

論文 液状水に起因した風車基礎アンカーリング周りのコンクリート損傷進展機構の解明

Mai Thi Hong^{*1}・千々和 伸浩^{*2}・岩波 光保^{*3}・齊藤 智久^{*4}

要旨：アンカーリング方式により定着された風車のタワー基礎において、スラッジが噴出し、噴出量が多くなるとタワーが浮き上がる現象が確認された。本研究では、風車基礎の一部をモデル化した試験体を用いて液状水の存在、水セメント比の違い、加力速度の違いに注目することで、コンクリート損傷の進展原因を解明する。その結果、降雨降雪に由来した液状水が内部に浸入したことにより、くさび効果、コンクリート骨格破壊、エロージョン、キャビテーション等の作用が生じ、基礎部分におけるコンクリートを急激に損傷させることが明らかになった。

キーワード：液状水、風車基礎、アンカーリング、くさび効果、コンクリート骨格破壊

1. はじめに

再生可能エネルギーの一つとして風力発電が注目されており、設置数が増加傾向にある。風車タワーの定着方式のひとつとして、鋼製のタワーにベースプレートを溶接して、コンクリート基礎内に埋め込んで定着するアンカーリング方式がある(図-1)。このアンカーリング方式によって定着された基礎において、鋼製アンカーリングとコンクリートとの界面から微粒粉と水の混合物であるスラッジが噴出し、タワーの浮き上がりが生じたため、供用開始からわずか数ヶ月しか経過していないにも関わらず補修を要した事例が報告されている(図-2)。運転により作用する支圧強度はコンクリート強度に対して十分に低く、一般的な環境でこのような速度での破壊は考えにくい。水と粉の混合物であるスラッジが噴出したという状況から、液状水の存在が急速なコンクリートの破壊を誘発したものの推察される。

既往の研究から液状水存在下において繰返し荷重が作用すると、ひび割れ面の洗い流し作用やくさび効果、キャビテーション等によって疲労寿命が大きく短縮されることが報告されている¹⁾²⁾³⁾が、定着性能に与える液状水の影響は十分に解明されているとは言い難い。今回の損傷と類似する事例として、松田による橋梁支承部付近が噴泥状に破壊していく事例とその機構推定に関する報告⁴⁾があるが、構造性能の低下にどのような影響を及ぼすのか、設計と運用に必要な定量的分析には至っていない。

以上の背景から、本研究では風車基礎において発生した今回の損傷事例の原因機構を解明し、構造性能にあたる影響の定量的把握と有効な対策を提案することを目的に実験検討を行うこととした。

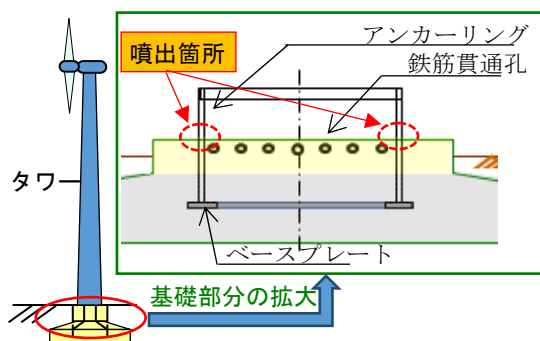


図-1 アンカーリング定着部とスラッジ噴出箇所



a) タワー内側の噴出状 b) 噴出したスラッジ

図-2 スラッジの噴出状況

2. 実験計画

2.1 損傷発生因子の推定

既往の知見から影響因子を推定し、実験条件の絞り込みを行った。内部への液状水の浸入経路は鋼製のアンカーリングとコンクリートの界面のみと考えられ、予め付着が著しく低下していたことが液状水浸入の原因であった可能性がある。スラッジ発生と損傷進展の原因として、基礎内部に浸入した液状水が内部の微細ひび割れやコンクリートの微細空隙内においてくさび的な効果を発揮した可能性や、液状水が粘性体であることからアンカープレートの急激な上下動によって瞬間的に水圧が下がり、キャビテーションエロージョンが発生した可能性、さらに微細空隙中を破碎で生じた粒子が水とともに移流する過程で、コンクリート面を削るエロージョンが発生した可能性が考えられる。よって、コンクリート損傷進展の

