

# 報告 高水圧を受けるコンクリートの打継目の水密性能に関する研究

石田 知子\*1・林 秀郎\*2・宍倉 知広\*3

**要旨：**海洋中に建設予定の浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体は、0.2MPa 程度以上の高い水圧が掛かることが見込まれ、また 20m を超える大規模構造物であることから、施工時にコンクリートに打継目を設ける可能性が高い。そこで、高水圧下での打継目の水密性能の把握を目的とし、水圧と打継処理方法をパラメータとした小型の透水試験装置による透水試験を行った。その結果、本試験の範囲内では、グリーンカット処理を行った場合の水密性能が優れている結果を得た。あわせて鉄筋を配置した大型の透水試験装置を開発し、打継目の部材厚および鉄筋の有無が水密性能に及ぼす影響についても検討した。

**キーワード：**浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体、打継処理方法、水密性能、高水圧

## 1. はじめに

止水機能が求められる地下や海洋に構築されるコンクリート構造物では、施工時に発生するコンクリートの打継目の水密性能が課題となる。

打継目の水密性能については、0.15MPa 以下の比較的 low 水圧の条件での研究が多く成されている<sup>1)2)</sup>。しかしながら、水圧が 0.15MPa を超えるような高水圧下における検討事例は少ない。

水深 50m を超える沖合の海洋上に建造が検討されている浮体式洋上風力発電施設は、図-1 のイメージ図に示すように、洋上に浮かんだ浮体式構造物を利用する構造である。このうち、風車タービン下部の浮体部分を鉄筋コンクリートで製造する検討が進められている。この浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体は、水深 20~30m までの位置で設置されることから、常時 0.2MPa 程度の高い水圧が掛かることが推定される。現在検討中のコンクリート浮体はポンツーン形式としており、その形状は、図-2 に示すように 3 つの中空円筒を持つ。中空円筒は安定度を高めるため長辺が 20m を超える大規模構造物となる。そこでは、浮体のコンクリート施工時に打継目を設ける可能性が高く、浮体構造物としての機能

を維持するために、打継目の水密性能の把握が重要な課題となる。

また、近年では、大都市の高速道路など 40m 以深の大深度地下を活用する事例も増加しており、高レベル放射性廃棄物処分場は、その安全性の観点から地下 500m 以深での建設が検討されている。そのため、これらの大深度地下構造物についても高い地下水圧が掛かることが予想され、高レベル放射性廃棄物処分場においては、5.0MPa 程度の水圧が掛かる可能性が考えられる。

そこで本稿では、打継目の打継処理方法をパラメータとして、0.2MPa~5.0MPa の高水圧下における打継目の水密性能の評価を目的に、小型の透水試験装置を用いて、漏水量および漏水開始までの時間に着目し、相対比較を行った結果を示す。また、鉄筋を配置した大型の透水試験装置を開発し、浸透深さの違いや鉄筋の有無による影響について検討を行った結果についてもあわせて示す。

## 2. 小型透水試験装置による実験

### 2.1 試験概要

#### (1) 小型透水試験装置の概要

本試験で使用した試験装置の外観を写真-1 に示す。試験で用いた透水試験装置は、9 連の試験装置で、最大 10MPa までの水圧を掛けることができる。

本試験では、写真-1 のシリンダー内に供試体を設置

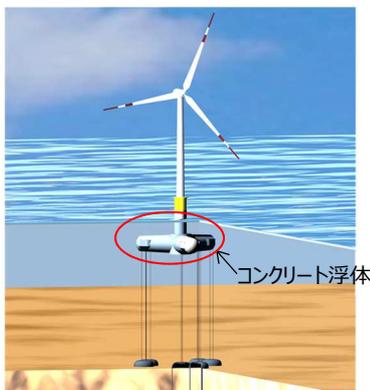


図-1 浮体式洋上風力発電施設イメージ

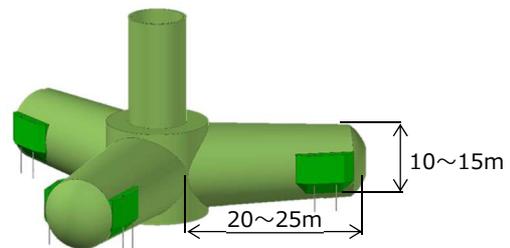


図-2 コンクリート浮体の形状

\*1 大林組 技術研究所生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

\*2 大林組 土木本部生産技術本部設計第三部 主席技師 博士(工学)

