

R C造耐震壁に設置した水密扉の性能試験

穴 吹 拓 也 水 越 一 晃 萩 尾 浩 也
 増 田 安 彦 渥 美 綱 介 桑 原 淳
 (本社技術本部) (本社技術本部)

Performance Test of Watertight Door on Reinforced Concrete Structural Wall

Takuya Anabuki Kazuaki Mizukoshi Hiroya Hagio
 Yasuhiko Masuda Kosuke Atsumi Jun Kuwahara

Abstract

A performance test of an actual watertight door was conducted to develop an evaluation method for the water leakage from a waterproof facility during seismic surges. The test was conducted on a standard single swinging watertight door, which was used for a nuclear facility, at the center of reinforced concrete structural wall. A shear deformation of up to $\pm 0.4\%$ and a water pressure of up to 0.50 MPa were loaded step by step in several different combinations, and the water that leaked from inside or outside of the door frame was measured at each step. The test showed that the shear deformation of the wall and the water pressure are related to the leakage quantities.

概 要

浸水防止設備の津波に対する止水性能評価方法を検討するため、実際の水密扉を用いた性能試験を実施した。試験対象は原子力施設に用いられる標準的な片開き水密扉を中央に設置した有開口 RC 造耐震壁であり、面内せん断力および水圧を試験変数として、両者を複合して載荷した。試験は開口部せん断変形角 $\pm 0.4\%$ ($\pm 4000\mu$)、最大水圧 0.50MPa (水頭 50m 相当) までの加力を段階的に行い、各段階において扉枠内および枠外からの漏水量をそれぞれ計測した。その結果、枠内外から生じる漏水量と開口部のせん断変形角および水圧の間には一定の関係性が認められ、試験変数ごとにその関係性を整理した。

1. はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震による福島第一原子力発電所の事故以降、IAEA 閣僚会議に対する政府報告書¹⁾や原子力安全・保安院の意見聴取会等、地震や津波に対する安全対策および基準・指針類^{(例えば 2)等}の整備および強化に係る多くの要求や提言がなされている。これらの報告書では、福島第一原子力発電所の事故において炉心溶融に至った大きな要因は、津波に対する安全上の対策が不十分であったことが指摘されている。そのため、発電所敷地内への浸入対策の強化を図ること、また、敷地内への浸水が生じた場合でも、安全上重要な設備の津波に対する防護対策を図る必要があるとされている。

そこで、浸水防止設備の津波に対する止水性能評価方法を検討するため、実際の水密扉を用いた性能試験を実施した。試験対象は原子力施設に用いられる実機仕様の標準的な片開き水密扉を中央に設置した有開口 RC 造耐震壁 (Photo 1 および Fig. 1) とし、面内せん断力および扉とその周辺への水圧を試験変数として、両者を複合して載荷した。

本稿は、設計レベル内またはそれを超える面内せん断変形角および水圧を受けた場合の扉枠内外からの漏水の傾向を整理し、原子力施設に用いられる標準的な片開き

水密扉および RC 造耐震壁の水密性能について検証したものである。



Photo 1 RC 造耐震壁に設置した水密扉
 Watertight Door on RC Wall Specimen

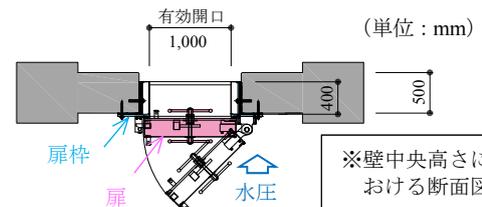


Fig. 1 RC 造耐震壁に設置した水密扉
 Watertight Door on RC Wall Specimen

2. 水密性能試験概要

2.1 水密扉

試験に用いた水密扉は、水頭 10m に対する許容漏水量が $0.02\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 以下、耐水压性能は 0.20MPa (水頭 20m 相当)、許容せん断変形角は 2000μ (0.2%) である。ここで、 μ は 10^{-6} を表す記号であり、本稿においてはせん断変形角の表記に μ を用いる。

扉は有効開口寸法 $1\text{m}\times 2\text{m}$ の片開き型であり、溝形鋼 (C-200 \times 80) を目の字に組んだ骨組の両面に鋼板を溶接して製作した。扉中央のハンドルを回転させると門が開まり、扉と扉枠間に設置したスポンジゴム製のパッキン (20mm \times 10mm) が密着する機構である。扉枠はあと施工アンカーにより RC 壁開口周囲に固定した後、隙間にモルタルを充填した。

2.2 RC 造耐震壁

RC 造耐震壁は壁厚を 500mm とし、既存の原子力発電所における耐震壁を参考に主筋および開口補強筋の配筋を決定した。また、開口部におけるせん断変形角を最大 4000μ とした状態で水密扉の性能試験を行うことを目標としたことから、脆性的な破壊を防止するために側柱を有する形状とした。Table 1 に耐震壁の概要を、Fig. 2 に RC 造耐震壁の配筋を、Table 2 および Table 3 に使用したコンクリートおよび鋼材の材料試験結果を示す。

