

超高平滑性コンクリートスラブの機械化施工

竹本 喜昭 深瀬 勇太郎 齊藤 亮介 村松 慶紀 藤田 敏郎 西尾 淳 石川 俊英
 (技術研究所) (生産技術本部) (技術研究所) (生産技術本部) (生産技術本部) (生産技術本部) (生産技術本部) (東北支店)

Mechanized construction of ultra-flat concrete slabs

Yoshiaki Takemoto, Yutaro Fukase, Ryosuke Saito, Yoshiki Muramatsu, Toshirou Fujita, Atsushi Nishio and Toshihide Ishikawa

八戸屋内スケート場では、高品質なスケートリンクの氷を実現するために、コンクリートスラブには±2mmを目標とする極めて高い平滑性が求められた。ところが、従来のコンクリートスラブの施工は、多くの時間と人手を必要とする。また、従来のコンクリートスラブの平滑性測定は、測定ピッチは粗く、精度は不十分である。そこでこの論文では、八戸屋内スケート場のコンクリートスラブにおいて、各種の施工機械を使用して省力化と目標とした高い平滑性を実現し、その平滑性を高精度で測定した内容を紹介する。

The new Hachinohe indoor ice oval was expected to have ice of the highest quality, necessitating construction of an extremely flat concrete slab with a target height difference of ±2mm. However, conventional methods of realizing such a flat slab are time-consuming and labor-intensive. Moreover, conventional methods of measuring the flatness of a slab operate on a coarse pitch and yield insufficient accuracy. In this paper, the authors detail the labor-saving use of various construction equipment to complete the Hachinohe ice oval slab to the required and target high level of flatness and to measure the finish to high accuracy.

1. はじめに

八戸屋内スケート場は、図-1に示すように国際規格の400mダブルトラックを備えた、長野、帯広に続く国内3例目の屋内スピードスケート競技施設である。このスケート場は、世界水準の屋内リンクを目指して様々な取り組みがなされており、その一つとして、氷の下地となる製氷コンクリートには全体の高さの差について±2mmを目標とする高い平滑性が求められた。リンク断面の概要を図-2に示すが、コンクリート表面の凹凸は氷の厚さの違いとなり、氷の硬さにムラが生じることになる。

製氷コンクリートは、幅が16mで約110mの直線部分と、内径20m、外径36mの曲線部分で構成され、面積は約6,350m²である。この大面積の製氷コンクリートを、図-3に示すように作業者の疲労を考慮した休息日を設けながら、2019年3月29日から4月15日まで9工区に分けて施工した。この製氷コンクリートに対して、極めて高い平滑性を確保し、できる限り短期間で施工

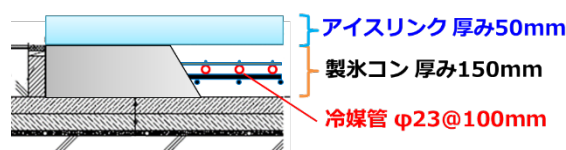


図-2 リンク断面の概要

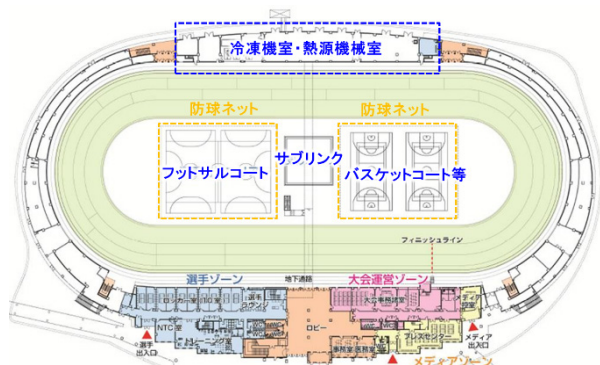


図-1 八戸屋内スケート場の平面図

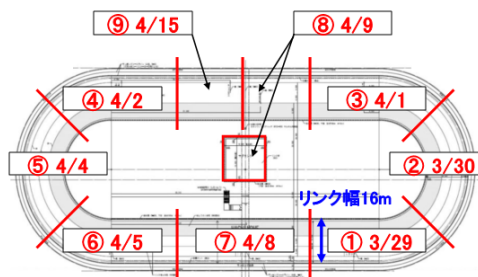


図-3 製氷コンクリートの工区割り

するには、人の技能と数に頼る従来の方法では不可能である。したがって、ここでは機械化施工を前提とし、コンクリート打設から均しおよび押えまでにおいて、表面高さを徹底的に管理する方法を試行錯誤の末に確立して実施した。製氷コンクリートの施工手順と使用機器類を表-1に示す。

2. コンクリートスラブ機械化施工

2.1 打設

打設に使用したコンクリートの配合を表-2に示す。製氷コンクリートは、リンクの中地にポンプ車2台を配置し、リンク幅16mを午前25m、午後25mの1日50mを基本として打設した。図-4には、コンクリートの打設速度を工区ごとに示すが、打設方法が異なる⑨工区以外はポンプ車

