

平成22年度

河川堤防に用いる高含水比粘性土の 石灰安定処理について

札幌開発建設部 千歳川河川事務所

○楠美 嘉和
高村 章
若林 英樹

千歳川流域の堤体材料となる遊水地内掘削土は、掘削直後では高含水比で施工性が得られず曝気を行っている。更に、曝気効果が期待できない、より高含水比な粘性土も発生する見込みで、通常、盛土材料とするとき、石灰やセメントによる安定処理を行う。しかし、安定処理土を堤体材料とするとき、固化の進行や乾燥によってクラックが発生することや、浸透した水がアルカリ性になって溶出することが課題になる場合がある。ここでは改良材に石灰を用い、カルシウムの存在状態を把握することで、これらの課題に対応できないか検討を行ったので報告する。

キーワード：粘性土、高含水比、石灰安定処理、曝気

1. はじめに

(1) 千歳川流域の概要

千歳川流域は、広大な低平地が広がっているため、洪水時に石狩川本川の高い水位の影響を受ける。更に、透水性の高い火山灰や、強度的に軟弱な泥炭や粘性土等が広く分布する地盤のため、洪水時には堤防の決壊などが起きる危険性がより高い地域でもある。これらの地形や地質条件を踏まえて、千歳川河川整備計画では、洪水を安全に流下させることを目的に、堤防整備と河道掘削に加え、千歳川遊水地群を6地区に分散して整備を行う¹⁾。

昨年度は長沼町嶮淵右岸地区遊水地の整備に着手し、今年度から恵庭市北島地区遊水地の整備に着手したところである(図-1)。

(2) 経緯

千歳川の河川堤防や遊水地の周囲堤整備に必要な盛土材料は、運搬距離が短く経済的に有利な、遊水地内の掘削に伴い発生する土砂を流用することとしている²⁾³⁾⁴⁾。

先行している嶮淵右岸地区及び北島地区遊水地の掘削土のほとんどは、河川堤防の盛土材料に適した粘性土である。しかし、地下水位が高いため高含水比となっており、施工性の指標となるコーン指数(qc)が小さく、掘削後すぐに河川堤防として盛土材料に流用することは困難な状況である。

含水比を低下させることで施工性を確保するため、掘削土を一年間仮置土し(厚さ1.0~1.5m程度)曝気を行ったところ、表面で乾燥の効果は得られたが、全体的には思ったほど効果は得られなかった。そのため、石狩川本川の掘削により発生する砂質土と混合することで施工性



図-1 位置図

を確保し、河川堤防の盛土材料として使用している。

しかしながら、工事が本格化する中で、施工性を確保するための砂質土の確保が困難になっており、購入せざるを得ない状況も考えられることから、より安価で効果的に施工性を確保する方法の検討が必要となっている。

2. 盛土材料の安定処理工法について

(1) 安定処理工法の選定

曝気のみで施工性が得られない粘性土を盛土材料とするとき、通常は、施工性を確保するために安定処理を行なう²⁾。安定処理に用いる固化材は、石灰、セメント、石灰系固化材、セメント系固化材と種類が多く、通常は土質に応じて複数の固化材を選定し、添加量と単価による経済比較を行う⁵⁾。

今回は、文献や既往資料による以下の理由から、固化材に生石灰を選定している。

・セメント、セメント系固化材、石灰系固化材（セメントが含まれるもの）による安定処理土では、六価クロムの溶出が認められる場合があり、河川環境への影響が懸念される⁶⁾。

・石灰による安定処理土は、仮置きした後、運搬、破砕し再度締固めても再固化する⁷⁾⁸⁾。

・石灰は主に生石灰と消石灰があり、生石灰は、消化吸水反応による初期含水比の低下効果が期待できる⁷⁾⁸⁾。

(2) 生石灰を用いる際の配慮事項

生石灰による安定処理土を河川堤防の盛土材料とする場合、土質、混合率、混合方法によっては河川堤防の表面に乾燥収縮によるクラックが発生し漏水の危険性を助長すること、また、浸透水によって堤防盛土内からアルカリ性溶出水が流出し周辺環境へ影響を及ぼすことが懸念される。

