# 論文 風力発電塔基礎におけるアンカーリングの沈下現象に関する一考察

黒木 唯真\*1・角掛 久雄\*2・菅 祐太朗\*3・村川 史朗\*4

要旨:アンカーリング方式を採用している風力発電塔において生じている,基礎接合部周辺のコンクリートの損傷に伴う沈下現象について,水および接合部下面に生じていると考えられる空隙に着目し,模型供試体による繰返し載荷実験を行った。水および空隙がある場合,早期にアンカーリングの沈下が生じるが,損傷の進展には,空隙量,空隙形状,実支圧強度比が影響することが確認され,空隙量の影響が最も大きいことを明らかにした。さらに,空隙によって生じるコンクリートの凹凸部が繰返し荷重による水の作用および支圧によって損傷するメカニズムを示した。

キーワード:風力発電塔基礎、アンカーリング、繰返し荷重、空隙、エロージョン

#### 1. はじめに

風力発電塔のタワーと基礎の接合方法の一つに、図ー1に示すようなアンカーリング方式 <sup>1)</sup>がある。現在、その接合部においてコンクリートが損傷し、アンカーリングおよびタワーが沈下・上下振動する現象が国内外で確認されている。図ー2に示すように、アンカーリングとコンクリートの界面から水と削り取られ粉末状となったコンクリートの混合物(以下、スラッジと呼ぶ)が噴出し、アンカーリングが数 mm から 1cm またはそれ以上沈下していることが報告されている。また、供用後半年から2年程度で損傷が生じ、補修が行われた事例もある<sup>2)</sup>。

図-1 に示すように、風荷重によるタワーの揺れに伴って、接合部には押込み・引抜きの繰返し荷重が作用するが、界面から雨水などの水が浸入したことによって接合部周辺のコンクリートが損傷したものと考えられる。さらに、早期にかつ1cm程度の沈下も生じていることから、水の浸入に加え、図-3 に示すようなベースプレート下面に生じていると考えられる空隙なども損傷の促進に影響していると考えられる。ベースプレート部の幅は参考とした風力発電塔実機でも30cmと広く、また普通コンクリートが使用されていることから、ベースプレート下面では空隙が発生しやすいと考えられる。

Mai ら 3)によって、接合部周辺のコンクリートの損傷について検討がなされているが、空隙による影響は考慮されておらず、また発電を停止する暴風時の高い荷重条件による検討であり、さらなる検討が必要と思われる。著者ら 4)は、水の浸入およびベースプレート下面の空隙に着目し、通常運転時レベルの荷重条件について、模型供試体による繰返し載荷実験を行った。水の浸入がない

場合,空隙の有無に関わらず損傷は生じないものの,水の浸入がある場合,空隙がない場合でもやや損傷が生じ、空隙がある場合には早期にかつより大きな損傷が生じることを確認した。空隙がない場合は、接合部コンクリートの表層がエロージョンやベースプレートによる支圧などによって損傷するが、空隙がある場合は、空隙によって生じるコンクリートの凹凸部が損傷することで大きな沈下現象となった。水および空隙の影響が大きいことを確認したが、具体的な損傷メカニズムについてまでは考

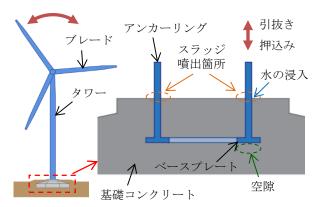


図-1 アンカーリング方式概略図



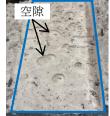


図-2 スラッジ噴出の様子

図-3 空隙例

- \*1 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (学生会員)
- \*2 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 准教授 博(工) (正会員)
- \*3 大阪市立大学 工学部都市学科
- \*4 株式会社日建設計シビル 生産施設部門 部長 修(工)

