

論文 コンクリート検査ロボットの登はん信頼性の向上

森 和也^{*1}・徳臣 佐衣子^{*2}・水流園 悠^{*3}・矢野 恕雅^{*3}

要旨: コンクリート検査ロボットに用いる真空式吸着盤の吸着を爪の装着によって確実にする方法を開発した。コンクリート壁面は粉が付着していたり濡れていたりとすることが多い。このような面に対して従来の真空式吸着盤は安定した吸着力が得られず、ロボットの落下の恐れがあった。本論文では、吸着盤に数個の爪を装着し、爪を壁面に押し付けて吸着盤を固定する方法を開発した。円錐形爪を正方形の真空式吸着盤に4コ取り付け保持できる最大荷重を測定した結果、壁面接線方向の保持可能な最大荷重は従来の吸着盤に比べ、清浄面では2倍、粉の分布した面では2倍以上、水で濡れた面では4倍となった。この技術は壁面登はん型ロボットの実用化に大きく貢献する。

キーワード: 吸着盤, コンクリート, 爪, 保持力, 壁面, ロボット, 登はん

1. はじめに

日本国内では、老朽化した橋梁やトンネルなどのコンクリート構造物の点検が本格化している。新設の構造物に対しても、地震や津波の被災後の再供用に際して点検が必要となる。そこで効率的な検査方法が望まれている。その一つの方法として検査ロボットを用いる方法がある。国土交通省は平成25年7月に、社会インフラの現場ニーズに基づき、「維持管理・災害対応(調査)・災害対応(施工)」の3つの重要な場面におけるロボットについて、その開発・導入分野を明確化するなど実用化に向けた方策を検討するため、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を設置し、「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野」を平成26年12月に策定した¹⁾。

この中には、橋梁・トンネルを対象とした、近接目視の代替ができる装置、打音検査の代替ができる装置、点検者を点検箇所近づける作業台が含まれている。

近接目視の代替には無人航空機の開発が盛んにおこなわれている。近年無人航空機の性能向上が著しく、実用的な検査装置が開発されつつある²⁾。打音検査の代替ができるロボットは、打撃装置の重さや衝撃の反動の問題から無人航空機による実用化はまだ先のようなのである。

ある程度の強度の打撃を遠隔でおこなうためには壁面を登はんするロボットが実用化に近いと思われる。筆者らも写真-1に示すような真空式吸着盤を用いた壁面登はん型検査装置の開発をおこなっている^{3), 4)}。この装置の開発で問題となったのは、吸着盤とコンクリート壁面との滑りであった。壁面が清浄な場合は吸着に問題はないが、壁面に白華現象による炭酸カルシウムの粉や粉塵、雨による濡れがあると、摩擦力が低下しロボットがしばしば落下した。この問題は、真空式吸着盤の実用化

の大きな障壁となっている。

そこで著者らは、コンクリート壁面の状況によって真空式吸着盤の保持できる最大荷重が低下しない方法の開発に取り組んだ。その結果、吸着盤に鋭利な爪を数個装着し、爪がコンクリート壁面を捉えることによって吸着盤を保持する方法を開発するに至った⁵⁾。本論文では、写真-1のロボットの吸着盤に4個の爪を装着し、吸着力の性能を評価した。