クラックの発生に対しては、盛土材料を用いた室内試験によって基礎的な検討を事前に行う必要がある²⁾⁹⁾。また、盛土時に石灰を添加するよりは、仮置時に石灰を添加して、十分な反応時間を確保することで強度増加が進み、影響を低減できると考えられる。

アルカリ性溶出水は、石灰の水和反応により生成される水酸化カルシウム (Ca(OH)_2) に起因するものである。しかし、アルカリ性溶出水は、炭酸ガスで容易に中和され、周囲の土壌中を30cm程度通過することで土に吸着され、周辺に影響を与えることはほとんど無い⁹⁾。従って、河川堤防の盛土材料に用いる場合は、堤防法面に中性～酸性の土砂を覆土することで、影響を低減できると考えられる。

3. 指標と試験項目

(1) 石灰安定処理の反応過程

土と生石灰の反応過程⁷⁾ (図-2) から、イオン交換反応で長期の強度増加条件が整えられ、ポズラン反応で長期の強度増加効果が発現すると考えられる。

イオン交換反応では、土中で生成された Ca(OH)_2 が土中水に溶解し、カルシウム (Ca^{2+}) イオンが土粒子表面に付着している正イオン (例えば H^+ 、 Na^+) と交換する

ことで、 Ca^{2+} が土粒子に吸着し、土粒子が凝集化 (団粒化) する。この過程で、土粒子周辺で余った水酸化物イオン $[\text{OH}]$ 量が多くなるとアルカリ性となる。

ポズラン反応では、アルカリ性の状態で、土粒子の主成分であるケイ酸塩 (SiO^4)¹⁰⁾ 等が溶け出し、比較的長期にわたって、土粒子近傍の Ca^{2+} と共にカルシウム化合物を生成する。更に、炭酸化反応では、炭酸ガスと結合して、炭酸カルシウム (CaCO_3) となる。

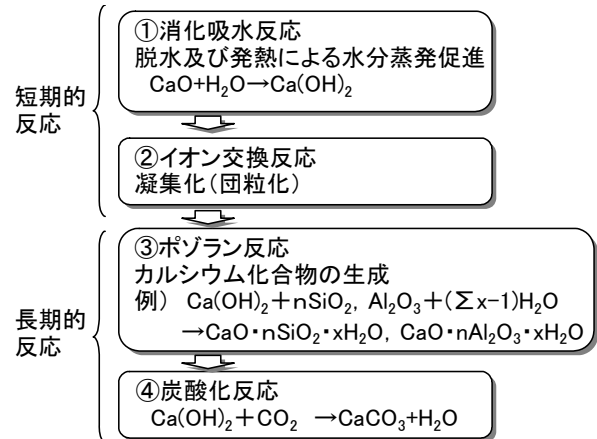


図-2 土と生石灰の反応過程模式図

(2) 指標の設定

ポズラン反応などの長期的反応に対し、通常の盛土工事では工期や費用等の制限があり、幾つかの反応過程の途中で施工せざるを得ないのが実情である。

反応過程の途中で盛土を行うので、盛土後の強度増加により、沈下や変形に追従できずクラックが発生するという懸念や、反応途中の Ca(OH)_2 の水溶により、アルカリ性溶出水が発生するという懸念は、石灰添加量、即ち Ca^{2+} 量と深く関係がある。

従って、 Ca^{2+} 量を指標とし、土の強度の指標であるコーン指数 (q_c 締固めた土のコーン指数試験 JIS A 1228 による) が 400kN/m^2 ⁹⁾となるような、適切な添加量を設定することで、これらの懸念が起きないようにすることが可能になると考えた。

(3) 室内土質試験と溶出カルシウム量

試料は、嶮淵右岸地区及び北島地区遊水地の高含水比粘性土を用いた。安定処理の検討に先駆け、置土について曝気の経過を確認している。曝気の状態は、夏期を含む期間で、月に2回程度、含水比と q_c の試験を行っている。表面から深さ約30cm程度までは、曝気乾燥の効果が得られているため、それより深い30～60cmで試料採取している。