表-1 コンクリートの配合

| 呼び強度 | 粗骨材の      | スランプ | 水セメント比 | 細骨材率 | 才率 単位量(kg/m³) |      |     |     |      |
|------|-----------|------|--------|------|---------------|------|-----|-----|------|
|      | 最大寸法 (mm) | (cm) | (%)    | (%)  | 水             | セメント | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤  |
| 24   | 15        | 10   | 53.0   | 45.6 | 183           | 345  | 803 | 972 | 2.76 |

表-2 パラメータ

| 名称       | 水 | 空隙量 | 空隙形状                | 荷重レベル | 載荷速度   |  |
|----------|---|-----|---------------------|-------|--------|--|
| N        |   |     |                     |       |        |  |
| 16-S     |   | 16% | 円形(小)               | 運転時   |        |  |
| 30-S     |   |     | 1 1)\S(\(\alpha\)   |       | 1.0Hz  |  |
| 30-L     | 0 | 30% | 円形(大)               |       | 1.0112 |  |
| 30-Sq    |   |     | 角形                  |       |        |  |
| 30-S-LP  |   |     | 円形(小)               | 低荷重   |        |  |
| 30-S-LHz |   |     | 11)\S(\(\lambda\)\) | 運転時   | 0.4Hz  |  |

察できておらず、対策に向けてはさらなる検討が必要である。そこで本研究では、損傷メカニズムの解明を目的として、空隙量、空隙形状、載荷荷重、載荷速度をパラメータとして、さらなる検討を行った。

### 2. 実験概要

### 2.1 供試体・パラメータ

供試体は、**図-4** に示すように、接合部の一部について、タワーの揺れによる押込み・引抜きを曲げ挙動を考慮しない単純な圧縮・引張として直線形で模擬した。既往研究 りと同様に、アンカーリングの寸法はベースプレート部を参考とした実機の 1/5 程度としているが、圧縮・引張に面として抵抗するように設定した。なお、ウェブ厚は載荷時に座屈・降伏しないように決定している。

供試体は、空隙作製のためコンクリートの打設を2回 に分けて行った。1日目に、図-4で示す打継ぎ目より下 側のベースプレート下面部を打設し、硬化後の翌日2日 目に上面部を打設した。打継ぎ目には凝結遅延シートを 用い,2日目の打設前に目荒し処理を行っている。なお, 意図しない空隙を設けないため、実機とは異なる横方向 からの打設を行っている。表-1 に使用したコンクリー トの配合を示す。コンクリートは、実強度が一般的な設 計基準強度程度(24~30N/mm²)となるように強度増加 を見込み,「普通-24-10-15-H」のレディーミクストコンク リートを用いた。なお、ベースプレート下面部および上 面部で配合は同じとしている。2 日目の上面部打設の翌 日に脱型し、約20℃の養生室にて7日間の散水養生を行 った。その後は、実験日まで気中養生を行っている。な お、早強ポルトランドセメントを用いているため、強度 が安定した材齢21日(ベースプレート下面部)以降から 実験を行っている。

表-2 にパラメータを、図-5 にパラメータの一つであるベースプレート下面の空隙形状および配置を示す。 既往研究 4より、水の浸入がない場合、空隙の有無に関

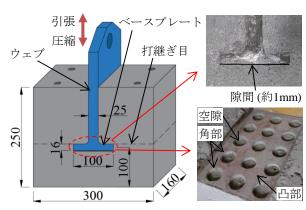


図-4 供試体概略図(単位:mm)

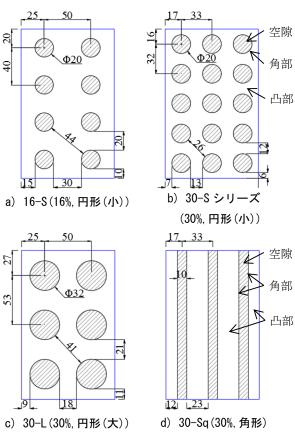


図-5 空隙形状および配置(単位:mm)