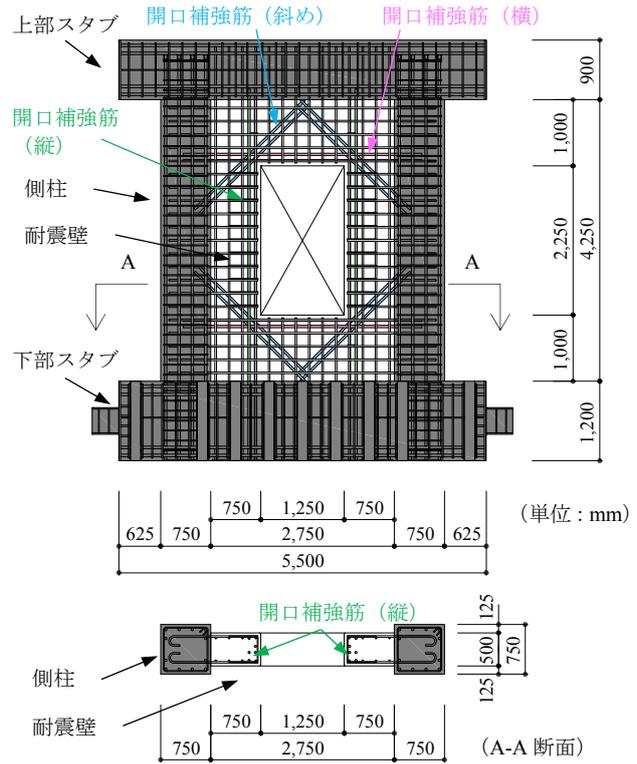


Fig. 2 RC 造耐震壁の配筋
Reinforcing Bar Arrangement of RC Wall Specimen

Table 1 RC 造耐震壁の概要
Outline of RC Wall Specimen

部位	耐震壁	側柱
寸法・形状	壁厚：500mm 壁板の内法長さ：2750mm 開口寸法：1250mm \times 2250mm	断面：750mm \times 750mm 内法高さ：4250mm
配筋	壁主筋：縦横共 D22@200 ダブル ($p_w=0.774\%$) 開口補強筋：5-D29 (縦・横)，4-D29 (斜め)	柱主筋：12-D32 ($p_g=1.69\%$) 柱帯筋：2-D13@150 ($p_w=0.225\%$)

Table 2 コンクリートおよび充填モルタルの材料試験結果
Material Properties of Concrete and Infilled Mortar

種別	部位	材齢* (日)	密度 t/m ³	ヤング係数 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	割裂引張強度 N/mm ²
コンクリート (W/C 49.7%)	壁・柱	96	2.35	2.98×10^4	47.7	3.12
モルタル	壁～扉枠間	47	2.16	2.41×10^4	60.6	—

(※試験直前に実施した材料試験時の材齢)

Table 3 鉄筋およびあと施工アンカーの材料試験結果
Material Properties of Reinforcing Bar and Anchor Bolt

部位	呼び名	鋼種	ヤング係数 N/mm ²	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²
柱帯筋	D13	SD295	1.92×10^5	359	511
壁縦筋	D22	SD390	1.93×10^5	456	644
壁横筋			1.92×10^5	454	640
開口補強筋	D29		1.96×10^5	437	638
柱主筋 (ねじ筋)	D32		1.94×10^5	428	615
あと施工アンカー	M16	—	2.08×10^5	452	547

2.3 載荷・計測方法

本試験では、壁面内方向の水平力と壁面外方向の水圧を複合した載荷を行った。Fig. 3に漏水量計測側および水圧載荷側から見た載荷装置の構成を示す。

2.3.1 壁面内水平力の載荷方法 壁面内水平力は上部スタブの南北側面に設置した5000kN油圧ジャッキにより載荷し、上部スタブが北から南に動く方向を正とした。載荷は開口部せん断変形角 (γ_d) が所定の値となるように変位制御とした。開口部せん断変形角は、Fig. 4に示すように、扉枠の隅角部に標点を設置し、対角線方向の変位 (L_1 , L_2) を計測して(1)式により求めた。

$$\gamma_d = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / a \quad (1)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: L_1 および L_2 におけるひずみ

a : 計測部の縦横寸法比 (c) より定めた係数

$$c = 1040/1930 = 0.54 \text{ より } a = 2c/(1+c^2) = 0.84$$

上部スタブ倒れ止めは水圧載荷時には効かせないようにしたため、水圧除荷後の上部スタブには面外方向の倒れが残る。そこで、壁面内水平力載荷前に水圧支持架構および上部スタブ倒れ止め治具頂部に取り付けられたジャッキにより上部スタブの面外方向変位を初期位置に戻し、水平力載荷中のみ上部スタブの横倒れを拘束した。