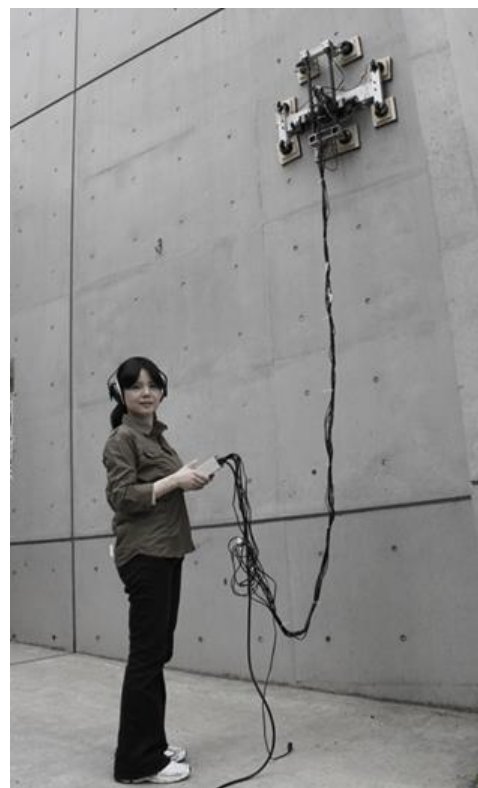


写真-1 真空式吸着盤を用いた検査ロボット

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科教授 工博 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科技術補佐員

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科学生

2. 真空式吸着盤

2.1 真空式吸着盤

コンクリート壁面に物体を保持する方法としては、真空式吸着盤によるものが一般的である^{6)~8)}。磁力を用いる方法は、コンクリートが非磁性体であるので適用できない。その他、原子間力を利用する方法などがあるが、コンクリートは表面が荒いため十分な吸着力を得ることができない。著者らの開発している検査ロボットにおいても真空式吸着盤を採用している^{3),4)}。

図-1は、一般的な真空式吸着盤の断面図である。板状のボディーに柔軟な環状部材を取り付けて減圧部を構成する。環状部材を吸着対象であるコンクリート壁面に接触させ、減圧部の空気を排気し、大気圧によってボディーを壁面に押し付ける。環状部材は、コンクリート壁面に沿って変形する柔軟性とボディーを支える構造材料としての強度が要求される。

吸着盤には、コンクリート壁面に対して垂直方向の荷重 N [N]と接線方向の荷重 F [N]が作用する。トンネル上部や橋梁床版下面の水平に近い天井では垂直方向の荷重が主に作用し、鉛直なコンクリート壁面では接線方向の荷重が主に作用する。

図-1において、吸着盤のコンクリート壁面の垂直方向の吸着力は、減圧部のゲージ圧 P [Pa]と減圧部のコンクリート壁面方向の投影面積 A_v [m²]との積、 $P \cdot A_v$ で表される。保持できる垂直方向の最大荷重 N_{max} [N]は吸着力と等しいので、次式ようになる。

$$N_{max} = P \cdot A_v \quad (1)$$

保持できる接線方向の最大荷重 F_{max} [N]は、環状部材とコンクリート壁面との間の静止摩擦係数を μ [-]とすると、吸着力 $P \cdot A_v$ が環状部材を壁面へ押し付ける垂直荷重となるので、次式で求められる。

$$F_{max} = \mu \cdot P \cdot A_v \quad (2)$$

ただし、ここでは垂直方向の荷重は作用していないものとする。

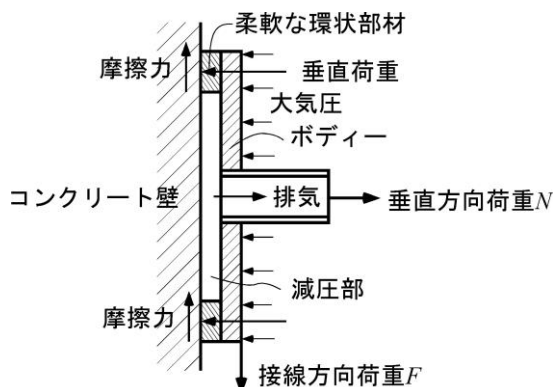


図-1 一般的な真空式吸着盤の断面図

2.2 従来の真空式吸着盤の問題点

従来の真空式吸着盤はいくつかの問題点を持っている。コンクリートは白華現象によって表面に炭酸カルシウムの粉が噴出したり、表面が粉じんで汚れていたりする機会が多い。また、雨水や地下水によって表面が濡れていることがある。このような場合、コンクリート壁面に対して接線方向の保持力を決定する静止摩擦係数 μ が著しく低下する。その結果、壁面接線方向に吸着盤が保持できる最大荷重が低下し、検査ロボットの落下を引き起こすことがある。

