

論文 高性能芳香族樹脂塗装を施した RC 貯水槽の水密性に関する実験研究

竹崎 真一*1・小野 英雄*2・吉本 稔*3・浦林 輝人*4

要旨：原子力発電所の重大事故対処施設として水源施設が必要である。この水源施設を放射線管理区域外に設ける場合でも、万全を期すため水密性と耐震性を確認する必要がある、その対策として強度と柔軟性を有する高性能芳香族樹脂塗装を用いることが考えられる。そこで、実機水源を模擬したボックス壁の縮小試験体に上記塗装を施した後、満水状態で正負繰返し載荷試験を実施した。結果、設計でのクライテリア $\gamma=2/1000$ 以上の変形を与えた際でも塗装はひび割れ追従性がみられ漏水は生じず、損傷挙動に影響はないことから、従来の RC 躯体の設計体系に基づいた耐震評価を行うことで水密性の担保が可能であることを確認した。

キーワード：原子力施設, ボックス壁, 高性能芳香族樹脂, ひび割れ, 水密性, FEM 解析

1. はじめに

原子力発電所の重大事故に対処する施設に設けられる水源ピットは、地震時および事故時に高い水密性が要求される。水源ピットを鉄筋コンクリート造とする場合、ひび割れからの漏水を防止するため、従来はステンレスによるライニングが施されてきた。しかし、近年、強度と柔軟性を有する高性能芳香族樹脂塗装が開発され、水密性を確保する必要がある設備に用いられ始めている。そこで、本研究では、塗布防水を行った RC 貯水槽の地震時水密性は RC 躯体の耐震評価によって確認できるかを実証するために、実機貯水槽を対象とした縮小試験体を製作し、構造実験と FEM 解析により検討を行った。本論では、この実験と FEM 解析の概要と結果について報告する。

2. 試験計画

2.1 試験体

試験体の形状寸法を図-1 に、試験区間の配筋（平面図）を図-2 に示す。試験体は実機貯水槽を模擬した 1/5 スケールのボックス形 1 体とし、その形状寸法は壁芯長

さ 1700mm×2200mm、内法高さ 1600mm である。試験区間の上下には水平力の載荷に必要な基礎スタブと加力スタブを設けている。壁厚 t は水圧によって生じる面外の曲げモーメントによる縁応力度の最大値が実機と同等となるように設定し、その厚さは事前に実施した予備解析の結果から $t=100\text{mm}$ とした。壁筋量は実機の最小値により設定し、その鉄筋比は $P_s=0.64\%$ 、配筋は D6-@100 とした。軸力はひび割れに対する安全側の評価としてなしとしている。壁の内面および基礎スタブ上面にはひび割れからの漏水の防止を目的に高性能芳香族樹脂を厚さ 3.0mm で塗布した。この高性能芳香族樹脂塗装はポリウレアを主成分としたウレア結合が主体の化合物であり、コンクリートとの付着力が高く、ひび割れ追従性に優れた材料であり、その施工方法は、コンクリート表面の下地処理、素地調整を行い、プライマーを塗布した後、専用機械により吹付け塗装するものである。

2.2 使用材料

コンクリートの材料試験結果を表-1 に示す。コンクリートには実験時の目標圧縮強度が 30N/mm^2 の普通コンクリートを用いた。打設は基礎スタブ、試験部、加力

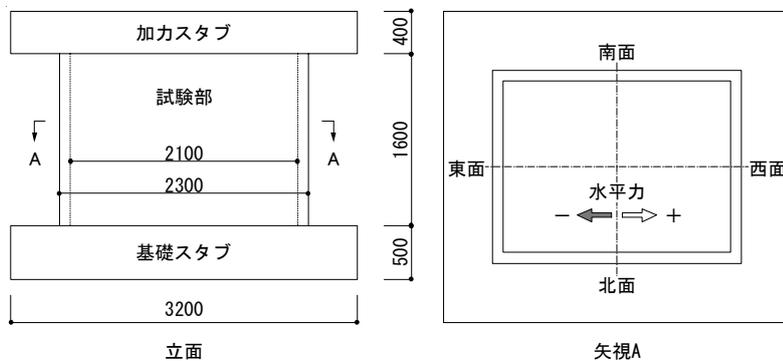


図-1 試験体の形状寸法



図-2 試験区間の配筋（平面図）

*1 大成建設（株） 技術センター 博士(工学) (正会員)

