

# 盛土地盤における締固め品質管理手法の開発

高倉 敏<sup>1</sup>・北村 佳則<sup>2</sup>・大谷 茂<sup>3</sup>・黒台 昌弘<sup>4</sup>・西尾 貴至<sup>5</sup>

<sup>1</sup>日本道路公団 静岡建設局 掛川工事事務所 (〒436-0047 静岡県掛川市長谷1413-3)

<sup>2</sup>日本道路公団 試験研究所 土工研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

<sup>3</sup>ハザマ 名古屋支店 森町PA作業所 (〒437-0214 静岡県周智郡森町草ヶ谷883-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 ハザマ 土木事業総本部 構造物・道路統括部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

<sup>5</sup>正会員 工修 不動建設株式会社 営業推進本部 技術部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-2-1)

従来より、振動ローラが地盤に与える振動を加速度計で計測し、その周波数を分析することによって得られる地盤応答値を用いて、地盤の剛性を評価する研究が進んでいる。その有効性は室内試験などで確認されているが、実際の盛土現場ではデータのばらつきが多く、定量的に活用するまでには至っていない。筆者らは、地盤応答値のばらつきを統計的に処理するとともに、GPSによる転圧回数管理(施工規定方式)と効果的に組み合わせることで盛土の面的でリアルタイムな締固め管理手法について研究している。本論文では、新しい地盤評価指標となりうる地盤応答値の実用化を目的として実施したモデル施工をもとに、地盤応答値の実用性について考察するとともに、実施工での品質管理手法についての提案を行う。

**キーワード：締固め、品質管理、省力化、GPS、盛土**

## 1. はじめに

近年の大規模土工では、施工機械の大型化や情報通信技術の活用等により、施工の省力化・効率化が図られている。特に盛土工事では、GPSを活用し、締固め回数を面的でリアルタイムに把握する品質管理方法が既に実用化されている<sup>1),2),3),4)</sup>。その一方で、盛土そのものの品質管理については、依然として広い施工範囲に対して現場密度による点管理が主流である。そのため、施工ヤードが広範囲に及ぶ大規模盛土では、ヤード全面に対する定量的な品質評価手法の開発が期待されている。

従来より、振動ローラが地盤に与える振動を加速度計で計測し、その周波数を分析することによって得られる地盤応答値を用いて、地盤の剛性を評価する研究が進んでいる<sup>5),6),7),8)</sup>。しかし、密度管理される材料については、その有効性が室内や現場での試験では確認されているが、実際の盛土現場ではデータのばらつきが多く、定量的に活用するまでには至っていない。

筆者らの研究では、このばらつきを統計的に処理することで、地盤応答値による面的でリアルタイムな品質管理を行う方法を提案している。本論文では、現地発生材料を用いて実施したモデル施工の結果をもとに、新しい地盤評価指標となりうる地盤応答値の実用性について検討を行うとともに、実施工での品質管理手法についての提案を行う。

## 2. 品質管理手法

現在、高速道路の盛土はRI計器を用いた密度・空気間隙率により品質管理が行われている。RI計器による品質管理は、ある程度は面的に管理できるものの、施工面全体の評価には至っていない。しかし、GPSを併用した地盤応答値による盛土品質管理手法が確立されれば、面的でリアルタイムな品質管理が可能となる。

そこで筆者らは、品質管理手法の一つとして図-1に示す品質管理フローを提案する。

モデル施工で地盤応答値による規定値(CCV規定値)と規定転圧回数を決定し、実運用の品質管理に適用していく方法である。

この方法では、地盤応答値(CCV)はGPSとの併用により、位置情報とリンクさせながらリアルタイムな計測が可能である。したがって、実施工では転圧が1回終了する毎に品質面からの面的な転圧完了判定を行うことができる。すなわち、規定転圧回数に達していない場合は、CCV規定値による転圧完了判定を行い、管理ブロック毎のCCV平均値がCCV規定値を上回っていれば規定転圧回数に達していなくても転圧は完了していると判定する。その一方で、規定転圧回数に達していればCCV規定値を超えていなくても転圧を終了したものと判定する。

