

# 論文 圧力分布シートセンサを用いたコンクリートの充填管理に関する研究

小林 聖\*1・柳井 修司\*2・坂田 昇\*3・細田 暁\*4

**要旨：**ハンチ部や高密度配筋部のかぶり部等，コンクリートの目視確認が困難な箇所において，コンクリートの打込みおよび締固めによる充填状況を施工中にリアルタイムで評価する方法として，圧力分布シートセンサを用いた充填検知方法について検討を行った。実際に本センサを型枠に設置し，コンクリートを打ち込んだ結果，未充填部分を確実に判別し，充填状況をリアルタイムでモニタリングすることが可能であった。また，本センサを用いてバイブレータによる締固め状況や，上層の打込みに伴う側圧の変化をモニタリングすることができ，締固めの度合いも同時に検知できる可能性も示された。

**キーワード：**圧力分布シートセンサ，締固め，かぶり，未充填，リアルタイム，モニタリング

## 1. はじめに

コンクリート構造物の品質や耐久性を確保するうえで，施工時の打込み・締固め作業を適切に管理することは重要である。特に，締固め管理は目視や現場作業員の経験などの感覚に依存しており，定性的な評価により行われているのが実状である。また，ハンチ部，高密度配筋部などにおけるかぶりなどの目視による充填状況の確認が困難な箇所においては，脱枠した時に初めてコンクリートの充填状況を確認することになる。しかし，その時点で未充填部や締固め不足が発見されても，補修を要するだけでなく，例え補修したとしても，長期耐久性が保たれるかは疑問である。これに対して施工中に充填状況をリアルタイムでモニタリングすることができれば，再振動などにより充填性を確保でき，構造物の品質を確保できる。以上のような背景から，コンクリートの充填状況を施工中にリアルタイムでモニタリングする技術が求められている。また，コンクリートの耐久性を確実に確保するうえで最も重要とされる「かぶり」の品質確保が重要視されている中で，確実な締固めがなされたか否かをかぶり部，すなわち型枠際で判断する技術が望まれている。

既存技術として，透明型枠を用いる方法が挙げられるが，充填状況の確認は可能であるものの，締固め状態を定量的に評価することはできない。また，打込み作業中に汚れてしまうと，その後の充填確認が困難となることもある。また，コンクリート打込み時にハンマー等で型枠を叩いて充填状況を確認する方法についても，その打音の周波数から充填状況を定量化する検討<sup>1)</sup>がなされているが，締固め状態までを定量的に判断するには至って

いない。他の技術としては，振動デバイス<sup>2)</sup>や電圧印加方式<sup>3)</sup>を用いた充填検知システムがあるが，センサから得られる情報は点の情報であり，充填検知はセンサを設置した部分に限られる。近年では，熱画像解析により，コンクリートの充填状況を評価する技術<sup>4)</sup>も提案されている。型枠の外側の温度を測定し，コンクリートが打ち込まれることにより生じる相対的な温度差を利用することによって未充填箇所を識別するものであり，非接触で検出することができることが特徴である。この技術についても，現状では締固め状態を定量的に判断可能とは言い難い。高周波静電容量を用いた方法<sup>5)</sup>により未充填が評価可能との報告もなされているが，やはり点の情報であり，全面を確実にモニタリングするには至っていない。

今回，検討の対象とした圧力分布シートセンサは，面的に圧力を検知できるセンサであり，コンクリートがセンサに触れた時点で充填を検知することができるため，リアルタイムでモニタリングが可能である。また，センサに接触する力の変化をリアルタイムで出力することができるため，締固めにより変化する側圧も検知すること

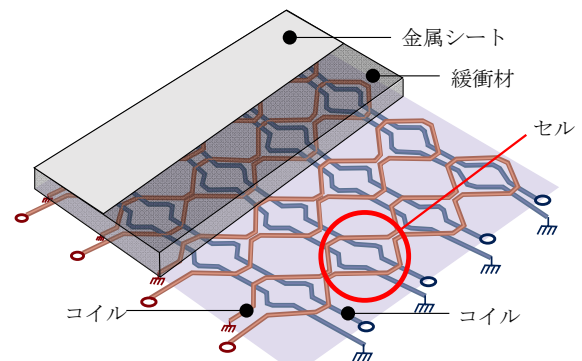


図-1 圧力分布シートセンサの概要

\*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 工修 (正会員)

