

報告 コンクリートの締固めと表層品質に関する橋台と橋脚での試験施工

平瀬 真幸*1・田村 隆弘*2・徳永 幸弘*3

要旨: バイブレータによる締固めと表層品質の関係について、実構造物において評価した結果を報告する。実構造物での締固め時間を決定するにあたり、コンクリートのスランブ 12cm とスランブ 6cm の 2 種類で、棒状バイブレータによる締固め時間を 15 秒と、そして、60 秒程度として打込む予備試験を行った。供試体は、コンクリート硬化後に鉛直方向に切断し、表層及び断面内部を観察した。実構造物では、2 種類の橋台において、スランブ 6cm のコンクリートを 60 秒程度ずつ締固めながら打込んだ。実構造物では、脱枠後に表層の透気試験を行い、94%以上の測点で透気係数 (KT 値) が $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下という結果を得た。

キーワード: 締固め, 材料分離, 透気試験

1. はじめに

コンクリート構造物の長期供用は、建設時の初期性能が高いほどライフサイクルに有利である。しかし、労働人口の減少に伴い熟練技術者の減少や新設構造物の発注減少にともなう施工技術を伝承する機会が減少することにより、コンクリート構造物の品質を確保することが困難になってきている。そうした中、山口県では、いち早く新設コンクリート構造物のひび割れ対策に取り組み、現在では品質確保システムを構築するに至っている¹⁾。最近では、国土交通省も全国各地で目視評価や施工状況把握チェックシートを試行し²⁾、スランブを 8cm から 12cm に変更³⁾することで施工性を向上させるなどして、新設コンクリート構造物の品質確保の取り組みを進めている。

近年のコンクリートでは、混和剤の改良によって、コンクリートの単位水量を大幅に変えることなく、スランブをコントロールすることが可能となった³⁾ことから、スランブ 12cm での打込みが合理的となった。しかし、スランブの大きなコンクリートの場合、締固め時間が長くなると、密度の大きい粗骨材が沈下し、ブリーディングが大きくなる⁴⁾。このため、締固め作業は、控えめになってしまう可能性があるが、逆に締固め時間が短いとコンクリートは緻密さを失う可能性が出てくる。

筆者はこれまで、スランブ 8cm のコンクリートでも適正とされる最大 15 秒程度の締固め時間では、緻密なコンクリートの表層品質が得られないと思われる経験をしたことから、スランブ 6cm 程度のコンクリートを用いて締固めを 60 秒程度徹底して行うことで、躯体の表層品質を向上させることを試みてきた。そして、スランブ 8cm 程度のコンクリートでは、締固め時間を長くすることによって材料分離を起こし、天端付近にブリーディングが

集積されるような状況に至るが、スランブ 6cm であれば、60 秒程度の締固め時間であってもブリーディングも少なく、脱枠後の出来映えも良いと思われる仕上がりになった。そこで、ここでは、スランブ 6cm とスランブ 12cm のコンクリートにおける締固め時間と硬化後の品質について調査し、その後、スランブ 6cm、締固め時間 60 秒で 2 つの実構造物を施工した結果について報告する。

2. 予備試験

まず供試体でスランブ 6cm (表-1) とスランブ 12cm (表-1) のコンクリートにおいて、それぞれ型枠の 4 つの面の中心かつ型枠面から内側へ 5cm 離し、スパイラル型内部振動機径 50mm にて、60 秒と 15 秒での締固めを 4 面で行った場合のコンクリートの品質について確認した。供試体 (500mm×500mm×900mm) に鉄筋 (D19) を縦横奥行き

表-1 使用したコンクリートの配合

| 粗骨材の最大寸法 (mm) | スランブ (cm) | 水セメント比 (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|---------------|-----------|------------|---------|----------|--------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 A |
| 20 | 6 | 50.6 | 4.5 | 45.9 | 161 | 318 | 869 | 1131 | 3.180 |
| 20 | 12 | 52.0 | 4.5 | 45.6 | 172 | 331 | 845 | 1109 | 3.310 |