また、環状部材は、コンクリートと接触して検査ロボットを保持するので、摩耗及びせん断力荷重による損傷が早い。柔軟な材料は一般に摩耗に弱く、強度が低いからである。

2.3 爪を装着した真空式吸着盤

従来の吸着盤の問題点を解決するために、図-2に示すような爪を有する真空式吸着盤を開発した⁵⁾。従来の吸着盤の環状部材の内側に数個の鋭い爪を装着したものである。式(1)からわかるように、壁面垂直方向の吸着力は壁面の状態に関係なく一定の値を生じるので、安定した荷重でコンクリート壁面に爪を押し込むことができる。コンクリート壁面に押し込まれた爪は粉や水を貫通して直接コンクリート壁面を捕らえるので、爪とコンクリート壁面との間の摩擦係数⁹⁾は壁面の状態の影響を受けない。

このとき、吸着力によって生じる垂直荷重は爪と環状部材に作用するが、垂直荷重を主に爪に作用させ、かつ、減圧部の圧力を低く保つためには、爪の高さを環状部材より低くし、環状部材をより柔軟な材料にする必要がある。環状部材が十分柔らかくないと、垂直荷重を環状部材が支えてしまい、爪をコンクリート壁面に押し込むことができないからである。

また、爪を有する吸着盤はコンクリート壁面をほとんど滑らず、かつ、環状部材に作用するせん断力が極めて小さいので(4.2.及び5.1参照)、環状部材の損傷を低減させることができる。

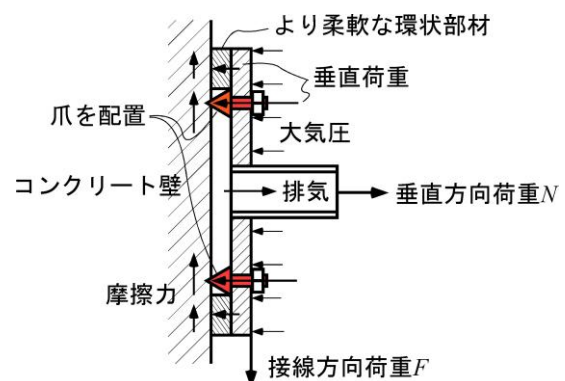


図-2 環状部材の内側に爪を配した吸着盤の断面図

3.真空式吸着盤の荷重試験方法

3.1 真空式吸着盤

爪を有する真空式吸着盤の有効性を確認するために、**図-3**に示す従来の吸着盤と**図-4**に示す爪を有する吸着盤の保持できる最大荷重を測定した。従来の吸着盤は**写真-1**に示す壁面登はん型検査ロボットに使用しているものである。

図-3に示す従来の吸着盤に使用している環状部材は独立気泡スポンジゴムで、25%圧縮硬さ（初期の寸法から厚さを25%圧縮するのに要する垂直表面力）は34.3-63.7 kPaである。

図-4に示す爪を有する吸着盤に使用している環状部材は半連続気泡スポンジゴムで、25%圧縮硬さは3.9kPaである。爪を有する吸着盤の環状部材は、従来の環状部材の16分の1から9分の1の力で同じ変形を生じる。

図-5に、爪の形状を示している。爪は円錐形で、材質はSKD11（合金工具鋼）の焼入れ材である。この爪を環状部材の内側に4コ装着した。

3.2 コンクリート壁面

コンクリート壁面は再現性を重視し、コンクリート平板を用いた。寸法は300mm×300mm×60mm、質量11.8kgである。

爪を有する真空式吸着盤の有効性は、コンクリート壁面が粉や水で覆われている場合に発揮されると考えられる。そこで、3種類の表面状態における、コンクリート壁面に対して垂直方向と接線方向の保持できる最大荷重を測定した。3種類の壁面状態は以下とおりである。

(1) 清浄なコンクリート壁面

コンクリート平板の表面をエタノールで洗浄し、その後十分に乾燥させた。

(2) 粉を分布させたコンクリート壁面

コンクリート平板の上に、アルミナ粉末（平均粒径75 μm ）をエタノールで溶いて塗布し、乾燥させた。分布の密度は約10g/m²とした。この密度は吸着盤の環状部材とコンクリート壁面が直接接触しない程度である。