1台につき14.4m³/h～26.6m³/hであった。図によると、①と④工区の午後のように目地棒が浮くなどのトラブルによって待ち時間が発生したケース以外は、打設速度は作業者の慣れによって徐々に向上していることが分かる。各工区における1台目のミキサー車からは、コンクリートのサンプルを採取し、JIS A 1147を参考としたコンクリートの凝結試験を実施した。この試験は、採取したコンクリートを5mmふるいを通してモルタルとし、時間の経過とともに所定の断面積の針で深さ25mmまで刺した際の貫入抵抗値を測定するものである。今回の施工では、この貫入抵抗値を測定することで打設したコンクリートの硬化具合を把握し、表-3に示す管理値において各工程の適切な施工タイミングを作業者に指示した。

表-1 製氷コンクリートの施工手順と使用機器類

(1)打設  【在来工法】	(2)均し  【トラススクリード】	(3)平滑性測定  【3Dレーザースキャナ】
(4)凸部の修正  【大型プロジェクター】	(5)あま出し  【騎乗式トロワエル・円盤】	(6)押え・プレスノ鍍仕上げ  【騎乗式トロワエル・金鍍】

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	水結合材比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)
24	49.9	15.0	4.5	46.7

単体量(kg/m ³)						
水	セメント	細骨材 1	細骨材 2	粗骨材	膨張材	混和剤
160	321	500	339	988	20	C×0.8%
セメント: 普通ポルトランドセメント(密度 g/cm ³)						
細骨材 1: 陸砂(表乾密度 2.59 g/cm ³ , 吸水率 2.83%, F.M. 2.4)						
細骨材 2: 石灰砕砂(表乾密度 2.65 g/cm ³ , 吸水率 1.08%, F.M. 2.99)						
粗骨材: 石灰碎石(表乾密度 2.70 g/cm ³ , 吸水率 0.84%, F.M. 6.62)						
膨張材: エトリンガイト・石灰複合系膨張材						
混和剤: ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤						

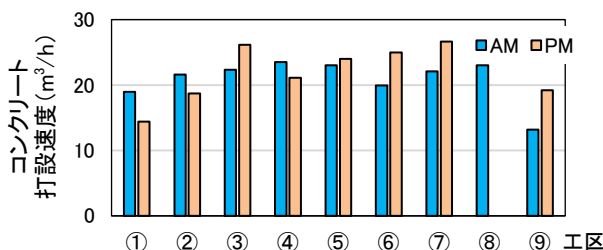


図-4 工区ごとのコンクリート打設速度

表-3 各作業工程における貫入抵抗値の管理値

貫入抵抗値 (N/mm ²)	表1の 番号	作業工程
0.5	(4)	凸部の修正
2.0	(5)	騎乗式トロワエル・円盤によるあま出し
3.5	-	騎乗式トロワエル・金鍍押え(1回目)
6.0	(6)	騎乗式トロワエル・金鍍押え(2回目) プレスノ鍍仕上げ

2.2 均し

2.2.1 均し作業の方法

均し作業には、写真-1に示すトラススクリッドを使用し、高さの調整を高精度で管理するシステムを採用することで均し精度の向上を図った。このトラススクリッドは、全体を構成する鉄製のパイプとコンクリートを均す板材から構成されており、幅3.5mのユニットを連結することで、最大約20mまで任意の幅に組み立てることができる。装置下面のコンクリートと接する部分はLアングル状のブレードとなっており、圧縮空気で振動する振動子が複数配置されている。この装置を、両端に配置した高さを調整したレールに設置し、振動しながら進行方向の先に固定したワイヤーをウインチで巻き上げることでレール上を移動させ、コンクリート表面を均してゆくことができる。

トラススクリッドは、激しく振動しながらコンクリートを均してゆくため、ジョイント部の緩みや装置全体の形状のなじみによって変形が生じる。そこで、各ユニットのジョイント部を回して調整する。高さの基本的な調整方法は以下である。

- (1) ジョイント部付近のブレードに標尺を立て、高さをデジタルレベル(1km 往復標準偏差 1.2mm カタログ値)で視準する。
- (2) ジョイント部を回し、基準高さに調整する。
- (3) 一ヶ所のジョイント部の高さを調整すると、他の箇所の高さが連動して変化するため、他のジョイントについても高さ測定を繰り返し、全体の高さ調整を繰り返す。

このように、レーザースクリッドの高さを調整するには、各所の作業を繰り返すことになるため、事前の施工実験ではコンクリート打設作業を待たせるケースが頻発した。そこで本工事では、写真-2に示すようにトラススクリッドの5ヶ所に回転レーザの受光器を設置し、精度0.1mmの高さ検出値をタブレットPCにリアルタイムに表示するシステムを構築・適用することで、高さ管理時間を大幅に短縮できた。ただし、回転レーザによる高さ測定には、距離に比例した誤差(±1.5mm/30m カタログ値)が生じるため、徐々に移動する施工位置に従って精度が悪くなることになる。そのため、レーザースクリッドの高さは、午前と午後の施工前にデジタルレベルで高精度に測定し、以降は、回転レーザからのリアルタイム測定を確認しつつ、±1mmを超える測定値が出た際はデジタルレベルで高さ調整することで、短時間かつ高精度の高さ管理を実施した。

