

論文 コンクリート床版上面の表層品質が防水層との一体性に及ぼす影響

十川 貴行*1・小松 怜史*2・田中 伸介*3

要旨：コンクリート床版上面の表層品質が防水層との一体性に及ぼす影響を検討するために、打込み面の養生期間および表面研磨の有無の条件が異なる試験体を製作し、建研式引張試験、せん断疲労試験、膨れ抵抗性試験を実施した。表層品質はシングルチャンパー法によって評価した。その結果、打込み面のごく表層の品質が防水層とのせん断疲労抵抗性に大きく影響することが分かり、建研式引張試験で現行の引張接着強度の基準を満足するだけでは、防水層とのせん断疲労抵抗性を適切に評価できないことが分かった。また、防水層の膨れ抵抗性評価には表層品質を適切に考慮する必要性が示された。

キーワード：防水層、表層品質、シングルチャンパー法、せん断疲労試験、膨れ抵抗性試験

1. はじめに

道路橋のコンクリート床版では、雨水などに由来する水が床版に浸透し、自動車等の交通荷重が繰り返し床版に作用することで、乾燥状態に比べて、ひび割れが100～300倍の速さで進展することが知られている¹⁾。また、凍結防止剤が散布される地域では、凍結防止剤に含まれる塩分が水とともにコンクリート床版に浸透し、塩害、凍害、ASRを促進、誘発する可能性が指摘されている。コンクリート床版の早期劣化を防ぎ耐久性を高めるには、水の侵入を防ぐことが必要不可欠である²⁾。

そこで、平成14年の道路橋示方書において、コンクリート床版とアスファルト舗装との間に防水層を設置することが規定された³⁾。

これまでの防水層の研究の多くは防水層の性能を高めることに主眼が置かれ、母材コンクリートは破壊しないものとして検討されている。しかし、コンクリートの打込み面は、施工方法や養生方法が不適切な場合、コンクリートの細孔空隙量が増加し、表層の強度が低下することが知られている⁴⁾。

また、コンクリート内部の水が蒸発するときに生じる蒸気圧で防水層が膨れ、コンクリート床版との一体性が損なわれるという現象（プリスタリング、ピンホール）が知られている。一因として、夏期におけるコンクリートの温度上昇やアスファルト混合物を敷設する際の熱がコンクリートに伝わることなどが指摘されている。そのため、道路橋防水便覧⁵⁾では、防水層施工の条件として、コンクリート床版の含水率が高周波容量式含水計で10%以下であることを確認するように規定している。しかし、蒸気圧の上昇の程度は蒸発する水が存在するコンクリート表層の細孔空隙量（品質）にも依存すると考えられるが、コンクリートの表層品質まで考慮した規定にはなっ

ていない。

以上を踏まえ、本研究では、コンクリート床版上面の表層品質が防水層とコンクリート床版の力学的な一体性に及ぼす影響、防水層の膨れ抵抗性に及ぼす影響を実験的に検討した。

なお、本論文中の「ごく表層」とは、後述する繰返し作用するせん断応力で生じる破壊面の発生位置（打込み面から1mm程度）までの領域であり、「表層」とは「ごく表層」よりは深い、かぶり厚程度までの領域を示す。

2. 実験概要

2.1 実験の流れ

本研究では、コンクリート床版を模擬した600×300×70mmの平板試験体を製作した。W/Cは50%で、スランプ8±1cm、空気量4.5±1.5%になるようにコンクリートのフレッシュ性状を調整した。示方配合の結果を表-1に示す。なお、製作した試験体はすべて同一配合のコンクリートを使用している。

打込み面を平滑に仕上げた後、24時間打込み面を封かん養生した。その後、コンクリート打込み面の品質が異なる試験体を製作する目的で、材齢28日まで打込み面を気中(20°C、湿度60%の一定環境)に暴露した試験体と、材齢28日まで打込み面を湿潤状態に保った試験体を製作した。これらの試験体に対して、打込み面から深さ5mm程度をハンドグラインダーで平滑に研磨した試験体も製作した。これは、実際の現場でコンクリート床版上面にレイタンスや強度不足があった場合に行われる床版上面の研掃作業を模擬したものである。表-2に試験体の条件一覧を示す。

次に、試験体の打込み面の表層品質を測定した。測定には表層透気試験(シングルチャンパー法)を使用した。

*1 横浜国立大学 都市イノベーション学府 (学生会員)