アルミナ粉末を用いた理由は、一定の大きさの粉末を得ることが容易で、再現性が得られることを期待したからである。また、アルミナ粉末は安定した性質で、特性が砂に近い。

(3) 水で濡れたコンクリート壁面

コンクリート平板を試験前に水に浸した後、毎回の試験の開始前にさらに水を塗った。

3.3 荷重の負荷方法

荷重の負荷方法は、**図-6**に示すような垂直方向に荷重をかける垂直方向荷重試験と接線方向に荷重をかける接線方向荷重試験の2種類をおこなった。

コンクリート平板を試験機に固定し、吸着盤を図のように試験機で引っ張った。負加速度を1mm/sとした。垂直方向の荷重試験では吸着盤がコンクリート壁面から離れるまでの荷重を測定し、接線方向の荷重試験では移動距離が9mmになるまで測定した（4.2参照）。

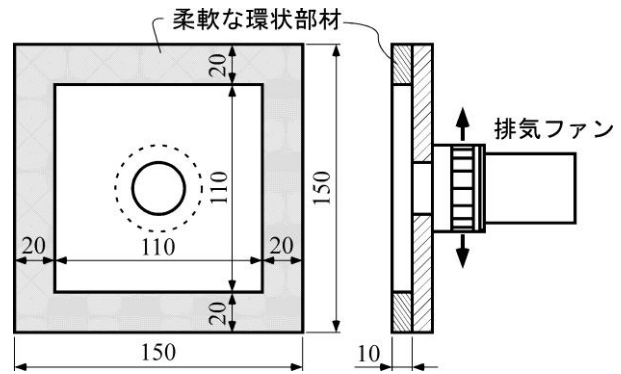


図-3 従来の爪を有しない真空式吸着盤

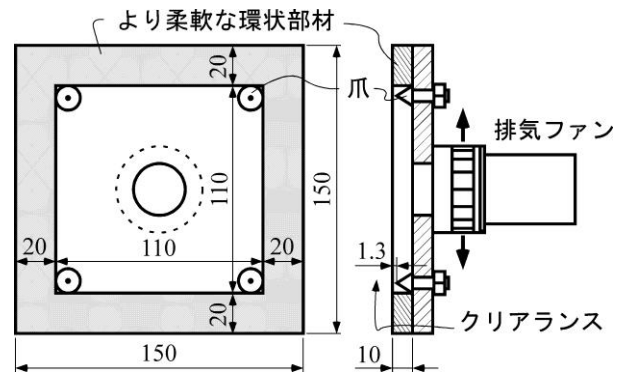


図-4 爪を有する真空式吸着盤

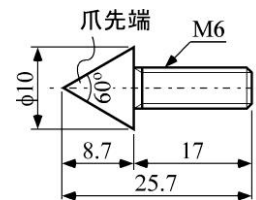


図-5 爪の形状

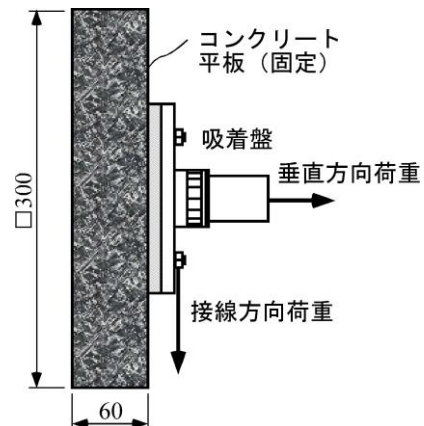


図-6 コンクリート壁面に対して垂直方向の荷重試験

4.真空式吸着盤の荷重試験結果

4.1 コンクリート壁面に対して垂直方向の荷重試験

図-7は、爪がない従来の吸着盤と爪を装着した吸着盤のコンクリート壁面に対して垂直方向の保持できる最大荷重 N_{max} の10回の平均値を示している。それぞれの吸着盤の N_{max} は面の状態によってあまり変わらないことがわかる。

