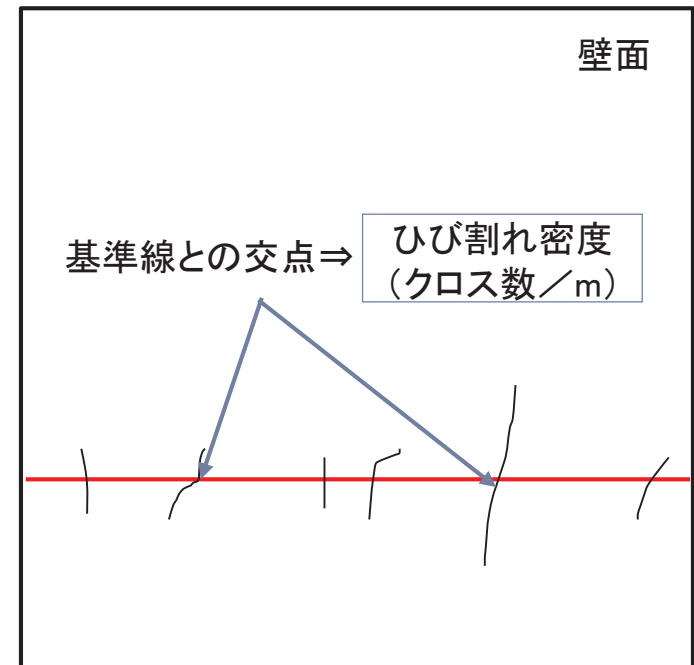
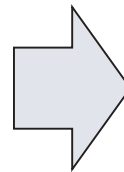
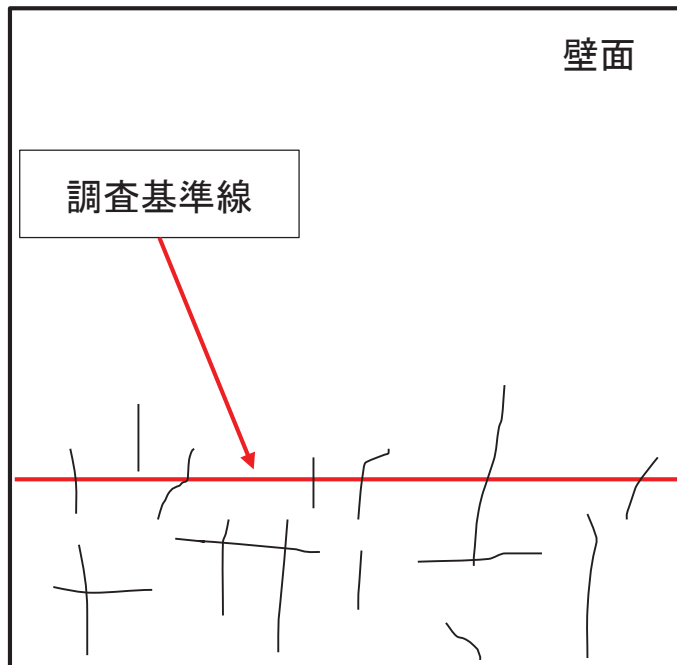
(6)実機における乾燥収縮ひび割れの傾向①

■ひび割れ調査目的

- ・建屋の剛性低下要因の一つとしている乾燥収縮について、女川原子力発電所の建屋に発生している乾燥収縮ひび割れを確認することを目的として調査を実施する。

■ひび割れ調査方法

- ・調査範囲は、全耐震壁を対象とする。
- ・乾燥収縮によるひび割れは、乾燥によるコンクリート中の水分の蒸発により、コンクリートの体積が減少し、収縮するため壁面に概ね万遍なく生じることから、その測定は、壁面に一定の高さ(約1.5m)の基準線を引き、その線とひび割れとの交点を基準線1m当たりのクロス数(以下、「ひび割れ密度」と呼ぶ。)として調査する。配管等のある箇所は避け、可能な限り長くとることとする。調査方法のイメージを下図に示す。



ひび割れ調査方法概要

(6)実機における乾燥収縮ひび割れの傾向②

■ひび割れ調査結果(女川2号炉原子炉建屋)

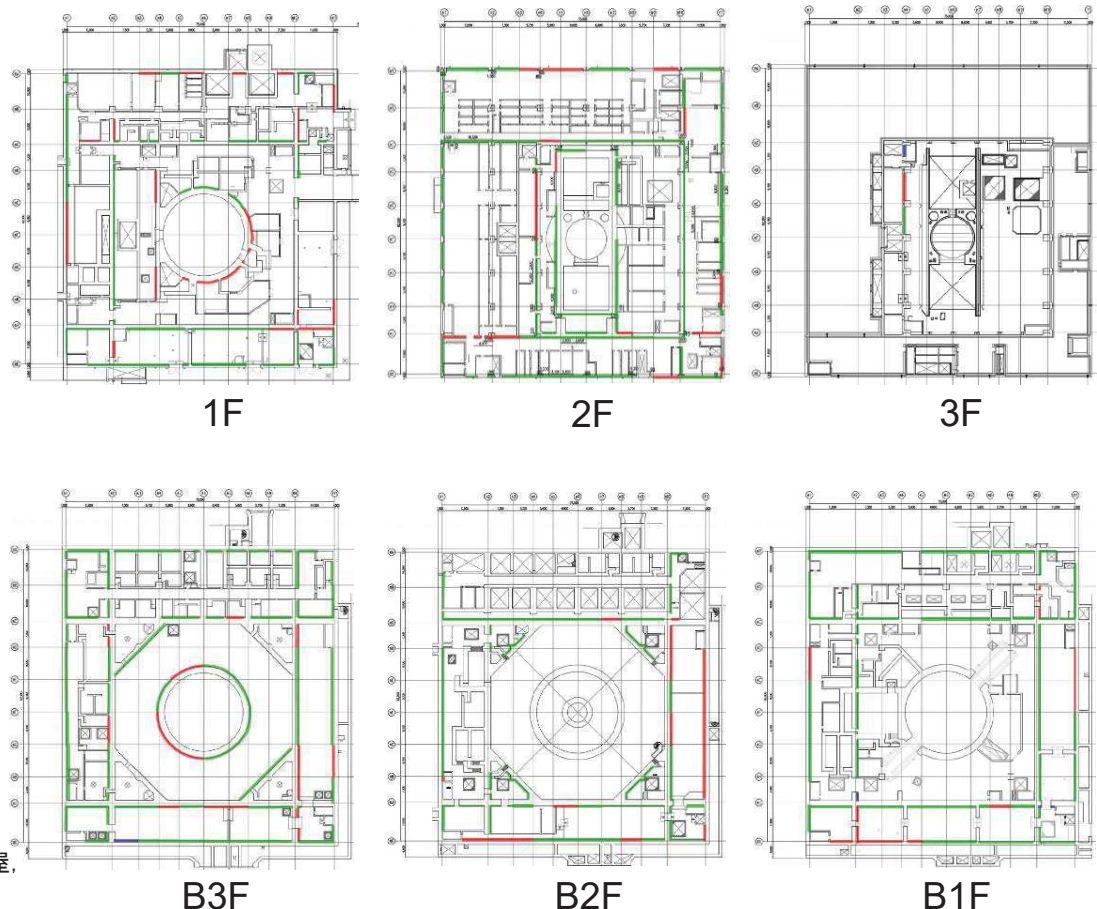
- ・ひび割れ密度は女川2号炉原子炉建屋において, 4~5の間の数値を示しており, 鉄筋間隔と同等である。
- ・平均ひび割れ幅はフロアによって大きな差はなく, 0.05~0.07mmと計測された。
- ・全建屋のひび割れ密度の平均値より+σ以上の耐震壁を赤色で, -σ以下の耐震壁を青色で, ±σに収まった耐震壁を緑色で示した図においては, 赤色を示している部位が多く確認される。