生石灰添加量は、過去の添加量の実績等を踏まえ、 30kg/m^3 ⁷⁾を初期値として試験を開始した。生石灰添加量と添加 Ca^{2+} 量との関係は、原子量より、(1)式で求められる。純度がほぼ100%の生石灰であれば、生石灰添加

量 30kg/m^3 が、添加 Ca^{2+} 量 21.4kg/m^3 となる。

$$\text{添加}\text{Ca}^{2+}\text{量}(\text{kg/m}^3) = 40 / 56 \times \text{生石灰添加量}(\text{kg/m}^3) \quad (1)$$

今回の試験では、嶮淵右岸地区粘性土は生石灰添加量10、 30kg/m^3 、北島地区粘性土は生石灰添加量10、30、 50kg/m^3 とした。その材令は1、7、28日とした。

試験内容(表-1)は、室内土質試験、溶出カルシウム量(溶出 Ca^{2+} 量)とした。

また、生石灰 30kg/m^3 を添加した安定処理土による盛土事例が有り、盛土後約1年を経過した試料が得られたので、同様に上記の試験を行った。

表-1 試験内容一覧表

試験分類	規格番号	規格名(試験方法)
室内土質試験	JIS A 1202	土粒子の密度試験方法
	JIS A 1203	土粒子の含水比試験方法
	JIS A 1204	土の粒度試験方法
	JIS A 1205	土の液性限界・塑性限界試験方法
	JIS A 1210	突固めによる土の締固め試験方法
	JIS A 1228	締固めた土のコーン指数試験方法
	JIS A 1218	土の透水試験方法
化学試験	JGS 0211	土懸濁液pH試験方法
	-	(乾燥方法は土粒子の含水比試験方法に準じる)
化学分析	JGS 0241-2009	フレーム原子吸光法
	JIS K0102 50.2	

(4) クラックの観察とアルカリ性溶出水の試験

クラックの観察は、室内で現場の気象条件を再現することが困難なことから、室内土質試験の範囲内で簡易に実施可能な方法とした。試験手順は、内径 85mm 深さ 39mm のシャーレに、試料を締め固めをしない様に隙間無く入れ、表面は亀裂やへこみ等が確認できない滑らかな平面とした。その後、 110°C 、24時間で完全乾燥させる間に、30分後、1時間後、2時間後、24時間後の表面を写真撮影し、クラックが有れば長さや深さを測定した。嶮淵右岸地区粘性土、北島地区粘性土、生石灰添加量 50kg/m^3 の北島地区粘性土、生石灰添加量 30kg/m^3 で施工約1年後の安定処理土の4試料を用いた。

アルカリ性溶出水の試験は、室内透水試験を実施し、これにより流出した水のpHを測定した。生石灰添加量 50kg/m^3 の北島地区粘性土、生石灰添加量 30kg/m^3 で施工約1年後の安定処理土の2試料を用いた。

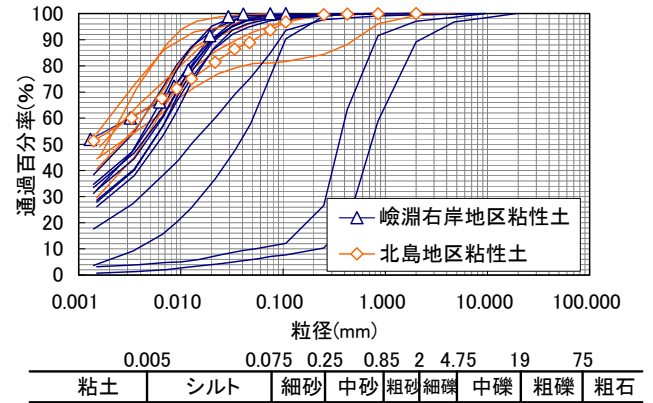
また、施工約1年後の石灰安定処理土について、試料採取時に現地の盛土表面においてクラックの発生状況を確認し、盛土材料や周辺水路のpHを測定した。