2.3.2 水圧の載荷方法 水圧は、加圧用コンプレッサーと加圧水槽の間に与圧タンクと加圧タンクを配置して、あらかじめ満水にした加圧水槽内の水に所定の水圧

を与えて載荷した。また、加圧タンク内の空気圧は加圧水槽に取り付けた水圧計の値により制御することとした。Fig. 5に水圧載荷装置の構成を示す。

2.3.3 載荷手順 原子力建屋の耐震壁のSs地震時許容限界であるせん断変形角 $2000 \mu^3$ を超過した場合の水密扉の性能を評価するため、開口部せん断変形角 $\pm 4000 \mu$ 、最大水圧0.50MPa (水頭50m相当) までの加力を段階的に行った。Fig. 6に壁面内水平力および水圧の載荷手順を示す。横軸は載荷ステップであり、赤線は開口部せん断変形角を表し左の縦軸により、青線は水圧を表し右の縦軸による。すなわち、水圧変動中は水平変位を一定に保持し、水平変位変動中は水圧を0とした。載荷の最終段階に至るまでは、水圧0.30MPaまでの漏水量計測を1セットとし、壁のせん断変形状態を順次変化させた。水密扉のゴムパッキン (Fig. 9に示す) は1セットごとに交換した。

2.3.4 漏水量の計測方法 単位時間あたりの漏水量 (V_w) は、水圧を0.05MPa上昇させるごとに10分間の計測時間を設け、扉枠内外からそれぞれ集めた漏水の重量を計測し、(2)式により算定した。

$$V_w = w_w / (\rho_w \times t \times A_0) \quad (\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)) \quad (2)$$

w_w : 漏水の質量 (g)

ρ_w : 水の密度 ($\rho_w = 10^6 \text{ g/m}^3$)

t : 計測時間 (h)

A_0 : 扉の有効開口面積 ($A_0 = 2\text{m}^2$)

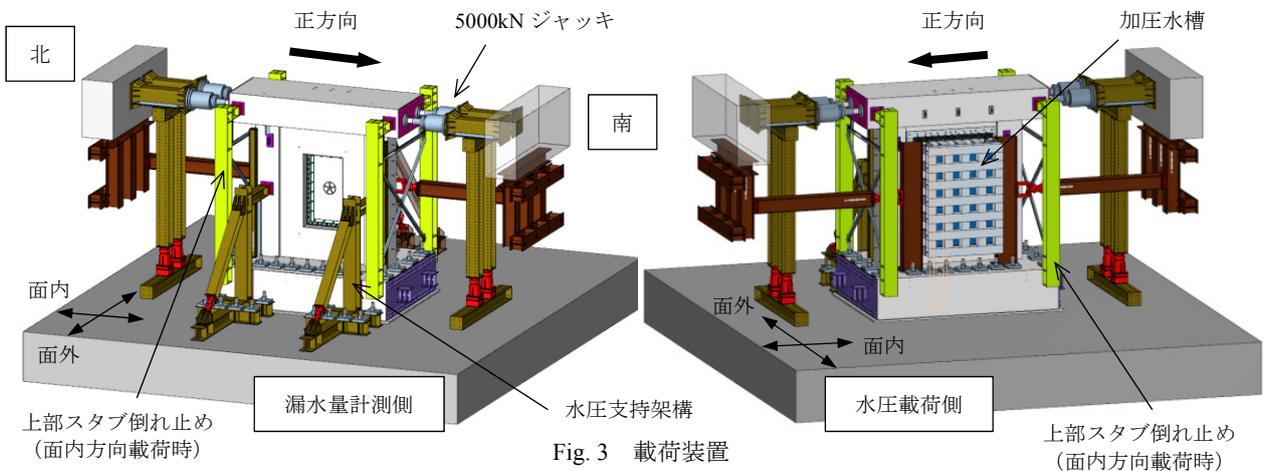


Fig. 3 載荷装置 Loading Equipment

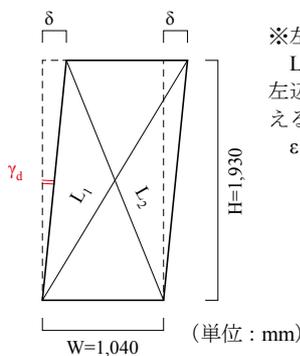


Fig. 4 開口部せん断変形角 Shear Deformation on Opening

※左図より次の関係を導ける
 $L_1^2 - L_2^2 = 4W\delta$
 左辺をひずみの表記で書き換えると、次式が得られる
 $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 2W\delta/(W^2+H^2)$