フロアごとのひび割れ調査結果 (女川2号炉原子炉建屋)

	ひび割れ調査長さ(m)		ひび割れ密度 (平均ひび割れ幅)
	建屋	各階	
3F	約2036	約14	約4.8 (0.05)
M2F		約30	約4.5 (0.05)
2F		約417	約4.2 (0.06)
M1F		約77	約4.0 (0.06)
1F		約269	約4.5 (0.06)
B1F		約360	約4.0 (0.05)
MB2F		約31	約4.5 (0.07)
B2F		約312	約4.8 (0.05)
MB3F		約86	約4.5 (0.05)
B3F		約440	約4.0 (0.06)

ひび割れ密度※
— : 平均より+σ以上多い
— : -σ~+σ
— : 平均より-σ少ない

※女川2号炉原子炉建屋,
 女川3号炉海水熱交換器建屋,
 東通1号炉原子炉建屋,
 東通1号炉海水熱交換器建屋
 の調査結果より平均値, σを算出
 (平均値:3, 標準偏差σ:2.4)

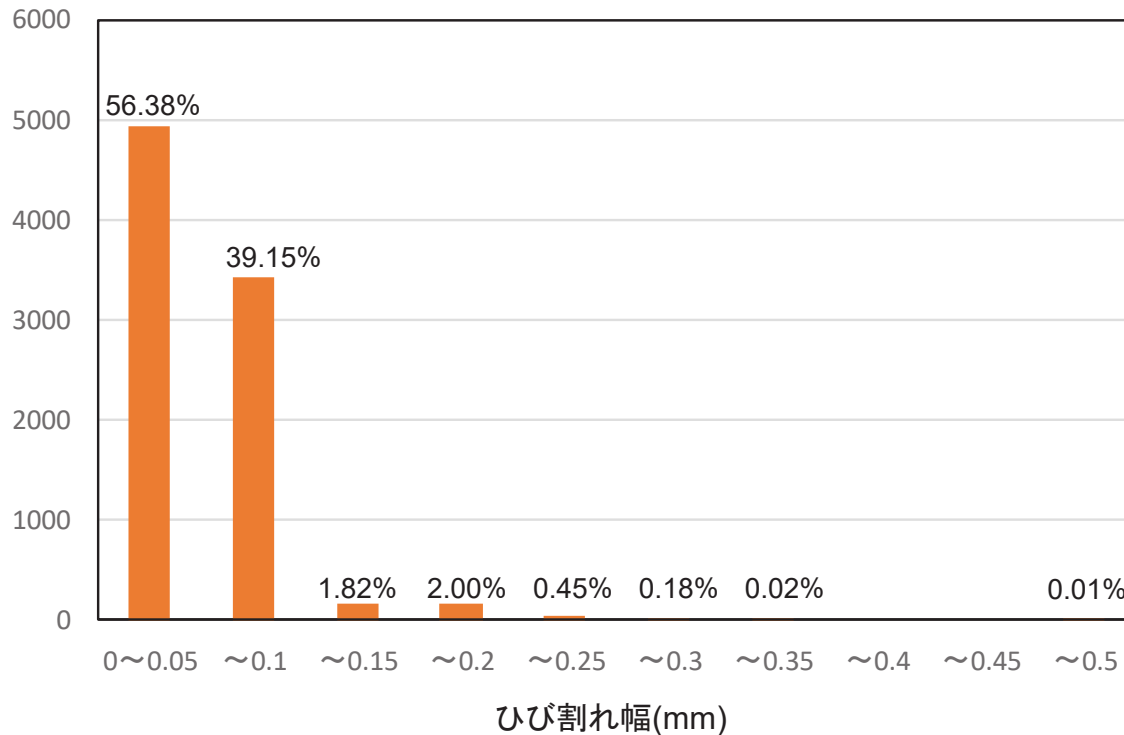


調査スパンごとのひび割れの多寡状況図
(女川2号炉原子炉建屋)

(6)実機における乾燥収縮ひび割れの傾向③

- 2号炉原子炉建屋の乾燥収縮ひび割れ調査結果によるひび割れ幅の度数分布から、乾燥ひび割れによるひび割れ幅は、0.05mm以下が約56%、0.05を超えて0.1mm以下が約39%の微小なひび割れであり、3.11地震時に生じたひび割れ幅(大部分は幅0～0.3mm未満)に比較して非常に小さい。

個所数(クロス数)

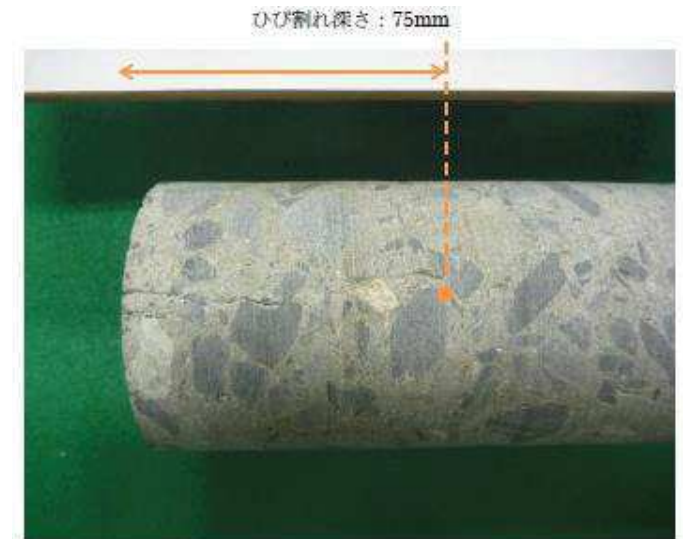
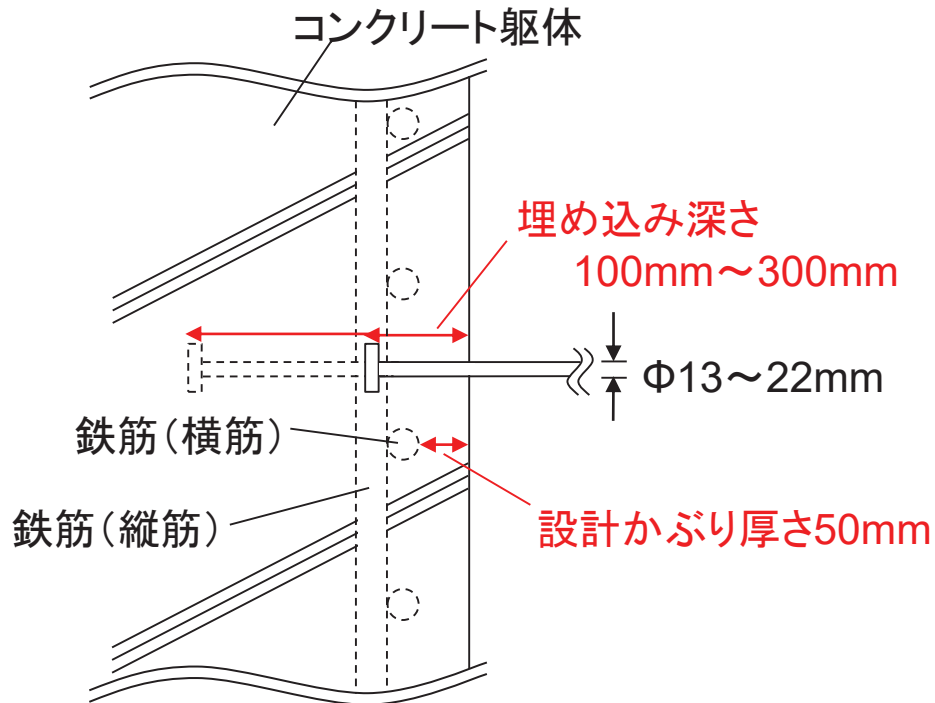