4. 試験結果と考察

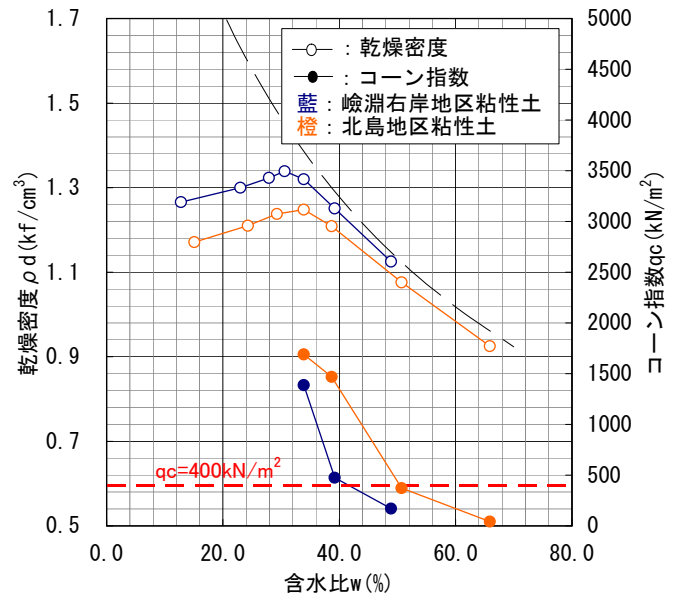
(1) 曝気の状態

嶮淵右岸地区では、粒度分布が異なる掘削土が発生しており(図-3上)、今回試験した試料を△で示す。この粘性土は、掘削直後 $qc=100\text{kN/m}^2$ 程度(図-3中)のため、置土し曝気を行っていた。その結果、約1年の曝気過程において多少 qc が上がったが、天候にも左右され、目標に達しない時期も多かった(図-3下)。

北島地区の粘性土(◇)は、粒度分布は嶮淵右岸地区と余り変わらない(図-3上)が、掘削直後 $qc=50\text{kN/m}^2$ 程度とより小さく(図-3中)、含水比はより大きかった。同じ様に置土し曝気を行ったが、約1年の曝気過程でほとんど qc が上がらなかった(図-3下)。



粒径加積曲線



乾燥密度・コーン指数-含水比

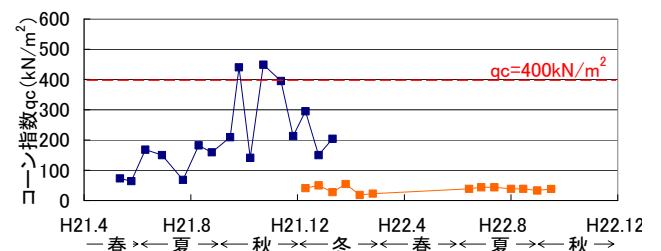
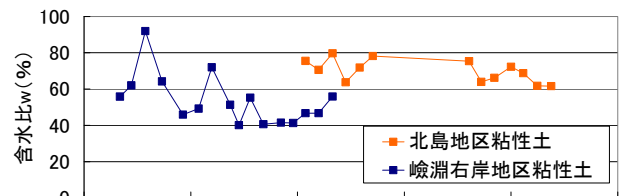


図-3 粘性土の土質と曝気の状態

掘削後1年程度の曝気では、施工性の確保が困難な粘性土があることを確認した。

(2) コーン指数とCa²⁺量の関係

溶出Ca²⁺量は、容易に石灰安定処理土から溶出するCa²⁺量である。添加Ca²⁺量と溶出Ca²⁺量の差は、何らかの反応に使われたCa²⁺量であり、「反応Ca²⁺量」とする。この反応Ca²⁺量を用いることで、材令に依存しない反応Ca²⁺量とqcの関係が得られると考えられる。

$$\text{反応Ca}^{2+}\text{量 (kg/m}^3\text{)} = \text{添加Ca}^{2+}\text{量} - \text{溶出Ca}^{2+}\text{量} \quad (2)$$

反応Ca²⁺量を、石灰安定処理の反応過程と照らし合わせると、イオン交換反応、ポゾラン反応、炭酸化反応により、容易に石灰安定処理土から溶出しなくなったCa²⁺量となる。従って、この量が最低限必要となるので、適切な量と考えることができる。