\*3 大林組 土木本部生産技術本部設計第三部 担当部長



写真-1 透水試験装置の外観

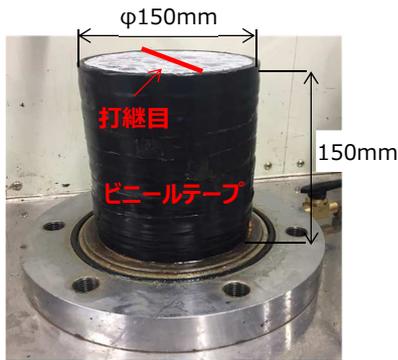


写真-2 供試体設置状況

し、供試体上部から水圧を掛け、下部から漏水するまでの時間と漏水後の漏水質量を測定した。

供試体は、直径 150mm×高さ 150mm の円柱供試体、各 3 体とした。写真-2 に示すように、中央部に打継目を設け、側面からの水の浸入を防止するため、防湿性に優れた粘着性が高いビニールテープを側面に貼付け(写真-2)、更にその上からゴムバンドを巻くことにより止水を図った。

## (2) 供試体の作製

供試体の作製に用いたコンクリートの使用材料および配合を表-1 および表-2 に示す。

コンクリートは、浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体を対象とし、呼び強度 36 のレディーミクストコンクリートを用いた。圧縮強度は、材齢 28 日で 46.6N/mm<sup>2</sup> となった。また、1 層目のコンクリート打込み時に同環境にて測定したブリーディング率は 1.0%であった。

対象とする打継目は水平打継目とし、図-3 に示すように、供試体を作製するための幅 1500mm×高さ 450mm×奥行 300mm のコンクリートブロックを作製し、そこからコアを採取し透水試験用の供試体とした。コンクリートブロックは、1 層目のコンクリートの施工後打継目表面にはシートを敷設し、20 日間が経過した時点で 2 層目のコンクリートを施工した。2 層目の施工後 28 日以上が経過し、強度が十分に発現した時点で、コンクリートブロックを 90 度回転させ、打継目が鉛直となるように設置した。その後、打継目が中央に位置するようにφ

表-1 使用材料

材料	記号	仕様他
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	細骨材①：陸砂 密度：2.58g/cm <sup>3</sup> 産地：茨城県行方市産（石神） 細骨材②：陸砂 密度：2.58g/cm <sup>3</sup> 産地：茨城県行方市産（麻生） 容積混合比 ①：②=50：50
粗骨材	G	粗骨材①：砕石 2005 密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 産地：茨城県つくば市 粗骨材②：砕石 2005 密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 産地：茨城県石岡市 容積混合比 ①：②=50：50
混和剤	AD	高性能 AE 減水剤

表-2 コンクリート配合

G <sub>max</sub> (mm)	スランプ <sup>o</sup> (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AD
20	12	42.9	4.5	41.1	160	373	718	1065	2.98