*2 大成建設（株） 原子力本部 博士(工学)

*3 関電プラント（株） 原子力事業本部

*4 関西電力（株） 原子力事業本部

表-1 コンクリートの材料試験結果

部位	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	ポアソン比	割裂強度 (N/mm ²)
試験部	33.0	2.95	0.21	2.87
基礎スタブ	36.7	3.01	0.20	3.34
加カスタブ	33.4	2.94	0.21	2.58

表-2 鉄筋の材料試験結果

鉄筋種別		降伏点 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
試験部	壁筋D6	388	1.83	599	23.0
スタブ	主筋D22	374	---	574	25.0
	配力筋D16	376	---	572	25.2
	幅止筋D13	358	---	496	26.5

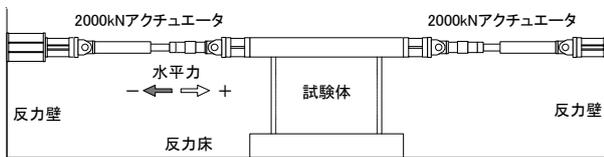


図-3 加力方法 (立面図)



写真-1 加力状況

スタブの3回に分けて行い、試験部には呼び強度24N/mm²、目標スランプ18cm、粗骨材最大寸法13mmのものを、スタブには呼び強度24N/mm²、目標スランプ15cm、粗骨材最大寸法20mmのものを打設した。表-1中の結果は加力日に実施した3本の供試体による試験結果を平均したものである。

鉄筋の材料試験結果を表-2に示す。壁筋D6にはSD345を、基礎スタブと加カスタブの主筋D22と配力筋D16にはSD345を、幅止め筋D13にはSD295Aを用いた。

2.3 加力・測定

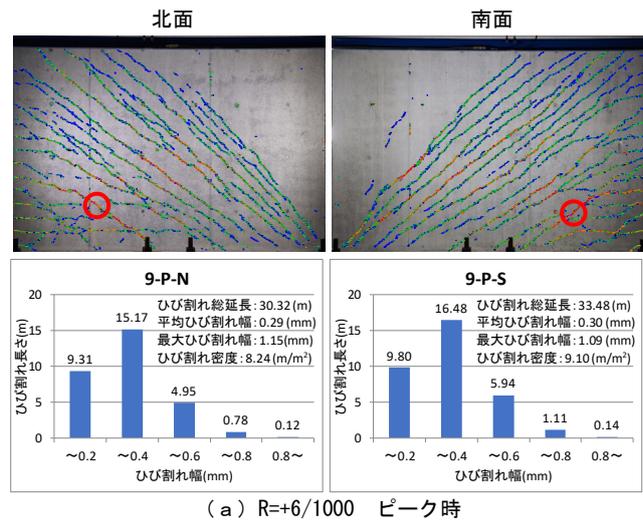
加力方法を図-3に示す。せん断力の載荷は加カスタブに取付けた4台の2000kNアクチュエータを変位制御で押し引きすることによって行った。載荷履歴は既往の実験¹⁾と同様とし、全体変形角R=±0.5/1000, ±1/1000, ±2/1000, ±4/1000, ±6/1000, ±8/1000を各2回ずつ計12回の正負交番繰返し載荷を行った後、最終状態を確認するためR=12/1000まで加力した。測定はせん断力のほか、全体変形、変形成分を分離するための試験区間内の