なお、試料に最初から存在するCa²⁺量も確認したが、添加Ca²⁺量に比べ、非常に少なかったので考慮しないことにした。

嶮淵右岸地区と施工約1年後の安定処理土は、反応Ca²⁺量が小さい量で400kN/m²となり、ある反応Ca²⁺量を越えた時点でqcが急に大きくなると考えられる。従って、qc=0~400kN/m²の範囲で試験値が少なくなったため、相関関係を確認できなかった。

北島地区について着目すると、qc=0~400kN/m²の範囲で反応Ca²⁺量とqcには良い相関(図-4)がある。

$$qc \text{ (kN/m}^2\text{)} = K \times \text{反応Ca}^{2+}\text{量 (kg/m}^3\text{)} + \text{初期qc} \quad (3)$$

(3) 生石灰添加量の設定方法

この関係式により、反応Ca²⁺量を求めることにした。

(3)式の左辺qc(kN/m²)を目標値400kN/m²とし、粘性土の初期qcを与えれば、適切なCa²⁺量が求まる。ここで、K=13.6(kN/m²/kg/m³)を用いることができる。

適正なCa²⁺量は求まれば、(1)式により生石灰添加量を求めることができる。

含水比等が異なる土質毎に適切なCa²⁺量を求めるときは、設定した添加量毎にコーン試験と溶出カルシウム量を試験で求め、Kを得ることが必要である。

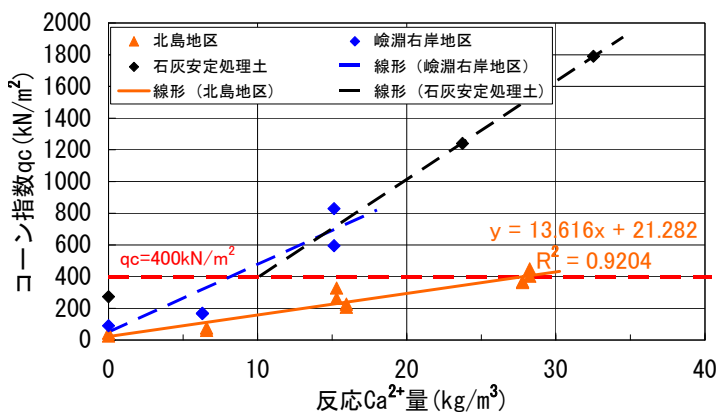


図-4 反応Ca²⁺量とqcの関係

(4) 土と石灰の反応に対するpHの影響

反応Ca²⁺量により生石灰添加量を求めたとき、その生石灰添加量によるpHを確認する必要がある。反応Ca²⁺量とqcの関係は、添加Ca²⁺量が存在している条件であり、添加Ca²⁺量が存在しないと強度増加条件が整えられないことも考えられるためである。

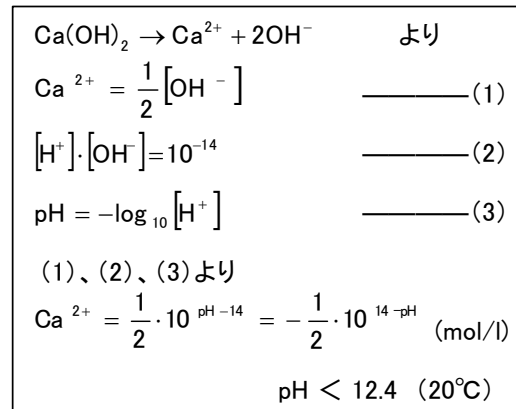


図-5 Ca²⁺量とpHの関係式

土のpHは、試料をpH=7の蒸留水に懸濁させて、測定を行なうため、水とpHの関係にも影響される。ここでは、水にCa(OH)₂が水溶するとき、他のイオンや粒子等の影響が全く無い場合の、Ca²⁺量とpHの関係式(図-5)を示す。Ca(OH)₂の溶解度は、0.165g/100mlH₂O(10°C)であり、その飽和溶液pHは、12.4(20°C)である⁸⁾。

ケイ酸塩が溶け出して安定するpHの範囲は、概ね11~12以上となっている¹¹⁾¹²⁾。Ca²⁺量とpHの関係式より、水1m³をpH=11~12程度にするCa²⁺量は0.02~0.2kg程度となる。水のみを大きくするCa²⁺量は、試料を安定処理するためのCa²⁺量に比べると非常に少ないことから、試料とCa²⁺量の関係が重要となる。