\*2 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 工修 (正会員)

\*3 鹿島建設 (株) 土木管理本部 土木技術部 土木技術部長 工博・農博 (フェロー会員)

\*4 横浜国立大学 都市イノベーション研究院・都市科学部 都市基盤学科 准教授 工博 (正会員)

ができ、充填検知のみでなく、締固め状態の定量評価を行える可能性がある。ここでは、本センサを用いたコンクリートの充填検知および締固め検知手法について、その適用性を実験的に検討した。

## 2. 圧力分布シートセンサ

### 2.1 センサの構造・原理

圧力分布シートセンサの概要を図-1に示す。圧力分布シートセンサは、コイルが直交するセル部と、金属シートを緩衝材で介した単純な構造となっており、圧力に応じて可動する金属シートがセル部に近づくことと電磁結合が変化し、その結合係数を検出することにより、各セルの圧力を独立して表示する機構となっている。緩衝材の種類を変更することで、セルと金属シート接触圧を調整することができるため、検知可能な圧力範囲を任意に変更できる特徴を有している。

### 2.2 圧力分布シートセンサのキャリブレーション

センサの出力値は無次元であり、その値は単体では意味をなさない。そのため、事前にセンサ出力値と圧力の相関関係を確認するためのキャリブレーションが必要となる。以下にその詳細について述べる。

#### (1) 緩衝材

コンクリートの側圧を評価できる検知範囲を決定するために、圧力分布シートセンサのセル部と金属シートの間に配置されている緩衝材の種類を変更し、キャリブレーションを実施した。緩衝材は2種類を使用し、1つ(軟質タイプ)はポリウレタンフォーム(密度22kg/m<sup>3</sup>,厚さ3.0mm)、もう1つ(硬質タイプ)は高発泡シリコンフォーム(密度220kg/m<sup>3</sup>,厚さ2.5mm)とした。

#### (2) キャリブレーション方法

センサを設置できるだけのスペースを有する2,000kNアムスラー(分解能0.05kN)を使用して、圧力分布シートセンサに荷重を与え、センサとパソコンを接続することで、荷重を与えた際にシートから検出された値を記録し、その値と圧力の相関関係を把握した。キャリブレーション状況を写真-1に示す。センサ上に鉄板(縦400mm,横400mm,厚さ20mm)を設置し、さらにコンクリート製角柱(縦100mm,横100mm,長さ400mm)、鉄板(縦100mm,横400mm,厚さ15mm)を介して全ての面が均一になるように荷重をかけた。荷重は0.8~6.0kNの範囲とし、手動で所定の荷重に合わせ、その時の荷重とセンサの出力値を取得した。

#### (3) キャリブレーション結果

センサ出力値と載荷した荷重を載荷面積で除して変換した圧力の関係を図-2に示す。ここでセンサ出力値は400×400mmの鉄板が設置している部分の平均値とした。軟質タイプの圧力とシートの出力値の関係を最小二乗法