*2 横浜国立大学 都市イノベーション学府 助教 博(工)(正会員)

*3 ニチレキ(株) 技術研究所 研究3課 主任研究員 工学修士

表-1 示方配合

| Type | G _{max} (mm) | Slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | Unit Content(kg/m ³) | | | | | |
|------|--------------------------|---------------|------------|------------|------------|----------------------------------|-----|-----|-----|------|------|
| | | | | | | W | C | S | G | Ad | AE |
| OPC | 20 | 8.5 | 4.0 | 50 | 44.1 | 172 | 344 | 767 | 987 | 0.68 | 0.34 |

表-2 試験体の条件

| 試験体 | 湿潤養生期間 | 打込み面の研磨 |
|---------|--------|---------|
| 1dry | 1日 | 無 |
| 28wet | 28日 | |
| 1dry-g | 1日 | 有 |
| 28wet-g | 28日 | |

測定後、製作した試験体を 150×150×70mm に成形し、防水層とコンクリートの打込み面との一体性を確認するための力学試験（建研式引張試験、せん断疲労試験）を行った。また、試験体の打込み面の含水率調整を行い、東、中、西日本高速道路株式会社による床版防水品質試験方法の膨れ抵抗性試験⁶⁾も実施した。

2.2 シングルチャンバー法の概要

シングルチャンバー法は、原位置で迅速かつ簡易的にコンクリートの耐久性を評価することを目的に開発された試験方法である⁷⁾。コンクリート表層の透気性を測定することで、コンクリート表層の品質の評価を行う。図-1に示すように、1つのチャンバーをコンクリート表面に取り付け、真空ポンプによってチャンバー内の圧力を減圧した後、目標とする圧力まで変化するのに要する時間を測定し、コンクリートの表層の透気性を評価する。評価には、式(1)に示す透気指数(Air permeability index : A.P.I)を用いた。

$$A.P.I = \frac{X_1 - X_2}{T} \quad (1)$$

ここで、A.P.I : 透気指数 (kPa/s), X₁ : 時間測定開始時のチャンバー内の気圧(kPa), X₂ : 時間測定終了時のチャンバー内の気圧(kPa), T : 測定時間(s)である。

本研究では、チャンバー内の圧力が 21.3(kPa)から 25.3(kPa)に戻るまでに要する時間を測定し、透気指数 A.P.I を算出した。過去の研究では、シングルチャンバー法は試験機の構造上、コンクリート表層の粗雑な空隙や微細なひび割れ等から外気を巻き込みやすいと指摘されている⁸⁾。この特性から、シングルチャンバー法での評価はごく表層のコンクリートの品質に強く影響を受ける試験方法であると考えられる。防水層との力学的な一体性や防水層との膨れ抵抗性との関係性を議論するのに最適な方法であると考え、本試験機を採用した。

2.3 建研式引張試験の概要

建研式引張試験は、現場でコンクリート床版と防水層

との力学的な一体性を評価するために用いられている試験法である。図-2に示すように、プライマー層（本研究ではエポキシ系）を塗布した試験体の打込み面にエポキシ系接着剤で金属製の治具を取り付け、治具の周囲に切れ込みを入れた後、鉛直上向きに載荷する。評価には、式(2)で算出される引張接着強度を用いる。

$$\text{引張接着強度} \left(\frac{N}{\text{mm}^2} \right) = \frac{\text{最大荷重(N)}}{\text{接着面積}(\text{mm}^2)} \quad (2)$$

本研究では、40mm×40mmの接着面積を持つ治具を使用して建研式引張試験を実施した。東、中、西日本高速道路株式会社による構造物施工管理要領⁹⁾では、防水層に用いるプライマー塗布後にコンクリート打込み面で建研式引張試験を実施し、1.2N/mm²以上の引張接着強度が確保されていることを確認するよう規定されている。

2.4 せん断疲労試験の概要

せん断疲労試験は、供用中の交通荷重に対する防水層の抵抗性の照査方法として、道路橋防水便覧⁵⁾に示されている。道路橋防水便覧では、舗装、防水層、コンクリートの三層構造の試験体を用いてせん断疲労試験を実施することを示されている。本研究では、コンクリートの打込み面以下数ミリ（本実験では最大10mmとした）付近のせん断疲労抵抗性を評価することが目的であるため、打込み面にエポキシ系プライマーを塗布した