わらず損傷は生じないことから、本研究ではすべての供 試体で水の浸入を模擬した。空隙量とは、ベースプレー ト下面の全面積(幅 100mm×奥行き 160mm)に対して、 空隙によって欠損する断面積の割合である。Nは、空隙 のない健全状態であり、16-S および 30-S は空隙量がそ れぞれ 16%、30%である。空隙は、実際に生じていると 考えられる円形状の空隙を想定し、直径 20mm の円形で 統一した(図ー5 a)、b))。さらに、既往研究4において 空隙の形状も損傷に影響している可能性が示されたため、 空隙形状による違いを見るために、空隙量は30%で30-S と同じとし、空隙形状が異なる30-L および30-Sq を用意した(図-5 c),d))。30-L は直径32mmの円形空隙とし、30-Sq は簡易的に模擬した既往研究かと同様の角形の空隙である。空隙がある場合の損傷には空隙によるコンクリートの凹凸が影響しているが、その凸部の角部は損傷しやすいと考えられる。そこで、角の長さも着目点の一つとし、既往研究がの30-Sq と同程度となるように30-Sを決定し、長さが短くなるように30-Lを決定している。なお、空隙の高さはそれぞれ5mm程度としている。さらに、30-Sと同じ供試体を2体用意し、1体は空隙によって欠損した断面を考慮して低荷重で繰返し載荷し(30-S-LP)、もう1体は載荷速度を変更した(30-S-LHz)。

また、本研究では損傷メカニズムの解明を目的としているため、初期からウェブの付着切れを生じさせ水が浸入しやすいように、図-4 で示すようにあらかじめベースプレート下面に約 1mm の隙間を設けている。

#### 2.2 載荷・計測条件

図-6 に載荷の様子を示す。載荷荷重は、圧縮につい ては参考とした実機における運転時の設計レベルの荷重 を目安として、ベースプレートによるコンクリートへの 支圧強度比(支圧応力/支圧強度(=圧縮強度):0.16) から設定している。既往研究 4では、引張についても支 圧強度比を基準に荷重を設定したが、本研究では空隙に よるベースプレート下面部の損傷について検討するため, 圧縮のみに着目し荷重を設定している。なお、基準とし た圧縮強度は41.6N/mm2であり、想定した強度より大き なものとなった。載荷荷重は、30-S-LP を除いて空隙によ る断面の欠損は考慮せずに設定し、約105kNである。30-S-LPのみ、支圧強度比による影響を見るために、空隙に よる欠損後の断面について支圧強度比が 0.16 となるよ うに、約75kNと低荷重とした。圧縮に着目しているが、 水を循環させるために引張に関しても数 kN(支圧強度比 0.01 程度) 設定し、繰返し載荷を行っている。載荷速度 は、タワーの固有周期と既往研究3,4から、圧縮のみに着 目していることを考慮して 1.0Hz を基本とし、載荷速度 による影響を見る 30-S-LHz のみ低速度の 0.4Hz とした。 載荷試験機は、電気油圧サーボ式の疲労試験機(容量 250kN) を用いた。

載荷時の条件は既往研究 4と同様であるが、図-6 に示すように、鉛直方向および水平方向を鋼材と PC 鋼棒および寸切りボルトによって固定・拘束した。鉛直方向については引張載荷時の固定用治具として設置しているが、供試体には鉄筋を配置していないこともあり、補強筋の役割も兼ねて水平方向にも拘束治具を設置した。PC 鋼棒および寸切りボルトはそれぞれ 4 本ずつ設けており、1 本当たり鉛直方向は約 30kN、水平方向は約 10kN のプ