以上に述べた品質管理手法により、従来の方法では不可能であった盛土材料の面的でリアルタイムな品質管理が可能となる。

ところで、地盤応答値を用いた品質管理には「原位置試験や地盤応答値のばらつきによる相関性の低下」「振動ローラの進行方向による地盤応答値の相違性」といった点において実用上の課題が残されていることを、筆者らは指摘している<sup>9),10)</sup>。本論文では、これらの課題を明確にするために実施したモデル施工の結果について述べる。

### 3. モデル施工

#### (1)地盤応答値

振動ローラの振動挙動の定量的な評価方法として、振動輪加速度の周波数特性を定量化した評価値を用いる方法がある。この方法は、振動ローラの振動輪の加速度を計測し周波数分析すると、振動ローラの振動数の他に、高調波成分や分数調波成分が観測されることを利用するものである。具体的には、周波数特性における振動ローラの基本振動成分に対する1次高調波成分の割合をとる手法(CMV)や高調波成分として2次以上の高調波成分も加える手法(ひずみ率)、さらには締固めの進行とともに発生してくる1/2分数調波も含めて評価する手法(CCV, 乱れ率)等の方法がある<sup>11)</sup>。地盤剛性の増加に伴い高調波成分は大きくなるため、いずれの方法を用いても地盤剛性の変化を評価することは可能である。各数式は式(1)～(4)のとおりであり、式の記号は図-2中の記号である。

$$C M V = \frac{S_2}{S_1} \quad (1)$$

$$\text{ひずみ率} = \frac{\sum S_n}{S_1} \quad (2)$$

$$\text{乱れ率} = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} S_n + \sum_{n=2}^{\infty} S_{(2n-1)/2}}{S_1 + S_{1/2}} \quad (3)$$

$$C C V = \frac{S_{1/2} + S_{3/2} + S_2 + S_{5/2} + S_3}{S_{1/2} + S_1} \quad (4)$$