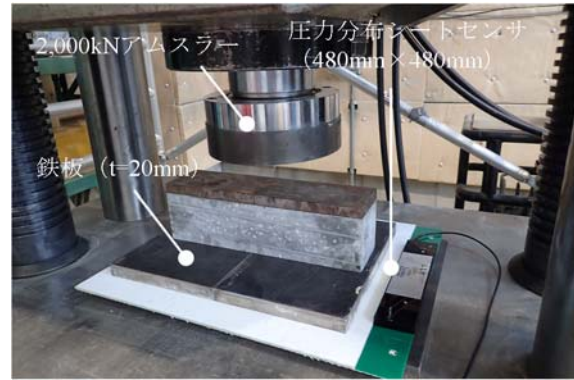


写真-1 キャリブレーション状況

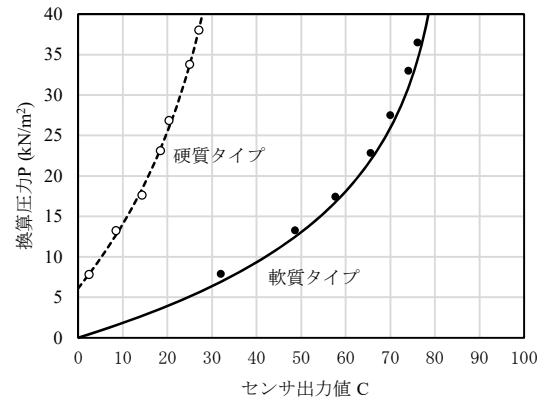


図-2 センサ出力値と換算圧力の関係

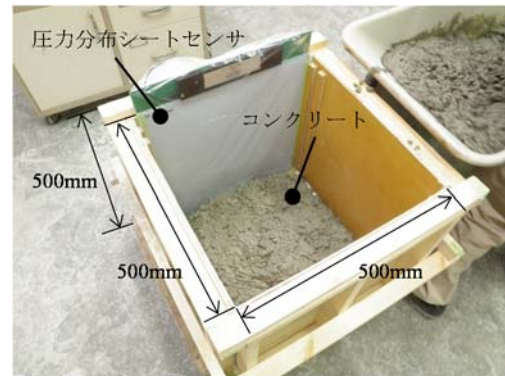


写真-2 要素実験状況

により指数関数で回帰した。回帰式を式(1)に示す。

$$P = -14.34 \cdot \log\{1 - (0.01195 \cdot C)\} \quad (1)$$

ここで、P: 換算圧力(kN/m<sup>2</sup>), C: センサ出力値とする。

硬質タイプでは、5.0kN/m<sup>2</sup>程度の小さい圧力は検知できないことが確認され、緩衝材を選定する際にはキャリブレーションにより適切に判断する必要がある。実施工ではコンクリートの打上がり高さやスランプにより、型枠に作用する側圧は変化するため、施工条件に合わせて緩衝材を選定することで対象とする側圧の測定が可能であると判断された。

## 3. 要素実験による充填検知

### 3.1 実験概要

圧力分布シートセンサのポテンシャルを確認するため

に、水、モルタルおよびコンクリートを用いてセンサの検知状況を確認した。コンクリートにおいては締固めによるセンサの検知状況を確認するために、コンクリートを型枠に投入した後の締固めの有無をパラメータとした。実験状況を写真-2 に示す。センサの緩衝材にはポリウレタンフォームを使用し、型枠の寸法は 500×500×500mm とした。モルタルの配合を表-1 に、コンクリートの配合を表-2 に示す。

### 3.2 実験結果

水によるコンター図を図-3 に示す。なお、コンター図は青から赤に変化するほど圧力が高くなっていることを示す。高さ 200mm まで水を充填し、センサに接触した箇所でグラデーションが表示されることを確認した。

モルタルによるコンター図を図-4 に示す。実験時のモルタルフロー（15 打）は 235mm であり、これを高さ

表-1 モルタルの配合（1：3 モルタル）

W/C (%)	S/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
		水	セメント	細骨材
55	3.0	272	495	1485

セメント：普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm<sup>3</sup>  
 細骨材：砕砂，表乾密度：2.60g/cm<sup>3</sup>

表-2 コンクリートの配合（呼び方：普通 18 8 20N）

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
72	49.7	162	225	933	969	2.43

セメント：普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm<sup>3</sup>  
 細骨材：砕砂，表乾密度：2.60g/cm<sup>3</sup>  
 粗骨材：砕石，表乾密度：2.67g/cm<sup>3</sup>