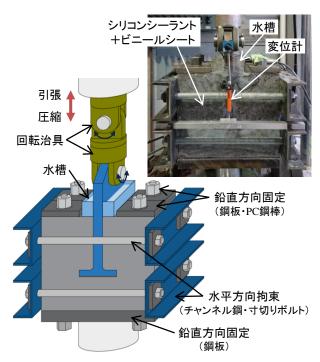


図-6 載荷の様子

レストレスを導入している。プレストレスによるコンクリートへの支圧応力は、それぞれ 3N/mm² 程度と 1N/mm²未満である。また、供試体上側でアンカーリングに固定した載荷治具は直角 2 方向に回転できるものとした。変位は、供試体の前面および後面の 2 箇所において、コンクリートとアンカーリングの相対変位を計測した。なお、1 周期 50 点計測することとしている。水の浸入は、コンクリート上面のアンカーリングウェブ部の左右に水槽を設けることで模擬し、前後の面を防水のためシリコンシーラントとビニールシートで被覆している。

### 3. 実験結果

図-7 に噴出したスラッジおよび載荷後の供試体正面の様子の一例を、図-8 に載荷後のベースプレート下面の様子を N, 30-S, 30-L, 30-Sq について示す。図-9~11 には、それぞれ得られた変位 - 繰返し回数の結果を示す。変位は引張を正としており、圧縮荷重最大時について、繰返し回数1回目の値を 0 とした沈下量として、計測した 2 箇所の平均値で示している。すべての供試体で、繰返し載荷とともに変位が生じ、図-7 に示すように水槽内およびベースプレート周辺においてスラッジが確認された。なお、供試体ごとに若干のばらつきはあるものの、水は載荷直後にベースプレート周辺まで浸入している。以降に、パラメータとした空隙量、実支圧強度比、空隙形状、載荷速度について、それぞれの影響を示す。

# 3.1 空隙量および実支圧強度比

図-9 には, N, 16-S, 30-S, 30-S-LP の変位 - 繰返し 回数の結果を示している。横軸の繰返し回数は6万回ま



図-7 噴出スラッジと載荷後の様子

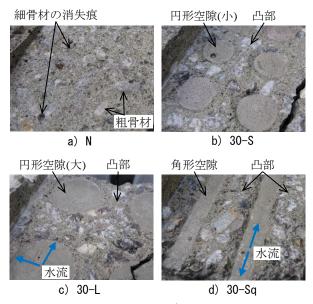


図-8 載荷後のベースプレート下面の様子

でとしているが、空隙のない健全状態である N は 40 万 回まで載荷しており、変位は-1.3mm に到達している。図 -8 a)で示すように、載荷後のベースプレート下面では 骨材が露出しており、さらに細骨材が抜け出しもしくは 破砕によって消失したと思われる痕も確認された。既往 研究  $^{3,4)}$ と同様に、モルタルおよび粗骨材がエロージョンなどの水による作用やベースプレートによる支圧によって削り取られたと考えられる。しかし、図-9 より、空隙のある他 3 供試体と比べて変位の進展は小さい。

空隙が 16%の 16-S は、徐々に変位が進展した後、約4万 2000回(図ー9 丸印)以降で急激な進展となり、2段階的な進展となった。空隙が 30%の 30-S は、1000回程度から変位が急激に進展し始め、3mm程度の沈下となったところで、スラッジによってシリコンシーラントおよびビニールシートが剥離しため載荷を終了した。しかし、図ー8 b)に示すように、空隙による凸部が削り取られていることが確認できる。16-S および 30-S-LP についても、残された凸部の高さおよびモルタルの削り取り具合に違いはあるものの、同様の様子であった。

30-S-LP は, 30-S よりは変位の進展が遅いものの, 空隙があるため大きな変位が生じている。約 1500 回から変位の進展が始まり, 約 8000 回 (図-9 丸印) で 2 段階