乾燥収縮ひび割れ調査結果(女川2号炉原子炉建屋)

(7) 機器アンカーと躯体の位置関係

- 鉄筋による拘束によって、アンカーのコーン状破壊の破壊面積が増大することが確認されており(松尾・金津(2014))※1, アンカーが鉄筋位置より深い位置で配置されると、ひび割れの影響は更に低減される。
- 実機におけるアンカー部の埋め込み深さは、標準的な埋込金物で100~300mmであり、アンカー部の端部は鉄筋位置よりも概ね深くなっている。
- また、躯体表面に乾燥収縮ひび割れがある箇所から採取したコンクリートコアでは、乾燥収縮ひび割れ深さは鉄筋位置程度となっている。

※1：曲げ損傷を受けた鉄筋コンクリート部材に定着されたアンカーの引張耐力に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.2, 2014



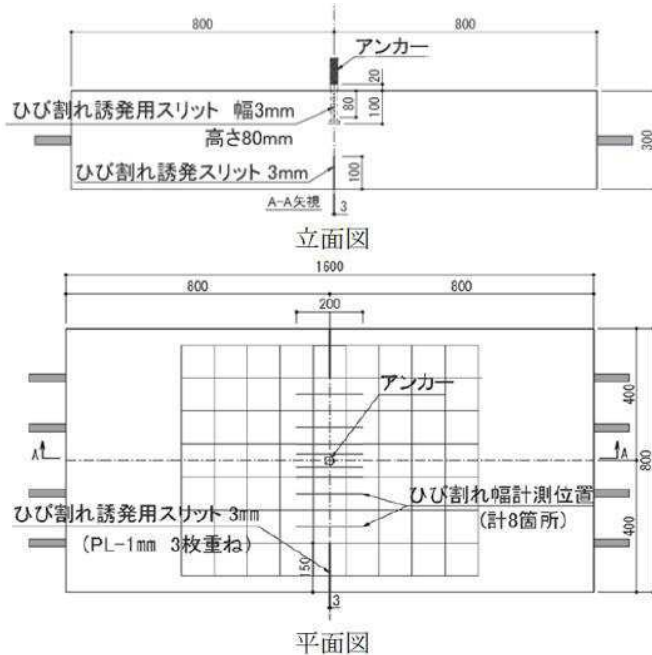
ひび割れ箇所から採取した
コンクリートコアの例

本コアの例ではひび割れ深さが75mm程度であり、横筋表面よりも深い位置となっている。

実機における機器アンカーとRC造建屋躯体および配筋の位置関係(例)

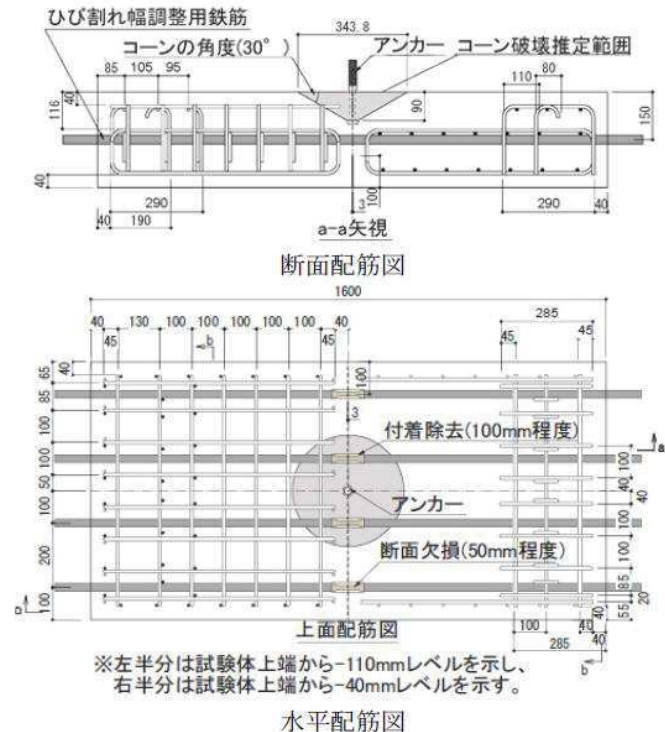
【参考①】ひび割れがあるアンカー部の耐力試験概要(1)

- ▶ 電力共通研究※1として、乾燥収縮ひび割れが機器支持部アンカーに与える影響を把握するために、アンカー部試験体にひび割れを導入し、ひび割れがアンカーのコーン破壊挙動に及ぼす影響を把握するための耐力試験を実施している。
- ▶ その結果、アンカー部を貫通するひび割れのひび割れ幅が0.4mmの場合では、貫通ひび割れが存在するにもかかわらず、円形ではないものの貫通ひび割れの両側にひび割れが進展しており、ひび割れが存在しても、その幅によっては引張力が伝達されることを示していると考えられる、とされている。また、ひび割れが無い場合の70%程度の耐力を示し、また、各種合成構造設計指針(日本建築学会)によるアンカー部の短期許容引張力を上回っていることが確認されている。



- ・曲げ加力によりひび割れを導入するために試験体を長方形とし、ひび割れがアンカー位置を貫通するように、試験体の上下面および側面にスリットを設けている。
- ・アンカーを貫通するひび割れ幅をパラメータ(0.0, 0.4, 1.0mm)とし、ひび割れ幅の違いがアンカーのコーン破壊挙動に及ぼす影響について検討している。

ひび割れアンカー試験体の概要



※左半分は試験体上端から-110mmレベルを示し、右半分は試験体上端から-40mmレベルを示す。

配筋がコーン破壊挙動に影響を及ぼさないように、コンクリートのコーン破壊推定領域として、コーンの角度を保守的に30度と仮定し、さらに余裕を考慮した外側の領域も含めて一切鉄筋を配筋しない設計としている。

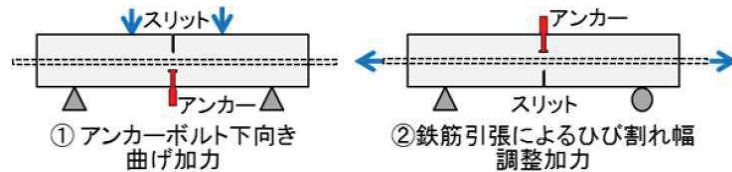
アンカー試験体の配筋図

※1 中村ほか(2018) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験(その1:試験計画・ひび割れ導入), 日本建築学会大会学術講演要集(東北)
水谷ほか(2018) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験(その2:ひび割れがアンカー耐力に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演要集(東北)

[参考①] ひび割れがあるアンカー部の耐力試験概要(2)

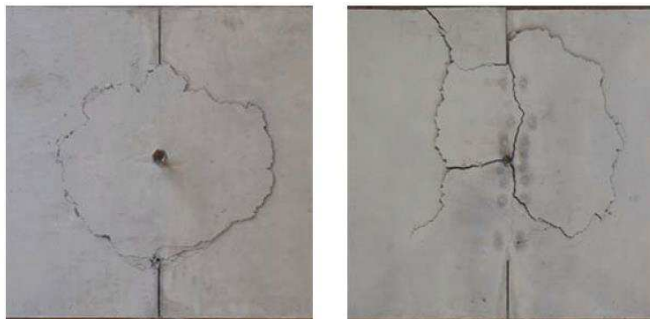
試験ケース

ひび割れ幅 (mm)	補修なし	エポキシ系補修材	セメント系補修材
なし	#1	—	—
0.4	#2	—	—
1.0	#3, #6	#4	#5



ひび割れ導入方法

アンカーボルト下向き状態での4点加力により、アンカー位置に曲げひび割れを発生させた。(上図①参照)
 曲げ加力だけでは断面を貫通するひび割れを導入することができないので、ひび割れ幅調整用鉄筋4本を同時に引張り、鉄筋を塑性化させることにより、ひび割れを全断面に貫通させ、ひび割れ幅を調整した。



a) 試験体#1(ひび割れなし)

