

## セメント改良土の室内試験における衝撃加速度とCBRの関係について

久慈 直之 畠山 乃 佐藤 厚子

### 1. はじめに

建設工事において発生した不良土は、自然含水状態では盛土等に使用することができなく、水分の管理を行う曝気乾燥、異なる粒度を加える粒度調整、セメント等の固化材を使用した安定処理等の不良土対策を講じて再利用する事が多くなっている。中でも、固化材を使用した不良土対策は北海道開発局においては「北海道における不良土対策マニュアル」<sup>1)</sup>（以降、不良土マニュアル）により実施され、道路盛土等へ利用されている。品質管理方法についても不良土マニュアルで、衝撃加速度を用いた方法が確立されている。しかしながら、施工方法や目標値の設定等の品質管理方法は路体盛土を対象としており、路床を対象としてはいない。そこで、目標値の設定条件や衝撃加速度を用いた品質管理方法について、路体と同様に路床においても適用できれば、路体部と一貫した品質管理が出来ると考えた。本研究では、路床の評価項目であるCBR試験と衝撃加速度の関係を確認するため、セメント改良した路床土で室内試験を実施し、衝撃加速度を用いた品質管理方法の検討を行った。

### 2. 衝撃加速度を用いた固化材改良盛土における品質管理方法について<sup>1)</sup>

不良土を固化材により改良し盛土を施工する場合の品質管理基準の設定手順としては、目標強度を設定し、固化材の種類及び目標強度を満足する固化材配合率を決定する。具体的には、固化材を3~4種類、配合率を3~4種類選定し、施工性について確認するトラフィカビリティ試験と目標強度を確認する一軸圧縮試験を実施し、どちらの試験も満足する固化材及び配合率を決定する。決定した配合率が目標強度を基準とした場合、品質管理方法は衝撃加速度によることとなっている。

衝撃加速度による品質管理方法は、以下のとおりである。まず、目標強度となる一軸圧縮強さを満足する固化材とその配合率を参考にして4種類の配合率を設

定する。15cmモールドで2.5kgランマーを用いて1層あたり55回、3層締固めて、衝撃加速度試験用の供試体を作成する。また、これらと同じ配合、同じ密度で一軸圧縮試験用の供試体を作成する。それぞれ同じ条件で7日間養生し、各供試体で衝撃加速度（写真-1）、一軸圧縮強さを求める。一軸圧縮強さと衝撃加速度の関係を求め、目標となる一軸圧縮強さに対応する衝撃加速度を施工現場での品質管理基準値とする（図-1）。



写真-1 室内における衝撃加速度試験

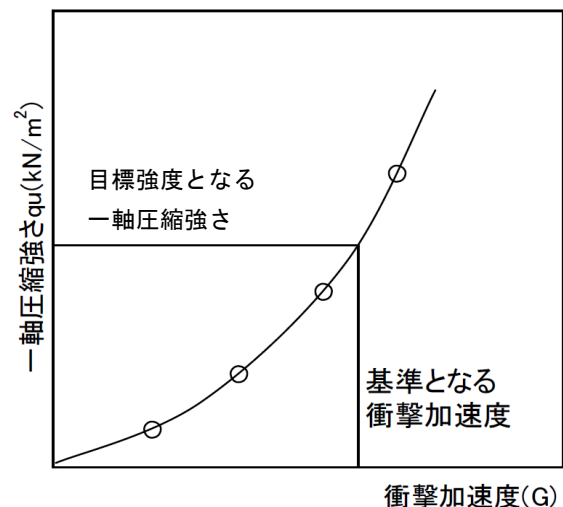


図-1 基準となる衝撃加速度<sup>2)</sup>

### 3. 試験方法

#### 3. 1 使用材料

本試験に使用した不良土試料は、北海道内で実際に不良土改良工事において、セメント改良を実施し盛土工事に利用されたものである。試料の基本物性値を表-1に示す。細粒分を多く含み、自然含水状態でのトラフィカビリティー試験によるコーン指数が300kN/m<sup>2</sup>以下であり、湿地ブルドーザーの走行が困難な軟弱な材料である。