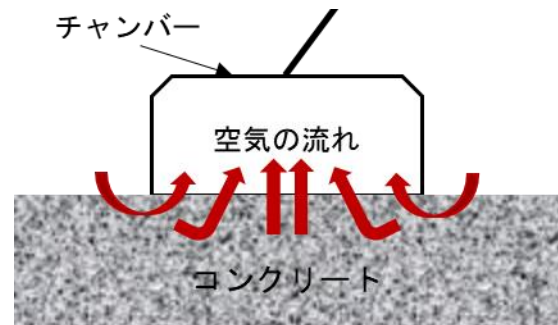


図-1 シングルチャンバー法の概要

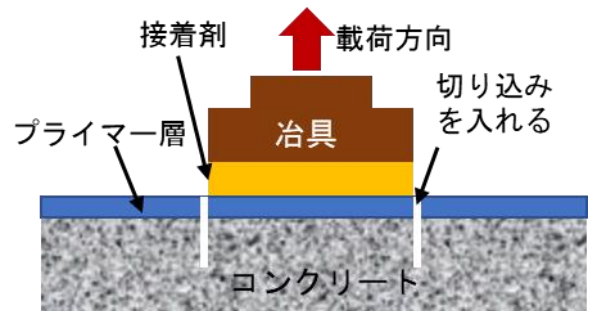


図-2 建研式引張試験の概要

表-3 膨れ抵抗性試験の試験体の条件

| 試験体名 | 試験体の湿潤養生期間 | 打込み面の吸水時間 | カウント値 |
|----------------|------------|-----------|-------------------|
| 1dry-0h-C200 | 1日 | 0h | 200以下 (表面乾燥状態) |
| 28wet-0h-C200 | 28日 | | |
| 1dry-24h-C300 | 1日 | 24h | 300程度 (湿潤状態) |
| 28wet-24h-C300 | 28日 | | |
| 1dry-24h-C400 | 1日 | 24h | 400程度 (湿潤状態) |
| 28wet-24h-C400 | 28日 | | |
| 1dry-72h-C300 | 1日 | 72h | 300程度 (湿潤状態) |
| 28wet-72h-C300 | 28日 | | |



図-3 せん断疲労試験の概要

150×150×70mmのコンクリートの上に、エポキシ系接着剤で150×150×30mmの鋼板を張り付けた試験体を製作し、せん断疲労試験を実施した。試験体と载荷の様子を図-3に示す。

試験には油圧式疲労载荷試験機を用いた。試験の制御方法は荷重制御で行った。繰り返し载荷の入力波形は正弦波とし、片押しで最大応力 0.15N/mm² で 1 万回、0.3N/mm² で 1 万回、0.6N/mm² で 10 万回と段階的に応力レベルを上げて試験を実施した。最小応力はそれぞれ最大応力の 5%の応力とした。加振周期は 2Hz とした。加振時に試験体が浮き上がらないように鉛直方向の変形を抑制し、加振時のコンクリートと鋼板の水平相対変位を測定した。

2.5 膨れ抵抗性試験の概要

膨れ抵抗性試験は、打込み面の含水率を調整した 1dry と 28wet の試験体を用い、東、中、西日本高速道路株式会社による床版防水品質試験方法の膨れ抵抗性試験⁹⁾の手順に準拠して行った。試験体のサイズは 150×150×70mm とした。以下に含水率の調整方法を示す。まず、試験体の打込み面から 5mm 程度までを 0, 24, 72 時間、水に浸漬させた。次に、谷倉ら¹⁰⁾が開発した電気抵抗式の水分計を用いて、この水分計が示す含水率の指標であるカウント値が、打込み面にて 200 以下(表面乾燥状態, C200 と記述), 300 程度(湿潤状態, C300 と記述), 400 程度(湿潤状態, C400 と記述)になるまで乾燥させた。膨れ抵抗性試験で用いた試験体の条件一覧を