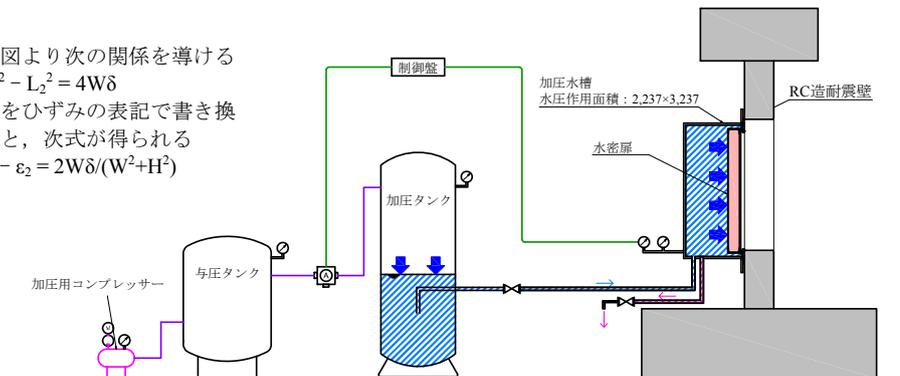


Fig. 5 水圧載荷装置 Loading System of Water Pressure

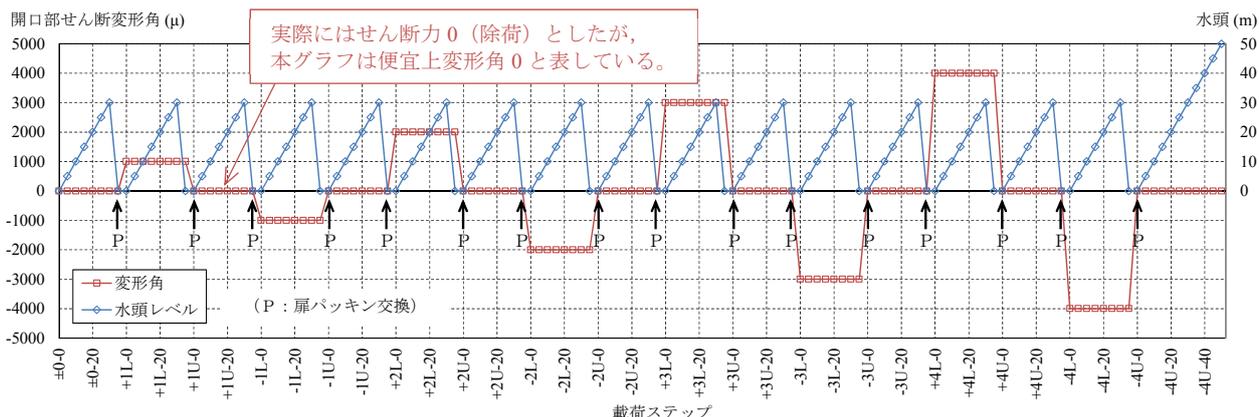


Fig. 6 载荷手順
Loading Schedule

また、漏水量が本試験に用いた水密扉の許容漏水量に対して10倍の漏水量 ($0.20\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$) を超えた場合には、その時点の水圧より大きな水圧における漏水量の計測は行わないこととした。

3. 試験結果

3.1 RC造耐震壁の損傷状況

Fig. 7 に RC 造耐震壁の水平荷重－開口部せん断変形角関係を、Fig. 8 に開口部せん断変形角 $+4000\mu$ 時の壁のひび割れを示す。開口部せん断変形角 $+1000\mu$ に到達した時点で、開口の左上および右下隅角部にせん断変形による斜めひび割れと、壁左側開口脚部に曲げ変形による水平ひび割れを生じており、耐震壁の剛性は低下した。壁脚部で計測した壁縦筋のひずみ度は、最大変形時において 1500μ 程度まで上昇したが、降伏ひずみ (2551μ) には達しなかった。正負繰り返り载荷によるひび割れは、概ね左右対称に生じた。また、壁のひび割れからの漏水は、水平ひび割れよりも斜めひび割れからの漏水が比較的多く見られた。

3.2 漏水量の整理方法

Fig. 9 に本稿における水密扉の「枠内」と「枠外」の境界を示す。漏水は、水密扉のゴムパッキンの合わせ目から生じるもの、扉と RC 造壁の取合い部分から生じるもの、RC 壁のひび割れから生じるものが考えられる。本試験においては、扉枠の内側 (Fig. 9 における「枠内」) から生じるものと扉枠と充填グラウトの界面より外側 (Fig. 9 における「枠外」) から生じるものを分けて収集し、計測した。

また、地震力による変形は瞬間的に生じるため、本試験のようにせん断変形を保持した状態で長時間水圧を受けることは考えにくい。すなわち、せん断変形を保持した状態で得られる漏水量は実現象に比べ過大な値となる。一方、せん断力除荷後の漏水量は、地震後の津波により建屋地下室に浸水した場合等、現実には生じ得る状態における漏水量と考えられる。そこで、以下の検討において