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科 (学生会員)

*2 東京工業大学 大学院理工学研究科 助教 博(工) (正会員)

*3 東京工業大学 大学院理工学研究科 教授 博(工) (正会員)

*4 株式会社ユーラスエナジーホールディングス 技術部 課長

影響要因として、界面付着劣化、液状水の存在、コンクリートの空隙特性、載荷速度が有力であると推定した。

2.2 実験ケースとその目的

2.1において推定された各影響要因が構造性能に与える影響を解明するため、表-1のように5通りの実験ケースを設定した。今回の実験ではケース1と2の比較から、液状水の有無がコンクリートの定着性能に与える影響をまず明らかにする。ケース1と3の比較からは鋼-コンクリート界面の付着がどの程度液状水の供給速度に影響するかを明らかにする。ケース3と4の比較からはコンクリートの空隙特性の違いが、液状水のくさび効果によるひび割れ進展やコンクリートの骨格破壊によるひび割れ発生がコンクリートの損傷進展に与える影響度を評価する。ケース3とケース5の載荷速度の違いによって、載荷速度が疲労寿命に与える影響を明らかにするとともに、くさび効果、キャビテーション、エロージョンによるひび割れ進展の影響を評価する。

2.3 試験体緒元

試験体は図-3のようにアンカーリング方式基礎の一部をモデル化したものであり、1辺が500mmの正六面体で、中央にアンカーリングを模した鋼材を設置している(図-4)。使用したコンクリートの配合を表-2に示す。なお最大骨材寸法が13mmである。内部に液状水が浸入したことを確認する目的で、プレート上面側に外径φ6mmのチューブを設置し、さらに一部試験体ではアンカーリング下面側での水圧を測定するためのプラスチックチューブも設置した。試験体上部には鋼材を囲むように水槽を作り、ここに水をためて雨水の滞留を模擬した。

なお試験体1と試験体2ではアンカープレート直下に

表-1 試験体ケース

| | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 |
|------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| 載荷方法 | 繰返し | | | | |
| 水の供給 | ○ | × | ○ | | |
| W/C | 62.4% | 62.4% | 62.4% | 40.9% | 62.4% |
| 載荷速度 | 0.5Hz | 0.5Hz | 0.5Hz | 0.5Hz | 0.1Hz |
| 支圧強度 | = コンクリートの28日圧縮強度 | | | | |
| 模擬空隙 | ○ | ○ | × | × | |

表-2 コンクリートの配合

| 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|------------|----------|--------------------------|-----|-----|-----|-------|
| | | セメント | 水 | 細骨材 | 粗骨材 | AE減水材 |
| 62.4 | 53.9 | 313 | 195 | 935 | 824 | 3.91 |
| 40.9 | 51.0 | 428 | 175 | 865 | 853 | 4.71 |

表-3 コンクリートの28日圧縮強度 (N/mm²)

| 試験体 | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 |
|-----|------|------|------|------|------|
| 強度 | 29 | 34 | 34 | 51 | 31 |

5mm厚の発泡スチロール埋め込み、鋼材とコンクリートとの相対ずれを起こすことでこれらの界面付着が消失しやすくなるように工夫した。基本となる試験体の水セメント比は実機より高めのものであるが、これは微細空隙中に液状水の浸入を容易にし、その破壊への影響を顕著にするためである。ここではケース4において水セメント比を大きく下げた際に、微細空隙への液状水の浸入を抑制した場合の影響をより明確にすることも意図した。

2.4 載荷条件と計測箇所

載荷にあたっては、図-5に示すようにアンカー鋼材とアクチュエータを専用の治具で接続して載荷を行った。また4本のPC鋼棒を用いて試験体を架台に固定した。各PC鋼棒に導入したプレストレスは150kN程度である。