一方、爪を有する吸着盤は爪がない吸着盤よりも最大で1.5倍程度の N_{max} を示した。これは、爪を有する吸着盤の減圧を保持する環状部材がより柔軟であるために、高い気密性を実現したことが原因であると考えられる。

写真-2は垂直方向荷重試験によって生じたコンクリート壁面の傷を示している。深さ約1mm、幅約2mmの傷が確認できる。

4.2 コンクリート壁面に対して接線方向の荷重試験

図-8は、清浄な面における爪がない従来の吸着盤と爪を装着した吸着盤をコンクリート壁面に対して接線方向に移動させた時の移動量と摩擦力⁹⁾の変化の一例を示したものである。爪のない吸着盤は吸着盤の移動に伴って非線形に摩擦力が上昇し、やがて一定値となる。非線形な部分は環状部材の変形によって生じたものである。

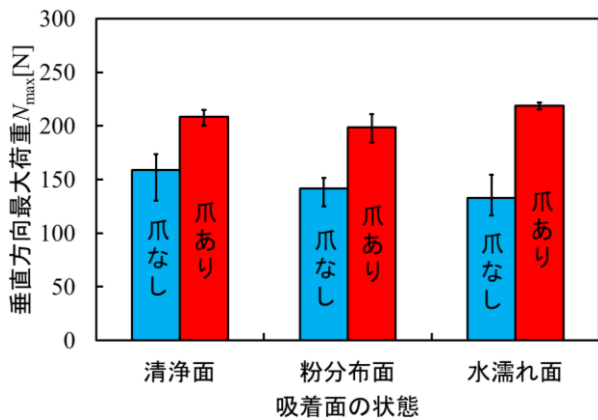


図-7 コンクリート壁面に対して垂直方向の最大保持力

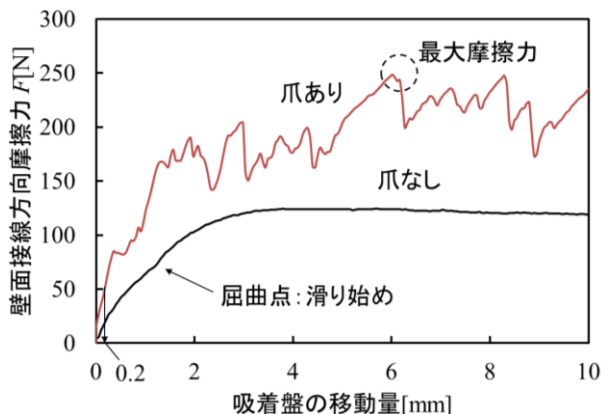


図-8 壁面に接線方向の荷重試験における摩擦力

屈曲点が約1.3mmの移動量で確認できる。この点までは環状部材とコンクリート壁面間に滑りはなく、1.3mmから一部が滑り始め、全面滑りに至っている。

爪のある吸着盤は移動に伴って摩擦力が大きく変動していることがわかる。これは爪の移動がコンクリートの掘り起こしを伴っているからである。爪の進行に伴って、爪は進行部分を破壊したり、進行部分に乗り上げたりしながら移動する。爪が進行部分を破壊・乗り上げる直前は、爪はほとんど移動していない。そのとき摩擦力はピークとなり、破壊・乗り上げを完了すると摩擦力は急激に低下する。このピーク値の最大値が最大摩擦力となり、保持できる接線方向の最大荷重 F_{max} となる。

多数回の試験において、最大摩擦力は9mmの移動量内で発生し、それ以上移動させても9mm以内で発生した最大値を超える摩擦力は生じなかった。そこで、接線方向の荷重試験では移動量の上限を9mmとした。

図-8に示す爪を有する吸着盤の試験結果の場合、最大摩擦力未満の荷重であれば、最大6mmの滑りを生じながらも保持が可能であることを意味している。実際には安全率を考慮するので、滑ることはほとんどない。例えば、安全率を5とすれば、吸着盤に作用する荷重は最大摩擦力250Nの5分の1の50Nであり、移動量は0.2mm程度である。