鉛直方向の区間変位、壁筋のひずみ等について行った。加力状況を写真-1に示す。

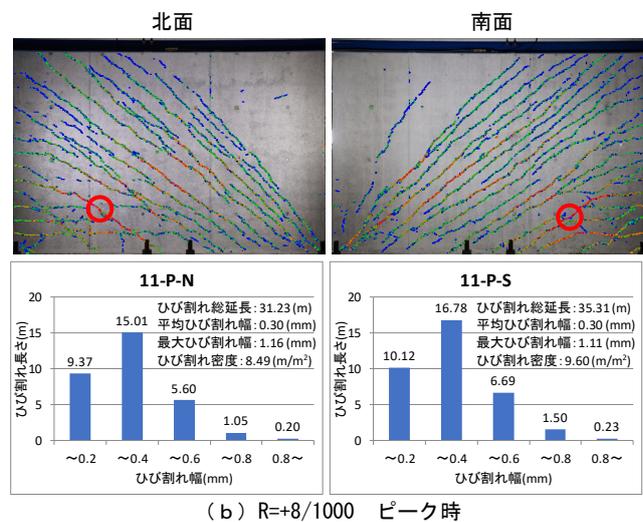
3. 実験結果

3.1 ひび割れ発生状況

ひび割れ発生状況とひび割れ長さ-ひび割れ幅関係を図-4に、最終ひび割れ状況を図-5に示す。同図は、高精度のデジタルカメラで撮影した画像を入力画像とし、



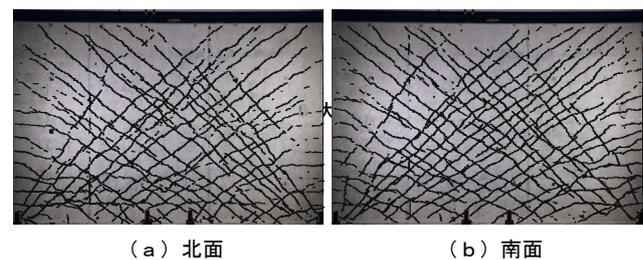
(a) R=+6/1000 ピーク時



(b) R=+8/1000 ピーク時



図-4 ひび割れ発生状況



(a) 北面 (b) 南面

図-5 最終ひび割れ状況



(a) 外面 (b) 内面
写真-2 試験後の壁の外部と内部の状況

文献 2) のひび割れ画像解析システムを用いて、発生した全てのひび割れを対象にひび割れ幅を 0.2mm ピッチで色分けしたものであり、部材角 $R=+6/1000$, $R=+8/1000$ ピーク時におけるウェブ壁となる北面と南面について示している。また、最大ひび割れ幅の発生位置を赤丸で示している。

加力開始後、第 1 サイクルの $R=\pm 0.5/1000$ の加力でフランジ壁に相当する東面と西面の脚部に曲げひび割れが、 $R=1/1000 \sim 2/1000$ の加力でウェブに相当する北面と南面の中央に大きなせん断ひび割れが発生した。以降の加力ではそれらのひび割れが壁全面に分散して多数発生した。最終的なひび割れ間隔は壁筋間隔とほぼ同じ 100mm 程度となり、耐震壁のせん断ひび割れ性状を検討した既往の研究³⁾と同様の結果であった。

後述のせん断力 Q - 全体変形角 R 関係およびせん断力 Q - せん断変形角 γ 関係による検討の結果、 $R=\pm 8/1000$ 時の γ は $\gamma=6/1000$ 程度であった。一方、試験体の鉄筋間隔は 100mm、対象とした実機の鉄筋間隔は 200mm であり、前述の既往の研究結果³⁾から推察される試験体でのひび割れ本数は実機の約 2 倍、すなわち、ひび割れ幅は半分程度となる。また、原子力施設の設計でクライテリアとしている $\gamma=2/1000$ 時の状態は試験での $\gamma=4/1000$ とほぼ同等となる。本試験での $R=8/1000$ 時には $\gamma=4/1000$ を上回る変位となっているものの、この変位段階までにひび割れからの漏水は確認されなかった。また、最終加力となる $R=12/1000$ 時において、圧縮側フランジの西面脚部において圧壊の兆候を示す縦ひび割れが発生し、一部のコンクリートが剥離するものの、漏水はなく、水抜きを実施した約 12 時間後においても漏水は確認されなかった。また、水抜き後の検査においても樹脂塗装に破れはなく、コンクリートのひび割れに追従していた。写真-2 に壁脚部隅角部位置でのコンクリートの剥離状況とその内面での樹脂塗装の状況を示す。壁面のみならず損傷の大きかった隅角部位置においても樹脂塗装に損傷はみられず、コンクリートが圧壊して剥離した位置においても漏水は一切確認されなかった。