各試験体のコンクリートの28日圧縮強度 f_c は表-3に示す通りである。風車実機における支圧強度比は、定格時(通常供用時)に0.19、風力が大きく危険防止のため発電を停止するカットアウト時において0.43程度となる。今回の実験では試験体の設計耐力を支圧強度比で4.0程度となるように設計し、繰返し作用させる荷重はカットアウト時に相当する支圧強度比で0.43に設定した。これは荷重値として約30kNに相当する。事前にW/C62.4%で同一諸元の試験体で行った単調引抜き試験結果では、鋼材とコンクリートの付着は約30kNで切れ、引抜き変位量5.1mmにおいてピーク荷重443kNに達したことから、繰返し載荷実験の荷重はピーク荷重の6%に相当する。繰返し載荷における載荷速度は実機で計測された振動周期である0.35Hzを念頭に0.5Hzを基本値とした。ケース5のみ載荷速度が疲労寿命に与える影響を明らかにするために、0.35Hzよりも小さい0.1Hzで載荷した。鋼材のひずみ計測するためのゲージは載荷方向と一致した鉛直面に4点、アンカーリング下面に2点に貼り付けた。

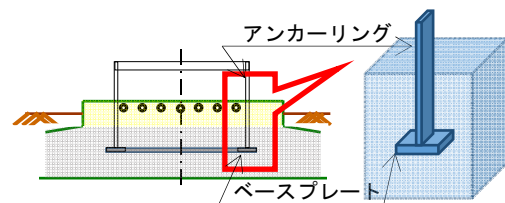


図-3 アンカーリング基礎の一部をモデル化した試験体

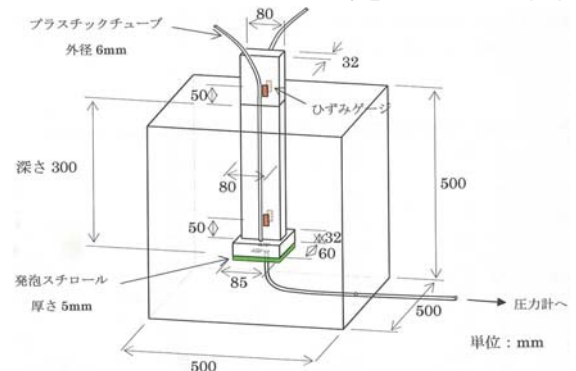


図-4 試験体の形状寸法

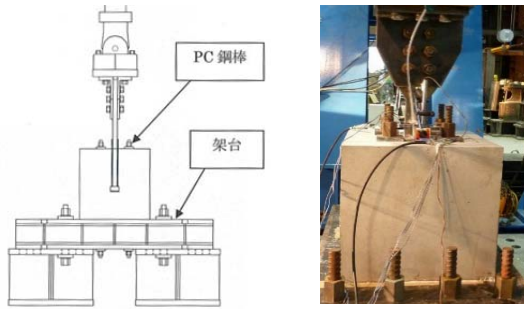


図-5 試験体の設置状況

コンクリート上面に変位計を設置し、そこから鋼板側面でコンクリート上面から約10cmの位置に設置した計測点の鉛直変位を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 液状水の存在が定着性能に与える影響

コンクリートの圧縮強度に応じて、ケース1では正負30kN、水供給ありの条件下で、ケース2では正負35kN、水供給なしの条件下で繰返し载荷を行った。ケース1とケース2の1サイクルの最大・最小変位をプロットした結果を図-6に示す。

水を供給しないケース2では、繰返し回数が10,000回から200,000回になった後も引抜き変位が0.12mm、押し込み変位が5.02mmであり、変位にほぼ変化がなかった。押し込みの変位はプレート下面の発泡スチロールが圧縮された分に相当するものと考えられるため、試験体自身の損傷は極めて小さく、破壊には至らなかった。