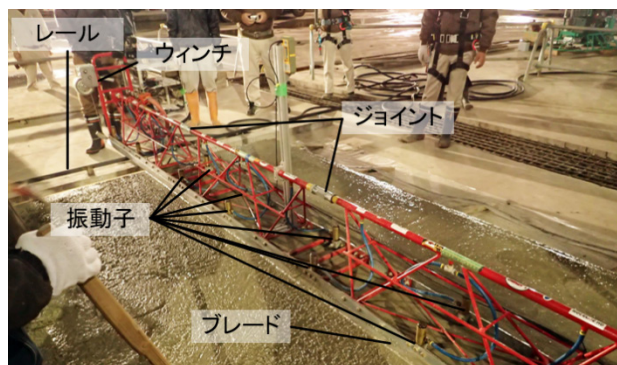


写真-1 トラススクリッド

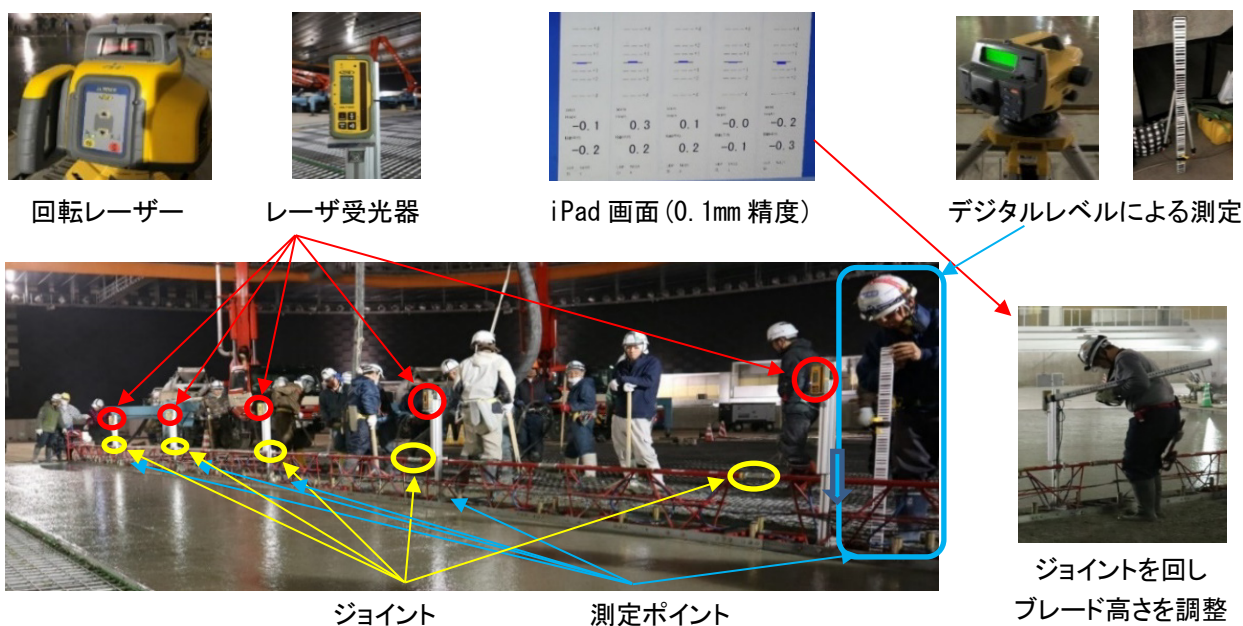


写真-2 高さ変化表示システムを用いた均しブレード高さ調整

2.2.2 均し直後の凹凸測定方法

均し直後のコンクリート表面凹凸の測定には、3D レーザースキャナを用いた。均し直後のコンクリートは硬化が不十分であるため、3D レーザースキャナを三脚に取り付けて面上に設置することができない。また、コンクリート面には水分による光沢によりレーザ光の屈折を引き起こすため、測定面への入射角は小さい方が好ましい。したがって、3D レーザースキャナによる測定は、1日の打設面積の1/4である16m×12.5mを対象として、写真-3に示すように、約9m上方から装置を吊り下げて測定した。なお、この吊り下げる測定方法は、予備実験においてクローラクレーンのブーム振動や降下が問題となった。そこで、実施工に使用するクローラクレーンを試験機として使い、ブームの振動と降下のデータを繰り返し測定した。その結果、実施工においてブームの影響が生じない時間と、表面凹凸の評価に必要なデータが得られる最も短い測定時間との兼ね合いから、1回の測定時間を43秒間に決定した。

3D レーザースキャナで得られたコンクリート表面の点群データを図-5に示す。この点群データは、3D スキャナの座標系で得られるため、相対的な高さとなっている。したがってこの点群データは、正確に工事現場に設置してある高さの基準座標系に合わせる必要がある。そこで、このコンクリート表面の座標系を基準高さからの凹凸として正確に計算するために、以下の方法を採用した。

- (1) 対象とするコンクリート面の周辺に700mm×700mmの基準平板を4つ設置した。
- (2) この基準平板は、表面を高精度の水準器を用いて正確に水平とし、4つの基準平板の面高さを同一に合わせた。
- (3) 取得した3D レーザースキャナの点群データから基準平板に相当する点群を抽出し、互いの高さを一致させることで仮想基準面を近似した。
- (4) 図-6に示すように、水平かつ高さ(H)が既知であるため、仮想基準面に対する点群の鉛直方向の距離(d)から基準高さに対する凹凸(h)を算出した。