表-2 供試体ごとの条件

| 供試体 | スランブ (cm) | 締固め時間 (秒) |
|-----|-----------|-----------|
| A | 6 | 60 |
| B | 12 | 60 |
| C | 12 (下層) | 60 |
| | 6 (上層) | 60 |
| D | 6 | 15 |

*1 株式会社ファインテクノ (正会員)

*2 福井工業高等専門学校 校長 博士 (工学) (正会員)

*3 株式会社瀬口組 (正会員)

に 150mm ピッチで配置したものを製作し、供試体ごとに材料・締固め条件（表-2）を変えて打込みを行った。そして、コンクリート硬化後に供試体の中心を鉛直方向に切断し、断面の状況を確認した（写真-1～写真-8 ひび割れ赤線）。

予備試験結果により試験施工の材料選定と締固め方法について検討した。

供試体 A については、外観上の不具合は無く、4面とも綺麗な仕上がりであった。切断面においても目視評価では不具合が無く、鉄筋近傍や骨材下に隙間は無く、ひび割れ・豆板など見られなかった。この結果から、スランプ 6cm のコンクリートでは 60 秒締固めても、粗骨材が沈下するなどの材料分離を起こしにくく、沈みひび割れなどの不具合も生じにくいことを確認した。また、鉄筋が高密度配筋されていない締固め作業に制約が少ない構造物においては、スランプの小さなコンクリートを 60 秒ずつ締固めながら打込む事で、品質の良い躯体が出来ると判断した。

スランプ 12cm で 60 秒間締固めをおこなった供試体 B については、外観では上層部の P コンの拘束によって上面に発生する沈みひび割れが生じた事に加えて、多くの残留気泡が発生した。また、切断面においては、供試体上面から約 150mm から 200mm 下付近までは粗骨材が沈下し、材料分離して主にモルタル分で構成された状態となった。供試体上部の鉄筋近傍では沈みひび割れが一部発生したが、下部の鉄筋位置においては、不具合は認められなかった。

供試体 C は下層で使用するスランプ 12cm の余剰水を、バイブレータによって天端へ導ける事を確認する試みである。これについて目視評価では、上層部で P コンの拘束によって上面に発生する沈みひび割れが一部で確認された事に加えて残留気泡が発生した。切断面に関しては、天端から下 100mm 程度までは材料分離し主にモルタル分で構成され、上層部に配置された鉄筋の下側に隙間を確認できるものの、ひび割れは発生していない。また、上層の材料分離した箇所に限り、3mm 以下の気泡が僅かに確認できたが、下層は密実であった。よって高密度配筋など棒状バイブレータが使えない場合に、ブリーディングを廃棄すれば、実構造物で施工に応用出来ると判断した。供試体 D については、材料分離は生じておらず骨材分布も均等であった。ただし、5mm を超える残留気泡が多く確認され、1 つは 30mm に達した。また、上層部で P コンの拘束によって上面に発生する沈みひび割れが多数発生した。切断面からは、全体で残留気泡と小さなひび割れが確認され、全体的に粗い仕上がりとなった。ここで、締固めを 4 面で 15 秒ずつ実施した供試体 D だけ、切断の際に濡れた供試体が、最も水分を吸収して乾燥が



写真-1 供試体 A



写真-2 供試体 A 拡大



写真-3 供試体 B



写真-4 供試体 B 拡大



写真-5 供試体 C



写真-6 供試体 C 拡大



写真-7 供試体 D



写真-8 供試体 D 拡大

遅く、鉄筋近傍においては乾燥するまで数時間を要した。他の供試体は切断後、速やかに乾燥した事から、締固めが供試体の空隙に大きく関わっている事や、鉄筋近傍の隙間に劣化因子が容易に侵入しやすいことを推測した。