一方、水を供給するケース1では、繰返し35,000回時点でチューブ内に水が動いていることが確認できた。この直後、引抜き変位が7.1mmまで急増し、押し込み変位は6.1mmとなった。また、スラッジが鋼材界面から試験体上面に噴き出すようになり、次第に上面に堆積した(図-7a))。このスラッジの噴出状況は風車の実機で見られたものと同様であった。その後、引抜き変位は急増し、アクチュエータの荷重制御能力が追いつかず、30kNの荷重をコンクリートに伝達することができなくなったため、変位の増加に応じて、载荷速度を0.25Hz、0.1Hz、0.075Hzに下げ、設定した荷重が確実に作用するように修正した。その結果、振幅30kNが確実にコンクリートに作用し続けた場合、約5万回繰返し载荷した時点において、総変位量が100mm以上に達した。その後、数千回载荷を続けてから実験を終了し、試験体を切断して内部を観察したところ、幅がほぼアンカープレート幅で、高さが引き抜き側120mm、押し込み側10mmの空洞が試験体内部に形成されていた(図-7b))。その空洞の側面を観察すると、粗骨材を残すようにしてセメントペースト部が0.5mm程度えぐられているような状態になっていた。上部に噴出したスラッジの組成を重液分析により

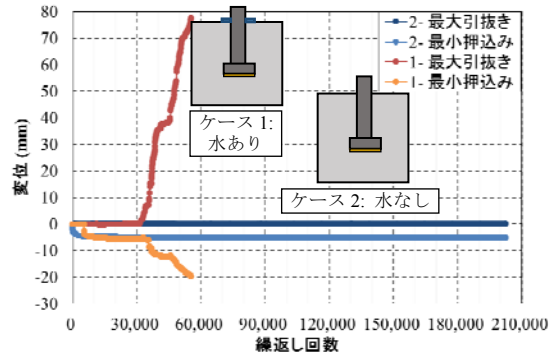
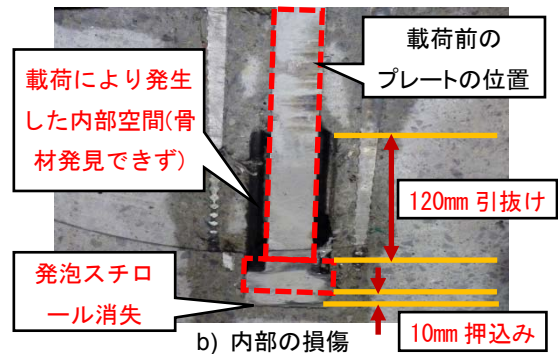


図-6 液状水の存在が定着性能に与える影響



a) 表面へのスラッジの堆積



b) 内部の損傷

図-7 コンクリート損傷状態

調べたところ、微粉末の組成は配合と一致しており、セメントペーストのみならず骨材すらも微粉砕されていたことが分かった。

この結果から液状水がコンクリート内部のアンカープレート周辺まで浸入すると、内部のコンクリートの損傷進展が加速され、乾燥条件下よりも著しく早く引き抜けが生じることが明らかになった。

3.2 鋼-コンクリート界面の付着が液状水の浸入に与える影響

前述したケース1はアンカープレートの直下に発泡スチロールを設置してあり、プレートが容易に沈み込むことができ、鋼材とコンクリートの界面付着が切れやすい状況となっている。これに対し、ケース3のアンカープレートは直接コンクリートに接しているため、界面付着は相対的に切れにくい状態にある。ケース1では繰返し35,000回でチューブ内に水が浸入したのに対し、ケース3では繰返し回数95,000回で水が浸入した(図-8)。これは仮にコンクリートが密実に鋼材周りに充填されていたとしても、水の浸入は避けたいことを示している。