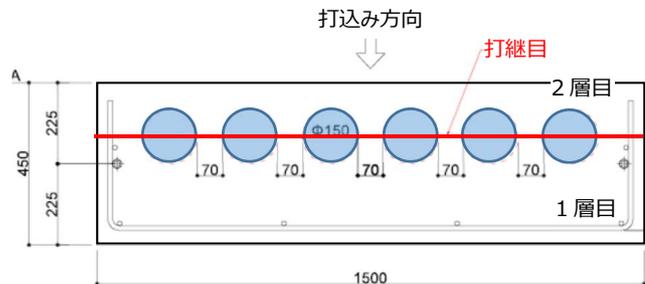


図-3 供試体作製時の試験体イメージ図



①グリーンカット ②金コテ仕上げ ③無処理

写真-3 打継面の仕上げ状況

150mm でコア抜きを行い、コンクリートカッターで両端部を切断し、高さ 150mm の供試体に成形した。

なお、打継目の処理方法は、一般的な処理方法である①コンクリートの打継面に遅延剤を散布することで、コンクリート打継表面に生じた脆弱部分を高圧の空気て取除く処理方法（以下、「グリーンカット」と称す。）、②金コテで平滑に仕上げる処理方法（以下、「金コテ仕上げ」と称す。）、③コンクリート打込み直後に表面の不陸を木コテで簡単に均すのみの処理方法（以下、「無処理」と称す。）の 3 つの異なる処理方法とした。現在、検討対象の浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体の施工方法としては、現場でのコンクリートの打込みに加え、PCa 製品の使用も検討している。そこで、PCa 製品を使用した場

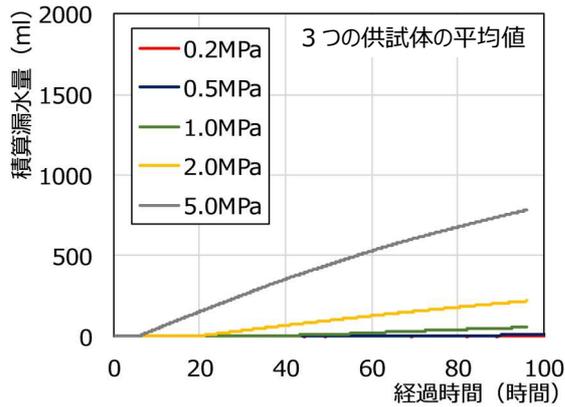


図-4 経過時間と積算漏水量の関係(グリーンカット)

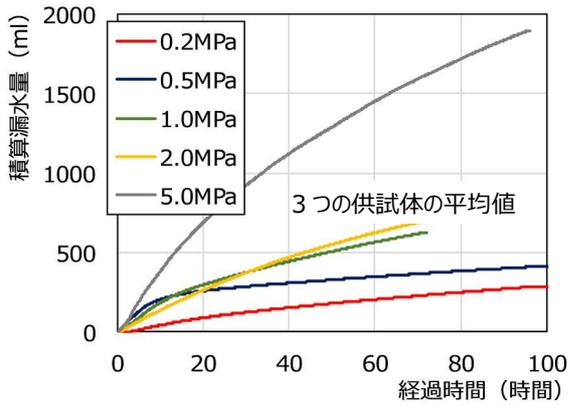


図-5 経過時間と積算漏水量の関係(金コテ仕上げ)

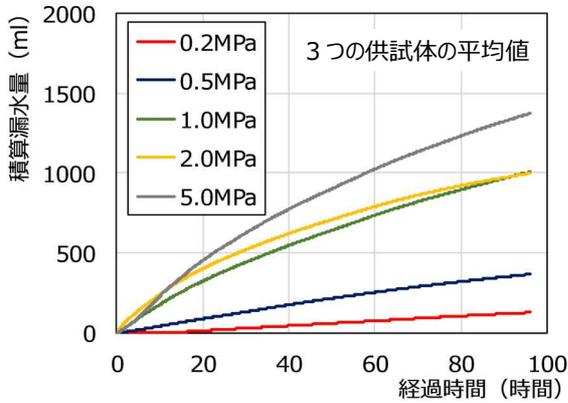


図-6 経過時間と積算漏水量の関係(無処理)