これらの予備試験から、供試体 A を参考に、高密度配筋ではない橋台において、スランプ 6cm 以下による徹底した締固めの試験施工を行う事とした。また、供試体 C の結果をもとに、高密度配筋で棒状バイブレータが入りにくい箇所に、スランプ 8cm を使用し、材料分離の促進とブリーディングの処分を行うこととして、コンクリートの緻密性にどのような影響があるかを透気試験にて確認する事とした。

3. 試験施工

3.1 橋台（鉄筋の水平最小空き 184mm）

3.1(1) 使用材料



写真-9 スランプ試験



写真-10 スロープ台

表-3 橋台に使用したコンクリートの配合

| 粗骨材の最大寸法 (mm) | スランブ (cm) | 水セメント比 (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|---------------|-----------|------------|---------|----------|--------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 A |
| 20 | 6 | 50.6 | 4.5 | 45.9 | 161 | 318 | 869 | 1131 | 3.180 |

使用したコンクリートの配合を表-3に示す。試験施工であることから、スランブ 6cm を使用した (写真-9)。

3.1(2) 施工方法

コンクリートのスランブが 6cm の場合、粘性が高いためにアジテータ車のシュートにコンクリートが溜まり、ポンプ車ホッパーへコンクリートを供給しにくくなる。結果、ホッパーが空になることで、エア噛みを生じさせてポンプ車が詰まるなどトラブルが懸念された。これを解消するために、アジテータ車をスロープ台に乗せてシュートに角度をつける工夫を行った (写真-10)。コンクリートの打込みは 1 層当り 500mm 以下、締固めはスパイラル型内部振動機径 50mm 締固め時間の目安は 60 秒で締固め間隔を縦横方向 400mm として、ブリーディングは廃棄処分した。打重ねの際は、上下層の馴染みを良くする為に、下層をバイブレータで再振動させたのちに打重ね、バイブレータの先端を下層 200mm 差し込んで締固めた。なお、200mm 差し込む理由は各作業員の技量差によって打重ね線が解消されない事があった事から、200mm としたところ、打重ね線をほぼ解消できたからである。再振動の目安は棒状バイブレータをコンクリート面に置いた時に、先端部分がコンクリートに沈まない硬さになるのを見計らって開始し、空気が出なくなるまで締固めた。再振動で多くのブリーディングが出た場合、さらに入念に締固めた。天端のコテ仕上げは、余剰水がほとんど抜き取られているので、想定より早く固まることに留意した。

3.1(3) 養生

施工翌日から、天端に保水マットを敷き冠水養生を行い、型枠についても散水しブルーシートで囲い乾燥を防止した。その後、脱型直後に高圧洗浄機で躯体に散水し、それから養生シールを貼付けたが、シール貼付までに躯体が乾燥するので、貼付直前に霧吹きで湿らせながらシールを貼り付け、足場解体直前までシール養生を行った (写真-11、写真-12)。なお、コンクリート表面にひび割れ防止剤や含浸剤は使用していない。

3.2 橋脚 (鉄筋の水平最小空き 68mm)

3.2(1) 使用材料

使用したコンクリートの配合を表-4に示す。高密度配筋構造物であるため、棒状バイブレータで締固めが難しい高密度な配筋の下に打込むコンクリートについては、

スランブ 8cm を使用し、バイブレータが届く中・上層についてはスランブ 6cm とした。



写真-11 養生作業状況



写真-12 養生完了

表-4 橋脚に使用したコンクリートの配合

| 粗骨材の最大寸法 (mm) | スランブ (cm) | 水セメント比 (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | |
|---------------|-----------|------------|---------|----------|--------------------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | 混和剤 A |
| 20 | 8 | 51.9 | 4.5 | 45.5 | 165 | 318 | 858 | 1131 | 3.180 |
| 20 | 6 | 50.6 | 4.5 | 45.9 | 161 | 318 | 869 | 1131 | 3.180 |