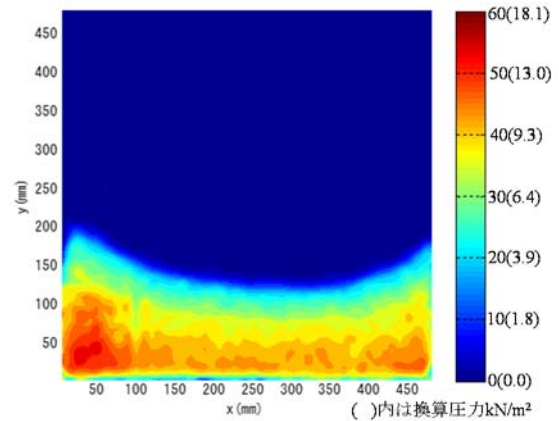


図-3 水の場合のコンター図

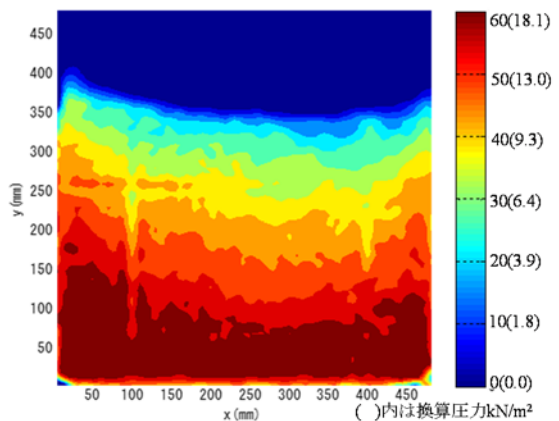


図-4 モルタルの場合のコンター図

表-3 コンクリートの場合のコンター図と脱型後の表面状態

	締固めなし	締固めあり
コンター図		
脱型後の表面状態		



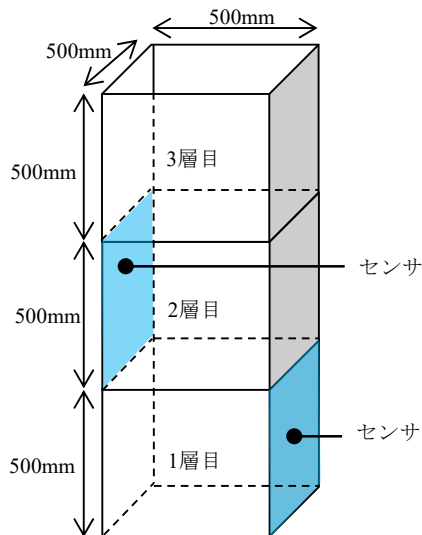


図-5 無筋構造物の試験体概要

表-4 コンクリートの配合(呼び方:普通 30 12 20N)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
52	43.8	175	337	767	1009	2.528

セメント：普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm<sup>3</sup>

細骨材：砕砂，表乾密度：2.60g/cm<sup>3</sup>

粗骨材：碎石，表乾密度：2.67g/cm<sup>3</sup>

500mm まで充填した。モルタルの場合は水と比較すると、コンター図に若干のムラが生じたが、問題なく検知可能であることを確認した。また、水に比べ、モルタルの方が着色範囲は広く、密度の違いによる側圧の違いが明確に示された結果を得た。なお、センサ上部（高さ 350mm 以上）はほとんどグラデーションが確認されないが、これはモニタリングの範囲でより鮮明にグラデーションが示せるよう出力レンジを調整したためであり、レンジの調整により表示範囲は変更可能である。

コンクリートによるコンター図と脱型後の表面状態を表-3 に示す。コンクリートは高さ 500mm まで充填した。バイブレータによる締固めを行わなかった場合は、未充填が多く存在し、未充填部分はコンター図に色が示されないことが確認できた。また、脱型後のコンクリート表面状態とコンター図は良好な対応を示しており、今回の表示レンジでは高さ 350mm 以下の未充填部分や、締固め不足を確実にモニタリングできることが示された。締固めを行った場合は、高さ 350mm 以下のコンター図にグラデーション色が示されることが確認され、脱型後も確実に充填されていた。

#### 4. 無筋構造物による施工実験

##### 4.1 実験概要

無筋構造物の試験体概要を図-5 に示す。縦 500mm、横 500mm、高さ 1,500mm の型枠にセンサを 1 層目と 2 層目に設置し、充填検知状況をモニタリングした。1 層目は