写真-3 3D レーザースキャナによる測定状況

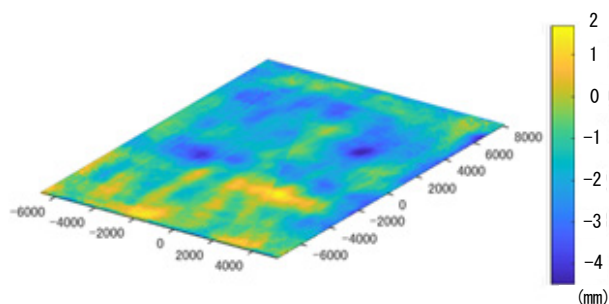


図-5 点群データの例
(凹凸データを色分け)

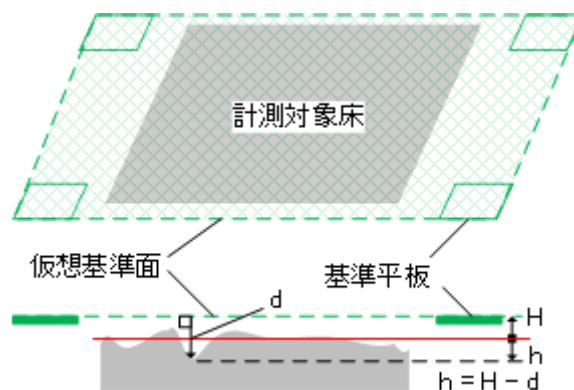


図-6 仮想基準面からの凹凸算出

2.3 凹凸の修正

トラススクリーンによって均したコンクリート表面の精度をさらに向上すべく、凸部のコンクリートを削り取る修正作業を実施した。修正作業のタイミングは、作業者がアルミ製の左官用下駄を履いてスラブ上面に乗っても上面が大きく変位しない程度に硬化したタイミングとした。このタイミングは、事前の検討から凝結試験より得られる貫入抵抗値が概ね 0.5N/mm^2 を越える時点であることを確認しており、施工時では貫入抵抗値が 0.5N/mm^2 超えた時点を目安とした。

均し後に取得した表面凹凸の点群データにおいて、表面高さが $+0\text{mm}$ 以上である箇所を修正対象とし、データ処理によって修正対象を赤色、その他の部分を青色で表示した画像(以下、修正用画像)を作成した。修正用画像の一例を図-7に示す。

コンクリートの削り取りは、表面から深さ 2mm とした。また、作業者が作業範囲を的確に把握できるよう、修正用画像をコンクリート表面に直接投影し、可視化する手法を採用した。

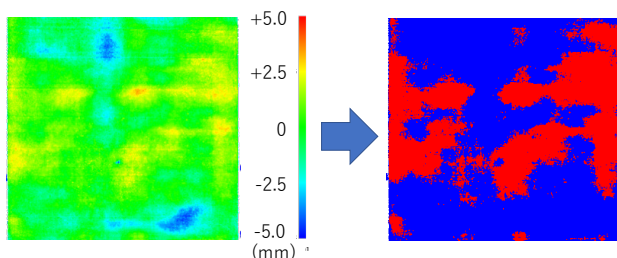


図-7 コンクリート表面の修正画像の一例

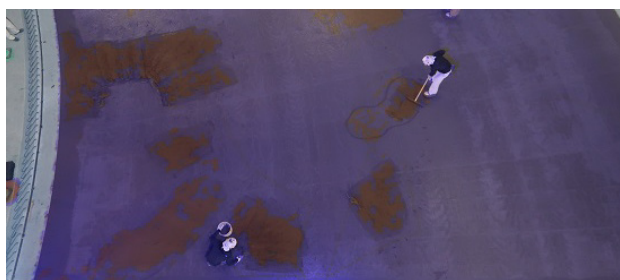


写真-4 修正用画像の投影と修正作業状況

写真-4には、修正画像をクレーンに搭載した大型プロジェクターから投影し、作業者が修正作業を行っている状況を示す。修正作業後は、コンクリート表面が荒々しい状態となるため、修正前の表面状態と同等になるよう、手押し式トロウエルに円盤を装着しアマ出し作業を行った。

コンクリートの均し直後と、凸部修正後における表面凹凸の高さ分布における変化の一例を図-8に示す。コンクリート表面における高さの標準偏差は、均し後は 1.1mm であるのに対し、修正後は 1.0mm と減少しており、精度向上の効果が見られた。今回の製氷コンクリートの平滑性目標値は $\pm 2.0\text{mm}$ であることから、このプロジェクターを用いた凸部の修正方法には、コンクリート表面の平滑性をより高いレベルで向上させることに効果的であることが明らかになった。なお、コンクリート表面高さの平均面が、 $+1.1\text{mm}$ から -1.4mm へ推移しているが、この原因はブリーディング水によるものと考えられる。