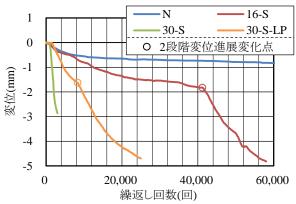


図-9 空隙量および実支圧強度比の影響

的に変位が進展している。16-S, 30-S-LP に関しては, 模 擬した空隙の高さである 5mm 程度の変位を目安として 載荷を終了した。

16-S および 30-S より, 既往研究 4と同様に, 空隙量が 多いほど変位の進展が早いことがわかる。空隙量が増加 するにしたがって、ベースプレート下面のコンクリート の凸部上面の支圧面積が減少し, 実際にコンクリートに 作用する応力(実支圧応力)は増加する。実支圧強度比 (実支圧応力/支圧強度(=圧縮強度))は、健全状態の 0.16 から, それぞれ 0.19, 0.23 となる。さらに, 空隙に よってコンクリートは凹凸となるが、空隙量の多い 30-S は、損傷しやすいと考えられる凸部の角となる部分が長 く, また空隙間の距離も短い (図-5 a), b)参照)。その ため、凸部はより損傷しやすくなっていると考えられる。 16-S は 2 段階的に変位が進展しているが、これは、凸部 上面のすり磨きによる変位の進展とともに、モルタル部 が削り取られ支圧面積が減少することによって支圧応力 も徐々に増加し、ある限界値に達したところで凸部が急 激に損傷したと考えられる。30-S は凸部がより損傷しや すいため、初期から急激に損傷したと思われる。

空隙による断面の欠損を考慮し、実支圧強度比が健全 状態 N と同じ 0.16 となるように荷重を低く設定した 30-S-LP は、30-S と比較すると変位の進展は緩やかとなっている。これは実支圧強度比が低くなった影響であり、16-S と同様に 2 段階的な沈下も見られた。実支圧強度比だけに着目すると、空隙のない N とは同じであるが、変位の進展はより早期に生じており、空隙があることで大きな沈下となった。また、16-S は実支圧強度比が 0.19 であり、30-S-LP より大きいものの変位の進展は遅い。これらのことから、実支圧強度比だけでなく空隙の有無および空隙量による影響も大きいことがわかる。30-S と同様に、30-S-LP は 16-S より空隙量が多いため、空隙による角部の長さは長く、空隙間の距離は短い。そのため、実支圧強度比は低いものの、30-S-LP のほうが凸部は削り取られやすく、変位の進展が早くなったと考えられる。

### 3.2 空隙形状

図-10 は, 空隙量は 30%で一定であるが空隙形状の異なる 30-S, 30-L, 30-Sq の変位 - 繰返し回数の結果である。なお, 横軸の繰返し回数は 1 万回までとしている。

30-S は前節の通りであるが、約1000 回からの急激な変位の進展後、2000 回を越えたあたりからやや変位の進展速度が遅くなっている。30-L は、約1500 回から緩やかに進展し、約3000 回から急激に進展している。30-Sqに関しては、約1000 回から急激に変位が進展した後、約1900 回の変位-1.4mm 付近から緩やかな変位の進展に移行している。

変位が初めから急激に進展している 30-S に対して、30-L は初期に緩やかな変位の進展が見られる。空隙量を同じとしているが、30-L は一つの円形空隙が大きく、数が少ないため、角部の長さが 30-S の7割以下と短い。また空隙間の距離も長いため、凸部がある程度の塊となっている(図-5 b)、c)参照)。そのため、角部の損傷による支圧面積の減少が小さく、凸部が削り取られにくいため、30-S よりも変位の進展が遅くなったと考えられる。初期は凸部上面のすり磨きなどによる変位の進展であり、その後は、支圧応力の増加に伴って 30-S と同様に凸部が急激に損傷したと考えられる。