$R=\pm 8/1000$ 時のひび割れ幅はいずれも 0.2~0.4mm が最も多く、その総長さは 15m 程度であった。また、最大ひび割れ幅は 1.1~1.2mm、平均ひび割れ幅は 0.3mm 程

度であった。

3.2 せん断力-全体変形角関係

せん断力 Q - 全体変形角 R 関係を図-6 に示す。図中の赤線は後述の図-11 に示す解析モデルを用いて加力前に実施した FEM 解析結果であり、コンクリート強度には 30N/mm^2 を、鉄筋の降伏点には 345N/mm^2 を用い、単調載荷にて実施した。また、図中の青線は原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601 に示されている評価式による曲げ耐力の計算値である。また、試験での曲げひび割れ発生時を□で、せん断ひび割れ発生時を○で、最大耐力時を▼で示している。

$R=\pm 0.5/1000$ 加力時での曲げひび割れの発生後、引張側となるフランジ脚部での縦筋の降伏が $R=\pm 1/1000$ の加力で、ウェブでの横筋の降伏が $R=\pm 4/1000$ の加力で確認された。最大耐力 Q_{max} は $R=6/1000$ に確認され、そ

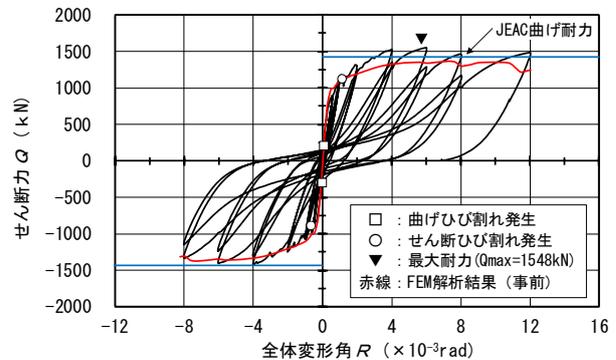


図-6 せん断力 Q - 全体変形角 R 関係

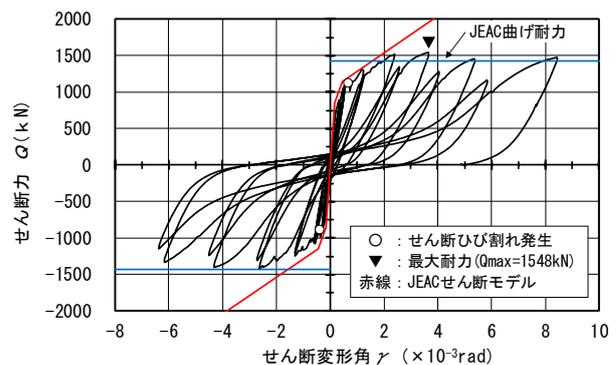


図-7 せん断力 Q - せん断変形角 γ 関係

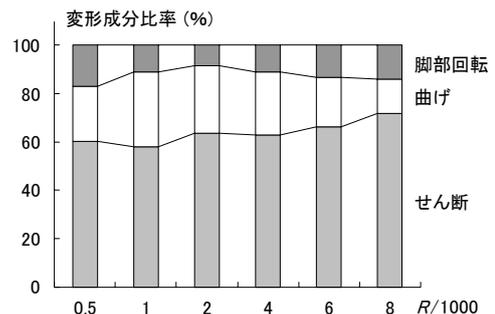


図-8 各変形成分の比率の推移

の値は $Q_{max}=1548kN$ となり、JEAC4601 の評価式による曲げ耐力の計算値とほぼ一致した。最大耐力以降はフランジ面とウェブ面でのひび割れが拡大・進展するものの明確なせん断破壊は生じず、最終変位となる $R=12/1000$ まで耐力は緩やかに低下した。本試験での耐力は JEAC 曲げ耐力とほぼ一致し、後述 3.3 節に示す JEAC せん断耐力計算値の 75%程度となっており、本試験での破壊形式は曲げ破壊と判断した。