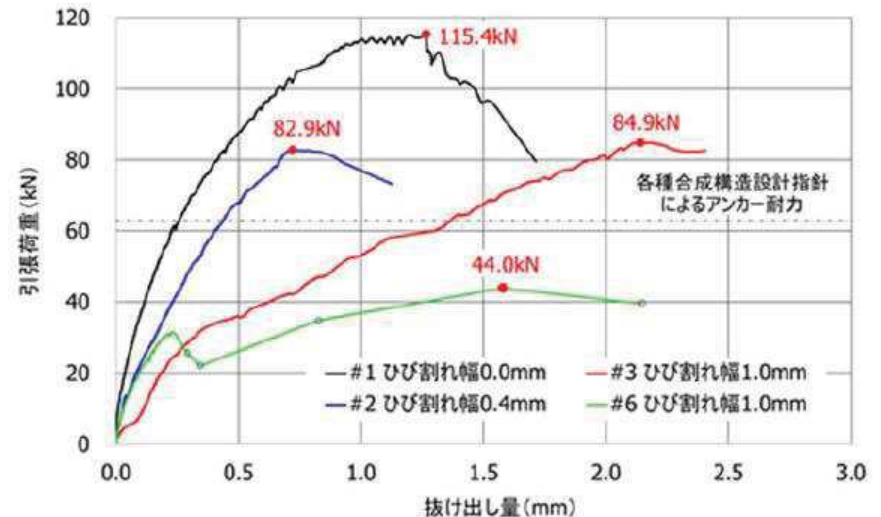
b) 試験体#2(0.4mm)

コーンひび割れ形状

アンカー試験結果(アンカー耐力検討)

試験体番号	ひび割れ幅 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	最大荷重 (kN)	抜け出し量 (mm)
#1	なし	35.6	33.0	3.19	115.4	1.27
#2	0.4	34.1	33.0	3.23	82.9	0.72
#3	1.0	34.1	33.0	3.23	84.9	2.14
#6	1.0	34.5	34.5	3.11	44.0	1.58

AIJ 各種合成構造設計指針による4試験体のアンカー耐力平均値: 62.9kN、
 4試験体のアンカーの短期/長期許容引張力平均値: 41.9kN/21.0kN

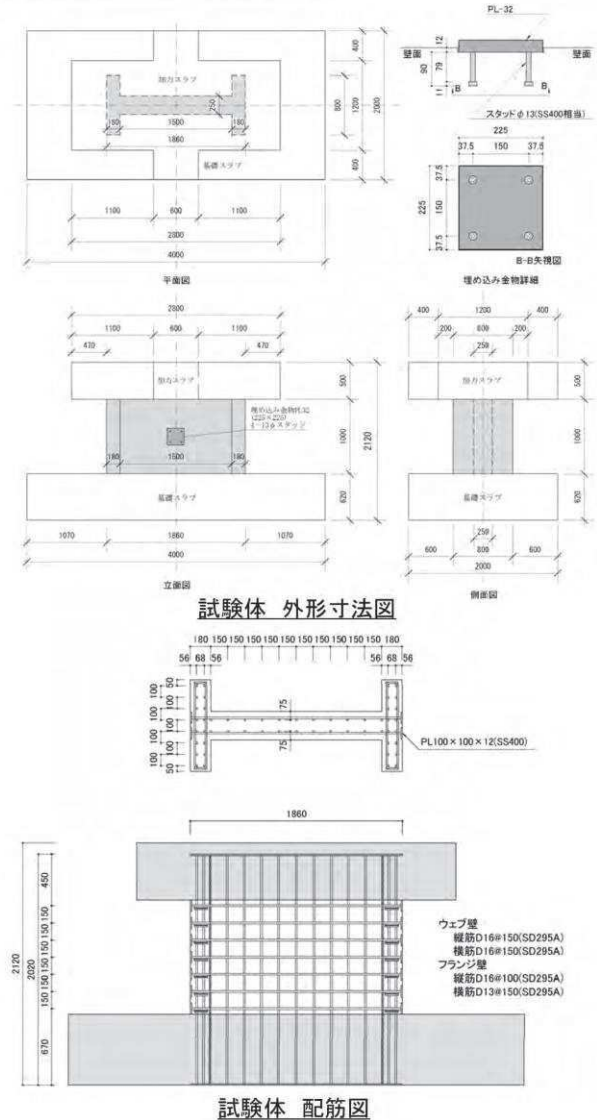


アンカーボルトの抜け出し量－引張荷重関係

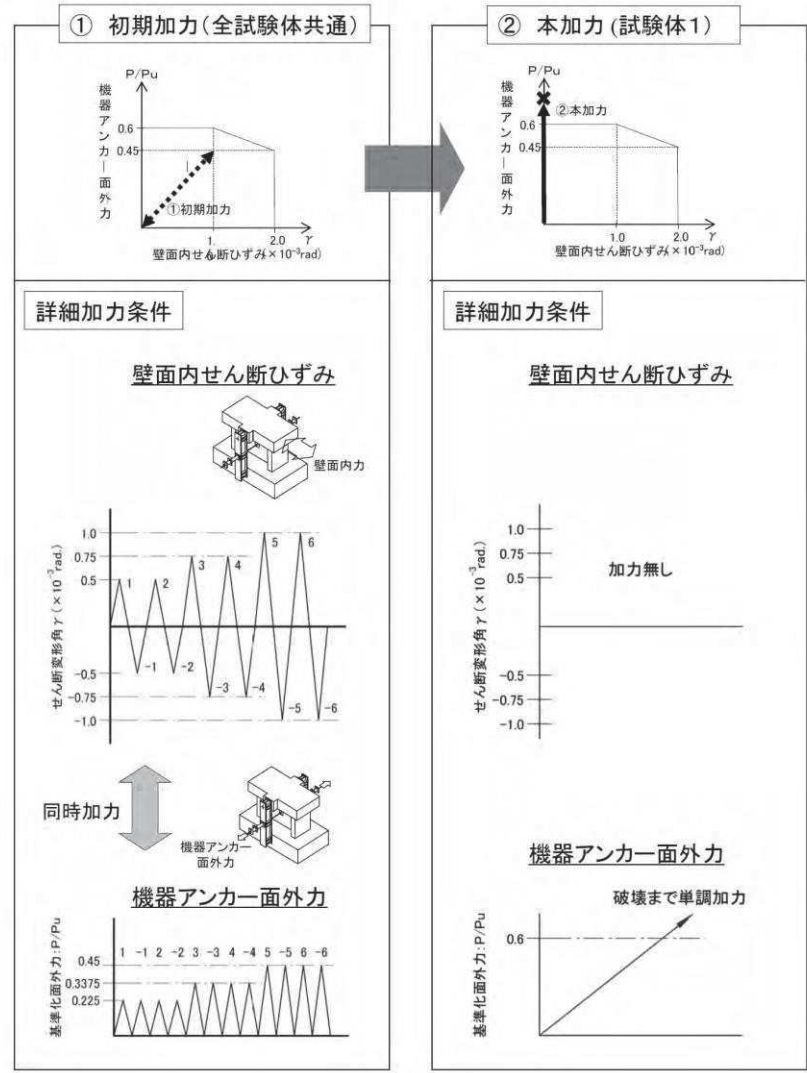
※ 中村ほか (2018) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験 (その1: 試験計画・ひび割れ導入), 日本建築学会大会学術講演要集 (東北)
 水谷ほか (2018) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験 (その2: ひび割れがアンカー耐力に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演要集 (東北)