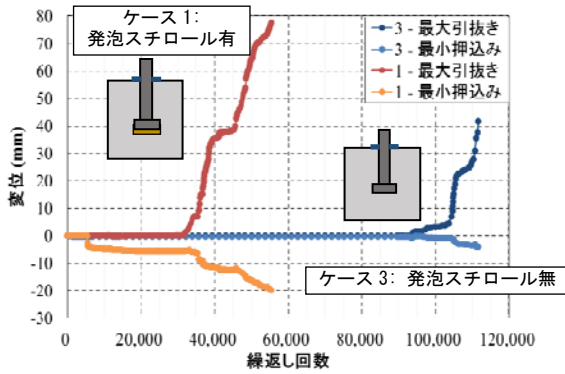


図-8 界面付着低下に伴う定着性能低下の関係

ちなみに、実構造物においてはブリーディングや収縮の影響で鋼-コンクリートの界面付着が低下し、より水が浸入しやすい状況になっている可能性は高いと考えられる。

3.3 細孔構造と液状水による定着性能低下の関係

コンクリートの圧縮強度に応じて、ケース3では正負35kN、ケース4では正負51kN、水が供給される状態で、繰返し荷重を行った。繰返し回数に対して、1サイクルの最大・最小変位をプロットした結果を図-9に示す。

高W/Cのケース3では、繰返し回数95,000回付近で、チューブ内に水が浸入したことが観察された。その直後、引抜き変位も押し込み変位も急増した。約105,000回時には、引抜き変位は約10mm、押し込み変位は1.2mmに達した。スラッジは上面に噴出し、次第に堆積するようになった。一方、低W/Cのケース4では、繰返し回数220,000回に達した時にチューブ中での水の動きが確認できた。しかし、水が内部に浸入した後も、しばらく変位量は増加せず、280,000回になってから、徐々に変化し始めた。変化は急激ではなく、緩やかに増加し、約360,000回繰り返した後、引抜き変位が5mmになった。試験体上面にスラッジが堆積した(図-10)。

この結果から低W/Cのコンクリートを用いることによって、液状水による破壊進展速度が変化し、高W/Cのコンクリートの場合に比べて疲労寿命が長くなることが明らかになった。

3.4 液状水の存在下における荷重速度と定着性能低下の関係

液状水の粘性挙動が破壊進展に与える影響を分析するため、ケース5では荷重速度を0.1Hzとして荷重を行い、荷重速度が0.5Hzであるケース3と比較することとした。図-11は繰返し回数に対して、1サイクルの最大・最小変位をプロットしたものである。なお他の実験と支圧強度比を統一するために、ケース5では正負30kNの上下限荷重で荷重を行った。