FEM 解析結果との比較において、正加力時における解析でのせん断耐力が実験値をやや下回るものの、剛性変化点や耐力低下の傾向を概ね模擬する結果であった。解析での耐力がやや低くなった要因としてコンクリートと鉄筋の材料強度に規格値を用いたことが考えられ、後述の事後解析では材料試験結果による実強度を用いた解析を再度実施した。

3.3 せん断力-せん断変形角関係

せん断力 Q -せん断変形角 γ 関係を図-7 に示す。同図のせん断変形は、フランジに相当する東面と西面の中心位置で高さ方向に 7 区間に分割して測定した各区間の変位を用いて算出した曲げ変形と脚部回転変形を、全体変形から差し引くことにより求めた。また、図中には JEAC4601 に示されている復元力特性モデル(以下、JEAC モデル) による $Q-\gamma$ 関係を赤線で示している。また、試験でのせん断ひび割れ発生時を○で、最大耐力時を▼

で示している。

試験から得られた $Q-\gamma$ 関係は、ひび割れの発生前の初期剛性やせん断ひび割れ発生後の剛性低下の状況など、 $\gamma=2/1000$ まで JEAC モデルによる評価結果と良好な対応を示した。一方、前節のせん断力-全体変形角関係に示したように、破壊形式が曲げ破壊であったため、その後 $\gamma=4/1000$ までは JEAC せん断耐力より小さくなり、JEAC 曲げ耐力と良好な対応を示した。

各変形成分の比率の推移を図-8 に示す。同図は、各加力サイクルの正負 1 回目ピーク時の結果を平均したものである。

第 1 サイクルの $R=0.5/1000$ 時の各変形成分の比率は、せん断変形成分で 60%、曲げ変形成分で 20%、脚部回転変形成分で 20%程度であり、以降の加力においてもせん断変形成分が大部分を占めている。 $R=1\sim 2/1000$ の加力では、フランジに相当する東面と西面の中央から上部付近の領域まで曲げひび割れが発生したため、曲げ変形成分が増大した。その後、引張側フランジ脚部での縦筋の降伏が顕著となり、脚部回転変形成分が微増している。繰返し载荷を実施した $R=8/1000$ での変形成分比率は、せん断変形が 70%、曲げ変形が 15%、脚部回転変形が 15%程度であった。