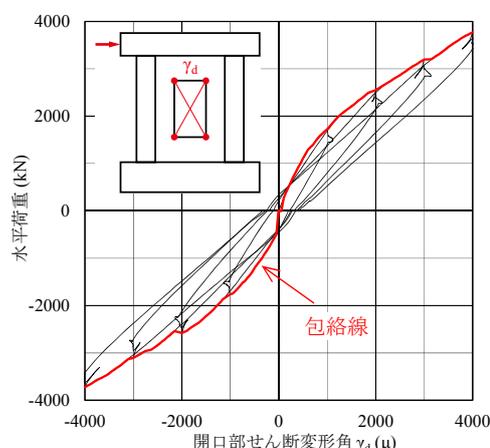


Fig. 7 水平荷重－開口部せん断変形角関係
Horizontal Load - Shear Deformation Relationship

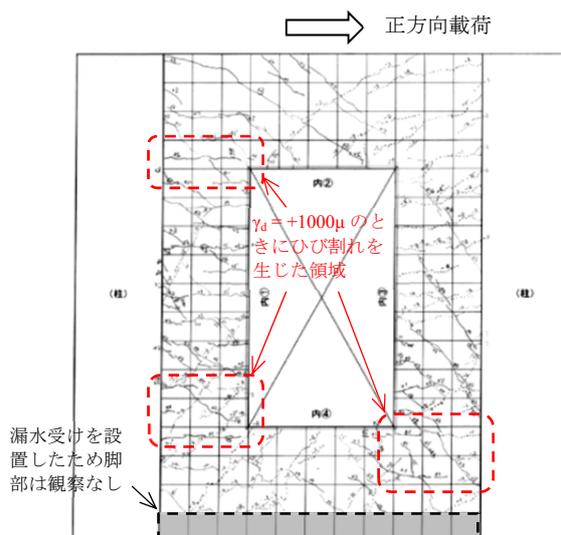


Fig. 8 開口部せん断変形角 $+4000\mu$ 時の壁のひび割れ
Cracks of Wall at Shear Deformation $+4000\mu$

は、せん断力を载荷した状態 (以下、载荷時と称す。) とせん断力を除荷した状態 (以下、除荷時と称す。) を分けて漏水量を整理した。

開口を通過する流量 Q は、一般に(3)式により表される。

$$Q = 3600 \times C \times A \times (2 \times \Delta P / \rho)^\alpha \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (3)$$

C : 流量係数

A : 枠内の場合は扉面積, 枠外の場合は壁の見付け面積 (m^2)

ΔP : 扉前後の圧力差 (Pa)

ρ : 液体の密度 (kg/m^3)

α : 流路の状態により決まる指数

単純な開口であれば $\alpha=0.5$ であり、摩擦が支配的な場合には $\alpha=1.0$ となる。本検討では、漏水量は扉面積に流量係数を乗じた値及び水圧の平方根に比例すると考えて、以下の漏水量と水頭及びせん断変形角の整理・考察にあたった。

3.3 せん断力載荷時における漏水量

3.3.1 漏水量と水頭の関係 Fig. 10 に開口部せん断変形角ごとの漏水量と水頭の関係を示す。横軸は水頭、縦軸は漏水量を表し、2つのグラフはそれぞれ枠内、枠外からの漏水量である。

枠内からの漏水量は水頭の上昇に伴い下に凸な、(3)式において $\alpha > 1.0$ となる指数関数状に増加する傾向があった。この理由として、枠内における漏水経路は水圧によりパッキンどうしの密着面が押し拡げられて形成されると考えられるため、水圧の上昇とともに漏水経路が拡大し、漏水量が大きくなったためと推察される。(3)式に照らして考えると、水圧の上昇に応じて、流量係数 C も大きくなっているものと考えられる。また、水頭が 20m を超える領域では、例えば -1000 μ 載荷時においては水頭 20m と 25m で漏水量が逆転する等、漏水量と水頭の関係についてばらつきを生じた。これは、水圧による扉側からの押し付けやパッキン交換によってパッキン間の密着具合等が変化するため、水圧上昇に伴う既存漏水経路の拡大や閉塞にわずかな変化が生じた結果と考えられる。特に高水圧下においてはわずかな条件の違いが漏水量のばらつきに大きく影響したものと推察される。

一方、枠外からの漏水量は水頭の上昇に伴い直線状に増加し、水頭に概ね比例した。枠外における漏水経路は、

躯体のひび割れや、扉枠と躯体間に充填したグラウトのひび割れや剥離部分と考えられるが、本試験における枠外からの主たる漏水の発生位置は壁のひび割れであり、グラウト界面からの漏水は開口隅部近傍からわずかに見られた程度であった。これは、グラウト表面に打ったシーリング材の止水効果によるものと考えられる。枠外からの漏水量が水圧の平方根に比例しなかった要因としては、RCのひび割れ面の凹凸やひび割れを横切る鉄筋により水の流れに対する摩擦の影響が大きく、(3)式で $\alpha=1.0$ の条件に近かったことが考えられる。あるいは、面内せん断変形により発生した壁のひび割れが、水圧によって拡幅することや、水圧によるひび割れと交わることで漏水経路を拡大し、(3)式における流量係数 C が水圧の上昇に応じて増大した可能性もある。