30-Sq は、空隙による角部の長さが30-S とほぼ同じである。初めの急激な進展は、角部の損傷によって凸部の断面が急激に減少し、エロージョンおよび支圧などにより凸部が削り取られたために生じたと考えられる。しかし、30-S および30-L の円形空隙と異なって空隙が前後面まで貫通しているため、図-8 c)、d)で示すように、円形空隙では凸部に水圧が作用するのに対して、角形では空隙が水みちとなり長手方向に水が流れやすく、前後面のシリコンシーラント・ビニールシート部へ水圧が逃げることで、凸部に生じる水による削り取り作用が小さくなっていると考えられる。そのため、急激な進展による沈下量は他2供試体と比べて小さく、緩やかな変位の進展に移行したと考えられる。

以上,空隙形状による影響を考察したが,3供試体とも1万回までに3mm程度の沈下となっており,前節で示した空隙量・実支圧強度比や次節で示す載荷速度よりは影響は小さいものと考えられる。

# 3.3 載荷速度

図-11 は、載荷速度を遅くした 30-S-LHz の変位 - 繰返し回数の結果を,30-S,30-S-LP と合わせて示している。 横軸の繰返し回数は図-9 と同様に6万回としている。

30-S-LHz は、約 1000 回で急激にやや変位が進展した後、緩やかに進展している。やや段階であるものの、約 9000 回の変位-1.8mm 程度(図-11 丸印)から、16-S、30-S-LP と同様の 2 段階目の変位の進展となっていると

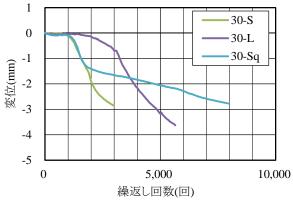


図-10 空隙形状による影響

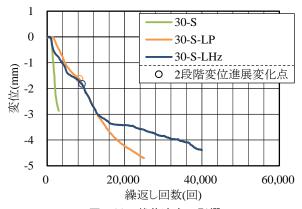


図-11 載荷速度の影響

考えられる。特に 30-S-LP とは比較的似た挙動となった。 変位が約-3mm となった約 1 万 3000 回以降は,再び緩や かな進展となっているが,これは凸部がある程度削り取 られた後の健全状態 N に近い損傷であると考えられる。

載荷速度の遅い 30-S-LHz は 30-S に比べ、変位の進展 は遅いが、これは載荷速度が遅いと水およびスラッジの 流れる速度も遅くなるため、水による削り取り作用が小 さくなったことによると考えられる。凸部の角や表層の セメントペースト部は削り取られやすいため、本研究で の速度差程度では初期の損傷は同程度となっているが、 モルタルや粗骨材の削り取りについては、載荷速度の影響は大きいと考えられる。また、載荷速度は速いが実支 圧強度比を低くした 30-S-LP とも変位の進展程度が近く、 本研究でパラメータとした範囲において、載荷速度と実 支圧強度比の影響は同程度だと考えられる。

# 4. 損傷メカニズムの推定

空隙がある場合、コンクリートに凹凸が生じるが、その凸部が削り取られることで大きな沈下現象が生じる。ここで、水および空隙がある場合について想定される凸部の損傷メカニズムを図-12に示す。なお、(0)載荷前は、模擬した空隙によって生じている凸部を示している。

(1)水の浸入および繰返し載荷によって水の流れが生じ、エロージョンなどの水の作用や支圧などによってコ

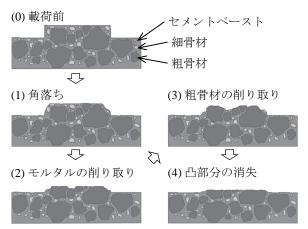


図-12 損傷メカニズム概念

ンクリートが削り取られるが、初めは凸部の角が欠けやすいと考えられる。その角落ちによって、凸部上面の支圧面積は減少する。また角落ちとともに、コンクリート表層のセメントペースト部がすり磨きで削り取られ、骨材が露出する。空隙がない場合は、主に表層のセメントペースト部のすり磨きが初期の沈下要因と考えられる。