3.2(2) 施工方法

写真-13 に示すような高密度配筋の橋脚の梁下においては、棒状バイブレータが挿入しにくいので、型枠バイブレータも併用して施工した。各層で気泡と余剰水を上層へ移動させるイメージで締固めた。締固め作業の過程で発生した余剰水やブリーディングはすべてバキュームによって回収した (写真-14)。棒状バイブレータが使用出来る中・上層ではスランブ 6cm のコンクリートを打重ねた。この場合、スランブ 8cm の先行コンクリートからの余剰水が上がってくるため、締固めを行うと下層もスランブ 6cm のコンクリートの場合よりも容易に流動性が増した。最後に天端付近についてはスランブ 5.5cm 程度のコンクリートを使用したためブリーディングは抑制された。



写真-13 配筋状況



写真-14 余剰水吸引状況

3.2(3) 養生

先に 3.1(3) 養生で記載した橋台と同等とした。

4. 透気試験

透気係数は構造物の劣化速度と高い相関⁵⁾があると考えられているので、目視評価で品質が悪いと考えられる箇所や不具合の発生しやすい天端付近、そして、鉄筋が高密度配筋されていて締固めが困難であった箇所を中心に透気試験を行った。試験はトレント法にて行い含水計 (Tramex 社の CMEX II) にて計測し含水率 5.5% 以下であ

る事を確認したのち実施した。

4.1 橋台（鉄筋の水平最小空き 184mm）

4.1(1) 透気試験測定概要（橋台）

透気試験を行う躯体の養生条件を表-5に示す。

目視評価を行った橋脚を写真-15に、そして、透気試験の箇所を図-1に示す。最も透気係数が大きいと考えられる、天端付近で縞模様が確認された2箇所(表-6, 番号6・16) (写真-16)、自重による圧密作用が弱い天端より170mm以上420mm以内で5箇所(表-6, 番号2・3・12・15・17)、自重による圧密作用が期待できる深さで縞模様の箇

表-5 躯体の養生条件 単位(日)

| | 材 齢 | 型 枠 養 生 | 保 水 テ ープ | 養 生 終 了 後 |
|-------|--------|------------------|-------------------|-----------------------|
| 縦壁1日目 | 112 | 7 | 94 | 11 |
| 縦壁2日目 | 54 | 7 | 36 | 11 |
| 縦壁3日目 | 28 | 7 | 10 | 11 |

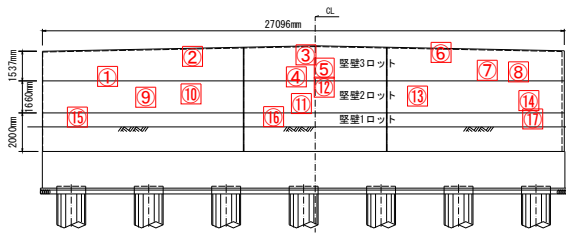


図-1 一般的な配筋の橋台での透気試験箇所



写真-15 目視評価を実施した躯体



写真-16 天端より170mm 薄い縞模様箇所での透気試験



写真-17 天端より680mm 縞模様箇所での透気試験

所4箇所(表-6, 番号1・5・8・10) (写真-17), そして、比較的外観が綺麗な箇所で6箇所(表-6, 番号4・6・7・9・13・14)を選定した。なお、盛土で隠れる背面については、測定していない。

4.1(2) 透気試験結果（橋台）

全ての箇所での透気試験の結果を表-6に示す。計測した全ての透気係数が【非常に良い： $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下】であり、そのうち10箇所は $0.000 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を示した。平均値は $0.0012 \times 10^{-16} \text{m}^2$ である。また、図-2は、透気係数と天端からの深さの関係を示す。各深さでのばらつきはあるものの、天端からの深さが大きくなるに従って、透気係数が小さくなる傾向を示した。また天端に近づくほど、圧密作用が小さい分、より丁寧な締め固めを行い、コンクリートのスランプをより小さく(5.5cm)するなど品質を高める工夫を行った結果不具合は発生しなかった。図-3では、含水率と透気係数の関係を示した。含水率が高いほど透気係数が低くなると思われたが、本構造物は、含水率が低いところでも透気係数が小さくなるといった結果となった。表層が緻密であることで、含水率が小さな領域でも透気係数が小さくなったと考えられる。