3.4 ひび割れに関する検討

地震時の耐震壁からの漏水を推定するための手法と

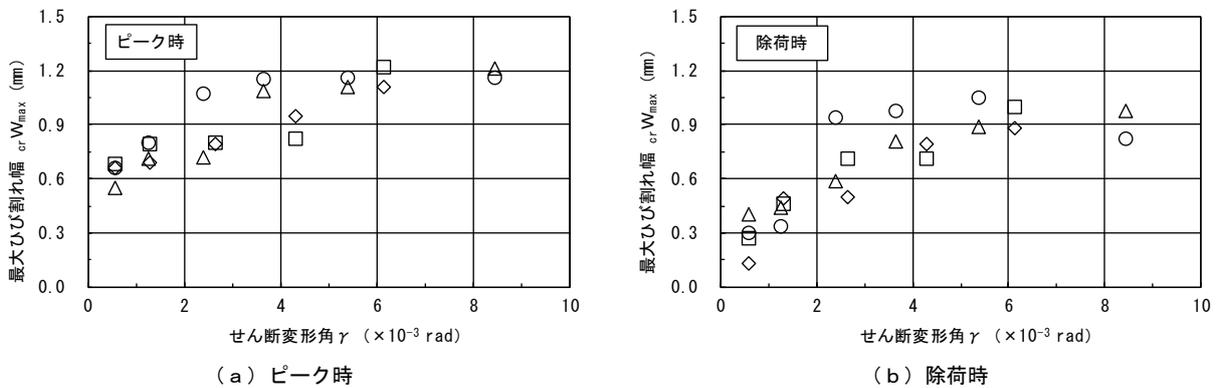


図-9 最大ひび割れ幅とせん断変形角の関係

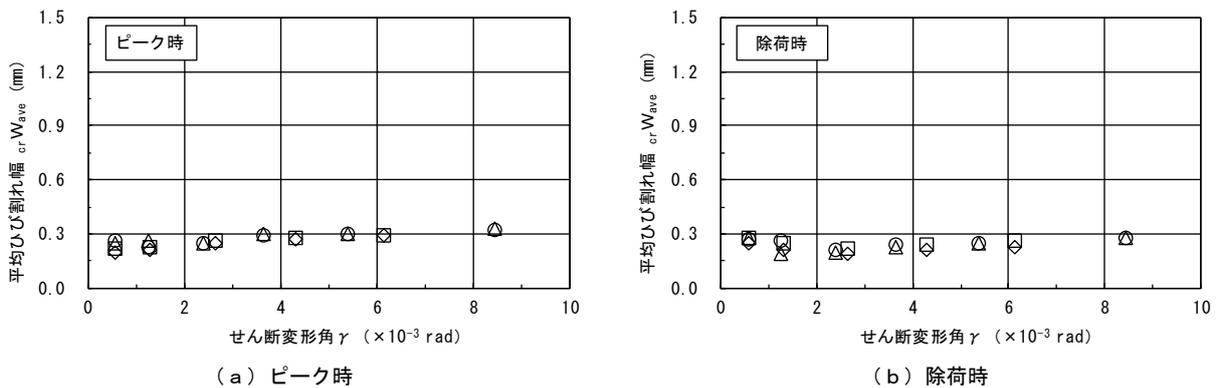


図-10 平均ひび割れ幅とせん断変形角の関係

して、耐震壁のせん断変形角とひび割れ幅について検討した既往の研究³⁾がある。この研究では、せん断応力 τ 、せん断変形角 γ とひび割れ間隔およびひび割れ幅について、以下のような関係があることが示されている。

- (1) ピーク時のひび割れ幅による平均ひずみは、 γ の増加に対してほぼ直線的に増加するとし、その回帰式を提案している。
- (2) 平均的なひび割れ間隔は、 γ の増加とともに減少し、鉄筋間隔に近づく。

本節ではウェブ壁に相当する北面と南面に生じたせん断ひび割れを対象に、文献³⁾と同様の検討を実施する。最大ひび割れ幅とせん断変形角 γ との関係を図-9に示す。同図は各変位段階での (a) ピーク時と (b) 除荷時のものである。また、○は正加力の北面、△は正加力の南面、□は負加力の北面、◇は負加力の南面のものを示しており、以後の図も同様に図示している。

最大ひび割れ幅は γ の増加とともに大きくなるものの、 $\gamma=4 \times 10^{-3}$ 付近から頭打ちとなる傾向がみられた。また、原子力施設的设计でクライテリアとしている $\gamma=2/1000$ 時の最大ひび割れ幅は、試験から得られた $\gamma=2/1000$ 時のひび割れ幅の2倍程度であると考えられ、その値は約1.5mmであった。除荷時での最大ひび割れ幅はピーク時と比較して小さくなるものの、その増加の傾向はピーク時とほぼ同様の傾向を示し、 $\gamma=4 \times 10^{-3}$ 付近から一定となった。

耐震壁の一般的なひび割れ性状の把握を目的に、壁面に生じた全ひび割れを対象に、ひび割れ画像解析システムにより評価した平均ひび割れ幅とせん断変形角 γ との関係を (a) ピーク時と (b) 除荷時で整理して図-10に示す。

ピーク時での平均ひび割れ幅は γ の増大とともに緩やかに増加するものの、その割合は小さかった。除荷時での平均ひび割れ幅は γ が増加してもほぼ一定の値で推移した。