写真-3 模擬空隙



写真-4 無筋構造物による施工実験状況

高さ 0~500mm の範囲に、2 層目は高さ 500~1,000mm の範囲に設置した。2 層目に設置したセンサには模擬空隙を設置し、どの程度の空隙まで検知可能であるかを評価した。模擬空隙の大きさは、直径 30mm、45mm、60mm の 3 種類とした。模擬空隙の設置状況を写真-3 に示す。実験に用いたコンクリートの配合を表-4 に示す。コンクリートは 0.3m<sup>3</sup> のバケツを使用して打ち込み、各層を一回で打ち上げた。1 層目（高さ 500mm）にコンクリートを打ち込んだ後、30 分の打重ね時間間隔を設け、2 層目（高さ 1000mm）を打ち込んだ。2 層目では 60 分の打重ね時間間隔を設け、3 層目（高さ 1,500mm）を打ち込んだ。バイブレータ（直径 40mm）による締固め時間は各層同一とし、コンクリート中心で 15 秒、4 隅で 15 秒ずつ振動させることとした。

##### 4.2 実験結果

施工実験状況を写真-4 に示す。コンクリートを打ち込んでいる直近でコンクリート充填状況をモニタリングした。実験時のコンクリートのスランプは 13.5cm、空気量は 5.3%であった。各センサのコンター図を表-5 に示す。センサが検知したコンター図を確認することで、コンクリート打ち込み直後の充填状況をリアルタイムでモニタリングすることができた。また、バイブレータによる締固め、次層の打ち込みという施工過程においてコンター図の色がリアルタイムで変化する状況が確認された。さらには、側圧の上昇状況もモニタリングすることができた。2 層目のコンター図では、直径 30mm の模擬空隙が

表-5 各センサのコンター図

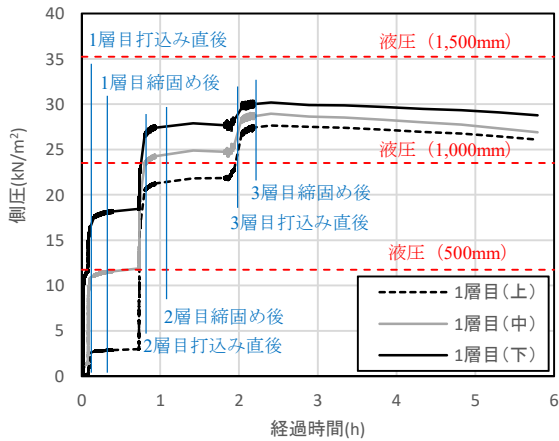
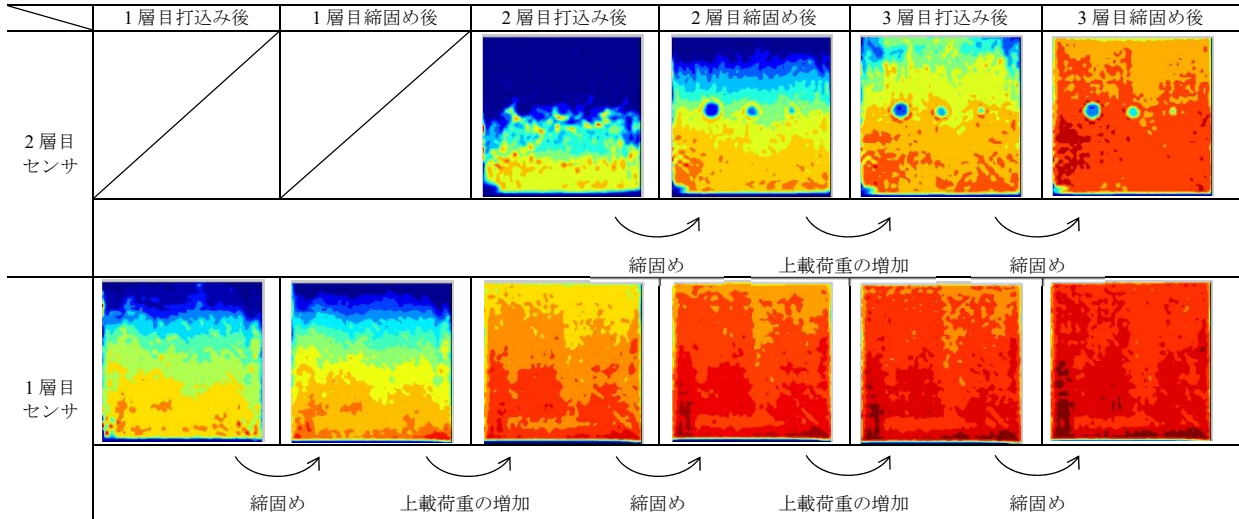