長期的な反応が起きていない添加直後の材令1日で、生石灰1、2、5kg/m³と少量添加した試料のpH試験を追加し、Ca²⁺量とpHの関係(図-6)を得た。

この結果より、試料のpHが11~12となるCa²⁺量は、水

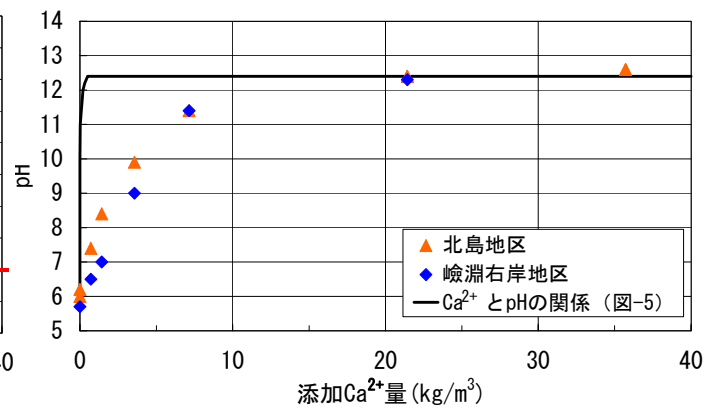


図-6 添加Ca²⁺量とpHの関係

に比べると多く必要である。嶮淵右岸地区と北島地区の粘性土とも、 $pH=11$ より大きくなる添加 Ca^{2+} 量は、 $7kg/m^3$ 程度以上となっている。この値は、 $qc=400kN/m^2$ となる反応 Ca^{2+} 量より小さいため、添加 Ca^{2+} 量が存在しなくても強度増加条件が整えられていると考えられる。

含水比等が異なる土質毎に適切な Ca^{2+} 量を求めたときは、設定した添加量毎とその前後で pH 試験を行い、 pH が $11\sim 12$ 以上であることを確認する必要がある。

(5) クラックとアルカリ性溶出水の状況

粘性土の2試料は、クラックが発生し、特に北島地区は大きく底面まで到達した。一方、石灰安定処理土の2試料は、全体的に僅かに収縮したものの、クラックが観察されなかった(図-7)。このことは、文献や既往資料の一般論とは異なる結果になっており、場合によっては石灰の添加によってクラック発生の可能性をより小さくできると考えられる。

室内透水試験により、石灰安定処理土から強制的に溶出させた水は、 $pH=12$ 程度であった。しかし、透水係数は $10^5\sim 10^6m/s$ 程度であり、アルカリ性溶出水の量は僅かであったので、周辺環境に影響を与える可能性はほとんどないと考えられる。

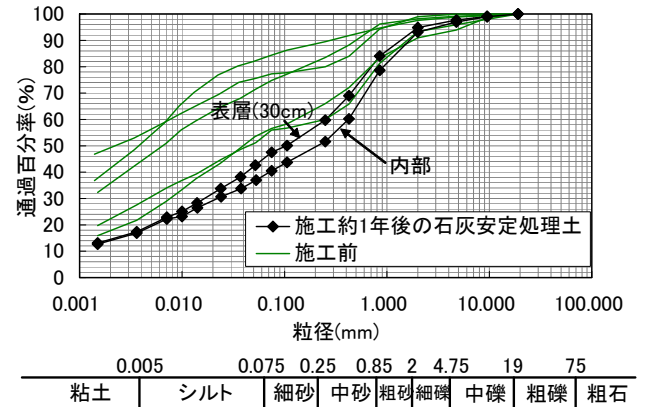
	嶮淵右岸地区 粘性土	北島地区 粘性土	北島地区 (石灰安定処理 50kg/m ³)	施工約1年後 (石灰安定処理 30kg/m ³)
乾燥前	 含水比48.6%	 含水比65.8%	 含水比60.4%	 含水比36.5%
30分後	 クラック発生	 大クラック発生	 変化無し	 変化無し
1時間後	 クラック発達 外周が収縮剥離	 大クラック発達 外周が収縮剥離	 変化無し	 変化無し
2時間後	 クラックは発達無し 収縮剥離は発達	 クラック・収縮剥離 が発達	 全体的に収縮	 全体的に収縮
24時間後	 クラックは底面まで達しない 外周はほとんど収縮剥離	 クラックが底面まで達する 外周はほとんど収縮剥離	 クラック無し 2時間後より収縮している	 クラック無し 2時間後より収縮している