3.3.2 漏水量とせん断変形角の関係 Fig. 11 に水頭ごとの漏水量と開口部せん断変形角の関係を示す。横軸は開口部せん断変形角の絶対値、縦軸は漏水量である。

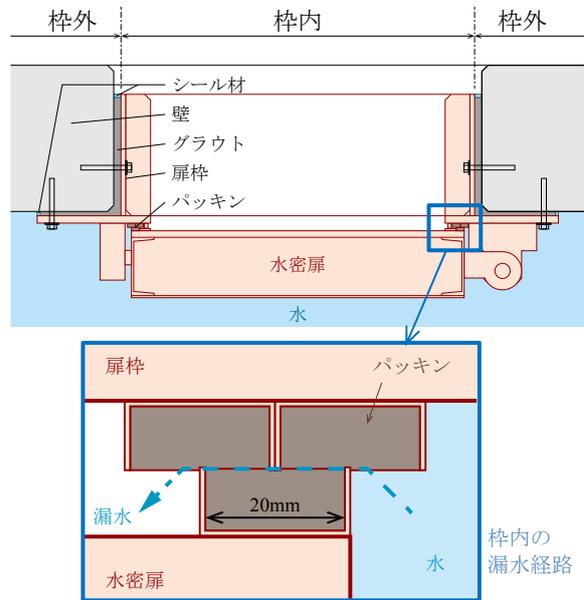


Fig. 9 水密扉の枠内と枠外の境界
Boundary between Inside and Outside

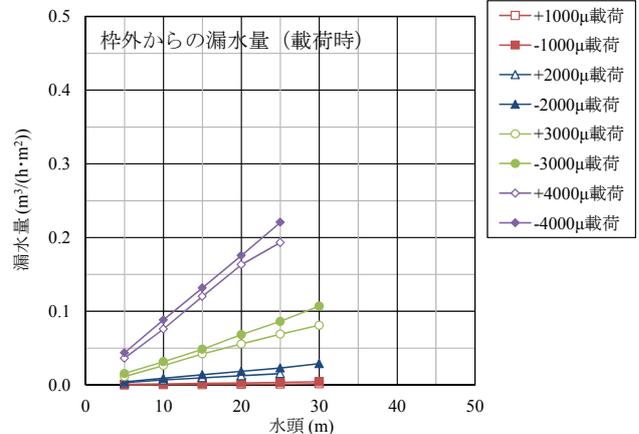
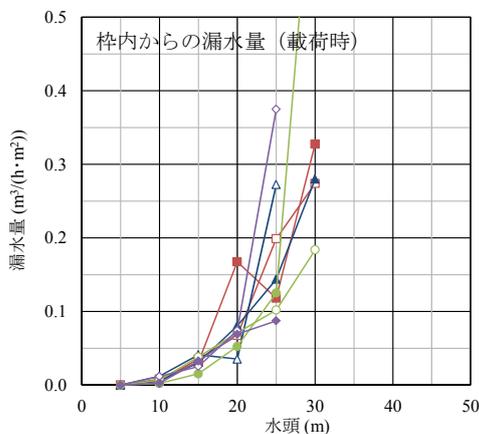


Fig. 10 せん断力載荷時における開口部せん断変形角ごとの漏水量と水頭の関係

Relationships between Quantities of Leakage and Head Height for Each Shear Deformation with Shear Loading

枠内からの漏水量とせん断変形角の間には明確な相関性が見られなかった。この理由として、扉枠に $\pm 4000\mu$ のせん断変形角が生じると水密扉と扉枠間には最大8.5mmの相対変位が生じるが、この変位に対してパッキンの幅(20mm)が十分に大きいことが挙げられる。即ち、せん断変形が増大しても扉と扉枠のパッキン間の接触面積に変化がなく、水圧一定下においてはパッキン部分の漏水経路が不変であったためと推察される。

一方、枠外からの漏水量は、開口部せん断変形角の増大に対して下に凸な指数関数状に増大した。これは、変形の増大によって既存のひび割れ幅が拡大すると共に、新たなひび割れが発生し、開口部せん断変形角の増大に伴う漏水経路の増大が著しいためと考えられる。(3)式に当てはめると、開口部せん断変形角の増大に応じて、流量係数Cが大きくなっているものと考えられる。

以上より、漏水量と水頭の間には枠内、枠外ともに相関性があり、漏水量とせん断変形の間には枠外において相関性があることを確認した。ただし、枠内の漏水量に関しては水頭が大きい場合にばらつきが大きいことや、得られた漏水量はせん断変形を維持した場合の値であること等に注意が必要である。また、漏水量を(3)式に基づき評価する場合は、流量係数Cによって水圧やせん断変形の増大に伴う漏水経路の拡大を適切に表す必要がある。

なお、枠内外からの合計漏水量は、原子力建屋の耐震壁のSs地震時許容限界であるせん断変形角 $2000\mu^3$ を生じた状態においても、本試験に用いた水密扉の許容漏水量(出荷時検査における基準値であり、水頭10mにおいて $0.02\text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 以下)を超えなかった。許容漏水量に対する合計漏水量の比は、正載荷時には95.4%(内訳は枠内が60.6%, 枠外が34.8%), 負載荷時には73.1%(内訳は枠内が27.3%, 枠外が45.8%)であった。