表-3 に示す。また、水分計が所定のカウント値を示した時の質量含水率を、試験体の質量を測定することで、式(3)から算出した。

$$\text{質量含水率の増分(\%)} = (W - W_0) / W_0 \times 100 \quad (3)$$

ここに、 W : 含水率調整後の試験体の質量、 W_0 : 含水率調整前の試験体の質量である。

目標とする含水率になったことを確認した後、打込み面に防水層を施工し、膨れ抵抗性試験を実施した。

膨れ抵抗性試験の実施後に、目視にて防水層のブリストリング(防水層の膨れ現象)とピンホール(防水層に穴が開く現象)の発生個数を確認した。

3. 実験の結果と考察

3.1 シングルチャンバー法の結果と考察

シングルチャンバー法による測定の結果を図-4 に示す。表面研磨をしていない試験体 1dry, 28wet の測定値を比べると、湿潤養生期間が長い 28wet の透気指数が、1dry の透気指数に比べ小さくなった。養生期間の違いによる打込み面の品質の差が測定結果に表れたと考えている。一方、表面研磨をした試験体 1dry-g, 28wet-g の測定の結果は、表面研磨をしていない試験体に比べ、大きく透気指数が低下した。これは、蔵重らの知見⁸⁾を参考にすると、どちらも研磨によって打込み面のごく表層の粗雑な空隙や微細ひび割れ等が除去されたためであると考えられる。

3.2 建研式引張試験の結果と考察

建研式引張試験の測定結果を図-5 に示す。各試験体に対して 2 回ずつ実施し、測定値の平均値を示した。すべての試験体で、東、中、西日本高速道路株式会社による構造物施工管理要領⁹⁾の基準である 1.2N/mm² 以上の引張接着強度を示した。表面研磨をしていない試験体 1dry, 28wet はどちらもほぼ同等の引張接着強度を示し、破壊面にモルタルと粗骨材の上側との界面を含んでいた。一方、表面研磨をした試験体 1dry-g, 28wet-g は、表面研磨をしていない試験体に比べ、高い引張接着強度を示し、