ここに、Fは起振力、 $m_1$ はフレームの質量、 $m_2$ は振動輪の質量である。

各手法の優劣や適応性については未だ明確にはなっていないが、本試験では2次以上の高調波成分を考慮した手法のうち、CCVを地盤応答値として採用している。

#### (2)モデル施工概要

モデル施工の目的は、①原位置試験とCCVとの関連性の把握、②転圧方向の相違によるCCVの変化特性の把握、③実用的な管理ブロックサイズの検討である。

モデル施工は、図-3に示すように、平面が14m×20m(層厚30cm×3層)と18m×30m(層厚30cm×1層)のモデル施工ヤードを造成して行った。転圧回数は

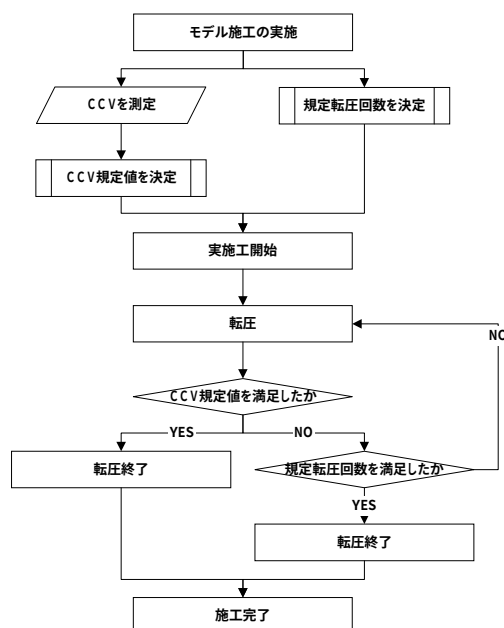


図-1 品質管理フロー図

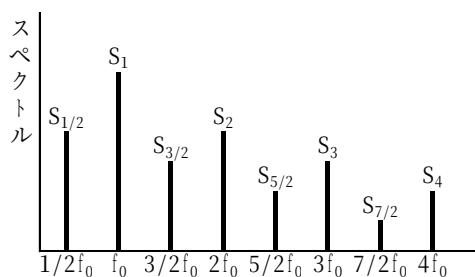


図-2 振動ローラの周波数特性

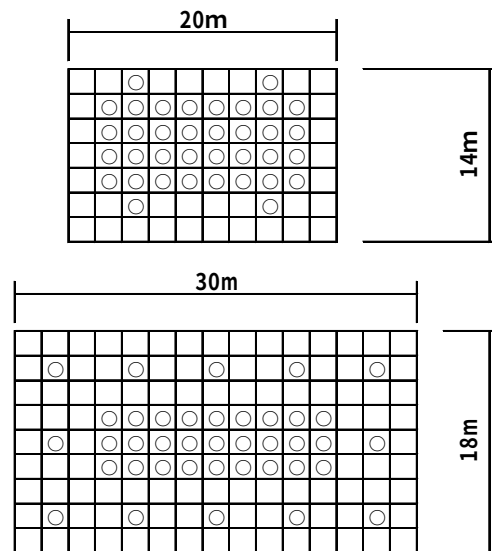


図-3 モデル施工平面図

最大で16回までとし、標準転圧速度は3.0km/hとした。実際の土工事同様、ブルドーザによる撒き出しの後、振動ローラによる締固めを行い、CCVについては各転圧回毎に全面で計測を実施し、原位置試験については偶数回の転圧が終了する毎に図-3の○印のあるブロックで計測を実施した。ここで、1つのマスは2m×2mの正方形であり、これを管理単位

ブロックとする。

転圧ローラの仕様は、総重量103.0kN、起振力205.9kN、振動数30Hzである。

モデル施工の条件は表-1に示すように、14m×20mの2層目と18m×30mを標準とし、14m×20mの1層目では転圧速度を標準転圧速度の半分(3.0km/h)、14m×20mの3層目では散水を行い含水比を高め設定して施工を行った。

原位置試験はR I 計器による土の密度試験方法(JHS106-1992)と動的平板載荷試験および沈下量の測定を行った。

### (3)モデル施工材料特性値

モデル施工で使用した材料について、土粒子の密度試験(JIS A1202)、土の粒度試験(JIS A1204)、突固めによる締固め試験(JIS A1210)の室内試験試験を行った。その結果は表-2のとおりである。いずれの材料もほぼ同一の材料であり、材料特性が試験結果を左右する可能性は極めて低い。したがって、各モデル施工から得られる試験結果は補正する必要が無く、同レベルでの比較が可能といえる。

## 4. 考察

### (1)原位置試験結果とCCVとの関連性

本モデル施工では、R I 計器による土の密度試験、動的平板載荷試験、累計沈下量およびCCVの計測を行ったが、ここでは盛土管理の代表的な特性である締固め度(Dc)とCCVとの関連性について検討した。それらの推移状況を図-5および図-6に示す。

Dcは、図-5に示すように、ヤード全面で締固めが進むにつれて単調に上昇している。また、CCVは、図-6に示すように、1回転圧時はヤード全面において一様に低い値を示しているが、締固めが進むにつれてDcと同様に値が上昇している。

これらの相関性を検証するため、2m×2mの管理単位ブロック毎にDcとCCVとの相関係数を算出すると表-3の結果が得られた。相関係数は1.0に近いほど相関性が高いと言えることから、原位置試験結果とCCVとの間には、ばらつきはあるが、少なからず相関性のあることが推測できる。

### (2)前後進におけるCCVの比較

一般的に、地盤剛性は同じ材料を転圧する場合、振動ローラの前後進によって周波数特性は異なり、CCVをはじめとする地盤応答値は前進時のほうが後進時より大きな値を示す。これは、垂直振動型の振動ローラにおける起振力の伝達方向が完全な垂直では無く、前後進で異なる方向を示していることも理由として考えられる。このようなことから、振動ローラの進行方向の相違によるCCVの特徴を把握するため、最適含水比よりも乾燥側の材料を標準的な転圧速度で締固めている18m×30mヤードで計測されたCCVをもとに検討する。