3.4 せん断力除荷時における漏水量

3.4.1 漏水量と水頭の関係 Fig. 12に除荷直前の開口部せん断変形角ごとに漏水量と水頭の関係を示す。

枠内からの漏水量は水頭が10mを超える領域で急激に

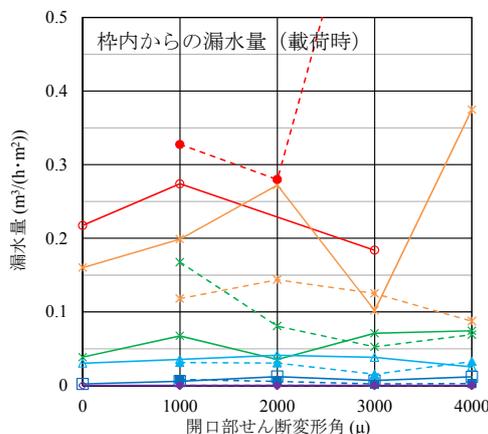


Fig. 11 せん断力載荷時における水頭ごとの漏水量と開口部せん断変形角の関係

Relationships between Quantities of Leakage and Shear Deformation for Each Head Height with Shear Loading

増大した。 -4000μ 除荷時において水頭が25mよりも大きい場合に漏水量の変化が小さくなったのは、高水圧による変形でゴムパッキンが硬化し、漏水経路の拡大が頭打ちになったためと考えられる。漏水量は全体的に右上がりであり漏水量と水頭の間には相関性は見られるが、載荷時の場合と同様に値のばらつきが大きく、漏水量と水頭の関係について定量的な評価は困難である。一方、枠外からの漏水量は経験したせん断変形角の大きさによらず極めて小さかった。これは除荷により壁のひび割れや、躯体とグラウト間の隙間が閉じたためと推察される。なお、水圧によるひび割れは壁の面外方向の曲げ変形によるひび割れであり、壁の片側では開くが反対側では閉じた状態である。そのため、開口部せん断変形がなく、壁を貫通するひび割れがない状態においては漏水経路の拡大に対する寄与が小さいものと考えられる。

3.4.2 漏水量とせん断変形角の関係 Fig. 13に同一の水圧下における漏水量と除荷直前の開口部せん断変形角の関係を、Fig. 11と同様に示す。

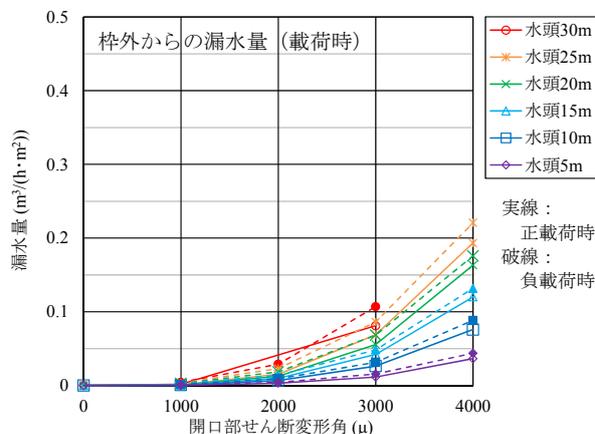
枠内からの漏水量は、載荷時の場合と同様に、開口部せん断変形角との相関性は確認できなかった。また、除荷時においては壁のひび割れが閉じているため、枠外からの漏水量は水頭50mまで極めて低い値であった。

以上より、除荷時における漏水量は枠内からの漏水量に概ね等しく、その値と扉が経験した変形との相関性は低いと推察される。また、原子力建屋の耐震壁のSs地震時許容限界変形経験後の枠内外の合計漏水量は、試験に用いた水密扉の許容漏水量に対して、正載荷からの除荷後に26.7%, 負載荷からの除荷後に23.3%であった。

4. まとめ

原子力施設に用いられる実機仕様の標準的な片開き水密扉と周辺のRC造耐震壁の水密性能を調べるため、開口部せん断変形角および水圧を変数として、実物大試験体からの漏水量を計測した。漏水量は各段階において扉枠内および枠外からのものに分類し、以下の知見を得た。