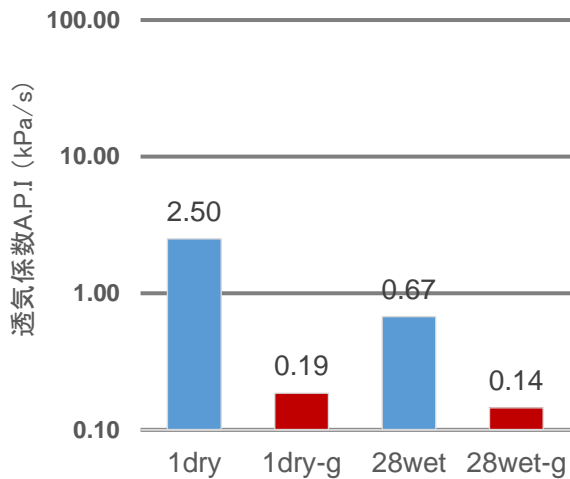


図-4 シングルチャンバー法の結果

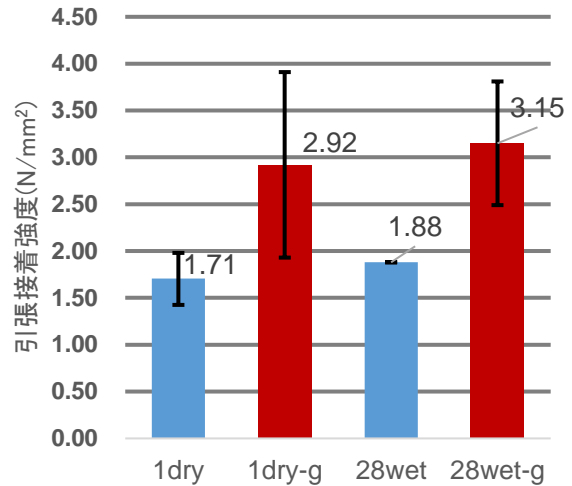


図-5 建研式引張試験の結果

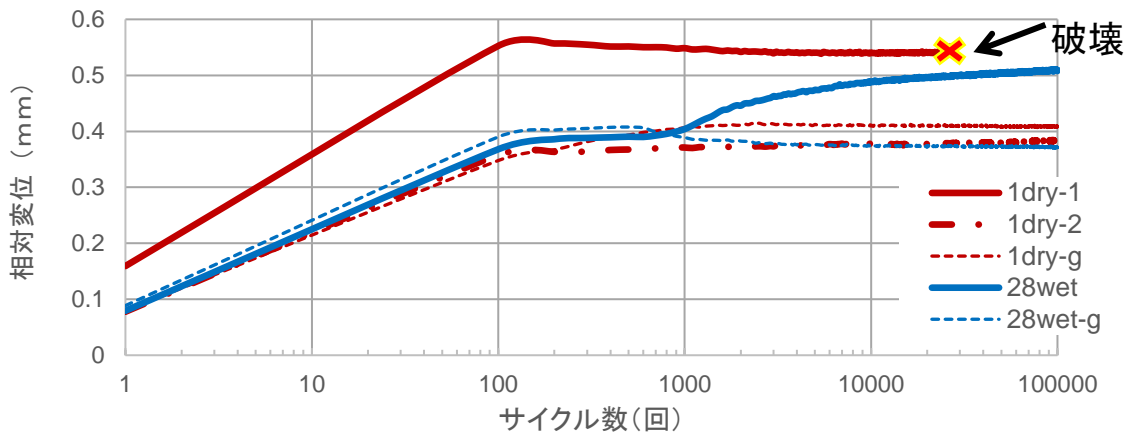


図-6 最大応力 0.6N/mm²のときの相対変位の結果



図-7 1dry-1の破壊の様子

破壊面にモルタルと粗骨材の下側との界面を含んでいた。

本実験で使用した W/C=50%程度の普通コンクリートであれば、モルタルと粗骨材の界面は、遷移帯と呼ばれる、周囲のモルタルに比べ相対的に細孔空隙量が多く、強度が低下している領域を有している¹¹⁾。また、遷移帯はモルタルと粗骨材の弾性係数とポアソン比の差異により応力集中が発生しやすい場所である¹¹⁾。内川らの知見

¹²⁾によると、遷移帯の細孔空隙量の増加によって、コンクリートの圧縮強度が低下するといった報告がされている。本実験の建研式引張試験の測定で、破壊面にモルタルと粗骨材との界面を含んでいた事実から、圧縮強度と同様に、引張接着強度は遷移帯の空隙構造に大きく支配されると推察している。

3.3 せん断疲労試験の結果と考察

1dry は 2つの試験体(1dry-1, 1dry-2)に対して、その他の養生条件、表面研磨条件の試験体(1dry-g, 28wet, 28wet-g)は 1つずつせん断疲労試験を実施した。最大応力 0.15N/mm²と 0.3N/mm²のときは、どの試験体も破壊に至らなかった。最大応力 0.6N/mm²のときの鋼板とコンクリートの相対変位の測定結果を図-6に示す。1dry-1の試験体は、最大応力 0.6N/mm²で約 2万 6千回の載荷で破壊した。同じ配合、同じ養生条件である 1dry-2は本実験の載荷条件では破壊に至らなかった。1dry-1の試験体の破壊後の様子を図-7に示す。1dry-1の破壊箇所は、凸部に集中していた。このことから、コンクリートの込み面の凹凸による応力集中が生じた可能性が考えられる。