表-1 モデル施工条件表

| 試験ヤード | 14m×20m |    |    | 18m×30m |
|-------|---------|----|----|---------|
| 層     | 1       | 2  | 3  | 1       |
| 転圧速度  | 遅速      | 標準 | 標準 | 標準      |
| 含水比   | 乾燥      | 乾燥 | 湿潤 | 乾燥      |

表-2 モデル施工材料特性値

| 試験ヤード  | 14m×20m |       |       | 18m×30m |
|--------|---------|-------|-------|---------|
| 層      | 1       | 2     | 3     | 1       |
| 土質名称   | S-F     | SF    | S-F   | SF      |
| 土粒子の密度 | 2.719   | 2.727 | 2.717 | 2.696   |
| 粒度試験   | 礫分(%)   | 0.0   | 0.7   | 0.2     |
|        | 砂分(%)   | 90.4  | 82.5  | 79.9    |
|        | 細粒分(%)  | 9.6   | 16.8  | 19.3    |
|        | 均等係数Uc  | 2.2   | 2.8   | 2.9     |
| 突固め試験  | 方法      | B-c   | B-c   | B-c     |
|        | 最適含水比   | 18.4  | 17.0  | 20.8    |
|        | 最大乾燥密度  | 1.564 | 1.602 | 1.520   |

表-3 相関係数表

|         |    | Dc - CCV相関係数 |
|---------|----|--------------|
| 14m×30m | 1層 | 0.534~0.997  |
|         | 2層 | 0.058~0.988  |
|         | 3層 | 0.075~0.954  |
| 18m×30m | 1層 | 0.160~0.970  |

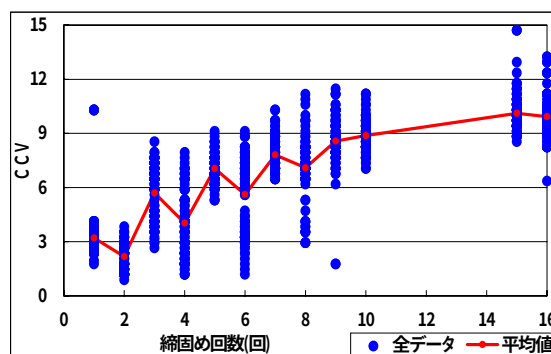


図-4 CCV推移図

転圧回数とCCVの関係を図-4に示す。奇数転圧回数が前進時、偶数転圧回数が後進時であり、前進時・後進時ともに転圧が進むにつれてCCVは大きくなっている。仮に振動ローラの前後進に関係なくCCVが地盤剛性に比例するのであれば、CCVは単調に増加するはずである。ところが、奇数転圧回数後の偶数転圧回数では、CCVは小さな値を示している。このことから、地盤剛性の評価は、振動ローラの前後進それぞれについて評価することが望ましいことがわかる。