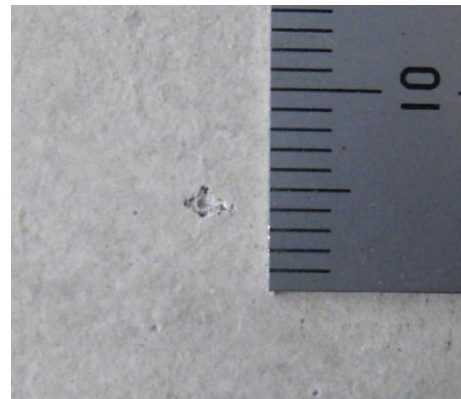


写真-2 垂直方向荷重試験後のコンクリート壁面の傷

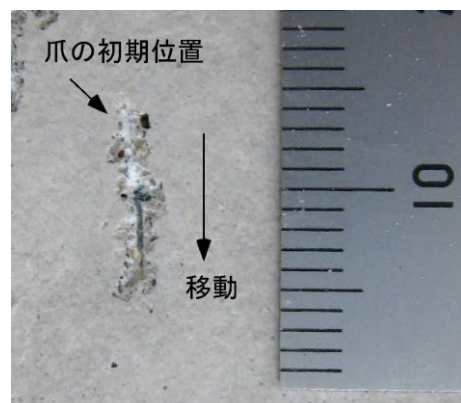


写真-3 接線方向荷重試験後のコンクリート壁面の傷

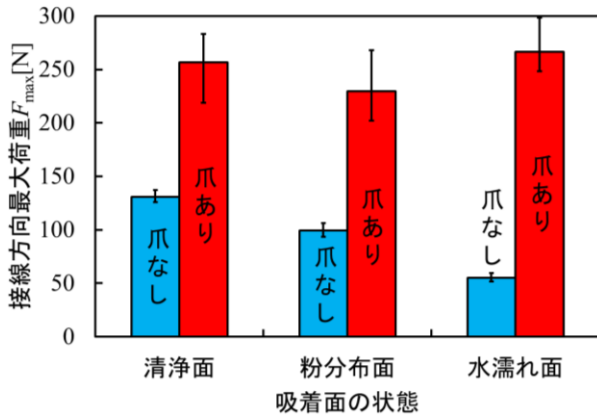


図-9 コンクリート壁面に対して接線方向の最大保持力

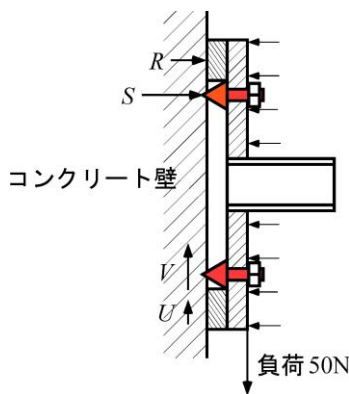


図-10 爪と環状部材に作用する荷重

写真-3 は接線方向荷重試験によって生じたコンクリート壁面の傷を示している。傷は、深さと幅が変化しつつ、蛇行しながら進行していることが確認できる。この傷の状態は図-8 の摩擦力の変動の理由を説明するものである。

図-9 は、爪がない従来の吸着盤と爪を装着した吸着盤のコンクリート壁面に対して接線方向の保持できる最大荷重 F_{max} の 10 回の平均値を示したものである。爪がない吸着盤は、清浄面よりも粉が分布したコンクリート表面の方が F_{max} は低下し、水で濡れたコンクリート壁面では大幅に F_{max} は低下する。

一方、爪を有する吸着盤は、表面状態に依存せず、高い F_{max} を発揮することがわかる。爪を装着した吸着盤は爪のない吸着盤に比べ、清浄面では 2 倍、粉の分布面では 2 倍以上、水で濡れた面では 4 倍の F_{max} を生じた。