荷重速度が速いケース3では、繰返し95,000回付近に水が内部浸入した後、変位が急加し、破壊に至った。一方、荷重速度が遅いケース5では、繰返し回数8000回の

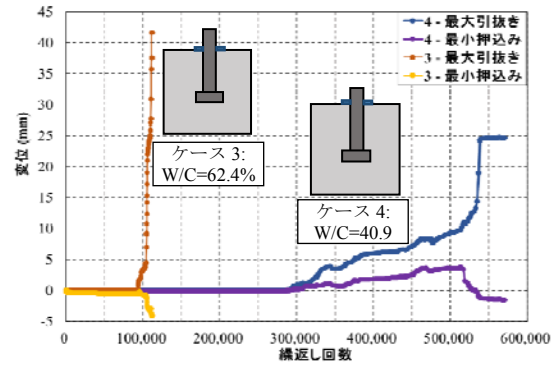


図-9 細孔構造と液状水による定着性能低下の関係



試験体3上面 試験体4上面

図-10 試験後のスラッジの堆積状態

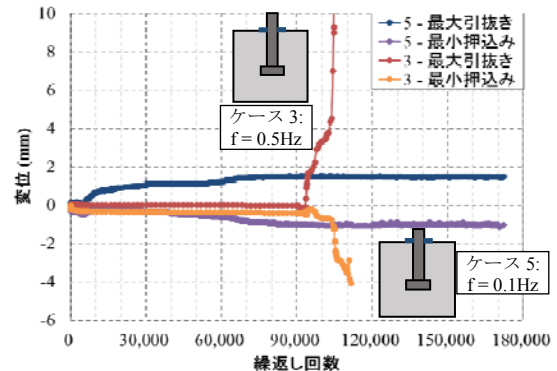


図-11 荷重速度と液状水による定着性能低下の関係

ときに、チューブに水が入り、その後、変位が徐々に増加する結果となったが、繰返し回数80,000回時点では引抜き変位が約1.5mm、押し込み変位が約1.0mm程度にとどまり、以降は変位が変化しない状態が続き、170,000回サイクル後でも破壊に至らなかった。

実験で観察されたチューブ内の水頭の動きからは、ケース5では水圧が周囲と平衡するのに十分な時間があったのに対し、ケース3では水圧が周囲と平衡に至らないまま、被圧した状態で移動し続けていることが推測され、これが破壊進展にも大きく影響したものと考えられる。疲労荷重において、乾燥条件下では荷重速度が遅いほど、破壊繰返し回数は小さくなるのが知られている⁵⁾。水が存在する場合は、存在しない場合よりも破壊繰返し回数は短くなるが、その影響は荷重速度が早いほど大きくなる。このため条件によっては荷重速度が早い程、破壊繰返し回数が短くなるという傾向が生じる場合がある。

4. 微視的機構に基づいた液状水によるコンクリート損傷加速機構に関する考察

4.1 くさび的な効果による破壊促進

細孔構造の違いが現れるケース3と4との結果と、載荷速度の違いが現れるケース3と5との結果から、液状水が存在すると、その粘性に由来した微細空隙や微細ひび割れ中においてくさび効果が発現し、セメント硬化体の骨格破壊を促進したことが示唆される(図-12)。

微細空隙中におけるくさび効果について、コンクリート中には様々な径の空隙が存在するが、液状水は粘性を有するため、比較的疎な毛管空隙(10^{-5}m 程度)には容易に浸入するが、緻密なゲル空隙(10^{-7}m 程度)には水が浸入しにくい。水セメント比を小さくした場合、硬化体は緻密化し、毛管空隙に対してゲル空隙の占める量が相対的に大きくなる。W/C62.4%のケース3とW/C40.9%のケース4の結果の違いはこれに起因するものと考えられ、ゲル空隙内に液状水が浸入しにくく、くさび効果が発生しにくかったと考えられる。なおエントレインドエアとしてコンクリート中に連行される空気による空隙は毛管空隙よりも1~2オーダー大きい。この空隙への水の浸入は容易だが、そこからの水の脱け出しも容易であることから、くさび的な破壊機構は発現しにくいと考えられる。

微細空隙中や微細ひび割れ中におけるくさび効果は、液状水の粘性に由来するものであるため、液状水の移動速度が小さいほど粘性の影響が抑えられ、くさび効果が起きにくくなることになる。ケース3とケース5との結果はこの影響が顕在化したものと考えられる。載荷速度の遅いケース5の方が水の浸入がケース3よりも早い、これは液状水が作用しない条件下における既往の知見において、載荷速度が遅いほうが、破壊繰返し回数が小さくなること⁹⁾と整合する。しかし水が浸入した後においては、くさび効果による破壊促進効果が発揮され、その影響をより大きく受けるケース3において破壊が早く起きたものと考えられる。

4.2 液状水による破砕片の移送に伴って生じる継続的な無損傷面露出による破壊促進

アンカープレート付近では支圧応力や前述のくさび的な効果等といった力学的な作用により、コンクリートが破壊され微細片が発生する。水が存在しない場合、微細片は原位置にとどまり、無損傷面を保護するクッションのような役割を果たす。しかし液状水が存在し、かつその移流が発生する場合、液状水の移流に伴って微細片は原位置から別の箇所へと移動し、常に新しい無損傷面がプレートからの力学的作用に晒され続けることになる。既報においても洗い流しによるせん断伝達の低下は指摘されている⁹⁾が、今回の実験でも、それと同様な機構が作用することで破壊が進展されたものと考えられる。