合、PCa製品のピース間の接合方法として、ピース間継手に組立現場にてコンクリートを打込むことを想定し、②金コテ仕上げを検討対象とした。

2層目施工直前の各処理方法による打継表面の状況を写真-3に示す。①グリーンカットは骨材が露出しているのに対し、②金コテ仕上げと③無処理は骨材の露出は認められない。また②金コテ仕上げの表面は平滑であるのに対し、③無処理の場合はブリーディングに伴う脆弱部分が残っている。

なお、いずれの打継処理においても、コア抜きを含む供試体作製時に打継目で肌別れすることなく、供試体は一体化していた。

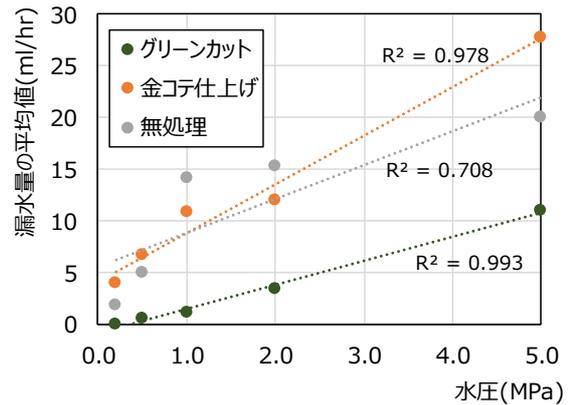


図-7 水圧と時間当たりの漏水量の平均値の関係

### (3) 試験方法

本試験では、打継処理方法(3水準)と水圧を検討パラメータとし、水圧は5水準(0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0MPa)とした。同条件の打継処理方法および水圧で、3体の供試体について試験を行った。

水圧は定常とし、試験開始後試験装置の下部から漏水が確認された後、10分あたりの漏水量が定常となるまで試験を継続した。なお、漏水量は、試験装置下部に設置した電子天びんにて、10分毎に重量を測定することで確認した。

なお、水は上水道を使用し、密度1g/mlとして漏水量を算出した。

### 2.2 試験結果

各打継処理方法における透水試験の経過時間と積算漏水量の関係を図-4～図-6に示す。経過時間60時間で比較すると、いずれの打継処理方法においても、水圧が高くなるにつれて積算漏水量は増加する傾向が認められる。また、打継処理方法の違いによる積算漏水量への影響は、同一の水圧で比較すると、グリーンカットが最も少なく、次いで無処理、金コテ仕上げの順となった。

水圧と漏水開始から60時間までの1時間当たりの漏水量の平均値との関係を図-7に示す。なお、1時間当たりの漏水量は3供試体の平均値とした。いずれの打継処理方法においても、水圧が高くなると1時間当たりの漏水量の平均値も大きくなり、その関係はほぼ線形に近い結果を示している。特にグリーンカットを実施した場合には、図-7に示した近似直線の決定係数が0.993となり、非常に高い相関を示した。これに対し、無処理とした場合の決定係数は0.708となり、他の処理方法に比べて小さい値となった。水圧5.0MPaとした場合の同じ打継処理方法における1時間当たりの漏水量に対する3つの供試体の標準偏差は、グリーンカットで0.10、金コテ仕上げで0.71と小さい値を示したのに対し、無処理とした場合は4.10となり、他の処理方法に比べて供試体間のばらつきが大きい結果を示した。そのため、無処理

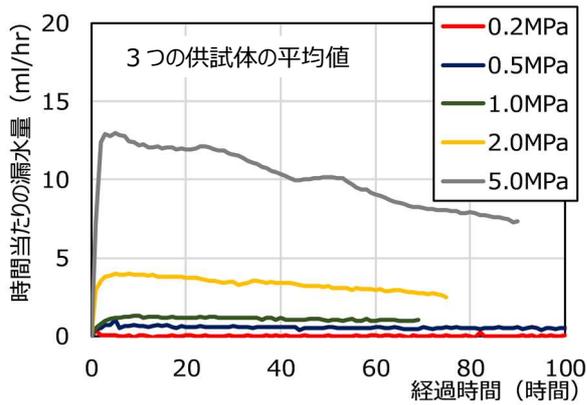


図-8 時間当たりの漏水量の変化(グリーンカット)