1) せん断力載荷時においては、漏水量と水頭の間



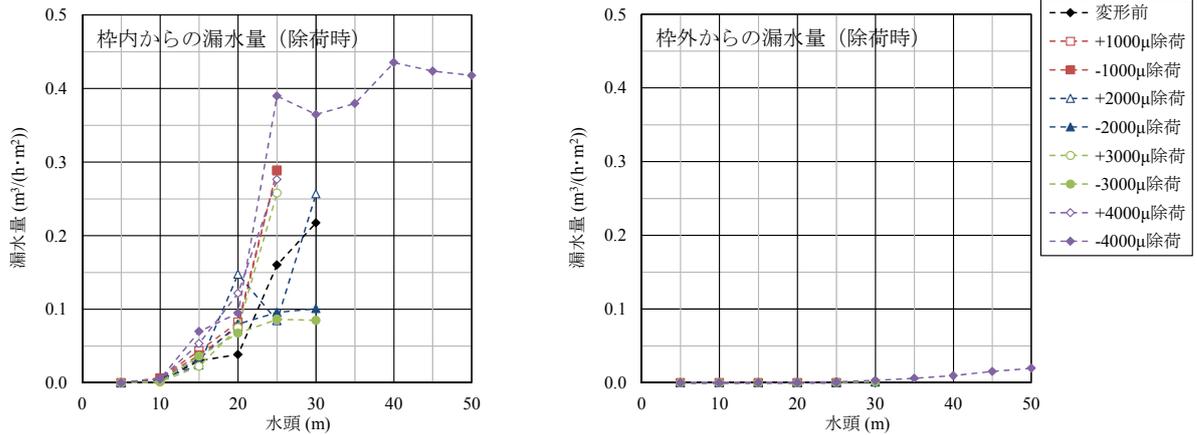


Fig. 12 せん断力除荷時における除荷直前の開口部せん断変形角ごとの漏水量と水頭の関係

Relationships between Quantities of Leakage and Head Height for Each Previous Shear Deformation without Shear Loading

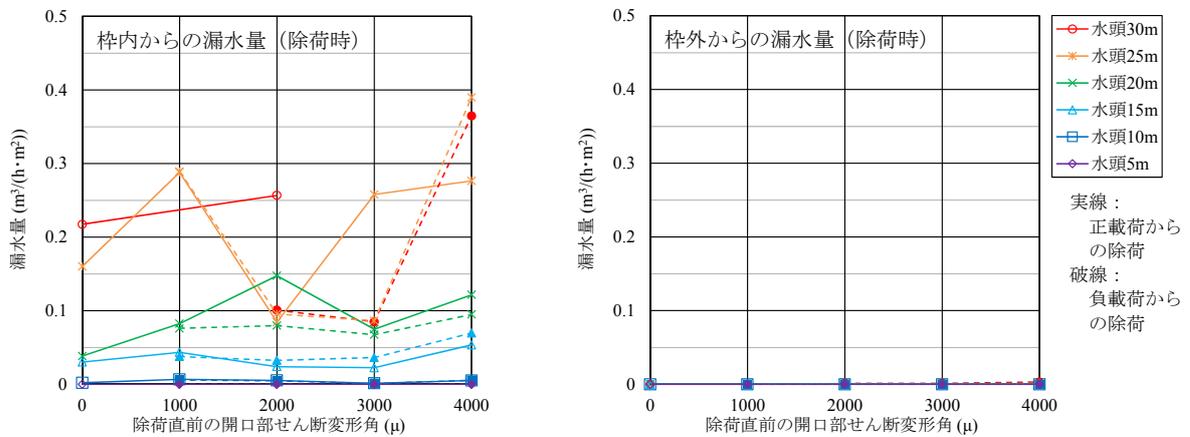


Fig. 13 せん断力除荷時における水頭ごとの漏水量と除荷直前の開口部せん断変形角の関係

Relationships between Quantities of Leakage and Previous Shear Deformation for Each Head Height without Shear Loading

は枠内外ともに相関性があった。また、漏水量とせん断変形角の間には枠外において相関性があったが、枠内には明確な相関性は見られなかった。

- 2) せん断力除荷時においては、漏水量と水頭の間には枠内において相関性があったが、漏水量とせん断変形角の間には相関性は見られなかった。
- 3) せん断力除荷時における枠外からの漏水量は、枠内からの漏水量に比して極めて小さかった。
- 4) 本試験の漏水量を、開口を通過する流量を表す式(本文における(3)式)により評価する場合は、水圧やせん断変形の増大に伴う漏水経路の拡大を、流量係数Cによって適切に表す必要がある。
- 5) 枠内外からの合計漏水量は、原子力建屋の耐震壁のSs地震時許容限界である2000μのせん断変形角を経験した状態で、試験に用いた水密扉の許容漏水量の27%程度であった。また、2000μのせん断変形角を載荷した状態においても95%程度であった。

謝辞

本稿は原子力規制庁の「平成26年度原子力施設等防災対策等委託費事業」による研究成果を基に執筆しました。また、試験実施にあたり首都大学東京の北山和宏教授に貴重なご意見を賜りました。厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 原子力災害対策本部：原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書－東京電力福島原子力発電所の事故について－, p.28, 2011.6
- 2) (独)原子力安全基盤機構(平成26年3月に原子力規制委員会に統合)：津波に対する構造設計・リスク評価手引き, JNES-RE-2013-2027, pp.1-21, 2014.1
- 3) (社)日本電気協会・原子力規格委員会：原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008, p.112, 2008.1