図-6 1層目の側圧の経時変化

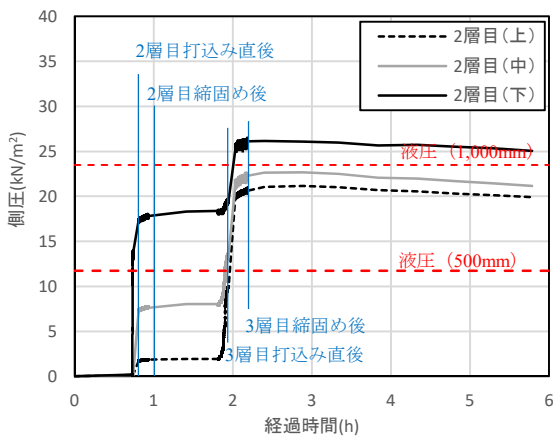


図-7 2層目の側圧の経時変化

検知可能であることも確認され、実施工においても同程度の未充填であれば検知可能であると判断された。

1層目に設置したセンサが検知した側圧の経時変化を図-6に示す。なお、1層目(下)はセンサの下から100mm、1層目(中)はセンサの中心、1層目(上)はセンサの下から400mmの位置の側圧変化である。1層目の締固め後に各箇所の側圧は一定となり、2層目を締固め後に側圧は上昇し、3層目を締固め後はさらに側圧は上昇するが、

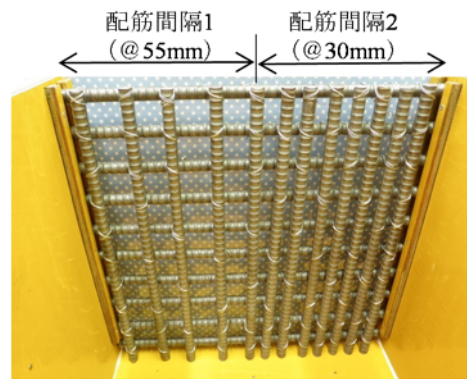


写真-5 鉄筋の配置状況

表-6 コンクリートの配合(呼び方:普通 27 15 20N)

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
53	46.9	170	321	833	969	3.47

セメント：普通ポルトランドセメント、密度：3.16g/cm³

細骨材：砕砂、表乾密度：2.60g/cm³

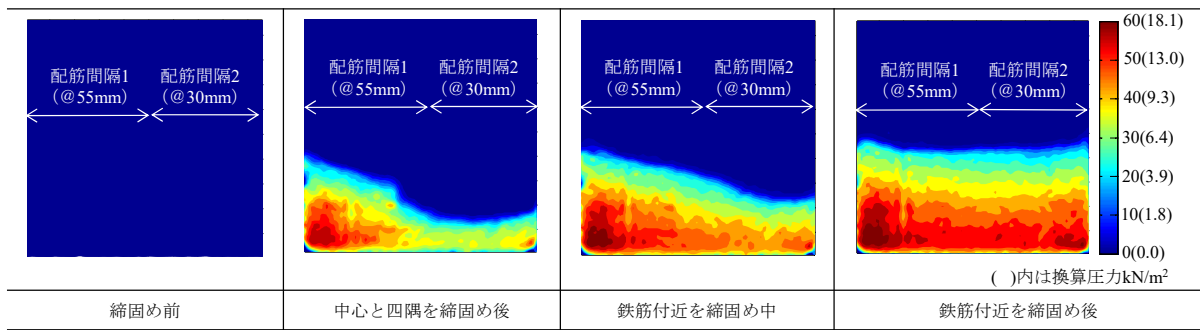
粗骨材：碎石、表乾密度：2.67g/cm³

型枠内のコンクリートのスランプ低下、凝結の進行により高さ方向の圧力差が小さくなったものと考えられた。

2層目に設置したセンサが検知した側圧の経時変化を図-7に示す。2層目についても1層目と同じセンサの箇所の側圧変化を示す。2層目は1層目と同等の性状を示した。振動締固め前と締固め後の側圧を比較すると、締固め開始から側圧が上昇し、ある値で一定となった。つまり、圧力が一定になった時点が十分な締固めがなされた時点と判断できる。このように、充填検知のみならず、締固め程度も判断できる可能性が示された。