#### 3. 2 試験内容

不良土マニュアルにおける固化材改良の衝撃加速度を用いた品質管理方法は、衝撃加速度から盛土の一軸圧縮強さを推定する方法である。しかし、路床においては一軸圧縮強さでの評価ではなく、舗装を支えるための支持力による評価であるため、一軸圧縮試験の他にCBR試験による支持力の評価を考える必要がある。また、北海道開発局の道路設計要領によれば、設計期間が20年の場合は、融解期における路床の支持力低下を考慮して舗装の設計が行われており、支持力低下は、路床の凍上に左右されると言われていることから、凍結融解後の設計CBR試験を実施することとなっている<sup>3)</sup>。そこで、今回は、室内衝撃加速度試験、一軸圧縮試験、設計CBR試験、凍結融解後の設計CBR試験、凍上試験を実施した(表-2)。また、セメント及びセ

メント系固化材を土と混合する改良土は環境上の条件を満たすこととなっているため、六価クロム溶出試験を実施した<sup>5)6)</sup>。それぞれの供試体作成方法については、固化材改良を行った盛土の品質管理方法と同様に衝撃加速度を用いた品質管理を目的とし、衝撃加速度との関係性を確認するため、衝撃加速度試験用の供試体の作成方法に統一した。設計CBR試験、凍結融解後のCBR試験(凍上試験含む)、衝撃加速度試験は15cmモールド用い、2.5kgのランマーで55回3層の締固めを行い作成した。また一軸圧縮試験用の供試体は、衝撃加速度試験用の供試体と同じ密度になるように静的締固めにより作成した。養生日数については、CBR試験で一般的な養生日数である3日空气中養生後に、4日水浸養生する方法とした(以降、水浸養生)。ただし、不良土マニュアルによる品質管理試験の養生方法である7日空气中養生も実施した(以降、気中養生)。固化材による配合については、実際の現場で用いた高炉B種セメント用い、現場での配合実績を勘案し、配合量として83kg/m<sup>3</sup>、213kg/m<sup>3</sup>、296kg/m<sup>3</sup>、379kg/m<sup>3</sup>(配合率は、高炉B種セメントの原土質量に対する6%、15%、21%、27%)の4種類で行った。

### 4. 試験結果及び考察

試験対象となる試料について4種類の配合量(83kg/m<sup>3</sup>、213kg/m<sup>3</sup>、296kg/m<sup>3</sup>、379kg/m<sup>3</sup>)でセメント配

表-1 基本物性値

試料名	自然含水比 w <sub>n</sub> (%)	土粒子の密度 ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	粒度特性			コンシステンシー限界		地盤材料の分類記号
			2mm以上(%)	2mm~75μm(%)	75μm以下(%)	液性限界w <sub>L</sub> (%)	塑性限界w <sub>p</sub> (%)	
不良土(原土)	60.07	2.550	0.6	41.8	57.6	70.52	44.98	SF

表-2 試験項目

試験項目	準拠した基準	供試体作成方法	養生方法
設計CBR試験	JIS A 1211	モールド径: 15cm ランマー: 2.5kg 締固め: 55回3層	気中3日、水浸4日
衝撃加速度試験	北海道開発局道路河川仕様書 <sup>2)</sup>		気中7日
			気中3日、水浸4日
凍結融解のCBR試験	NEXCO試験法 112 <sup>4)</sup>		気中7日
			気中3日、水浸4日
凍上試験	NEXCO試験法 112 <sup>4)</sup>		気中7日
		気中3日、水浸4日	
一軸圧縮試験	JIS A 1216	モールド: 5cm×10cm 静的締固め	気中3日、水浸4日 気中7日
六価クロム溶出試験	JIS K 0102 65.2.1	—	気中3日、水浸4日

合し、各種試験毎の供試体を作成し、所定の方法による養生後に各試験を実施した。試験結果を以下に示す。

セメント配合量と一軸圧縮強さの関係（図-2）より、セメント配合量の増加と共に一軸圧縮強さの増加が確認できた。また、気中養生と水浸養生の違いとして、水浸養生による強度低下が確認できた。