シャーレφ85mm、H39mm

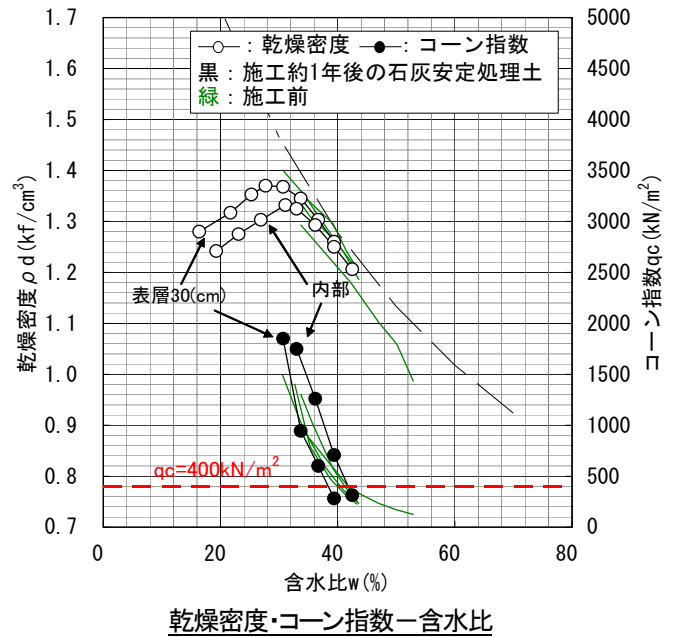
図-7 クラック発生の状況

(6) 石灰安定処理土による盛土の状況

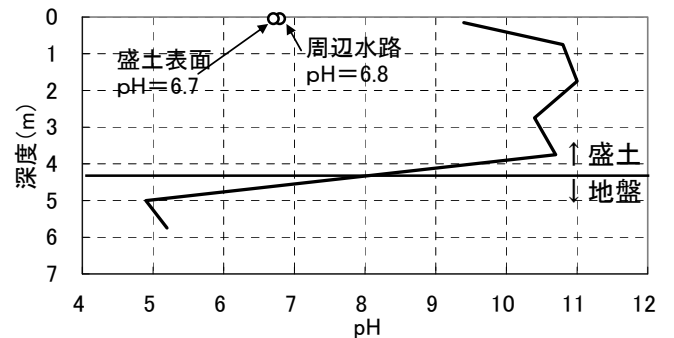
室内土質試験より、生石灰添加量 $30kg/m^3$ で施工約1年後の安定処理土の土質が把握できた。石灰安定処理によって粒度分布は変化しており、多少粗粒側となっている傾向にある(図-8上)。石灰安定処理によって qc は、含水比が小さくなるにつれ、より qc が大きくなる傾向がある(図-8中)。表面は、試料採取時の植生が無い状



粒径加積曲線



乾燥密度・コーン指数-含水比



pHの深度分布

図-8 石灰処理土の土質

態で確認した結果、河川堤防として懸念されるようなクラックは観察されなかった。

施工後約1年の石灰安定処理土の溶出 Ca^{2+} 量は、試験結果より 1kg/m^3 程度であった。また、材令1~28日試料の溶出 Ca^{2+} 量は、添加 Ca^{2+} 量の10~30%程度なので比較すると小さな値であった。これは、反応が十分に進むことで石灰添加量のほとんどが何らかの反応に使われ、アルカリ性溶出水となる量が少ない状態となっていると考えられる。

盛土表面のpHは、盛土内部のpHより小さく（図-8下）、降水や空気に触れ易かったためと考えられる。現在は、盛土表面に泥炭を貼付け、種子散布した結果、早期に植生が回復した（図-9）。周辺水路の水はpH=7程度であった。これらより、アルカリ性溶出水による周辺環境への影響は無かったと考えられる。