[参考②] 地震履歴を受けた機器アンカー一部の耐力試験の概要(1)

試験体概要 (全試験体共通)

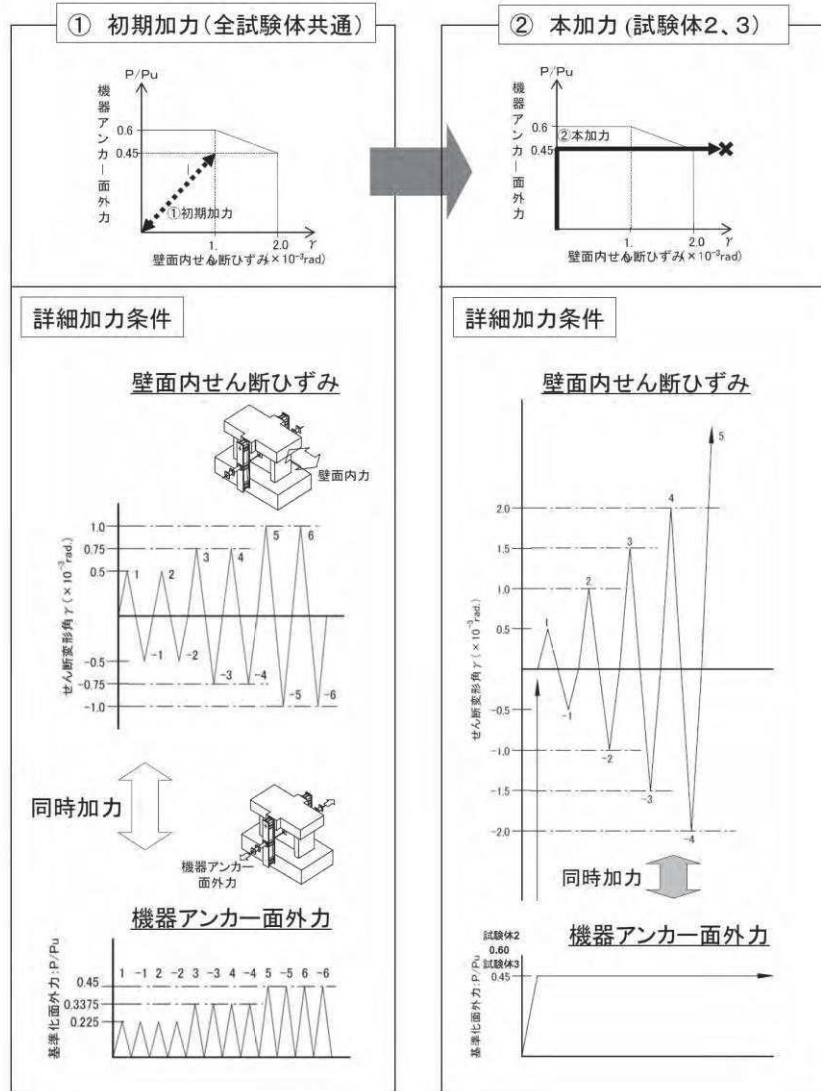


詳細加力条件 (試験体1)

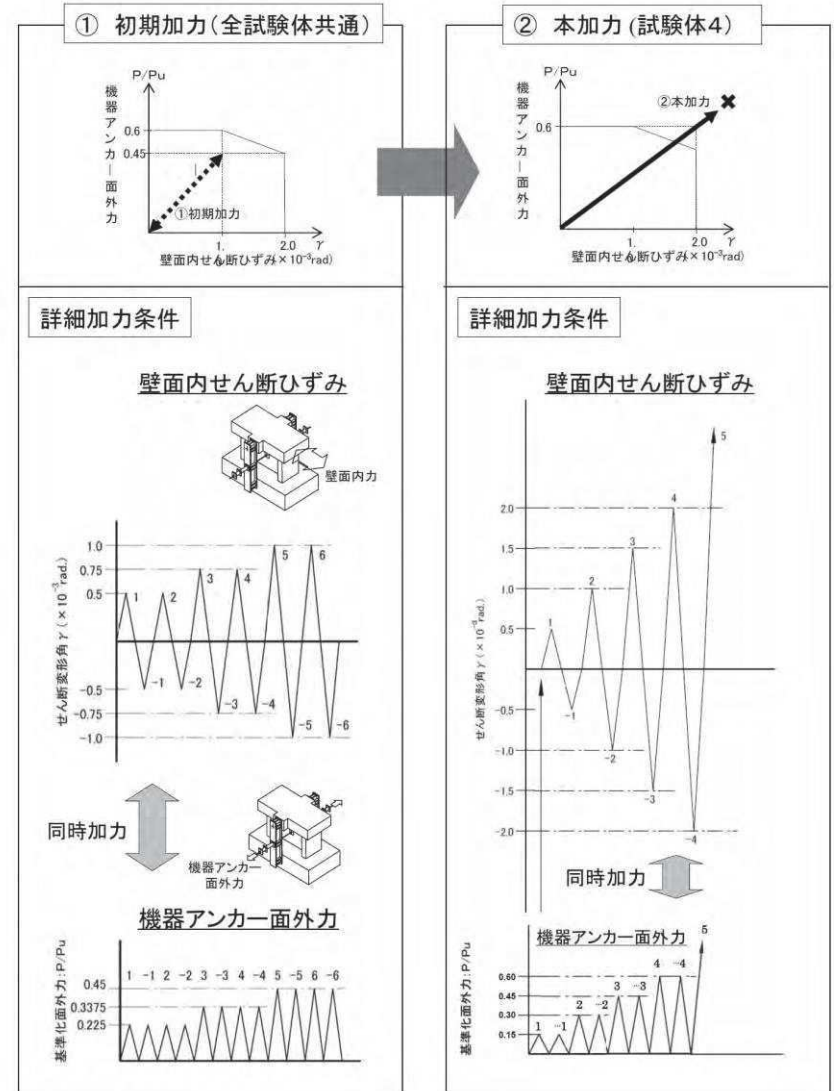


[参考②] 地震履歴を受けた機器アンカー一部の耐力試験の概要(2)

詳細加力条件 (試験体2, 3)



詳細加力条件 (試験体4)



[参考②] 地震履歴を受けた機器アンカー一部の耐力試験の概要(3)

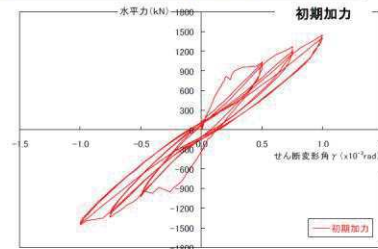
試験状況写真



試験体1 結果概要

荷重—変形 関係

壁面内せん断力—せん断変形角(ひずみ) γ



初期加力終了時

実線: 正加力時発生ひび割れ
破線: 負加力時発生ひび割れ



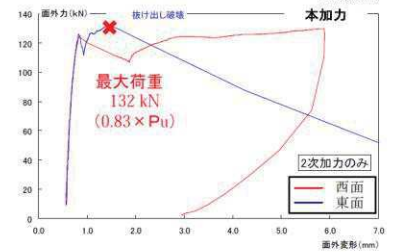
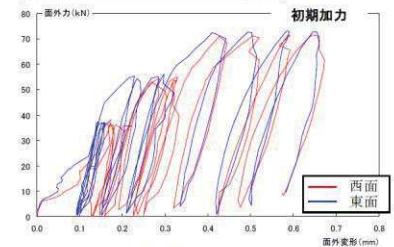
【ひび割れ発生状況 (-1サイクル目: $\gamma = -0.5 \times 10^{-3}$)】