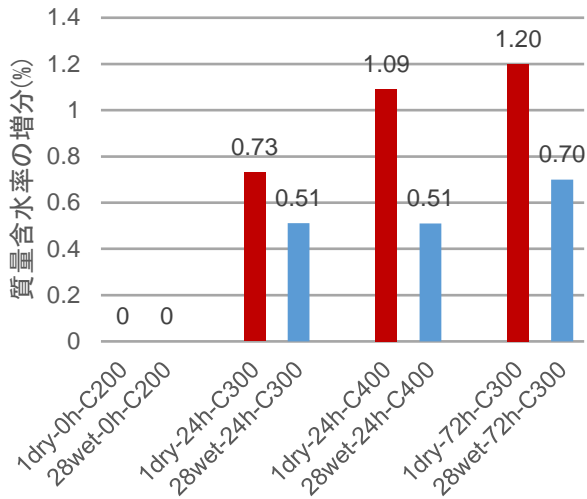


図-8 質量含水率の増分

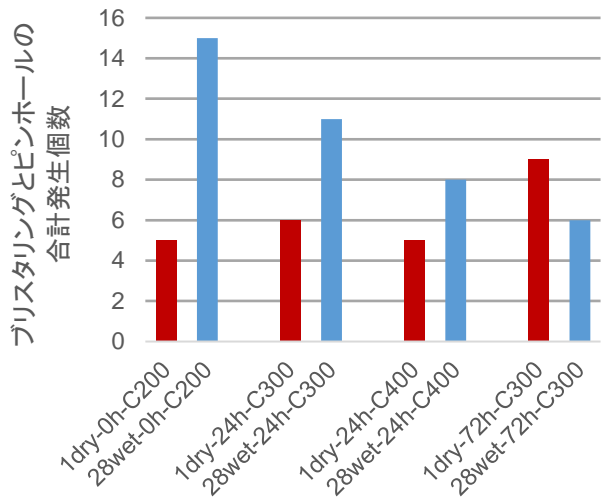


図-9 ブリスタリングとピンホールの合計発生個数

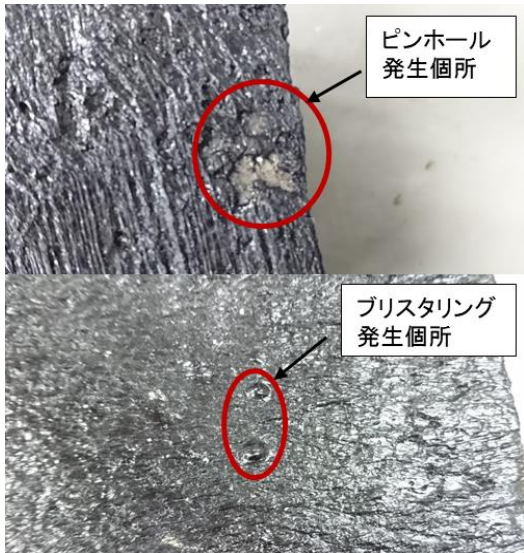


図-10 ピンホールとブリスタリングの発生の様子

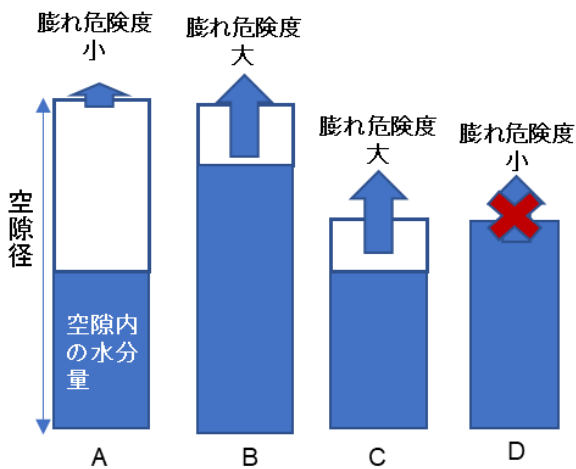


図-11 空隙径と水分量の関係が膨れ危険度に及ぼす影響の概念図

また、本実験の条件では破壊に至らなかったが、28wetの試験体も、サイクル数が約1000回程度から、相対変位が次第に大きくなっていく様子が見てとれる。打込み面の表層品質が、せん断疲労抵抗性に影響していることが傾向として確認された。

せん断疲労試験の結果と 3.1 (シングルチャンバー法の結果と考察) を比較すると、コンクリートの打込み面のごく表層の品質が劣る試験体は、せん断疲労抵抗性も劣るということが傾向として示された。一方で、3.2 (建研式引張試験の結果と考察) との比較では確認できなかった傾向である。その理由は、先述の通り、建研式引張試験の測定結果は、主に粗骨材回りの遷移帯の空隙構造に支配されるのに対し、シングルチャンバー法は打込み面のごく表層の品質 (微細ひび割れ等も含む) を強く評価しているためであると考えられる。繰り返しせん断応力が作用することで、コンクリートのごく表層の粗雑な空隙 (微細なクラック等) で破壊が進行したと考えられる。

3.4 膨れ抵抗性試験の結果と考察

養生条件の異なる試験体 (1dry と 28wet) に対して、膨れ抵抗性試験を実施した。各試験体に対して1回ずつ実施した。図-8 に各試験体の質量含水率の増分を示す。1dry, 28wet の試験体どちらも、72h-C300, 24h-C400, 24h-C300 の順に、質量含水率の増分が大きい結果となった。打込み面からの吸水時間と乾燥時間を調整することで、水分計のカウント値は同じでも含水率の異なる試験体を製作することができた。

図-9 に膨れ抵抗性試験後の各試験体のピンホールとブリスタリング (以下、膨れに関する現象とする) の合計発生個数を示す。膨れに関する現象は図-10 に示すような箇所を数えた。1dry の試験体は、質量含水率の増分