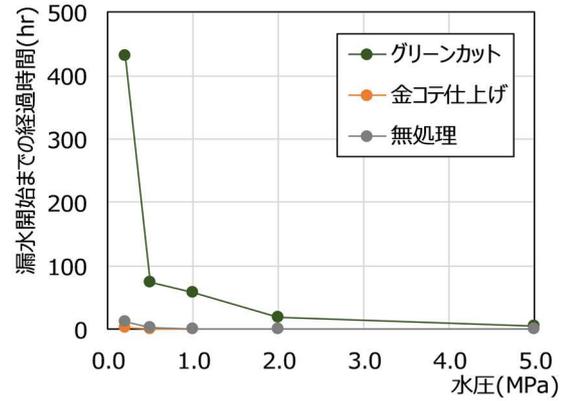


図-9 水圧と漏水開始までの経過時間の関係

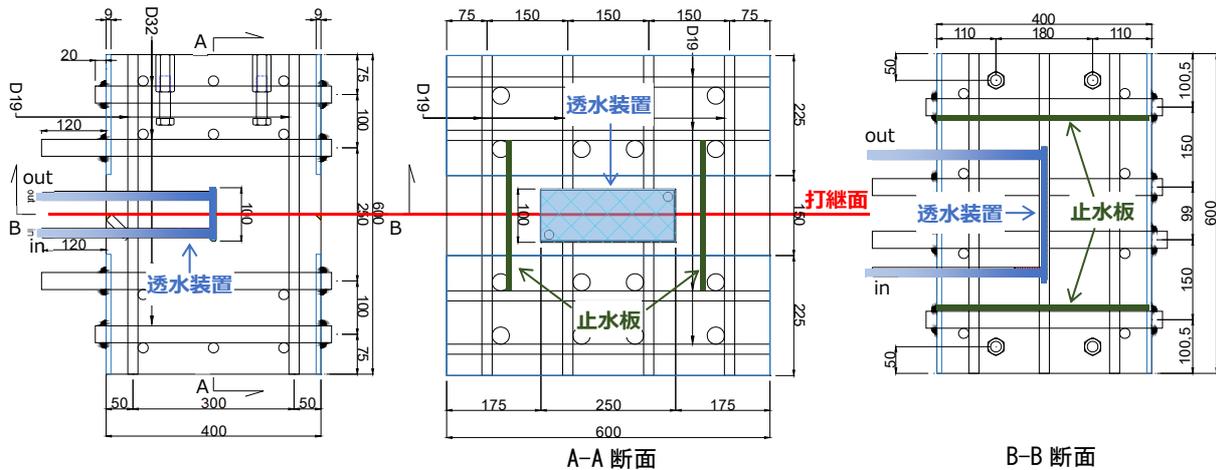


図-10 大型供試体断面図

とした場合は他の処理方法に比べ、ブリーディングの状態など供試体間での打継面の性状の違いが打継面の水密性能に影響を及ぼしていると考えられる。

打継処理方法をグリーンカットとした場合について、1時間当たりの漏水量の時間に伴う推移を図-8に示す。なお、1時間当たりの漏水量は3供試体の平均値とした。水圧を0.2MPaとした場合、1時間当たりの漏水量は、0.0~0.1mlの間で推移し、ほとんど変化は見られない。これに対し、水圧を2.0MPaや5.0MPaと高圧にした場合、漏水開始直後に1時間あたりの漏水量が最大となり、その後時間の経過とともに減少する傾向が認められた。この傾向は、他の打継処理方法においても確認された。この原因は明らかではないが、高圧水により打継目のコンクリートが損傷したことによる空隙の閉塞や、浸透水の粘度の増加などが考えられる<sup>3)</sup>。