セメント配合量と設計CBR値（図-3）より、セメント配合量の増加と共にCBR値の増加が確認できた。ただし、水浸養生を行った凍結融解後のCBR試験では、どの配合においてもCBR値が低く1%程度で推移している。これは、以降に述べるが、水浸養生後の凍上試験で、いずれの配合においても凍上したため、供試体自体が緩くなり凍結融解後のCBR値に影響を与えたと考えられる。また、気中養生と水浸養生の違いについては、配合量の増加と共に、水浸養生の方がCBR値は大きくなった。これは、水浸することでセメントの強度増加に繋がったのではないかと考える。一軸圧縮試験用の供試体は、CBR試験用の供試体と違い、脱型して水浸し、また供試体の直径も小さいため、セメントの強度増加よりも含水の増加による強度低下が上回ったのではないかと推測する。

セメント配合量と衝撃加速度の関係（図-4）より、セメント配合量の増加と共に衝撃加速度の増加が確認できた。また、気中養生と水浸養生において、CBR値と同様に水浸養生の方が若干ではあるが大きな値となった。これは、試験に用いた供試体をCBR試験と同様な作成方法で作ったため、CBR値と同じ傾向が得られたものと推測する。

セメント配合量と凍結膨張率の関係を図-5に示す。NEXCO試験方法の「凍上性判定のための土の凍上試験方法」<sup>4)</sup>に基づき膨張率を求めた。なお、気中養生での凍上試験とは、凍結過程前の飽和度を上げるための吸水膨張試験を行わずに凍上試験を実施した結果である。水浸養生を実施したものは、セメント配合量が増加するに伴い僅かではあるが凍結膨張率は低くなっている。しかし、判定の目安である5%を大きく上回っており、凍結様式においても霜降状凍結か霜柱状凍結の判定で、凍上試験の結果としては不合格の判定となった（表-3、4）。また、比較検討のために実施した気中養生における凍上試験については、凍結膨張率がいずれも5%未満、凍結様式がコンクリート状凍結となり凍上試験の結果としては、合格となった。