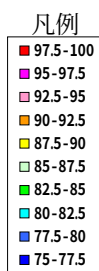
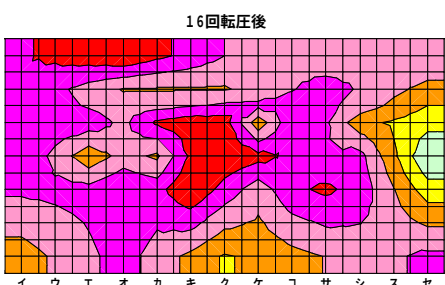
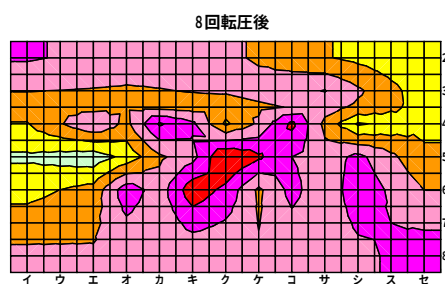
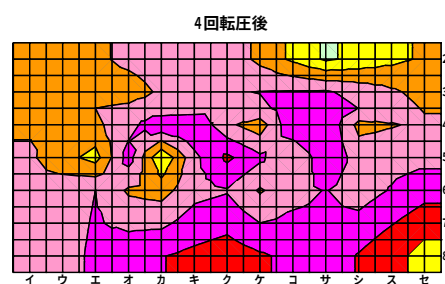
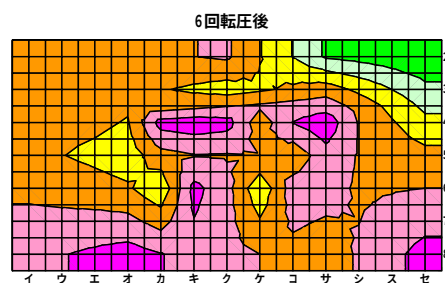
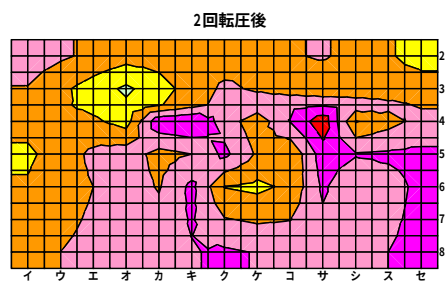
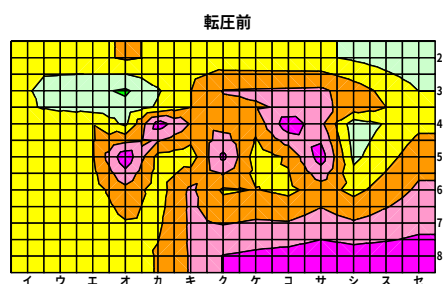


図-5 締固め度推移図

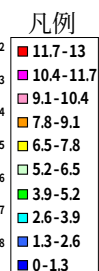
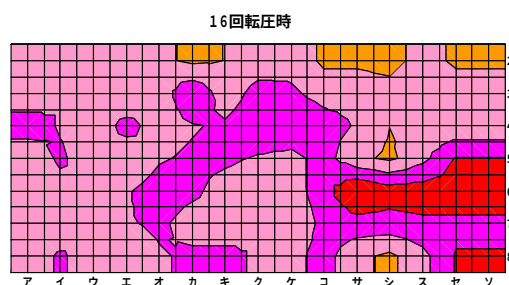
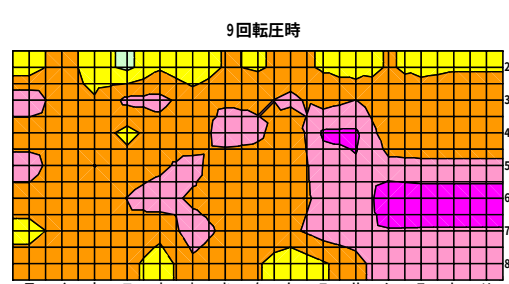
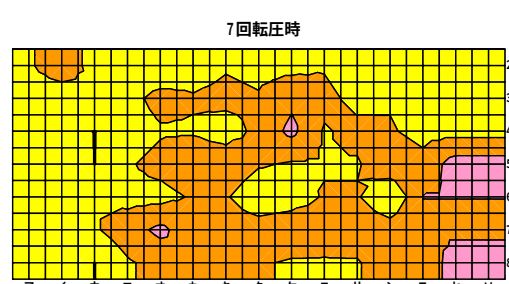
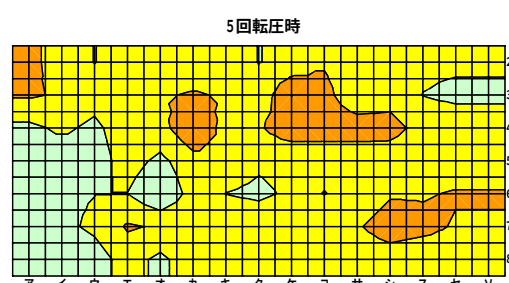
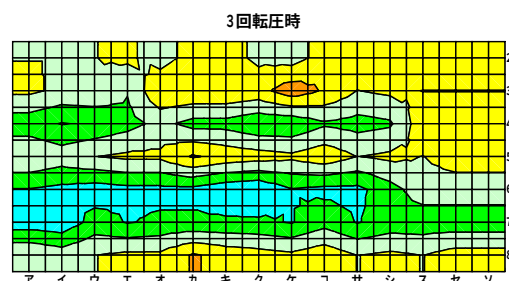
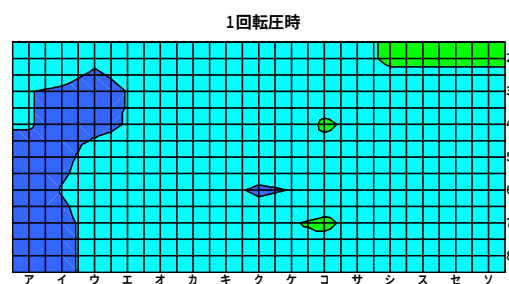