水圧と漏水開始までの経過時間の関係を図-9に示す。なお、漏水開始までの経過時間は3つの供試体の平均値とした。いずれの打継処理方法においても水圧が高くなるにつれ、漏水開始までの経過時間が短くなる傾向が確認された。またグリーンカットによる打継処理方法を用いた供試体は、他の処理方法に比べて、漏水開始までに掛かった時間が長く、打継目の水密性能が優れていることが明らかとなった。この傾向は水圧が0.2MPaの場合

に特に顕著である。また、0.2MPaの漏水開始後の漏水量は、図-8に示したように、0.0~0.1ml/hrと非常に少ない。したがって、浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体の施工時の打継処理方法としては、グリーンカットを用いるのが適切と考える。これに対し、水圧を5.0MPaとした場合は、いずれの処理方法においても加圧開始直後数時間で漏水が確認され、打継処理方法による大きな違いは認められなかった。

### 3. 大型透水試験装置による実験

小型の透水試験装置では、150mm×150mmの打継面積を評価することとなり、水の浸透深さは150mmとなる。これに対して、検討対象とした浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体の部材厚は150~450mm程度となり、水の浸透深さは同等以上となると想定される。また、鉄筋も配置されることから、部材厚すなわち水の浸透深さや鉄筋が打継目の水密性能に及ぼす影響についても検討する必要があると考える。

そこで、本研究では、鉄筋を配置した大型の供試体による透水試験方法を検討するとともに、小型透水試験装置による試験結果との比較を行った。

#### 3.1 大型透水試験装置の概要

大型透水試験装置は、いくつかの装置を試作した結果から、高水圧载荷時に注入装置からの漏水を防止するた



写真-4 大型試験装置の外観

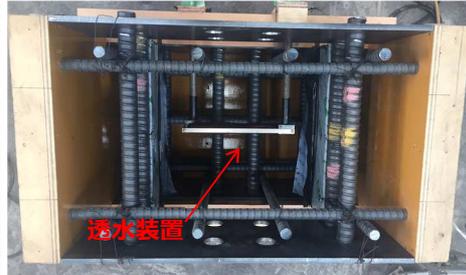


写真-5 透水装置設置状況



写真-6 打継目の処理状況

表-3 コンクリート配合

G <sub>max</sub> (mm)	スランプ <sup>o</sup> (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AD
20	12	41.2	4.5	37.0	177	373	608	1071	4.30

め、透水装置をコンクリート供試体内部に埋込むこととした。

また、鉄筋については、安全上の観点およびコンクリートに発生したひび割れからの過度な漏水を防止する観点から、高水圧 (5MPa) 载荷時に抵抗する鉄筋のひずみが 500 $\mu$  以下となるように鉄筋を配置した。

大型透水試験装置の断面図を図-10 に、また、大型試験装置の外観を写真-4 に示す。試験体のサイズは、幅 600mm×高さ 600mm×奥行 400mm とし、高さ方向の中央部に水平打継目を設けた。写真-5 に示すように奥行 400mm の中央に打継ぎ面への透水部を配置し、透水方向を 1 次元方向とするため、透水部両端部に止水版を設置した。そのため、水の浸透深さは約 200mm となる。

大型試験装置の作製に用いたコンクリートの使用材料は、セメント以外は小型透水試験時と同様とし、セメントについては耐久性を考慮し高炉セメント B 種を用いた。コンクリートの配合を表-3 に示す。圧縮強度は、材齢 28 日で 51.3N/mm<sup>2</sup> となり、小型透水試験装置に用いた供試体とはほぼ同等の値となった。

大型透水試験装置の打継目の処理方法は、グリーンカットとし、1 層目のコンクリートの施工後 14 日が経過した時点で 2 層目のコンクリートを打ち込んだ。打継目の処理状況を写真-6 に示す。