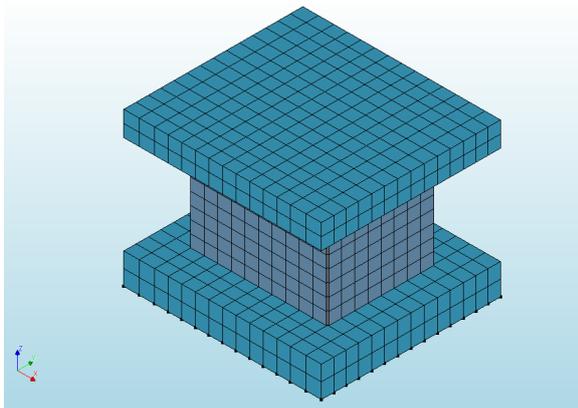


図-11 解析モデル

4. FEM 解析結果との比較

4.1 解析モデル

事前解析で用いた解析モデルを用い、コンクリートと鉄筋の材料特性に材料試験結果を用い、さらに、載荷履歴を加力試験と同様の正負交番繰返し載荷とした事後解析を実施した。解析モデルを図-11に示す。解析には非線形汎用プログラム DIANA Version10.2を用いた。コンクリートの構成則には非直交多方向ひび割れモデル(前川-福浦モデル⁴⁾)を用いた。モデル化に用いた要素は、ボックス壁には4節点曲面シェル要素を、基礎スタブと

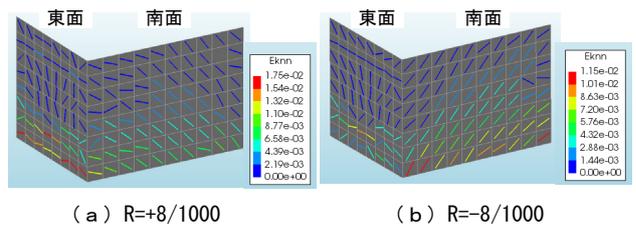


図-12 ひび割れ発生状況

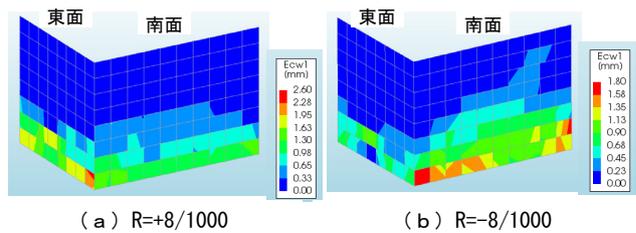


図-13 ひび割れ幅

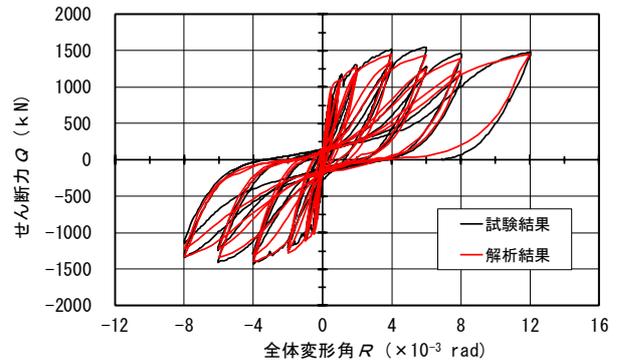


図-14 せん断力Q-全体変位関係R

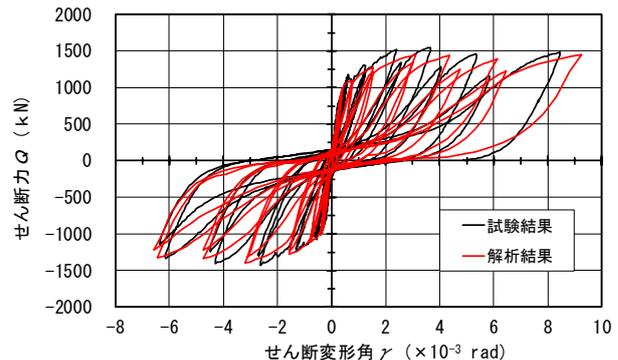


図-15 せん断力Q-せん断変形角 γ 関係

加力スタブには8節点ソリッド要素を用いた。鉄筋には埋込み鉄筋要素を用い、コンクリートとは完全付着とした。基礎スタブと加力スタブは弾性体としてコンクリート要素のみをモデル化し、その材料特性としてヤング率とポアソン比および比重を与えた。境界条件は、基礎スタブ下端の全節点を完全拘束とした。加力は自重と水圧を作用させた後、加力スタブ中央の節点に変位漸増により水平力を与えた。