2.4 押え

押え作業は、コンクリート表面を平滑にかつ緻密化する重要な工程である。今回の製氷コンクリートの施工においては、写真-5に示す2台の騎乗式トロウエルを使用した。

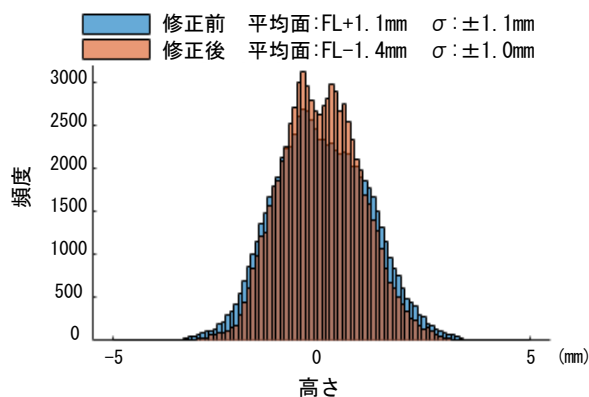


図-8 均し直後と修正作業後の表面凹凸比較



MBW MK8
あま出し用(重量 180kg)



アクティブ ATR22L
金鍍作業用(重量 220kg)

写真-5 押え作業に使用した騎乗式トロウエル

騎乗式トロウエルによる施工は、人の手による作業より重量とパワーがあるため、作業タイミングはコンクリートの硬化具合に合わせて的確に行う必要がある。押えが早すぎたり、終了が遅すぎたりすることは、コンクリート表面の平滑性を乱し、ひび割れや剥がれにつながる可能性がある。

コンクリートの硬化程度を把握する方法には、前出のように凝結試験を用いた。図-9(1)には、例として①工区(3月29日)における凝結試験の測定結果である貫入抵抗値と経過時間の関係を示す。また図-9(2)には、図-9(1)の貫入抵抗値と経過時間をそれぞれ対数値に変換した関係を示す。図より、経過時間は貫入抵抗値より以下の式(1)に示す1次式で得ることができる。傾きAが大きいほど硬化速度が遅くなり、切片Bが大きいほど、強度の発現が遅いことを意味する。

$$\ln(Y)=A \times \ln(X)+B \quad (1)$$

ここで、Y: 経過時間 (分)
X: 貫入抵抗値 (N/mm²)
A: 直線の傾き
B: Y切片 (X=1 における値)

押え作業は、以下の手順で行った。図-10に施工範囲と施工時刻の指示方法の概要を示す。

- (1) 1台のミキサー車からサンプルを採取した。2台目以降は、各ミキサー車のミルシートから注水時刻を記録し、同時にそのミキサーが打設したコンクリートの位置を記録した。
- (2) 採取サンプルを5mmふるいで篩ってモルタルとし、測定用の箱に詰め、写真-6に示す凝結試験を開始した。
- (3) 所定時間での凝結試験による取得データから傾きAと切片Bを算出した。AとBは、貫入抵抗値0.4N/mm²までのデータで求められる。

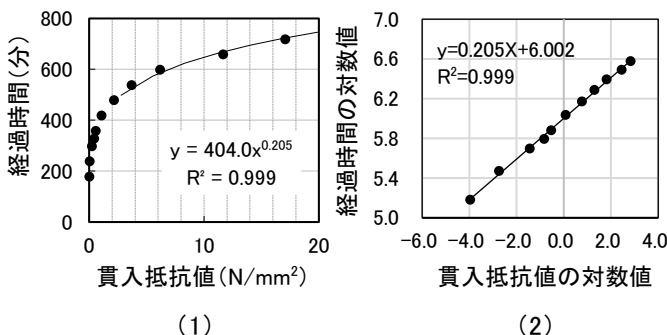


図-9 貫入抵抗値と経過時間の関係(①工区)

なお、貫入抵抗値0.4N/mm²から、最初の作業である修正作業が始まる0.5N/mm²までには、今回の施工においては約1時間以上の十分な余裕があった。

- (4) 求めたAとBより式(1)から、前出の表-3に示した各工程までにかかる時間を算出し、各ミキサー車の注水時刻に加算して、施工範囲と作業時刻を予測した。
- (5) 求めた予測施工時刻を色紙に記入し、施工範囲の脇に置くことで作業者に施工範囲と施工時刻を視覚的に指示した(写真-7)。

図-11には、各工区の凝結試験における傾きAと切片Bを示す。④工区(4月2日)は傾きAが0.221、⑤工区(4月4日)は切片Bが6.149と、他の工区と比較して大きいことが分かる。