本加力終了時



埋込金物破壊状況(シアコン破壊)

機器アンカー面外力—面外変形



【ひび割れ発生状況 (-6サイクル目: $\gamma = -1.0 \times 10^{-3}$)】



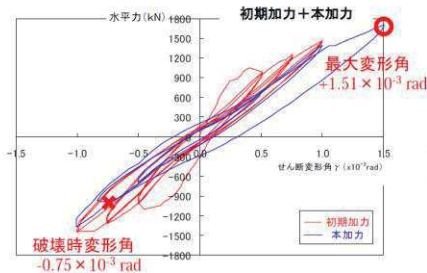
埋込金物破壊状況(シアコン破壊)

[参考②] 地震履歴を受けた機器アンカー一部の耐力試験の概要(4)

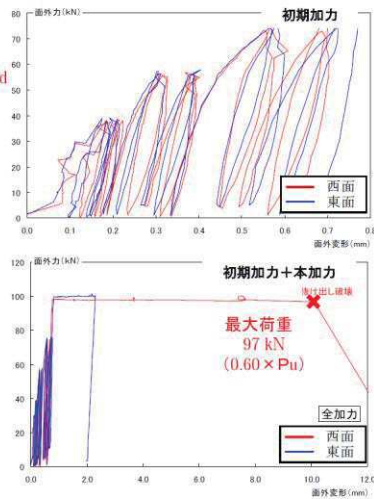
試験体2 結果概要

荷重—変形 関係

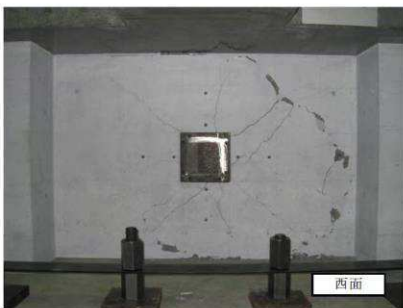
壁面内せん断力—せん断変形角(ひずみ) γ



機器アンカー一面外力—面外変形



本加力終了時



埋込金物破壊状況(シアコン破壊)

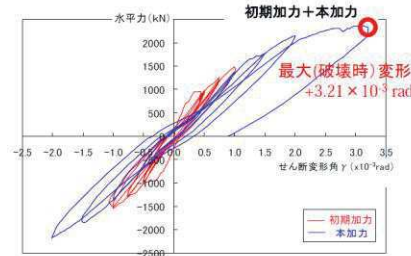


埋込金物破壊状況(シアコン破壊)

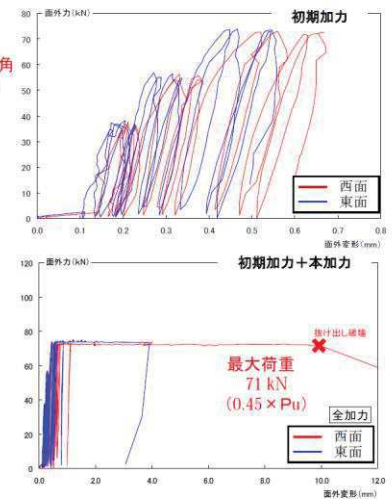
試験体3 結果概要

荷重—変形 関係

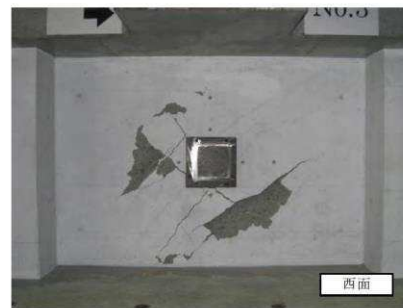
壁面内せん断力—せん断変形角(ひずみ) γ



機器アンカー一面外力—面外変形



本加力終了時



埋込金物破壊状況(シアコン破壊)



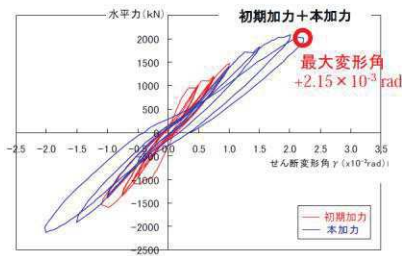
埋込金物破壊状況(シアコン破壊)

[参考②] 地震履歴を受けた機器アンカー一部の耐力試験の概要(5)

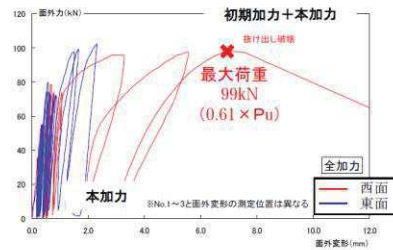
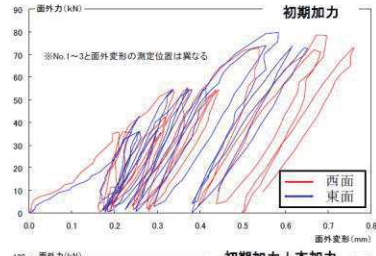
試験体4 結果概要

荷重—変形 関係

壁面内せん断力—せん断変形角(ひずみ) γ



機器アンカー—面外力—面外変形



本加力終了時



埋込金物破壊状況(シアコン破壊)



埋込金物破壊状況(シアコン破壊)

表 6.1.1-1 機器アンカー部(埋込金物)の引抜耐力に及ぼす地震履歴の影響

加力条件	地震履歴(初期加力 [※])の影響 ※面外力 0.45Pu、面内せん断変形角(ひずみ) 1.0×10^{-3} rad	JEAC4601 設計許容限界(案)との関係
面外力のみ (試験体 1)	既往の初期加力無しの単調加力及び繰返し加力試験に比べ、引抜耐力が低下した	引抜耐力は設計許容限界(面外力で 0.6Pu)を上回った
面外力一定 (試験体 2, 3)	既往の初期加力無しの試験結果に比べ、同等以上の面内せん断変形角(ひずみ)で破壊した	引抜耐力は設計許容限界(面外力、面内せん断変形角(ひずみ))で(0.6Pu、 1×10^{-3} rad)、(0.45Pu、 2×10^{-3} rad)を上回った
面外力と面内せん断変形角(ひずみ)の組合せ		
共に漸増 (試験体 4)	既往の初期加力無しの試験結果に比べ、引抜耐力が 20~30%程度低下した	引抜耐力は設計許容限界(面外力、面内せん断変形角(ひずみ))で(0.5Pu、 1.67×10^{-3} rad)を上回った。