図-6 C-C-V推移図

### (3)管理ブロックサイズの検討

管理単位ブロック毎に計測されるCCVと原位置試験結果を比較する場合、各々の計測値にばらつきがあるため、一対一対応での指標の評価は難しい。そこで複数の管理単位ブロックを集約して1つの評価エリアとし、その中での相関性を調べ、実運用時の最適な評価エリア(以降、管理ブロックと称する)の寸法を検討する。ここでは、最適含水比よりも乾燥側の材料である14m×20mヤードの1, 2層目と18m×30mヤードを締固めた際に計測されたCCVと原位置試験結果をもとに検討を行った。具体的には以下のようにして、最適な管理ブロックサイズの検討を行った。

検討に際して、最小の管理ブロックは2m×2mとした。管理ブロックサイズは、図-7に示すように一辺が2mの整数倍となるように順次拡大して大きさを設定している。したがって、管理ブロックの最小単位は1ブロック=2m×2mとなり、順に4m×4m(4ブロック)、6m×6m(9ブロック)、8m×8m(16ブロック)となる。

ここでは、地盤の代表的な特性として締固め度(Dc)を採用し、管理ブロック内に存在する転圧回数毎のDcとCCVの平均値を求め、それらの相関係数を算出している。こうして求められた相関係数の最小値についてまとめたものが表-4である。管理ブロックが9ブロックすなわち6m×6m以上となった時、締固め度とCCVとの相関係数が最小値でも0.7を上回っている。一般に、相関係数が0.7以上なら相関性が高いと言える<sup>12)</sup>ことから、CCVの評価には6m×6m以上の管理ブロックサイズが適当であると考えられる。

### (4)品質管理規定値の設定

CCVによる盛土の品質管理を行うには、何らかの品質管理規定値を設定する必要がある。ここでは、その品質管理規定値の設定方法について述べる。

前節では、CCVで締固め品質管理を行う場合、管理ブロックは6m×6m以上が望ましいとしたが、試験運用を行う現場の土工品質管理が10m毎に行われていることから、ここでは10m×10mの管理ブロック毎に転圧完了判定を行う。

CCV規定値の設定方法には、図-8に示すように、①絶対的数値による方法、②相対的数値による方法、③収束傾向による方法などが考えられる。①ではモデル施工から得られた規定転圧回数時のCCV平均値を、②では1回転圧時と規定転圧回数時のCCV比較により求められた一定の倍率を掛けた数値を、③では規定転圧回数時とその1回前転圧時のCCVの増減割合(収束率)を、それぞれCCV規定値としている。

盛土材料の含水比が高い場合、締固めが進んでもCCVはあまり変化しないことがいくつかの事例<sup>2)</sup>に示されている。したがって、②や③の手法を採用した場合、含水比が高い材料では、締固めが進んでいない初期段階でもCCVの変化が小さいため、十