表-6 透気試験の位置と透気係数

| 番号 | 場所 (ロット:縦壁 の施工順番) | 各ロット 天からの 深さ(m) | 含水率 (%) | 透気係数 (10^{-16}m^2) |
|----|-------------------------|-----------------------|------------|-----------------------------------|
| 1 | 縦壁3ロット | 1.33 | 5.3 | 0.000 |
| 2 | 縦壁3ロット | 0.38 | 5.4 | 0.000 |
| 3 | 縦壁3ロット | 0.42 | 5.1 | 0.000 |
| 4 | 縦壁3ロット | 1.55 | 5.3 | 0.000 |
| 5 | 縦壁3ロット | 0.90 | 4.8 | 0.001 |
| 6 | 縦壁3ロット | 0.17 | 4.7 | 0.000 |
| 7 | 縦壁3ロット | 1.05 | 5.2 | 0.000 |
| 8 | 縦壁3ロット | 1.11 | 5.1 | 0.002 |
| 9 | 縦壁2ロット | 0.85 | 4.8 | 0.002 |
| 10 | 縦壁2ロット | 0.68 | 5.1 | 0.004 |
| 11 | 縦壁2ロット | 1.18 | 5.1 | 0.000 |
| 12 | 縦壁2ロット | 0.32 | 5.1 | 0.002 |
| 13 | 縦壁2ロット | 0.79 | 5.1 | 0.000 |
| 14 | 縦壁2ロット | 1.11 | 5.0 | 0.003 |
| 15 | 縦壁1ロット | 0.22 | 4.8 | 0.000 |
| 16 | 縦壁1ロット | 0.19 | 5.2 | 0.000 |
| 17 | 縦壁1ロット | 0.26 | 5.2 | 0.006 |
| | 平均 | | | 0.0012 |

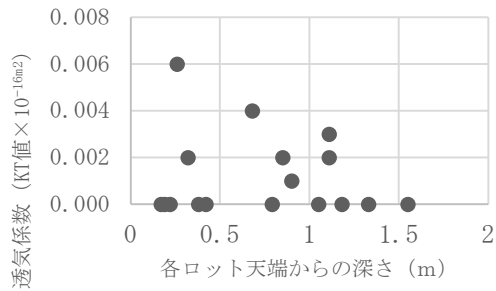


図-2 各ロット天端からの深さと透気係数の関係

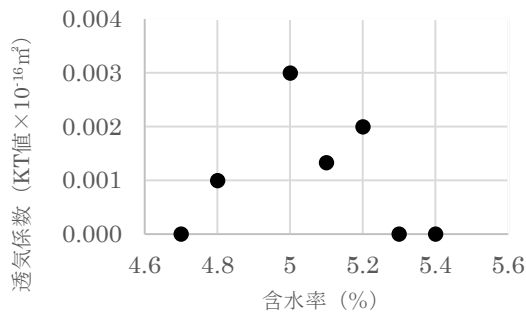


図-3 含水率と透気係数の関係

4.2 橋脚（鉄筋の水平最小空き 68mm）

4.2(1) 透気試験測定概要（橋脚）

透気試験を行う躯体の養生条件を表-7に示す。本構造物は2脚であり、透気試験の位置を図-4、図-5に示す。試験位置の選定は、最も透気係数が大きいと考えられる天端付近で表面に縞模様や3mm程度の気泡が多く確認された5箇所(表-8, 番号2・10・15・16・17) (写真-18右)、自重による圧密作用が小さい天端下の210mm以上510mm以内で10箇所(表-8, 番号1・3・6・7・11・12・13・18・19・20)、自重による圧密作用は期待できるが気泡が多い箇所2箇所(表-8, 番号8・9)、外観が綺麗で自重による圧密作用が期待できる箇所3箇所(表-8, 番号4・5・14)とした。写真-18左は表面に縞模様が発生した位置での透気試験の様子を示す。