5. 考察

5.1 吸着盤の爪と環状部材に作用する力

爪を有する真空式吸着盤において、爪と環状部材に作用する力の割合は最大保持力を決定する重要な因子となる。そこで、今回開発した吸着盤における爪と環状部材に作用する力の割合を求める。まず、垂直荷重の割合を

求め、次にせん断荷重の割合を求める。

図-10 に示すように、4 本の爪に作用する垂直荷重を S [N]、環状部材に作用する垂直荷重を R [N] とする。図-7 からわかるように、吸着力（垂直方向最大荷重）による垂直荷重は壁面の状態によらず約 200N であることから、

$$S + R = 200N \quad (3)$$

写真-2 からわかるように爪のコンクリート壁面に押し込まれる深さは 1mm 程度で、図-4 のクリアランス 1.3mm から、環状部材が圧縮される量は 2.3mm となる。環状部材の接触面積 A_c は、

$$A_c = 0.15m \times 0.15m - 0.11m \times 0.11m = 0.010m^2 \quad (4)$$

環状部材の 25% 圧縮硬さは 3.9kPa であるので、これをヤング率 E に換算すると、

$$E = 3.9kPa \div 0.25 = 16kPa \quad (5)$$

10mm の厚さを 2.3mm 圧縮させるのに必要な垂直表面力 σ は、

$$\sigma = E \times (2.3mm / 10mm) = 16kPa \times 0.23 = 3.7kPa \quad (6)$$

式(4)と式(6)を掛けて R が次のように求められる。

$$R = A_c \times \sigma = 0.010m^2 \times 3.7kPa = 37N \quad (7)$$

従って、爪に作用する垂直荷重 S は、

$$S = 200N - 37N = 163N \quad (8)$$

環状部材に作用する垂直荷重 R は、爪に作用する垂直荷重 S の約 4 分の 1 となる。

次に接線方向の荷重を求める。4 本の爪に作用する接線方向荷重を V [N]、環状部材に作用する接線方向荷重を U [N] とする。吸着盤に作用している接線方向の荷重を 50N と仮定すると (4.2 参照)、

$$V + U = 50N \quad (9)$$

この時、図-8 より接線方向の移動量は約 0.2mm である。

横弾性係数 G は、 $G = E / 2(1 + \nu)$ の関係によって求められる (ν はポアソン比)、半連続気泡スポンジゴムは圧縮によって空気が抜けるので ν はほぼゼロとなり、

$$G = E / 2(1 + \nu) = 16kPa / 2 = 8.0kPa \quad (10)$$

7.7mm に圧縮された環状部材を 0.2mm せん断変形させるのに必要なせん断表面力 τ は、

$$\tau = G \times (0.2mm / 7.7mm) = 8.0kPa \times 0.026 = 0.21kPa \quad (11)$$

式(4)と式(11)を掛けて U が次のように求められる。

$$U = A_c \times \tau = 0.010m^2 \times 0.21kPa = 2.1N \quad (12)$$

従って、爪に作用するせん断荷重 V は、

$$V = 50N - 2.1N = 48N \quad (13)$$

環状部材に作用する接線方向荷重 U は、爪に作用する接線方向荷重 V の約 23 分の 1 となる。

5.2 吸着盤の大きさと最大保持力

爪を有する真空式吸着盤の大きさ、減圧の圧力および保持力の関係について考察する。図-4 に示すように、減圧部のコンクリート壁面方向の投影面積は、

$$A_v = 0.11 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.012 \text{ m}^2 \quad (14)$$

壁面に対して垂直方向の保持できる最大荷重は図-7より約 200N である。従ってゲージ圧 P は、

$$P = 200 \text{ N} / 0.012 \text{ m}^2 = 16.5 \text{ kPa} \quad (15)$$

式(1)および式(2)より、減圧部のコンクリート壁面方向の面積を変化させた場合、次のような保持できる最大荷重が期待できる。

(1) 200mm×200mm のとき

垂直方向：0.66kN，接線方向：0.79kN

(2) 300mm×300mm のとき

垂直方向：1.49kN，接線方向：1.78kN

(3) 400mm×400mm のとき

垂直方向：2.64kN，接線方向：3.17kN

以上の結果より、打音検査装置を搭載した壁面登はん型検査装置の重量を 20kg とした場合、必要な保持力を 1kN とすれば（安全率 5）、300mm×300mm の吸着盤 1 個で保持可能である。この性能は、真空式吸着盤を用いた検査ロボットの実用化を可能にするものである。