### 3.2 試験方法

大型透水試験装置による加圧は、安全性確保の観点から、徐々に昇圧する方法で行った。水圧の加力履歴を図-11 に示す。

加圧は手動ポンプにて導水管に設置した圧力計を見ながら適宜調整した。

なお、大型供試体の注入に使用する水は、フローレス蛍光塗料にて染色し、特定しやすくした。

### 3.3 試験結果

#### (1) 大型透水試験装置による試験結果

载荷開始後 5.8 時間が経過した水圧 2.0MPa の時点で

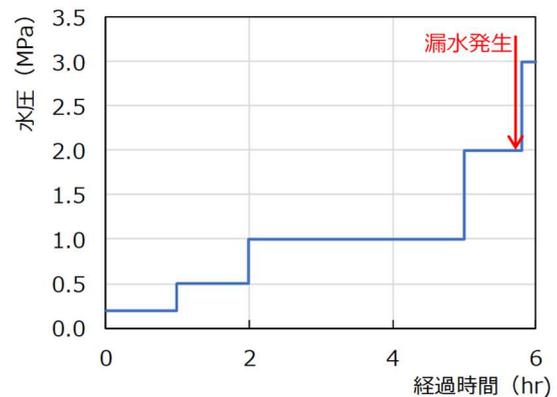


図-11 水圧の加力履歴

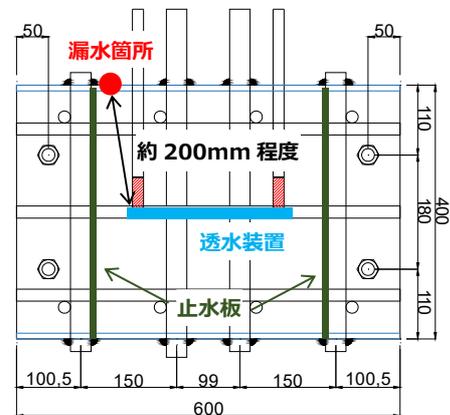


図-12 漏水箇所

漏水が確認された。漏水箇所は、図-12の断面図に示すように、供試体のほぼ端部からであった。

漏水確認後、3.0MPaまで昇圧したところ、打継目に加えて埋設した供試体を貫通する鉄筋周りからも漏水が確認され、昇圧できなくなったため、実験を終了した。

漏水が確認された 3.0MPa はコンクリートの引張強度とほぼ同等である。このことから、鉄筋周りからの漏水は、水圧により供試体内部に発生したひび割れを介して水が鉄筋まで伝わり、鉄筋下部のブリーディングによる空隙に加え、水圧により鉄筋とコンクリートとの付着が切れ、鉄筋が水みちになったことによると考えられる。

以上より、浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体では課題とはならないものの、コンクリートの引張強度を超えるような水圧が掛かる場合は、打継目に加え鉄筋が水みちとなる可能性が考えられることから留意する必要がある。

#### (2) 小型透水試験結果との比較

既往の研究では水圧が 0.15MPa を超える場合は、浸透過程で水およびコンクリートが弾性変形を起こすことをダルシー則に加えた高圧浸透モデル(式(1))が提案されている<sup>3)</sup>。そこで、前述の小型透水試験装置を用いて打継処理方法をグリーンカットとした供試体の試験結果から、式(1)により拡散係数を算出した結果を表-4に示す。

$$\beta_0^2 = \alpha \frac{D_m^2}{4t\xi^2} \quad (1)$$

ここで、

$\beta_0^2$ : 拡散係数 (mm<sup>2</sup>/s)

$D_m$ : 平均浸透深さ (mm)

$t$ : 水圧を加えた時間 (s)

$\alpha$ : 補正係数 ( $\alpha=t^{3/7}$ )