表-7 躯体の養生条件 単位(日)

| | 材 齢 | 型枠 養生 | 保水テ ープ | 養生終 了後 |
|----------|--------|----------|-----------|-----------|
| 柱1回目上下線 | 110 | 8 | 92 | 10 |
| 柱2回目・梁上線 | 34 | 16 | 8 | 10 |
| 柱2回目・梁下線 | 32 | 14 | 8 | 10 |

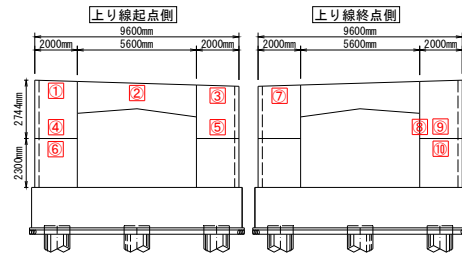


図-4 過密鉄筋な橋台での透気試験箇所（上線）

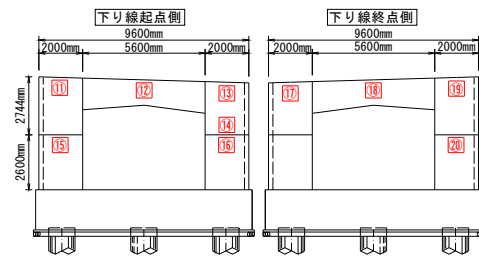


図-5 過密鉄筋な橋台での透気試験箇所（下線）

表-8 透気試験の位置と透気係数

| 番号 | 場所 | 各ロット天 からの深さ (m) | 含水率 (%) | 透気係数 (10^{-16} m^2) |
|----|---------|-----------------------|------------|------------------------------------|
| 1 | 梁部（上り線） | 0.53 | 5.0 | 0.000 |
| 2 | 梁部（上り線） | 0.33 | 5.1 | 0.000 |
| 3 | 梁部（上り線） | 0.48 | 5.3 | 0.000 |
| 4 | 柱部（上り線） | 2.18 | 5.0 | 0.010 |
| 5 | 柱部（上り線） | 1.95 | 5.2 | 0.006 |
| 6 | 柱部（上り線） | 0.50 | 5.2 | 0.002 |
| 7 | 梁部（上り線） | 0.51 | 5.0 | 0.000 |
| 8 | 梁部（上り線） | 2.14 | 5.0 | 0.014 |
| 9 | 柱部（上り線） | 2.15 | 5.3 | 0.003 |
| 10 | 柱部（上り線） | 0.51 | 5.3 | 0.000 |
| 11 | 梁部（下り線） | 0.49 | 5.1 | 0.000 |
| 12 | 梁部（下り線） | 0.28 | 5.0 | 0.003 |
| 13 | 梁部（下り線） | 0.50 | 4.9 | 0.000 |
| 14 | 柱部（下り線） | 2.01 | 4.9 | 0.062 |
| 15 | 柱部（下り線） | 0.22 | 4.9 | 0.000 |
| 16 | 柱部（下り線） | 0.21 | 5.3 | 0.000 |
| 17 | 梁部（下り線） | 0.51 | 5.2 | 0.000 |
| 18 | 梁部（下り線） | 0.28 | 5.1 | 0.005 |
| 19 | 梁部（下り線） | 0.50 | 5.1 | 0.000 |
| 20 | 柱部（下り線） | 0.42 | 5.2 | 0.000 |
| | 平均 | | | 0.00525 |