6. まとめ

真空式吸着盤を用いた登はん型コンクリート検査ロボットで問題となる壁面の汚れによる滑りを、吸着盤に爪を装着し、それが有効となるよう、減圧を保持する環状部材により柔らかい材料を用いることによって解決する方法を開発した。実際に吸着盤に爪および柔らかい環状部材を装着してその有効性を確認した結果以下のことがわかった。

- (1) 柔軟な環状部材の摩擦で保持する従来の吸着盤は、コンクリート壁面に粉が分布していたり水で濡れていたりすると保持できる最大荷重が低下する。
- (2) 爪を有する吸着盤は、コンクリート壁面に粉が分布していても、水で濡れていても、保持できる最大荷重が低下しない。
- (3) コンクリート壁面の垂直方向荷重に対して、爪を有する吸着盤は従来の吸着盤に比べ最大で 1.5 倍程度の最大荷重を保持することができる。
- (4) コンクリート壁面の接線方向荷重に対して、爪を有する吸着盤は従来の吸着盤に比べ、清浄面では 2 倍、粉の分布面では 2 倍以上、水で濡れた面では 4 倍の最大荷重を保持することができる。
- (5) 爪を有する吸着盤は、減圧を保持する環状部材としてより柔らかい材料を用いることができるので、高い気密性を示し、保持力が向上する。
- (6) 爪を有する吸着盤に荷重が作用していないとき、環状部材に作用する垂直荷重は、爪に作用する垂直荷重の約 4 分の 1 である。
- (7) 爪を有する吸着盤に接線方向荷重が 50N 作用すると

き、環状部材に作用する接線方向荷重は、爪に作用する接線方向荷重の約 23 分の 1 である。

- (8) 先端角 60 度の円錐形爪を有する吸着盤は、壁面登はん型検査装置の重量を 20kg とした場合、300mm×300mm の吸着盤 1 個で保持可能である。この性能は、真空式吸着盤を用いた検査ロボットの実用化を可能にするものである。

謝辞

本研究は独立行政法人科学振興機構の研究成果最適展開支援プログラム A-Step の支援を受けた。また、吸着盤の環状部材に関しては、有明工業高等専門学校の岩本達也氏の協力を得た。ここに、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入重点分野，国土交通省ホームページ，http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo15_hh_000104.html，2014.7
- 2) Irizarry, J., Gheisari, M., Walker, B.N.: Usability assessment of drone technology as safety inspection tools, *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, Vol. 17, pp. 194-212, 2012.9
- 3) 森和也，三浦明洋，徳臣佐依子，岩本達也：支承検査のための橋台登はん型遠隔目視装置の開発，*コンクリート工学年次論文集*，Vol. 34，No. 1，pp. 1726-1732，2012.6
- 4) 森和也，矢野恕雅，松尾優輝，徳臣佐依子：高構造物の高所検査のための壁面登はん装置の登はん性能に及ぼす目地部の影響，*コンクリート技術シリーズ No. 100*，土木学会，pp. 167-170, 2012.9
- 5) 森和也，徳臣佐依子：真空式吸着装置，特許出願，特願 2014-163669, 2014.8
- 6) Schmidt D., Hillenbrand C. and Berns K.: *Robotics*, 11, pp. 1-13, April. 2011
- 7) Elkmann N., Lucke M., Kruger T., Kunst D. and Sturze T.: *Kinematics* , *Proceedings of the 10th International Conference on Climbing and Walking Robots*, pp. 169-176, 2007
- 8) Zhang H. X., Wang W. and Zhang J. W.: *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1806-1811, 2009
- 9) 日本トライボロジー学会，*トライボロジーハンドブック*，養賢堂，p. 18, 2001