(2)支圧面積の減少による支圧応力の増加やその支圧面に固体粒子である削り取られたコンクリートが挟まり支圧されることによって、微細ひび割れが生じやすくなる。さらに、水によって細骨材を含むモルタルが削り取られることで、徐々に粗骨材が露出する。空隙があるため、凹凸のない健全状態とは異なって凸部の側方向からも水による削り取りが行われると考えられる。図-8 a)で示したように、細骨材の抜け出しや破砕も生じていると考えられる。角部が長い場合、角落ちによって減少する支圧面積は大きくなり、実支圧面積にはより大きな応力が作用するが、さらに側方向からの水による削り取りも大きいため、モルタル部の損傷速度も速いと考えられる。これは、30-S および 30-L で初期の削り取りに差が生じた要因であると考えられる。

(3)モルタルの削り取りで粗骨材が露出すると、粗骨材そのものに作用する支圧応力は増加していくが、固体粒子の介在によって点で作用している部分も多くなる。そして、ある限界に達したときに粗骨材表層がひび割れ・破砕することで、凸部が急激に削り取られると考えられる。載荷後のベースプレート下面では、破砕後と思われる凹凸のある粗骨材も確認された。この損傷過程は、16-S、30-L、30-S-LP、30-S-LHzで見られた2段階目の急激な変位の進展が相当していると考えられる。なお、30-Sに関しては、実支圧強度比が高く角部も長いため角落ちから粗骨材の削り取りまでが一気に生じたと考えられる。

(4)粗骨材の急激な削り取りによって凸部が減少し凹凸が消失していくと、側方向からの水による削り取りは減少し、健全状態であるNの損傷状態に近づくと考えら

れる。空隙がない場合は、表面のモルタルおよび粗骨材が削り取られていくが、空隙がある場合でも、凸部が削り取られた後は変位の進展は緩やかになる。模擬した空隙の高さである 5mm に近づくと変位の進展が緩やかになっていることからも確認できる。

## 5. まとめ

アンカーリング方式の風力発電塔基礎接合部において 生じているコンクリートの損傷による沈下現象について、 水の浸入およびベースプレート下面のコンクリートの空 隙に着目し、模型供試体による繰返し載荷実験を行うこ とで、沈下現象およびコンクリートの損傷メカニズムを 検討した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 空隙量が多い場合,実支圧強度比が高くなることに加え,空隙によるコンクリートの凹凸が多くなることで,凸部の角部が長くなり,凸部も小さくなるため,より損傷しやすく早期に変位が進展する。
- (2) 空隙量が同じ場合,実支圧強度比が高いほうが変位 の進展は早期に生じる。しかし,実支圧強度比が大 きい場合でも,空隙量およびコンクリートの凹凸が 少ないと損傷は遅くなる。
- (3) 同じ空隙量でも、一つの空隙の大きさによって凹凸 の角部の長さは異なるが、角部が長いほど損傷はや や早いと考えられる。しかし、その空隙形状が与え る影響は、実支圧強度比および空隙量による影響ほ どはない。
- (4) 載荷速度が遅い場合,水の流れが遅くなるため,エロージョンなどの水による削り取り作用が小さくなり,変位の進展は遅くなる。
- (5) 空隙がある場合について、水およびベースプレート からの支圧などによるコンクリート凸部の損傷過程を示した。

## 参考文献

- 1) 土木学会:風力発電設備支持物構造設計指針·同解 説,2010
- 2) 前山篤史: 風車基礎コンクリートの補修事例,第22 回構造物の診断と補修に関する技術・研究発表会論 文集, I-7, 2010
- 3) Mai Thi Hong, 千々和伸浩, 岩波光保, 齊藤智久: 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, コンクリート工 学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.481-486, 2015
- 4) 黒木唯真,角掛久雄,江田七海,村川史朗:風力発電塔基礎接合部における沈下現象に関する基礎的研究,コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, Vol.16, pp.455-460, 2016