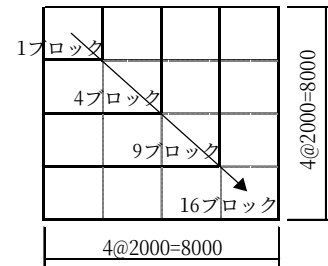


図-7 管理ブロックサイズ

表-4 相関係数最小値推移表

|         |    | 1ブロック<br>(2m×2m) | 4ブロック<br>(4m×4m) | 9ブロック<br>(6m×6m) | 16ブロック<br>(8m×8m) |
|---------|----|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| 14m×20m | 1層 | 0.534            | 0.888            | 0.833            | 0.952             |
|         | 2層 | 0.058            | 0.050            | 0.788            | 0.747             |
| 18m×30m | 1層 | 0.160            | 0.413            | 0.784            | 0.891             |

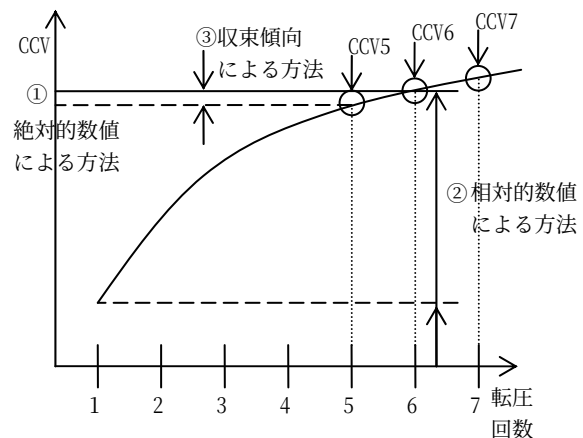


図-8 CCV規定値設定方法

表-5 CCV規定値

|        | 前進    | 後進    |
|--------|-------|-------|
| CCV規定値 | 7.465 | 5.788 |

管理ブロックは10m×10m

前進の値=図-8中(CCV5+CCV7)/2

後進の値=図-8中 CCV6

分な地盤剛性が得られていないブロックを締固め完了と誤判断する可能性がある。その一方で、①では締固めが進んだ後でもCCVが規定値に達しない可能性がある。ここでは、品質管理の安全性を考え、①の手法を採用することとした。

また、(2)で述べたように、CCVはローラの前後進によって異なる傾向を示す。したがって、実運用においてはローラの前後進を考慮したCCV規定値を設定する必要がある。

①による手法をモデル施工結果に適用してCCV規定値を求めると表-5に示す結果が得られた。当該材料の規定転圧回数である6回転圧時はローラ後進時であり、その時のCCV平均値は10m×10mの管理ブロック内で5.788である。一方、6回転圧時は後



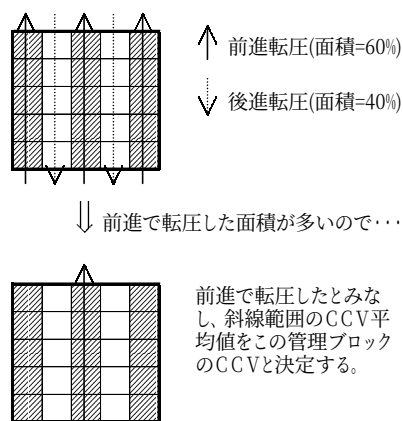


図-9 管理ブロック内転圧方向・C C V決定基準

進データであることから、5回転圧時と7回転圧時の平均値を前進時のC C V規定値とする。この時、前進時のC C V平均値は10m×10mの管理ブロック内で7.465である。

### (5)品質管理例

実施工においては、管理ブロック(10m×10m)内のローラ進行方向は一定ではない。そこで、以下に示す方法により、転圧完了判定を行っている。図-9を例にとると、この管理ブロックでは、前進で転圧された面積(60%)が後進のそれ(40%)を上回っているため、前進で転圧されたと見なしている。次に、斜線で示した範囲で計測されたC C Vの平均値を求め、これを当管理ブロックのC C Vとしている。こうして求められたC C Vをモデル施工から得られるC C V規定値と比較して転圧完了判定を行っている。

現在行っている試験運用について、表-5のC C V規定値を用いて品質管理を行った事例を図-10に示す。初回転圧時では転圧完了となるブロックは少ないが、規定(6回)転圧完了時ではほとんどのブロックにおいて転圧完了となっている。また、規定転圧完了時に行った原位置試験(R I 計器による土の密度試験JHS106-1992)の結果では、締固め度Dc=92%に対して、95.2%といった結果となっており、C C V規定値による品質管理が有効であると言える。