グラフ中にはコンクリートの密度を23.0kN/m³とした場合の液圧のラインを示しているが、各センサの下部において側圧が液圧よりも大きくなっている。これはキャリブレーションの精度によるものと考えられる。今後は低圧力部分のデータを拡充し、精度を向上させる必要が

表-7 各締め固め段階におけるコンター図



あると考える。なお、通常のコンクリートの側圧は、時間の経過とコンクリートの硬化および自立に伴って減少するが、本センサの場合には、構造上その様子を捉えることはできなかつた。

## 5. RC 部材による施工実験

### 5.1 実験概要

ここでは、鉄筋が配筋された状態におけるコンクリートの充填検知の可否を評価した。試験体の概要を写真-5に示す。縦 500mm、横 500mm、高さ 500mm の型枠にセンサを設置し、かぶり 30mm の位置に鉄筋を配置した。鉄筋径は D16 とし、鉄筋の配筋間隔は 2 種類とした。縦筋の配筋間隔 1 は 55mm (あき 39mm)、配筋間隔 2 (あき 14mm) は 30mm とし、横筋の配筋間隔は一律 55mm とした。コンクリートの配合を表-6に示す。コンクリートは高さ 500mm まで打ち込み、中心と四隅、鉄筋付近の順に段階的に直径 40mm のパイプレータで 15 秒ずつ締め固め、その様子をセンサでモニタリングした。

### 5.2 実験結果

各締め固め段階におけるコンター図を表-7に示す。締め固め前はコンター図には色が表示されず、これまでの結果と異なり、コンクリートを打ち込んだだけでは、鉄筋により型枠際にコンクリートが達していない様子が分かる。中心と四隅を締め固めた場合、配筋間隔が 30mm の箇所においてはコンター図の色から判断して、コンクリートが鉄筋を通過しづらいことが確認され、鉄筋付近を締め固め始めると、徐々に間隙を通過してかぶりに回り込む様子をモニタリングすることが可能であった。鉄筋付近を締め固めることで鉄筋の間隙の影響が無くなり、最終的にコンター図はほぼ左右均一となった。以上より、RC 部材においては、充填や締め固めの度合いをリアルタイムに、より正確にモニタリングすることができ、また、高密度配筋部への適用が可能であることが示された。

## 6. おわりに

今回の検討により得られた結果は以下のとおりである。

(1)センサの出力値と圧力の関係を事前に把握すること

で、圧力分布シートセンサの出力値を側圧に変換することができた。

(2)コンクリートが圧力分布シートセンサに接触するとリアルタイムでコンクリート圧がコンター図に表示されるため、より正確な充填検知が可能である。

(3)締め固め中に側圧のグラデーションを確認することで、締め固め状況をリアルタイムでビジュアルにモニタリングすることができる。

(4)締め固め後に側圧が一定となり、その時点を締め固め完了とみなすことができることから、圧力分布シートセンサにより検知された側圧をモニタリングすることで、締め固め度合を判断できる。

(5)RC 部材による施工実験により、鉄筋が配置された状態でもコンクリートの充填検知が可能である。

今後は、実施工において、本センサが充填および締め固め管理に適用できるか否か、どの程度の未充填まで検知可能かについて検証していく予定である。

## 参考文献

- 1) 佐々木晴夫ほか：打音法によるハーフ PCa 板に打設したコンクリート充填検査に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.139-140，2000
- 2) 金子 稔，坂井 孝，安田正雪，末岡英二：振動を利用したコンクリート充填検知システムに関する基礎実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1527-1532，2002
- 3) 平田隆祥，十河茂幸：電圧印加方式によるコンクリートの充填感知に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，1996
- 4) 渡部 正，魚本健人：型わく面の熱画像解析によるコンクリート打ち込み時の欠陥検出法に関する研究，土木学会論文集，No.478，V-21，pp.51-59，1993.11
- 5) 瀬古繁喜，三井健郎，結城秀恭，中川裕巳：型枠面での高周波静電容量測定によるコンクリート充填状態の判定に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，2007