$\xi$ : 水圧に関する係数

表-4に示した各水圧(P)における拡散係数の平均値( $\beta_0(P)$ )を用いて、図-11の水圧条件が作用した場合、式(1)から導きだした(2)により各水圧(P)が作用した時間(t)の単位幅あたりの浸透深さ( $D_m(\beta_0^2(P), t)$ )を求め、それを積算する(式(3))と、浸透深さは199.6mmとなる。

$$D_m = \sqrt{\frac{4t}{\alpha} \beta_0^2 \xi^2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} D_m &= \int D_m(\beta_0^2(P), t) \quad (3) \\ &= D_m(\beta_0^2(0.2), 3600) + D_m(\beta_0^2(0.5), 3600) \\ &\quad + D_m(\beta_0^2(1.0), 10800) + D_m(\beta_0^2(2.0), 2880) \\ &= 26.5 + 43.7 + 68.4 + 60.9 = 199.6\text{mm} \end{aligned}$$

大型透水試験装置の漏水箇所は端部であったことから、水みちの距離すなわち浸透深さは概ね200mm程度であったとすると、小型透水試験装置の結果から算出した拡散係数を使用した浸透深さとほぼ一致する。よって、小型透水試験結果から求めた打継目の拡散係数は、サイズの異なる供試体にも適用できる可能性があると考えられる。

#### 4. まとめ

高水圧を受ける打継目の透水性能の把握を目的とし、水圧と打継処理方法を検討パラメータとした透水試験を実施した。その結果明らかになったことを以下に示す。

(1) 打継処理方法に関わらず、水圧が高くなるにつれて積算漏水量は増加する傾向が認められた。また、打継処理方法の違いによる積算漏水量への影響は、同一

表-4 拡散係数算出結果

水圧 (MPa)	拡散係数(mm <sup>2</sup> /s)			
	供試体 1	供試体 2	供試体 3	平均値
0.2	18.0	16.4	17.8	17.4
0.5	7.3	7.5	6.7	7.2
1.0	4.9	3.5	7.1	5.1
2.0	5.4	5.7	6.4	5.8

の水圧で比較すると、グリーンカットが最も少なく、次いで無処理、金コテ仕上げの順となった。

- (2) いずれの打継処理方法においても、水圧が高くなると1時間当たりの漏水量も多くなり、その関係はほぼ線形に近い結果を示した。
- (3) 打継処理方法に関わらず、水圧が高くなるにつれ、漏水開始までの時間が短くなる傾向が確認された。またグリーンカットを実施した供試体は、他の処理方法に比べて漏水開始までの時間が長く、打継目の水密性能が優れていることが明らかとなった。この傾向は水圧が0.2MPaの場合に特に顕著であった。
- (4) さらに、水圧が0.2MPaの場合、グリーンカットを実施した供試体の漏水量も非常に少ないことから、浮体式洋上風力発電用コンクリート浮体の打継処理方法は、グリーンカットとするのが適切と考える。
- (5) 水圧を5.0MPaとした場合は、いずれの処理方法においても加圧開始直後数時間で漏水が確認され、打継処理方法による大きな違いは認められなかった。
- (6) 大型透水試験装置では、3.0MPaの水圧を掛けた時点で、打継目に加え埋設した鉄筋周りからも漏水が生じた。これは、コンクリートに発生したひび割れおよび鉄筋下部のブリーディングによる空隙に加え、水圧により鉄筋とコンクリートとの付着が切れ鉄筋が水みちになったものと考えられる。
- (7) 大型透水試験装置による試験結果と、小型透水試験装置による試験結果から、打継目の水密性能を評価する指標として、高圧浸透モデルにより算出した拡散係数が使用できる可能性を見出した。

#### 参考文献

- 1) 染谷 望, 斯波明宏, 三田勝也, 加藤佳孝: 水平打継ぎ部の耐久性に関する研究, 土木学会第66回年次学術講演会, V-108, pp.215-216, 2011
- 2) 手塚基広, 松井 勇, 逸見義男, 守屋哲夫: 高水圧下におけるコンクリートの打継ぎ部およびひび割れ部の水密性試験の提案, 日本建築学会技術報告集, 第13巻, 第26号, pp.411-414, 2007
- 3) 村田二郎: コンクリートの水密性とコンクリート構造物の水密性設計, 技報堂出版, 2002年