4.3 エロージョン及びキャビテーションエロージョンによる破壊促進

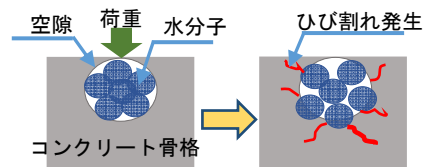


図-12 くさび効果による骨格破壊

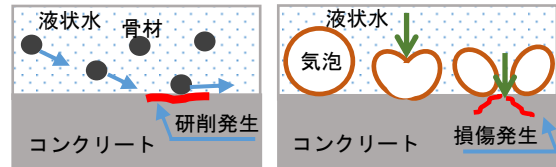


図-13 エロージョンによる損傷発生

図-14 キャビテーションによる損傷発生

実験済み試験体を切断し、載荷により発生した内部空隙の壁面を確認したところ、骨材を残すようにしてセメントペースト部が削られていることが観察された。この原因として、試験体の内部において、図-13に示すような固体粒子を含む液体が移流し、その過程で粒子が壁面と衝突することによって、壁面を削り取っていくエロージョン作用と、内部に発生した負圧により、キャビテーションが生じ、それで発生した衝撃が微小領域に数百MPaの圧力で壁面を削り取るキャビテーションエロージョン作用²⁾の2つが発生した可能性がある。

破壊が進み、アンカープレートの変位幅が大きくなると、内部空隙を移動する水量が大きくなる。繰返し載荷速度が一定の場合、アンカープレートとコンクリートの側面の間の隙間を高速・低圧で水が移動せねばならなくなる。このときの水圧が一定値以下になると図-14に示すようにキャビテーションエロージョンが発生し、壁面を削る可能性が出てくる。今回の実験では直接キャビテーションを検知することが難しかったため、試験体1の内部をオリフィス管で近似し、プレートと壁面との隙間が0.01mmと仮定してキャビテーション発生条件を検討したところ、載荷速度0.5Hzで、変位が42mmを超えたあたりからキャビテーションの発生可能性があるという結果となった。この結果から、今回の実験における内空隙壁面のセメントペーストの削り出しは通常のエロージョンによるものが主であるが、変位が大きくなるとキャビテーションエロージョンも併せて生じ、破壊が一層促進されることになる。なおコンクリートの破砕により微細片が発生し液状水に混入すると液粘性が増加する可能性もあることから、実際にはここでの検討よりもよりキャビテーションが起きやすい条件下にあったと考えられる。

5. 実機におけるコンクリート損傷の検証

4章ではコンクリート空隙特性と各空隙中での液状水の粘性挙動が損傷進展に大きな影響を与えることが明らかになった。この知見を基に、アンカーリング方式によ

り定着された既設風車基礎を対象に、配合計画書における水セメント比と調査によるタワーの浮上りの関係について分析を行った。結果を図-15に示す。W/C50%以上の基礎ではスラッジの噴出が見られタワーの浮き上がりが生じるが、W/C 50%以下のほとんどの基礎では変状が起きず、本研究の得られた知見と同じ傾向が見られた。また損傷が発生しているのは降雪地域にある基礎であり、降雨だけの地域にある基礎では損傷が発生していないことも分かった。降雨の場合、滞留がなければ天候の回復後、数時間のうちに雨水は逸散するが、降雪の場合天候回復後も数日間そこに留まり、融雪水として液状水が供給され続けることが、この差を生んだ原因であると考えられる。なお降雨の場合においても排水が悪く滞留が生じる場合には同様の問題が発生する可能性がある。