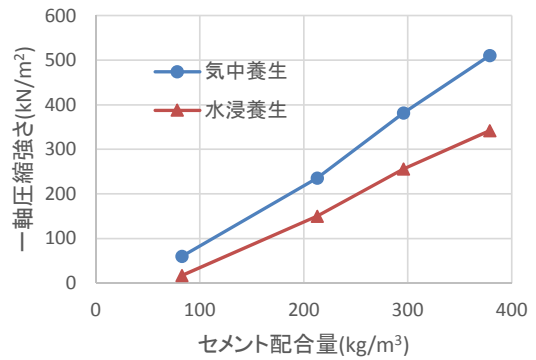


図-2 セメント配合量と一軸圧縮強さ

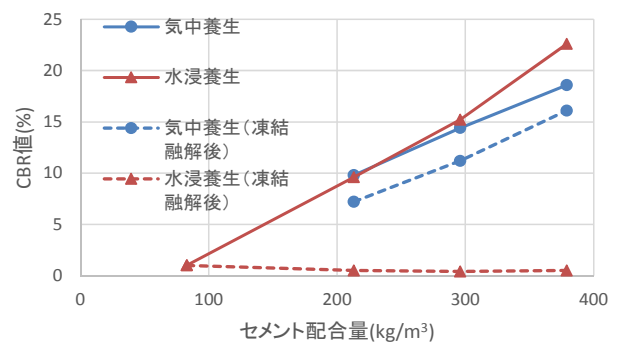


図-3 セメント配合量とCBR

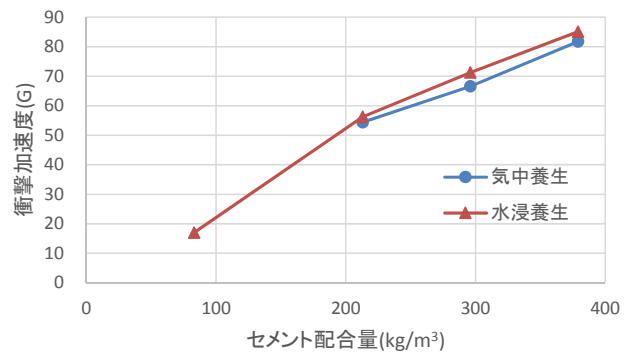


図-4 セメント配合量と衝撃加速度

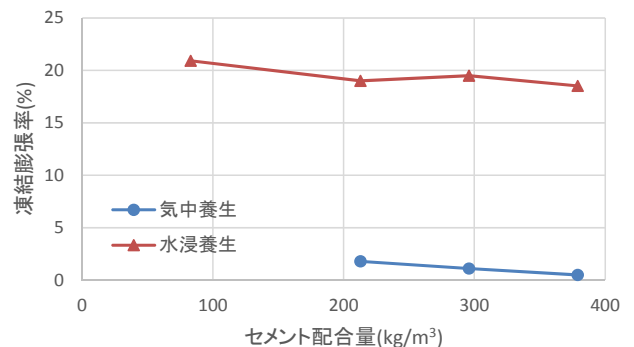


図-5 セメント配合量と凍結膨張率

表-3 凍結様式

配合量	凍結様式	
	水浸養生	気中養生
83kg/m <sup>3</sup>	5	—
213kg/m <sup>3</sup>	4	1
296kg/m <sup>3</sup>	4	1
379kg/m <sup>3</sup>	4	1

一軸圧縮強さと凍結膨張率の関係を図-6に示す。水浸養生、気中養生共に、一軸圧縮強さが増加すれば凍結膨張率が低くなる傾向がある。水浸養生においてはセメント配合量を増加させれば、凍結膨張が5%を下回るに必要な強度が得られると考えられるが、今回の結果からは推定は出来なかった。

一軸圧縮強さとCBR値の関係を図-7に示す。水浸養生、気中養生共に、一軸圧縮強さが増加すれば支持力であるCBR値も増加することがわかる。また、設計CBR試験と一軸圧縮試験に使用した供試体は、密度が同じでも大きさが違うため、前述のとおり、水浸養生が供試体に及ぼす影響の違いで、水浸養生の方が気中養生に比べ、一軸圧縮強さが小さくなる傾向となった。

衝撃加速度とCBR値の関係を図-8に示す。水浸養生、気中養生共に衝撃加速度が大きくなればCBR値も大きくなる傾向となった。また、気中養生と水浸養生における衝撃加速度とCBRの関係とは同じである

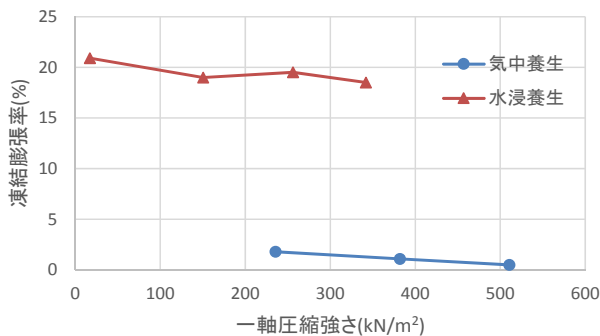


図-6 一軸圧縮強さと凍結膨張率

表-4 凍結様式及び凍上性の判定<sup>4)</sup>

番号	凍結様式	凍結形態	説明
1	コンクリート状凍結		[ 氷晶がまったく認められない ] 水の結晶が土の中に無数に、かつ一様に混入して固まっているように見える。
2	微細霜降状を含むコンクリート状凍結		[ 一部に氷晶が細かく入っている ] 土の中に氷の結晶が無数に分布し、その中に土から水が分離し出した小さい氷層として一部混在している。
3	微細霜降状凍結		[ 氷晶が非常に細かく、切れぎれに入っている ] 粒状の水の結晶として、土の中に分布している。
4	霜降状凍結		[ 1~2mm厚程度の氷晶が無数に入っている ] 1~2mm厚程度で、おおむね水平方向に氷晶が入っているものが多く氷晶はほとんど透明な水の層で壊すと貝殻状に壊れる傾向をもっている。
5	霜柱状凍結		[ 純霜柱が発達したもの ] 地表における霜柱と同様のものが土中に発達したもので、地下水等の供給を受け、大きな凍上量を示す。