図-9 石灰安定処理土表面における泥炭張付後の種子散布状況

(7) 今後の試験施工や室内土質試験

今後は、検討結果を踏まえ、現地で試験施工を行う予定である。試験施工は、高含水比粘性土を掘削後、置土時に生石灰を散布、混合を行い、その後の経過を確認するため含水比と q_c の試験を行う。

また、発生した粘性土についての曝気効果の有無、室内土質試験等で判断することなどが必要なので、試験や検討を継続していく。

石灰安定処理には、材料費と、石灰の散布や混合するための施工費がかかる。そのため、より工事費を削減する方法を検討していきたい。例えば、曝気前の置土時に石灰を混合せず石灰散布費のみとすることや、砂質土の混合量を小さくするための補助材として石灰を用いることなどが考えられる。

5. まとめ

本報告は、室内土質試験とカルシウム分析を行った結果、曝気によって比較的長期の反応時間を確保できる条件での、最適な石灰添加量の設定方法を示した。

例えば、北島地区の粘性土初期 $q_c=25\text{kN/m}^2$ の場合、 $q_c=400\text{kN/m}^2$ となる Ca^{2+} 量は、 $(400-25)/13.6=27.6\text{kg/m}^3$ となる（13.6は q_c/Ca^{2+} 量の係数）。適切な生石灰添加量は、 $27.6 \times 56/40=38.6\text{kg/m}^3$ と設定できる。また、 Ca^{2+} 量で土懸濁液pH=11~12以上であれば、長期的な反応による施工性の確保が期待できる。

更に、安定処理土の懸念であるクラックの発生やアルカリ性溶出水に対する試験を行った結果、石灰については、堤防自体や周辺環境への影響は、非常に小さいと考えられる。

千歳川流域では、石灰安定処理費用を多少追加することにより、膨大な砂質土の入手を不要とし、土砂運搬等の施工費用を軽減させるなど総合的なコスト削減を進めながら、品質が確保された堤防整備を行なっていく。

参考文献

- 1) 国土交通省北海道開発局, 2005, 千歳川河川整備計画, 9-10, 30-38.
- 2) 財団法人 国土開発技術研究センター, 2009, 河川土工マニュアル, 68-70.
- 3) 建設省河川局監修, 社団法人 日本河川協会編, 1998, 改定新版 河川砂防技術基準(案) 同解説 設計編 [1], 山海堂, 12-13.
- 4) 社団法人 日本河川協会, 財団法人 国土開発技術研究センター編, 1978, 改定 解説・河川管理施設等構造令, 山海堂, 112-113.
- 5) 北海道開発局土木試験所 第3研究部土質研究室, 1985, 北海道における不良土対策マニュアル(案), 24-25, 33.
- 6) 社団法人 セメント協会, 2003, セメント系固化材による地盤改良マニュアル 第3版, 技報堂, 19-60.
- 7) 日本石灰協会, 2010, 石灰による地盤改良マニュアル平成22年度版, 5-28, 109-123.
- 8) 日本石灰協会 石灰安定処理委員会編, 1983, 石灰による軟弱地盤の安定処理工法, 鹿島出版会, 14-91.
- 9) 独立行政法人 土木研究所 編著, 2004, 建設発生土利用技術マニュアル 第3版, 財団法人 土木研究センター, 1-41, 68-71.
- 10) 久保亮五 長倉三郎 井口洋夫 江沢洋 編集, 1991, 岩波 理化学辞典 第4版, 岩波書店, 373.
- 11) 一般社団法人 日本化学物質安全・情報センター, OECD: HPV-SIAP 日本語訳 可溶性ケイ酸塩(Cas No.1344-09-8ケイ酸ナトリウム), <http://www.jetoc.or.jp/safe/doc/J1344-09-8.pdf>.
- 12) 西山孝 方堂毅 山田将巳 別所昌彦, 2003, シリカコーティングによる有害元素の流出防止に関する基礎的研究, 応用地質 第43巻 第6号, 390-395.