写真-6 凝結試験の状況

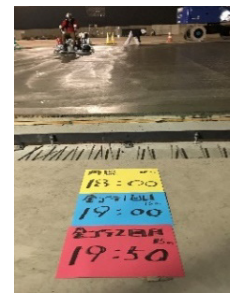


写真-7 施工範囲と時刻の指示

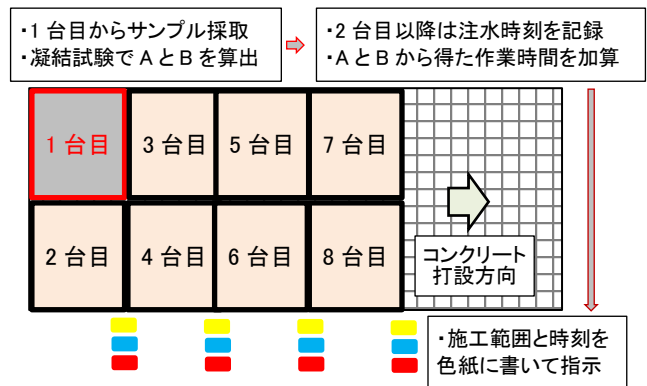


図-10 施工範囲と施工時刻の指示方法の概要

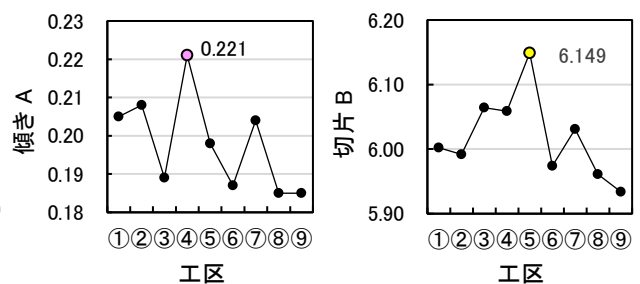


図-11 各工区の傾きAと切片B

また表-4には、各工区の午前中における1台目のミキサー施工範囲において、凝結試験から得られた傾きAと切片Bから算出した各作業工程の施工時刻を示す。④工区は、①～③工区とほぼ同じ時刻に修正作業を始めたが、その後は硬化が遅かったことが分かる。また、⑤工区は、修正作業時刻が最も遅く、作業終了まで11時間07分もかかっており、最も短い⑨工区と比較すると2時間21分の差が生じた。

図-12には、1台目のミキサーから採取したコンクリートの、9時時点のコンクリート温度、施工時間中のコンクリート最低温度、および室内最低気温を工区ごとに示す。①～⑤工区まで室内気温は10℃以下であり、コンクリートは約13℃から徐々に冷えて10℃以下となっていることが分かる。⑥～⑨工区は、室内気温が上昇して10℃を超え、コンクリートの温度低下が少なくなることで硬化速度が安定したと考えられる。ただし、コンクリートの硬化速度と温度の相関は不十分であり、④、⑤工区のように傾向が異なるケースが見られる。これは、プラントの製造におけるコンクリート品質のバラつきと考えられる。したがって現段階では、施工タイミングを把握するにはサンプルを採取した凝結試験を行うことが確実であり、できるだけ早い時間で傾きAと切片Bを確定できる簡易な方法の提案が課題である。

表-4 各工区における各作業工程の施工時刻

工区	1台目の注水時刻	修正	円盤(あま出し)	金鍍1	金鍍2(仕上げ)
①	8:02	13:52	15:47	16:44	17:45
②	7:51	13:37	15:33	16:30	17:31
③	7:50	14:07	16:00	16:55	17:53
④	7:50	13:57	16:08	17:14	18:25
⑤	7:50	14:38	16:47	17:50	18:57
⑥	7:47	13:32	15:14	16:03	16:56
⑦	7:52	13:53	15:51	16:49	17:51
⑧	7:48	13:29	15:09	15:57	16:48
⑨	8:00	13:32	15:09	15:56	16:46

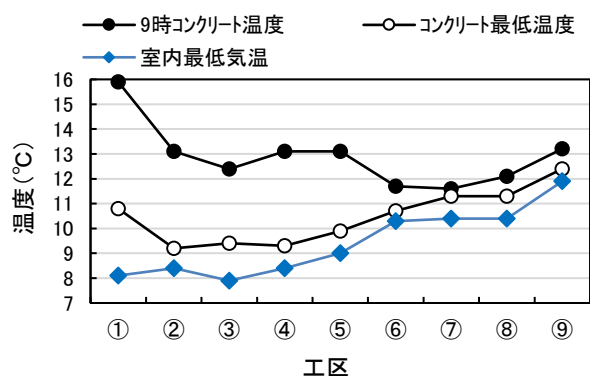


図-12 各工区のコンクリート温度と室内最低気温

3. 平滑性評価

3.1 3Dレーザースキャナによる平滑性評価

3Dレーザースキャナによる測定データの妥当性を検討するために、従来手法で高精度と考えられるデジタルレベルによる測定結果と比較した。写真-8に、デジタルレベルによる測定状況を示す。測定はリンク直線部の15m×14mの範囲を対象とし、デジタルレベルは500mm格子間隔に対して2人組を3チーム作り、約4時間かけて約1,000点の高さを取得した。一方3Dレーザースキャナは、3人で基準板設置など約10分で測定した。図-13には、それぞれの測定結果を10mm格子間隔の凹凸となるように可視化処理して示したが、2次元的な高さ分布がほぼ一致していることが分かる。また、図-14には、デジタルレベルと3Dレーザースキャナの高さ分布を比較して示すが、それぞれの分布の形状は同様で、標準偏差は1.00mmと一致していた。したがって3Dレーザースキャナの測定結果は信頼性が高いと判断でき、測定の短時間化と省力化から製氷コンクリート全体の平滑性測定に適用した。