写真-18 天端より 2140mm 縞模様箇所での透気試験

4.2 (2) 透気試験結果（橋脚）

橋脚での透気試験の結果を表-8 に示す。20 測点のうち透気係数が【非常に良い： $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下】は 17 測点、【良い： $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下】は 3 測点で、そのうちの 12 測点は $0.000 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を示し、平均値は $0.0052 \times 10^{-16} \text{m}^2$ となった。また、図-6 は、透気係数と天端からの深さの関係を示す。コンクリートの圧密作用による締固めがコンクリートの緻密さを向上させることを期待したが、結果はその逆となった。これは経験上天端に近いほど不具合の発生が多い傾向であったことから、それに備えて天端付近を十分に締固めた結果、透気係数が小さくなったものと考えられる。表-8 番号 14 においてのみ他の測点と比較すると透気係数が大きい。偶発的な要因でバイブレータによる締固めが不足したと考えられる。図-7 では、本構造物での絶対含水率と透気係数の関係を示した。この図からは、各含水率でばらつきはあるものの含水率が高いほど透気係数低くなる傾向が確認された。

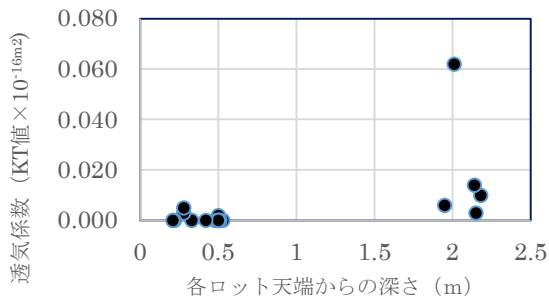


図-6 各ロット天端からの深さと透気係数の関係

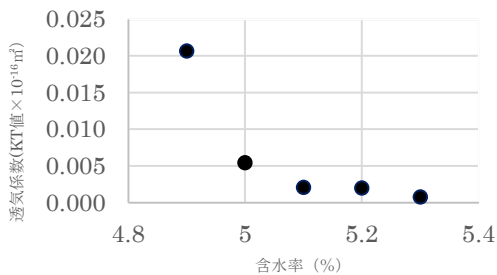


図-7 含水率と透気係数の関係

5. まとめ

コンクリートの締固めと表層品質の関係について、予備試験と試験施工により確認した。予備試験の結果、スランブ 12cm のコンクリートを長時間（60 秒程度）締固めると粗骨材が沈下して上部にモルタル分が集積してしまうが、スランブ 6cm のコンクリートを 60 秒程度締固めながら打込んだ場合には、そうした粗骨材の沈下も起こらず表層品質も高いコンクリートとすることができることを確認した。

この結果をもとに、高密度配筋では無い橋台と、高密度配筋の橋脚で、スランブ 6cm のコンクリートを 60 秒締固めながら打込みする試験施工を行った。施工後、両構造物の表層の透気係数を確認したところ、いずれの構造物においても、ほとんどの計測箇所【非常に良い： $0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ 以下】という結果が得られた。

本試験施工から、スランブ 6cm のコンクリートを 60 秒程度締固めながら施工するという事は、施工手間が増加するなどの課題も確認した。今回の取組から、締固めが不足すると P コンの拘束によって上面に発生する沈みひび割れを生じ、透気係数も高くなるといったリスクがあることを認識でき、適切な締固めについて考えることができた。

【謝辞】 本試験施工に携わっていただいた各関係者には、多大なるお力添えをいただいた事に対して心から謝意を表したい。

参考文献

- 1) 細田暁, 二宮純, 田村隆弘, 林和彦: ひび割れ抑制システムによるコンクリート構造物のひび割れ低減と表層品質の向上, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.70, No.4, pp.336-355, 2014.
- 2) コンクリート構造物の品質確保の手引き(案) (橋脚, 橋台, 函渠, 擁壁編), 国土交通省東北地方整備局, pp. 9-10, 2015
- 3) 国土交通省:流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関する ガイドライン, p. 5, 2017. 3
- 4) 構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書
- 5) 半井健一郎・蔵重勲・岸利治: 解説 かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査—スイスにおける指針—コンクリート工学 Vol. 49, No. 3, pp. 33-36, 2011