が大きくなるにしたがって、膨れに関する現象の合計発生個数も多くなる傾向にあった。一方、28wet の試験体は質量含水率の増分が大きくなるにしたがって、膨れに関する現象の発生数が少なくなっていく傾向にあった。今回の実験条件では 72h-C300 のシリーズを除き、28wet の試験体は 1dry の試験体より膨れに関する現象の発生個数が多くなっていることがわかる。膨れ抵抗性は水分計のカウント値に加えて、コンクリートの品質も考慮する必要があることが本実験から分かった。

以上の結果は、図-11 に示す概念図によって説明することができると考えている。1dry の試験体のような養生期間の短いコンクリートは、打込み面の表層コンクリートの平均細孔空隙径が大きく、図-11 の A と B に示すように、細孔空隙内の水分量の割合が大きくなるにつれて、細孔空隙内の蒸気圧が高まりやすく、膨れ危険度が高まる。一方、28wet の試験体のように十分な養生を施すと、打込み面の表層コンクリートの平均細孔空隙径が小さくなり、図-11 の C に示すように、図-11 の A と同じような水分量を有していたとしても、細孔空隙内に占める水分の割合が大きいため、細孔空隙内の蒸気圧が高まりやすく、膨れ危険度が高まる。また、28wet の試験体のように、打込み面の水分逸散が可能な表層コンクリートの平均細孔空隙径が小さい場合、図-11 の D に示すように、細孔空隙内が十分水で満たされるほど、水分量が多くなると、細孔空隙内の蒸気圧が高まりにくくなり、膨れ危険度が低くなるのではないかと筆者らは考えている。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの打込み面の表層品質が防水層との一体性に及ぼす影響について検討した。検討より得られた知見を以下に示す。

- (1) 交通荷重によってコンクリート床版と防水層との境界部に生じるせん断応力を作用させたせん断疲労試験を実施した。その結果、コンクリートの打込み面のごく表層の品質が劣る試験体（養生期間が短く、研磨をしない）は、せん断疲労抵抗性が劣るということが分かった。また仕上げ面の平坦性の精度も、せん断疲労抵抗性に影響することが分かった。
- (2) 建研式引張試験を用いた現行の評価基準を満足するか確認するだけでは、供用時に作用するコンクリートと防水層との一体性（せん断疲労抵抗性）を十分評価できない。
- (3) 防水層の膨れに関する現象（プリスタリング、ピンホール）の発生の危険度を明らかにするためには、従来から指摘されている含水率だけでなく、コンクリート表層の品質も測定して考慮する必要があることが分かった。
- (4) シングルチャンバー法のような、コンクリートのごく表層の品質を測定することが出来る方法を適切に活用することで、せん断疲労抵抗性や膨れ抵抗性といったコンクリートと防水層の一体性をより正確に評価できる可能性が示された。

謝辞

本研究ではニチレキ（株）技術研究所の樋口氏を中心に、せん断疲労試験の実施をサポートして頂きました。東京理科大学の今本啓一博士を始めとした研究室の方々から、シングルチャンバー法をお借りし、ご指導いただきました。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 松井繁之，大田孝二，西川和廣：RC 床版とその損傷（その2），橋梁と基礎，1998.6
- 2) 土木学会：鋼構造シリーズ 28 道路橋床版システムガイドライン 2016，2016.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編，p.107，2011.
- 4) 湯浅昇，笠井芳夫，松井勇，大川原修：乾燥条件が微小セメントペーストの水和，細孔構造及び強度に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第 505 号，pp.149-154，1998.10.
- 5) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧，2007
- 6) 東日本高速道路株式会社，中日本株式会社，西日本株式会社：NEXCO 試験方法 第 4 編 構造物関係試験方法，試験法 433，2013.2
- 7) 山本順二，今本啓一，下澤和幸，永山勝：原位置での簡易透気性とかぶり厚さによる RC 構造物の耐久性評価，コンクリート工学会年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1999-2004，2009
- 8) 蔵重勲，今本啓一，佐藤大輔，湯浅昇他：各種透気試験方法に関する共通試験 —その2：ラウウドロビンテストの結果概要—，第 71 回土木学会年次学術講演会講演集，V-483，2016
- 9) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，2016.
- 10) 谷倉泉，榎園正義，後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究，構造工学論文集 Vol.59A，pp.1112-1123，2013
- 11) A.M.Neville：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版株式会社，2004
- 12) 内川浩，羽原俊祐，沢木大介：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討，コンクリート工学論文集，Vol.4，No.2，pp.1-8，1993