写真-8 デジタルレベルによる測定状況

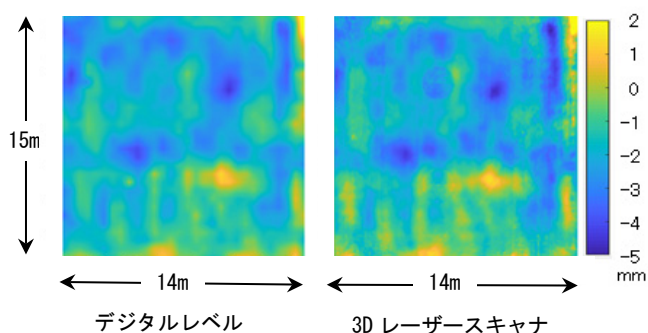


図-13 コンクリート表面の可視化処理比較

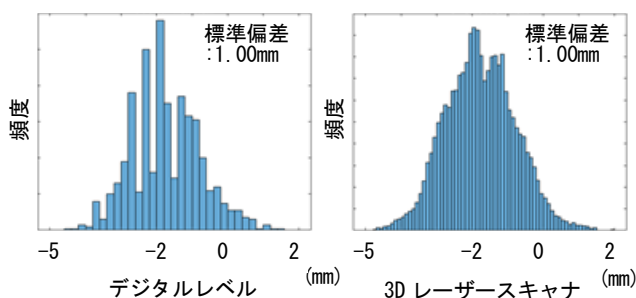


図-14 高さ分布の比較

3D レーザースキャナによる全体の測定は、リンクを図-15のように84ヶ所のスキャンエリアに分割して行った。測定は、エリア内に3D レーザースキャナを設置し、エリア周辺には2.3節の均し後の測定と同様に、高さの基準となる平板を設置した。

リンク全体の高さ分布を図-16に示す。高さの標準偏差は1.22mmであり、全体の90.3%の面積が±2mm以内に入る結果となり、目標である±2mmをほぼ達成できた。また、リンク全体の凹凸位置を高さごとに色分けして図-17に示す。

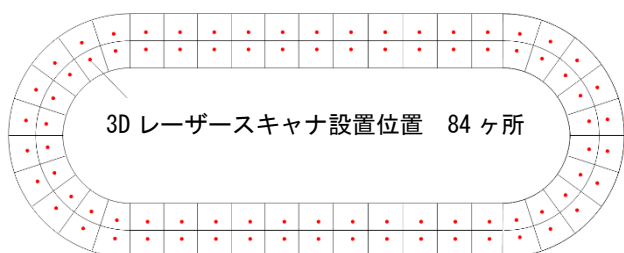


図-15 3D レーザースキャナのスキャンエリア

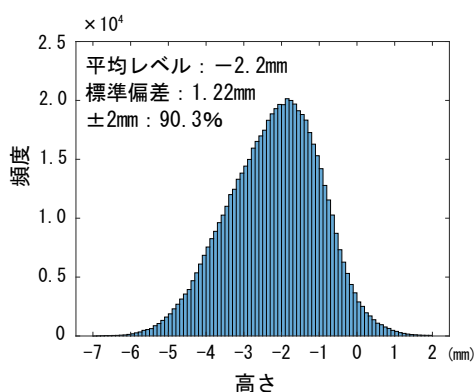


図-16 リンク全体の高さ分布

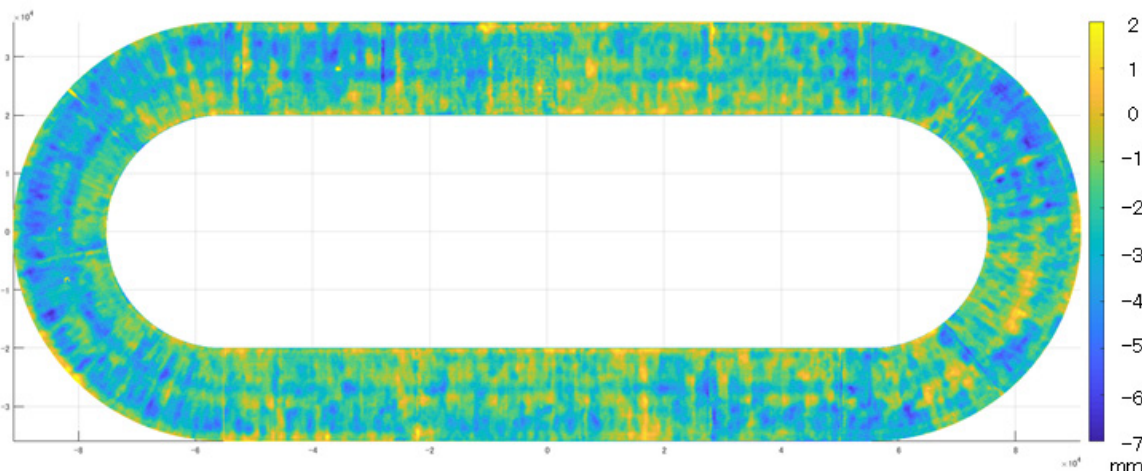


図-17 リンク全体の高さ凹凸位置

②、④、⑤工区のカーブ部は、全体的に低い傾向が見られるが、これは、直線部と比較してトラススクリードが、リンク内側と外側で移動速度が異なり施工が難しいことが影響した可能性が考えられる。