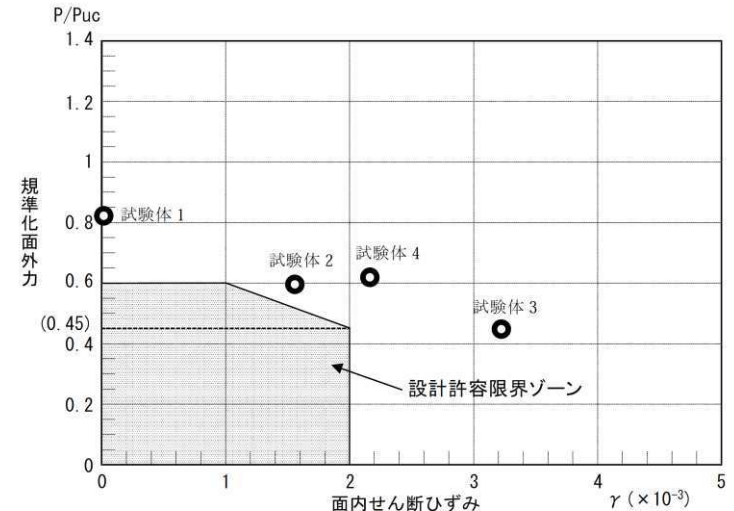


図 6.1.1-8 本試験結果と設計許容限界ゾーン(JEAC4601 案)との比較

指摘事項No.92に対する回答

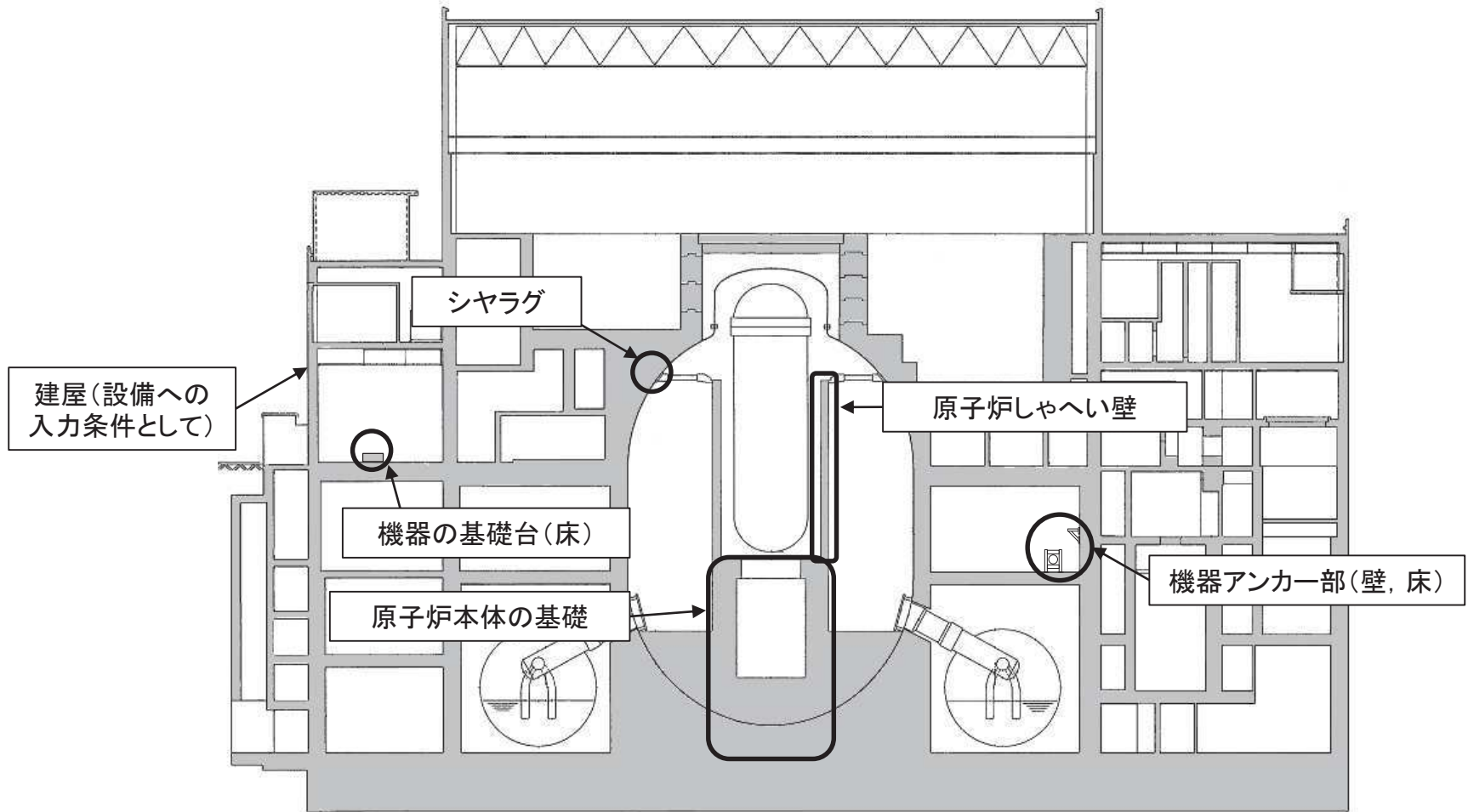
No	審査会合日	項目
92	平成30年9月25日	乾燥収縮及び地震によるひび割れを踏まえた機器・配管系の耐震評価に係る条件設定について、耐震評価への影響が小さい項目も含めて網羅的に抽出し、評価条件の設定方針を提示すること。

乾燥収縮及び地震影響のひび割れを踏まえた機器・配管系の耐震評価に係る条件設定

- ▶ 乾燥収縮及び地震影響によるコンクリートのひび割れを踏まえ、評価への影響の可能性が考えられる機器・配管系の設備を構造的な分類により抽出し、抽出された設備の耐震評価において考慮すべき内容を整理する(次頁参照)。
- ▶ 耐震評価において考慮すべき内容は、評価対象部位ごとに 応答解析及び強度評価に区分し、コンクリートのひび割れに係る影響検討結果(建屋の初期剛性が低下していること、建屋躯体の耐力への影響が小さいこと)、設備の構造特徴等を踏まえて検討を行う。
- ▶ コンクリートと関連する機器・配管系の設備のうち、建屋(設備への入力条件として)、原子炉本体の基礎、機器の基礎台及び機器アンカー部の応答解析に対して、乾燥収縮及び地震影響のひび割れの影響として、建屋の初期剛性低下を考慮した設計を行う。

評価対象部位	応答解析における考慮	強度評価における考慮
建屋(設備への入力条件として)	<ul style="list-style-type: none"> ・床応答スペクトルは、建屋解析モデルの基本ケースに対する拡幅率$\pm 10\%$と不確かさケースとの比較を行い、その結果を設計に反映する。なお、フロア毎に全質点包絡の床応答スペクトルを用いることを基本とする。 ・原子炉建屋と連成解析を行う大型機器は、建屋解析モデル(基本ケース、不確かさケース)を反映した応答解析結果を用いた設計とする。 	—
原子炉本体の基礎	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼板で覆われているため、内部に充填されたコンクリートの乾燥収縮の影響はないと考えられる*が、念のため、建屋側と同様の剛性低下を考慮した設計とする。 ※鋼板で覆われているコンクリートの乾燥収縮に関する文献レビュー参照 	<ul style="list-style-type: none"> ・内部に充填されたコンクリートには、強度を期待せず、鋼板のみで耐える設計とする。【従来同様】
機器の基礎台	<ul style="list-style-type: none"> ・基礎台は、十分な剛性を持たせた設計であるため、コンクリートのひび割れの影響はない。なお、評価用荷重は、建屋解析モデルを反映した応答解析結果を用いた設計とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋躯体と同様の構造であり、耐力への影響はないことから、JEAG4601に基づく設計とする。【従来同様】
機器アンカー部	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋躯体に直接設置されていることから、建屋解析モデルを反映した応答解析結果を用いた設計とする。 	<ul style="list-style-type: none"> ・JEAG4601に基づく設計とする(コンクリートのコーン状破壊の評価において、建屋の面内せん断ひずみ度に応じた低減係数を考慮)。【従来同様】
原子炉しゃへい壁	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼板の剛性のみを考慮した応答解析であるため、コンクリートのひび割れの影響はない。【従来同様】 	<ul style="list-style-type: none"> ・内部に充填されたモルタルには、強度を期待せず、鋼板のみで耐える設計とする。【従来同様】
シヤラグ	<ul style="list-style-type: none"> ・ばね定数は、鋼材の物性値により設定されるため、コンクリートのひび割れの影響はない。【従来同様】 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートの圧縮に係る評価には、ひび割れの影響は無視できること、建屋躯体の耐力への影響はないことから、JEAG4601に基づく設計とする。【従来同様】