番号	凍結様式	凍結膨張率	判定
1	コンクリート状凍結 (氷粒散を含む)	5%未満	合格
		5%以上	要注意 <sup>a)</sup>
2	微細霜降状を含む コンクリート状凍結	5%未満	要注意 <sup>a)</sup>
		5%以上	不合格
3	微細霜降状凍結	凍結膨張率の大きさに関係なく	不合格
4	霜降状凍結		
5	霜柱状凍結		

注 a) 要注意なもの、わずかの凍上も許せない場合には使用してはならない。構造物の性質によって多少の凍上を許すことのできるものは、土質試験結果、地下水の状態等を考慮し、技術者が判断して号種を決定する。

と言える。これは、試験に使用した供試体の作成方法と大きさが同じであり、同じ条件で試験を実施できたからと言える。また、供試体の含水状態に関わらず衝撃加速度とCBR値には同じ関係があることがわかる。これは、室内試験結果及び1試料での検証ではあるが、

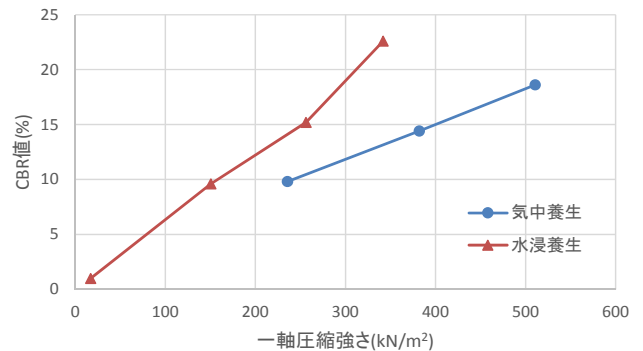


図-7 一軸圧縮強さとCBR

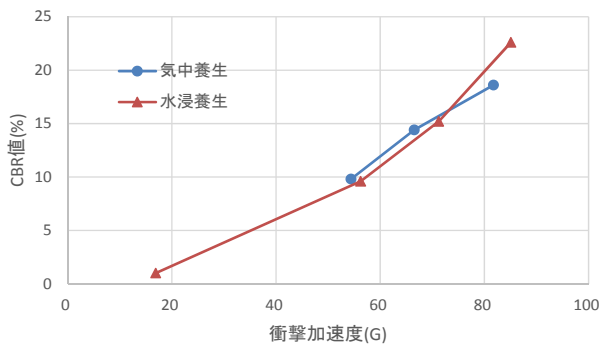


図-8 衝撃加速度とCBR

衝撃加速度でCBR値を推定できる事が示唆された。

六価クロム溶出試験について、213kg/m<sup>3</sup>、296kg/m<sup>3</sup>、379kg/m<sup>3</sup>配合時の一軸圧縮試験に使用した供試体でそれぞれ1本ずつ溶出試験を実施した。結果は、どの配合量においても基準値(0.05mg/l)以下であることがわかった(表-5)。

表-5 六価クロム溶出試験

対象物質名：六価クロム(mg/l)		
高炉セメントB種 配合量:213kg/m <sup>3</sup> (気中3日-水浸4日)	高炉セメントB種 配合量:296kg/m <sup>3</sup> (気中3日-水浸4日)	高炉セメントB種 配合量:379kg/m <sup>3</sup> (気中3日-水浸4日)
0.011	0.028	0.017

## 5. まとめ

不良土対策の一つである固化材を利用した安定処理について、不良土マニュアルにおける衝撃加速度を用いた品質管理方法の対象は路体盛土となっている。本研究では、路床における品質管理方法を検討するためにいくつかの室内試験を実施したところ、以下の事がわかった。