## 5. おわりに

筆者らは、盛土の品質管理のさらなる高度化に向け、C C Vはもとよりこれまで開発してきたGPS転圧管理機能とも組み合わせた品質管理手法について検討してきた。

本論文は、その具体的な品質管理フローの流れを提案し、その中核に位置付けているC C Vによる品質管理について、特にC C Vの特性面からの検討を加えた。その結果、C C Vをはじめとする地盤応答値の利用により、大規模土工事における盛土の品質管理は従来の原位置試験結果と同様に運用できることが判った。また、GPSの併用により、従来では不可能であった面的でリアルタイムな品質管理を実

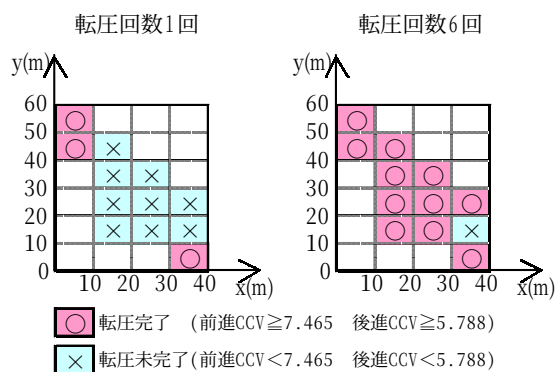


図-10 試験運用における品質管理の一例

現することができ、従来以上の品質管理を行うことができる手法であることも検証できた。

今後は、試験運用を通して得られたデータをもとに、C C Vによる盛土の品質管理手法を確立する所存である。

### 参考文献

- 1) 伊東晋, 山地斉, 小池豊久, 坂川正行, 浅野浩幸: GPS締固め管理システムの開発, 第34回地盤工学研究発表会NO.925, 1999.
- 2) 緒方健治, 益村公人, 大西崇士, 黒台昌弘: 盛土の自動締固め管理システム, 第35回地盤工学研究発表会NO.212, 2000.
- 3) 斎藤重明, 木村哲, 杉村正次, 堀場夏峰, 斎藤潤: GPSを用いた造成工事支援システムの開発, 土木学会第56回年次学術講演会VI-139, 2001.
- 4) 皿海章雄, 片寄学, 竹野毅, 森下裕史: GPSとジャイロを用いた締固め管理システム, 土木学会第56回年次学術講演会VI-151, 2001.
- 5) 高倉敏, 横田聖哉, 益村公人, 西尾貴至, 黒台昌弘: 地盤応答値による盛土締固め管理の実用化に向けての検討, 第37回地盤工学研究発表会NO.80, 2002.
- 6) 横田聖哉, 吉田武男, 藤井弘章, 内山恵一: 振動ローラの加速度を利用した締固め管理の検討, 第37回地盤工学研究発表会NO.664, 2002.
- 7) 横田聖哉, 益村公人, 藤山哲雄, 石黒健: 道路路床の施工管理の合理化に関する考察, 第37回地盤工学研究発表会NO.672, 2002.
- 8) 古屋弘, 内山裕史, 有村正広, 清末克弘: 大規模造成現場における加速度センサーとGPSを用いた施工管理システムの適用, 土木学会第57回年次学術講演会III-807, 2002.
- 9) 緒方健治, 益村公人, 大西崇士, 黒台昌弘: 地盤応答特性を用いた締固め度の評価方法およびR I との相関について, 土木学会第56回年次学術講演会VI-134, 2001.
- 10) 緒方健治, 益村公人, 大西崇士, 黒台昌弘: 自動締固め管理システムを用いた盛土品質管理における地盤反力値の適用検討, 地盤工学会第36回地盤工学研究発表会NO.717, 2001.
- 11) テラメカニックス研究会: 転圧ローラ工学, pp.169-170, 1999.
- 12) 裳華房: 統計学入門, pp.40, 1992.