6. まとめ

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- 1) 液状水が定着部の支圧領域に存在する場合、鋼-コンクリートの定着性能は乾燥条件下で想定されたものよりも著しく低下する可能性がある。
- 2) 鋼-コンクリートの付着が健全であっても、繰返し作用を受けると界面から液状水が内部に浸入しうる。
- 3) 液状水の粘性挙動に由来したくさび効果による破壊促進、水による破砕片の移送に伴って生じる継続的な無損傷面露出による破壊促進、エロージョン及びキャビテーションエロージョンによる破壊促進により、液状水が存在するとコンクリートの定着性能を著しく低下する。
- 4) 繰返し荷重作用下において液状水が存在すると、微細ひび割れ内や細孔空隙中においてくさび的な効果が生じる。水セメント比を小さくし空隙を緻密化して水の浸入を抑制したり、載荷速度を下げてくさび的な効果を発生させないようにしたりすることで、液状水による破壊促進を緩和することができる。
- 5) 繰返し荷重作用下において液状水が存在すると、発生した破壊したコンクリート片がスラッジとして移送されるため、無損傷面の継続的に外力に晒されることになり、損傷進展が加速される。
- 6) スラッジを含む液状水が移動するとエロージョンにより、セメントペースト部を削って破壊を促進する。水の速度が速くなるほどその促進効果も大きくなる。
- 7) 引抜き変位が大きくなると、キャビテーションエロージョンが発生し、破壊を促進する可能性がある。
- 8) 降雪による液状水供給は長期間に渡るため、鋼-コンクリート界面から液状水が侵入しやすくなり、液状水による定着性能低下が誘発される。降雨の場合においても排水が悪く液状水の滞留が生じるような場合に

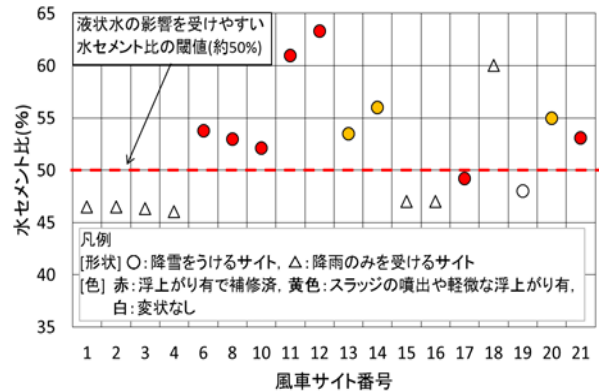


図-15 水セメント比とタワー浮き上がりの関係

は、同様の問題が発生する可能性がある。

謝辞

本研究は、東京工業大学、(株)ユーラスエナジ-ホールディングス、東電設計(株)(以下、TEPSCO)、三井住友建設(株)(以下、SMCC)との共同研究であり、共同研究者である山谷敦博士、茂木寛之様(TEPSCO)、篠崎裕生博士(SMCC)に多大なご協力をいただきました。また東京大学教授 前川宏一博士にはいくつもの有益なご助言を賜りました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987
- 2) Maekawa, K. and Fujiyama, C.: Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads, Engineering Computations, Vol. 30, No. 6, pp.825-841, 2013.6
- 3) 松下博通：水中におけるコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究、土木学会論文報告集, No.296, pp.87-95, 1984.4
- 4) 松田芳範：コンクリートの耐久性を定める『水』の制御 ①コンクリート構造物の劣化・損傷に及ぼす水の影響について、コンクリート工学, 第 51 巻, No.10, pp.817-818, 2013.10
- 5) 石橋忠良, ほか：コンクリート構造の耐久性シリーズ 疲労, 技報堂出版, 第 3 章, p.49, 1987.9
- 6) Gebreyouhannes, E., Kishi, T. and Maekawa, K.: Shear fatigue response of cracked concrete interface, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.2, pp.365-376, 2008
- 7) 千々和伸浩, 國枝将大, 前川宏一：PC-RC 構造の自律的時間依存変形制御に関する基礎的検討, 平成 25 年度土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集第 V 部門, Vol. 68, pp. 1199-1200, 2013.9