- ・一軸圧縮試験強さは、セメント配合量の増加と共に大きくなり、気中養生と比べ水浸養生することで強度低下する。
- ・CBR値は、セメント配合量の増加と共に大きくなり、気中養生と比べ水浸養生の方が大きくなった。しかし水浸養生を行った凍結融解後のCBR値は大きな低下が見られた。
- ・衝撃加速度は、セメント配合量の増加と共に大きくなり、CBR値と同様に気中養生と比べ水浸養生の方が若干ではあるが大きな値となった。
- ・凍上試験については、水浸養生を実施したものは、セメント配合量が増加するに伴い僅かではあるが

凍結膨張率は低くなっているが、凍上試験の結果としては不合格の判定となった。水浸養生において、セメント配合量を増加させれば、凍結膨張が5%を下回るに必要な強度が得られると考えられるが、今回の結果からは推定はできなかった。

- ・一軸圧縮強さが増加すれば支持力であるCBR値も増加した。しかし、同じCBR値の時、一軸圧縮強さは水浸養生の方が気中養生と比べ、小さくなる傾向となった。
- ・供試体の含水状態に関わらず、衝撃加速度が大きくなればCBR値も大きくなった。
- ・六価クロム溶出試験について、今回行った配合量においては基準値である0.05mg/l以下であることがわかった。

## 6. 今後に向けての課題

舗装設計における路床の評価は、一軸圧縮強さではなく、舗装を支えるための支持力による評価であるため、衝撃加速度を用いた品質管理方法の検討には、CBRとの関係を考える必要がある。今回実施した試験結果は、室内試験ではあるが衝撃加速度とCBR値の間に一定の関係が得られた。固化材改良盛土の品質管理では一軸圧縮強さを衝撃加速度から推定し品質管理を行うものであるが、固化材により改良した路床についても衝撃加速度からCBR値を推定できることが示唆された。

しかしながら、北海道開発局の設計要領では、舗装設計時に路床土の凍結融解後の設計CBR試験を行い、路床に使用できるCBR値が2%以上と定められている。また、凍結する箇所での路床材の使用については、凍上による影響を考慮し、凍上性の無い凍上抑制層に置き換える必要があるとされている。今回実施した4種類の配合量では、凍結融解後の設計CBR値が基準以下の値となり、凍上性の判定でも4種類全てで不合格となった。このことから、実際の工事で不良土対策として固化材改良した路床の施工を検討する場合には、凍上性を考慮すると費用が高くなる場合もあるため、経済性を考えつつ、配合量の決定を行う必要がある。

今回は、室内試験における設計CBR値と衝撃加速度の関係性を確認するために各種試験を実施したが、今後は室内試験で求めた衝撃加速度とCBR値の関係を、現場CBR値においても再現できるかを検証する必要がある。現場におけるCBR値を衝撃加速度で推定することが出来れば、固化材改良盛土と同様に衝撃加速

度を用いた品質管理を固化材改良路床においても実施可能と考える。

#### 参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：北海道における不良土対策マニュアル、平成25年4月
- 2) 国土交通省北海道開発局：道路河川工事仕様書（平成30年度版）
- 3) 国土交通省北海道開発局：道路設計要領（平成30年度版）
- 4) 東日本高速道路：NEXCO試験方法、平成28年8月
- 5) 環境省：環境庁告示第46号、平成3年8月23日
- 6) 国土交通省：セメント及びセメント系固化材を使用した改良土の六価クロム溶出試験実施要領（案）、平成13年4月



久慈 直之  
KUJI Naoyuki

寒地土木研究所  
技術開発調整監付  
寒地機械技術チーム  
（前 寒地基礎技術研究グループ  
寒地地盤チーム）  
研究員



畠山 乃  
HATAKEYAMA Osamu

寒地土木研究所  
寒地基礎技術研究グループ  
寒地地盤チーム  
上席研究員



佐藤 厚子  
SATO Atsuko

寒地土木研究所  
寒地基礎技術研究グループ  
寒地地盤チーム  
主任研究員  
博士（工学）  
技術士（建設・総合技術監理）  
APECエンジニア（Civil）