4.2 解析結果

(1) ひび割れ発生状況

解析から得られた $R=+8/1000$ および $R=-8/1000$ ピーク時でのひび割れ発生状況を図-12に、ひび割れ幅を図-13に示す。両図は対称性を考慮して、フランジ1面(東面)とウェブ1面(北面)について示している。また、解析でのひび割れ幅は便宜的に要素の平均ひずみに要素長さを乗じて求めている。

解析から得られたフランジ壁となる東面での水平ひび割れと、ウェブ壁となる北面での斜めひび割れの発生状況は試験結果と良好な対応を示した。また、解析から得られた最大ひび割れ幅は $R=+8/1000$ 時で 2.6mm、 $R=-8/1000$ 時で 1.8mm となり、試験での 1.2mm と比べ大きくなった。その一因として、解析では弾性ひずみも含んだひび割れ幅であること、また、分割された要素毎に1本のひび割れでその幅を評価していることが考えられるが、ひび割れ発生状況も含め、解析結果は試験結果を良好に模擬する結果であったと言える。

(2) Q-R 関係および $\tau - \gamma$ 関係

せん断力 Q-全体変形角 R 関係を試験結果と比較して図-14に示す。解析により得られた Q-R 関係は試験結果に対してせん断力を小さく評価しているものの、その差は僅かであり、解析結果は試験結果を良好に模擬している。

せん断力 Q-せん断変形角 γ 関係を試験結果と比較して図-15に示す。同図のせん断変形角は試験結果と同様、フランジ中央位置での区間変位から求まる曲げ変形と脚部回転変形を全体変形から差し引くことにより求めている。解析での Q- γ 関係はせん断変形角を幾分大きく評価しているものの、解析結果は試験結果と良好な対応を示したと言える。これらの結果から、今回 FEM 解析に用いたモデル化手法を用いることで、水圧と水平力を受けるボックス壁の挙動を良好に模擬できるものと考えられる。

5. まとめ

ボックス壁の構造性能およびコンクリート躯体と高性能芳香族樹脂の追従性およびひび割れからの漏水の有無を確認することを目的に、ボックス壁内部に水を満たした状態での変位制御による正負交番繰返し加力試験を実施した。得られた知見を以下に列記してまとめとする。

- (1) 最大ひび割れ幅はせん断変形角の増加とともに大きくなるものの、せん断変形角 $\gamma=4 \times 10^{-3}$ 付近から頭打ちとなる傾向を示し、その傾向はピーク時と除荷時でほぼ同じであった。
- (2) 平均ひび割れ幅はピーク時、除荷時ともせん断変形角の値によらずほぼ一定の値で推移した。
- (3) 今回 FEM 解析に用いたモデル化手法を用いることで、水圧と水平力を受けるボックス壁の挙動を模擬できる。
- (4) 設計で想定した以上の変形領域においても、ひび割れからの漏水は一切確認されず、水抜き実施の約 12 時間後においても水密性を保持した。また、水抜き後の検査において樹脂塗装に破れはなく、コンクリートのひび割れに追従していた。
- (5) 塗布防水(樹脂塗装)を施した RC 躯体の地震時水密性評価は、水密性に直接影響のあるひび割れ幅と耐震設計でのクライテリアとの関係の評価することで、RC ボックス壁の知見を用いた従来からの耐震健全性評価を行うことで達成できる。

参考文献

- 1) 原子力安全基盤機構：耐震安全解析コード改良試験に関する報告書 原子炉建屋の多入力試験 (URL：http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/gijyutsu/itakujigyoo/2002_nupec.html), 2002.3
- 2) 堀口賢一, 鈴木三馨, 本澤昌美, 坂本淳: 画像解析技術を用いた遠方からの床版ひび割れ定量評価システムの構築, コンクリート工学, Vol.56, No.1, pp.106-111, 2018.1
- 3) 稲田泰夫, 岡田恒夫, 秋野金次, 小池健仁: 鉄筋コンクリート造耐震壁のせん断ひび割れ性状に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.3, pp.385-390, 1988
- 4) 福浦尚之, 前川宏一: 非線形支配ひび割れ面の三次元同定と空間平均化構成則の高度化, 土木学会論文集, 65(1), pp.118-137, 2009