コンクリートと関連する機器・配管系の設備の抽出結果



□ : コンクリートと関連する機器・配管系の設備

■ : コンクリート

鋼板で覆われているコンクリートの乾燥収縮に関する文献レビュー

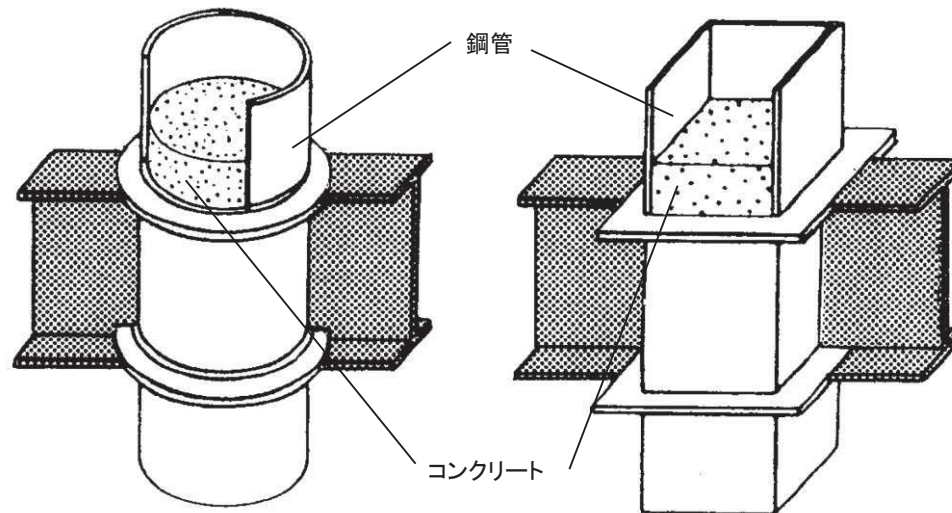
- ▶ 「鋼・コンクリート複合構造の理論と設計 (1)基礎編:理論編」(土木学会)によると、コンクリートが鋼管によって密閉されている状況のCFT構造(Concrete Filled Steel Tube:コンクリート充填鋼管構造)では、乾燥収縮の影響は無視できるとされており、類似の状況である鋼板で覆われているペDESTAL等のコンクリートも乾燥収縮の影響が無視できると考えられる。

■ 鋼板で覆われているコンクリートの乾燥収縮の影響 ※1

(d) 充填したコンクリートの乾燥収縮の影響

コンクリート充填鋼管柱の場合、実験¹⁾によれば、乾燥収縮ひずみはコンクリートのみでできている柱の9%(28×10^{-6})にしか達していない。このように乾燥収縮ひずみが著しく小さいのは、鋼管によって密閉された状況のもとで固結するとき、乾燥が進まず、ほとんど収縮が起こらないためであると考えられている。したがって、コンクリートの乾燥収縮を無視して差しつかえない。

※1 土木学会:鋼・コンクリート複合構造の理論と設計 (1)基礎編:理論編,1999.4 P.132記載抜粋,加筆



CFT構造のイメージ※

※コンクリート工学 37巻 1999 4号に一部加筆

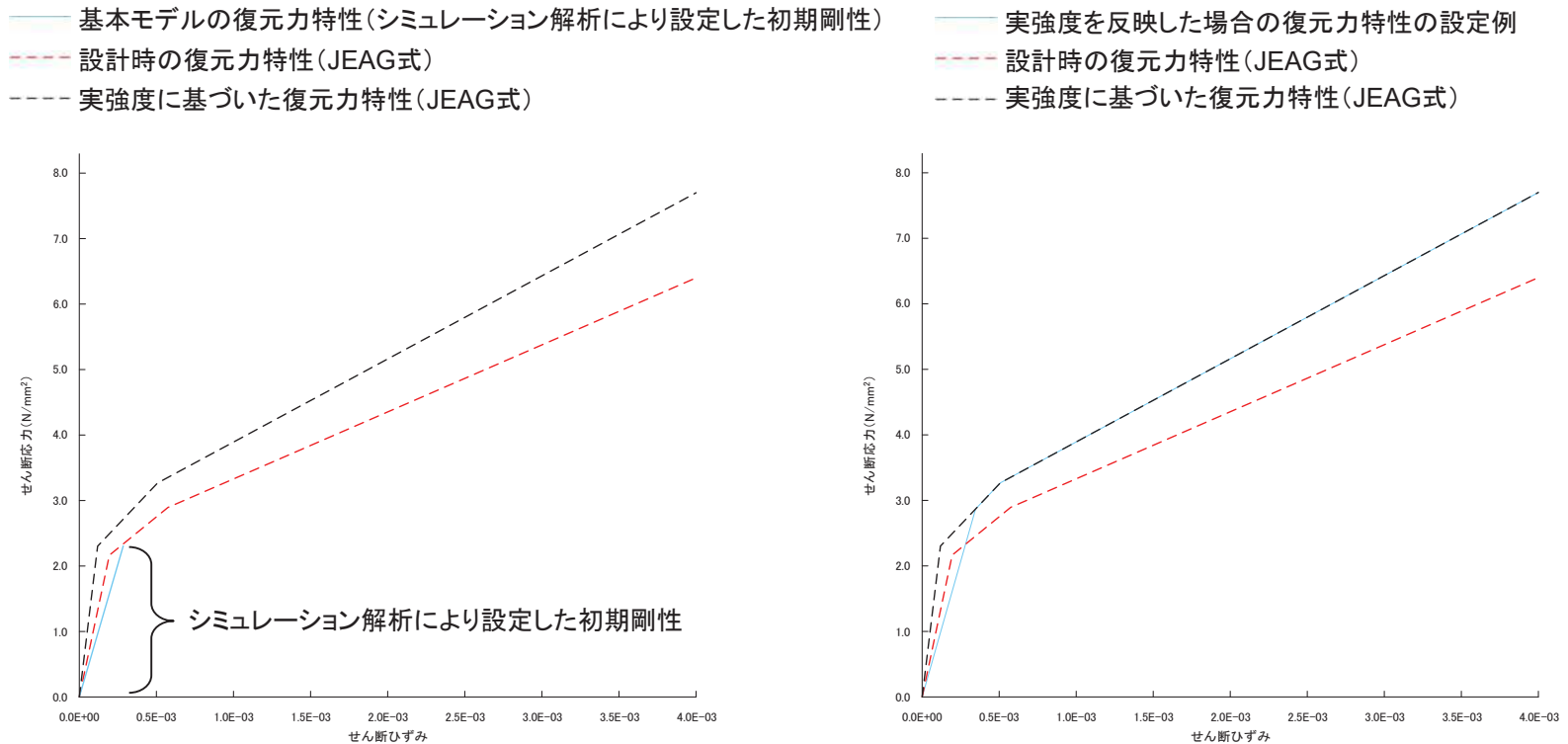
指摘事項No.93に対する回答

No	審査会合日	項目
93	平成30年9月25日	床応答スペクトルの拡幅率10%に対するばらつきの検討について、設計基準強度と実強度の差異を終局耐力に反映する方針を提示すること。

拡幅スペクトルの検討に実強度を反映する場合の検討方針

拡幅スペクトルを検討する際の実強度を反映した建屋の地震応答解析モデルは以下の方針で策定する。

- ①実強度もしくは実ヤング係数については、実機から採取したコンクリートコアの強度試験結果等を踏まえて推定する。
- ②復元力特性は、初期剛性としては3.11地震等のシミュレーション解析で設定した剛性を採用し、それ以降はJEAG式に基づく実強度を考慮した復元力特性を採用することを基本とする。



実強度を反映する場合の復元力特性の設定例