3.2 F-number による平滑性評価

施工したスラブの精度を ASTM E 1155M に規定される F-number を用いて評価を行った。F-number とは、1ft ピッチで測定した表面凹凸から算出されるコンクリートスラブの精度の指標であり、隣り合う3点の高さの差から算出される平滑性 (Fflatness) と 10 点ごとの高さの差から算出される平坦性 (FLlevelness) の 2 つが含まれる¹⁾。図-18 に示すようなある測定ラインに対して、Ff および FL はそれぞれ式(2)~式(5)により算出される。

$$q_i = (h_i - h_{i-1}) - (h_{i-1} - h_{i-2}) \quad (\text{in.}) \quad (2)$$

$$Ff_j = 4.57 / (3 \times S_q + |A_q|) \quad (\text{dimensionless}) \quad (3)$$

ここで、 $i \geq 2$ 、 S_q は q の標準偏差、 A_q は q の平均値

$$z_i = h_i - h_{i-10} \quad (\text{in.}) \quad (4)$$

$$FL_j = 12.5 / (3 \times S_z + |A_z|) \quad (\text{dimensionless}) \quad (5)$$

ここで、 $i \geq 10$ 、 S_z は z の標準偏差、 A_z は z の平均値

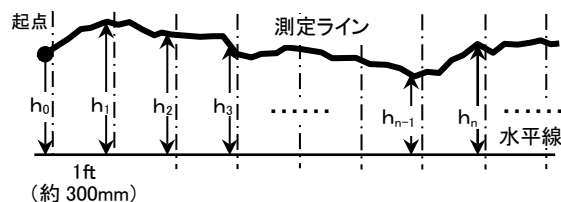


図-18 F-number 算出のための凹凸測定結果の例

ある区画全体の Ff、FL を算出する場合は、その区画に含まれる全ての測定ラインを統合する必要があるが、ここではその細かな導入式は省略する。F-number は数値が高いほど精度が良好であることを示し、ASTM E 1155M ではコンクリートスラブの精度クラスを F-number の数値によって表-5 に示すように分類している²⁾。今回の測定には、Face社製の Dipstick 2277 Floor Profiler を使用し、製氷コンクリート全体を 10 のセクションに分割し、それぞれについて実施した。測定ラインのレイアウトを図-19 に示し、Floor Profiler による測定状況を写真-9 に示す。

Floor Profiler による測定は、1 人で各セクションの 4 本のラインを約 30 分で測定できた。測定ラインの位置出しには事前の準備作業が必要であるが、ラインの位置には厳密な精度は求められないため、比較的短時間で測定が可能である。

表-5 ASTM によるスラブの精度クラス分類²⁾

Floor Surface Classification	Ff	FL
Super Flat	60	40
Very Flat	45	35
Flat	35	25
Moderately Flat	25	20
Conventional	20	15

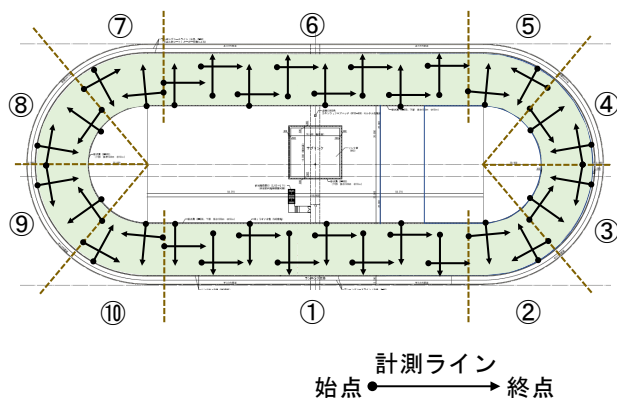


図-19 測定ラインのレイアウト



写真-9 Floor Profiler による測定状況

測定結果を表-6 に示す。各セクションで大きな違いは生じず、全体の傾向としては、Ff よりも FL の方が大きい。カーブ部を左右で比較すると、先に施工した②③④⑤よりも後で施工した⑦⑧⑨⑩の方が精度は高まったことが分かる。

表-6 各セクションにおける F-number の結果

セクション	面積 (m ²)	Ff	FL
①	1,600	73	87
②	396	71	68
③	391	71	70
④	391	65	71
⑤	396	75	76
⑥	1,600	73	81
⑦	396	82	107
⑧	391	63	72
⑨	391	88	84
⑩	396	95	85
Total	6,348	75	82

4. さいごに

八戸屋内スケート場では、世界水準のリンクを目指し、製氷コンクリートの平滑性には±2mm という高い目標が設定された。この目標に対して、徹底的に高さを管理したトラススクリードによる均しと3D レーザースキャナとプロジェクターを組み合わせた凸部の修正により、コンクリート表面の平滑性を高めた。また、押えには騎乗式トロウエルを使用し、製氷コンクリート全体において機械化による施工短時間化と省力化を実現した。また、施工後のスラブ表面における測定には、3D レーザースキャナと Floor Profiler を用い、短時間化と省力化を実現しつつ、高精度で視覚的に分かりやすい平滑性評価を実現した。以上の機械化施工および測定・評価方法により、製氷コンクリートの平滑性は±2.0mm をほぼ達成でき、F-number による評価では最高クラスである Super Flat を実現できた。

謝辞

河原木室長をはじめ八戸市職員の皆様には、製氷コンクリートの施工内容および測定・評価についての公表を許可くださったことに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) ASTM E 1155-14 : Standard Test Method for Determining Ff Floor Flatness and FL Floor Levelness Numbers
- 2) ACI 117-10 : Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials and Commentary