

牡蠣殻片の道路路床構築材料としての 適用性に関する基礎的研究

山田幹雄¹・谷口克也²・奥村充司³・佐野博昭⁴・宮本正規⁵

¹正会員 工博 福井工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

²正会員 北川ヒューテック株式会社技術部技術研究所 所長 (〒923-1276 石川県能美郡川北町橋ヶ1番地)

³正会員 工修 福井工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

⁴正会員 博(工) 大分工業高等専門学校教授 土木工学科 (〒870-0152 大分県大分市大字牧1666)

⁵石川県工業試験場化学食品部 副部長 (〒920-0223 石川県金沢市戸水町口1番地)

国内に点在する牡蠣養殖地では、剥き身収穫後に発生する殻の野積み量と転用量との間に不均衡を生じている所も多くみられ、そのような産地では周辺環境の保全のみならず、地場産業の振興を図る上からも殻の効率的な処理、加工策の確立が急務の課題となっている。本研究では能登半島七尾湾沿岸の養殖地を対象に、破碎した牡蠣殻を現地のアスファルト舗装の路床構築に活用することを念頭に置いて、実施工に先立つ室内試験および模擬路床の構築試験を行ったところ、殻片混入の有無は安定材を添加して締固めた有機質粘土のCBRや強度発現過程に直接関与しないこと、殻片を2割程度混入することで路床のトラフィカビリティは向上し、併せて安定処理効果も大きくなるなどの結果が得られ、これより、薄片状を呈する殻材であっても現道の路床改良工事に利用できる可能性は高いと判断した。

Key Words: oyster shell, improvement of subgrade soil, impact acceleration value, California bearing ratio, unconfined compressive strength

1. まえがき

漁業系廃棄物の1つであり、発生地が限定される養殖真牡蠣の殻は、養殖地内または近隣地域に造成した堆積場に原殻のまま野積みされるのが通例である。このため、殻に附着している藻などの腐敗臭が周囲に漂ったり、幾重にも積まれた殻の連なりが付近の景観を損ねたりしている。これを解消するには占用地の拡張や新規取得が有効な手段となるが、昨今の市街化区域の拡大にともなう用地確保難ならびに生活環境の保全の観点から容易に実現できない産地も多い。

従来、殻はそのまま暗渠被覆材として圃場整備事業に利用¹⁾したり、砕いて養殖漁場の底質改良材²⁾、養鶏飼料や農耕肥料に用いたりして処分されてきたが、これらへの転用だけでは増え続ける殻に対処しきれないことから、実効ある減量化策および再資源化策の確立が望まれていた。

国内の主要な養殖地である宮城県石巻市(生産量約1600トン/年、殻発生量約14000トン/年)では、殻の野積み累積量を減らす目的で、砕いた殻と砂との混合材料を防波堤下部および捨石部のサンドコンパクションパイ

ルの中詰材に用いた改良工事を行って破碎殻の礫、砂代替材料としての有用性を実証した³⁾。しかし、生産量の少ない養殖地ではこのような大規模な活用策を講じることが難しく、殻発生量や既存の殻処理設備など現地の実状に見合った利用方法を摸索する必要がある。

能登半島七尾湾沿岸に位置する石川県鹿島郡中島町および鳳至郡穴水町は日本海側有数の養殖地であり、過去10年間の生産量は国内のおよそ2%に相当する470~570トン/年を推移している⁴⁾。一方、殻発生量は年間約3000トンであり、2001年度まではその大部分が暗渠被覆材に転用されるものの、圃場整備事業が完了した後は数年のうちに堆積場の残余容量が逼迫する見通しにある。現在、堆積場に設置してある漁協の殻破碎機を含めて養殖地内で10数台が石灰肥料および薬品原料向けに移動しており、殻発生量の2割程度が破碎処理されている。

当該地域の平野部は概ね地表面下約8mまでN値 ≤ 2 の軟弱なシルト層(黒褐色)であり、1mほど掘削すると自然湧水する箇所も認められる。このため、以前から宅地の造成や道路の新設、補修などにあたっては地盤表層の改良工事をとともなう場合も少なくない。なお、地域内で採取した11試料の土質試験結果によれば、表層土の

表-1 原殻の化学成分組成

二酸化ケイ素 (%)	0.20
酸化アルミニウム (%)	0.08
酸化第二鉄 (%)	0.01
酸化カルシウム (%)	55.6
酸化マグネシウム (%)	0.15
五酸化リン (%)	0.06
強熱減量 (%)	43.8

平均的な pH、有機物含有量はそれぞれ 5、7% である。

このような七尾湾沿岸養殖地における牡蠣殻の発生量、転用量の動向および地盤環境から、著者らは殻の減量化にあたっては既存の破砕機や建設機械を用いて細かくするのが経費面からみて得策であり、また、資源循環型社会の構築に寄与するには、可能なかぎり多くの殻片を養殖地内および近隣地域の道路や公園の整備、宅地や工業団地の造成などの公共事業に利用できる方法を提案するのが趨勢に適うと判断した。そして、これらへの最初の取り組みとして、過去にも施工基盤の改良工事を行う事例が多かった町道（主として設計交通量の区分が L、A に該当するアスファルト舗装や簡易舗装）に着目し、路床構築に際して安定処理に支障をきたさない牡蠣殻片混入量の範囲について実験的に探究することにした。

具体的には、初めに室内において、原殻を破砕機で碎いてふるい分けした径 4.75~2mm の殻片を混入した有機質粘土の締固め特性を調べ、続いて殻片混入土に消石灰を添加して作製した供試体の CBR および強度発現過程を調べた。なお、消石灰には一般的な工業用のほか、原殻の副次的な用途としてこれの焼成、水和により得た粉末（以後、牡蠣殻消石灰と称する）も使用した。次に、屋外で振動ローラを用いた殻破砕を試行後、セメント系固化材添加、径 37.5~0mm の殻片混入により構築した模擬路床（ただし、舗装は設けず表面曝露状態）において殻片混入量とゴーン指数、インパクト値（現場 CBR および地盤反力係数に換算）との関係について調査した。

上記のように、牡蠣殻はこれまで圃場や港湾の整備事業、漁域の保全事業、材料（飼料、肥料）の分野などで活用されてきたが、道路分野における利用、とりわけ、一部の地下水位が高く、地盤表層に化学的安定処理の妨げとなる有機物を 5% 以上含有する地質・土質条件のもとで路床構築材料への適用を目指した例は見当たらない。

2. 牡蠣殻および牡蠣殻消石灰の性状

堆積場での野積み期間を 2 ないし 3 年経て藻の付着や臭気なくなった七尾湾産養殖真牡蠣の殻（平均寸法：

I : CaCO_3 — 原殻 II : CaO — 牡蠣殻焼成生石灰
III : $\text{Ca}(\text{OH})_2$ — 牡蠣殻消石灰 (pH $[\text{H}_2\text{O}]$ = 12.2)

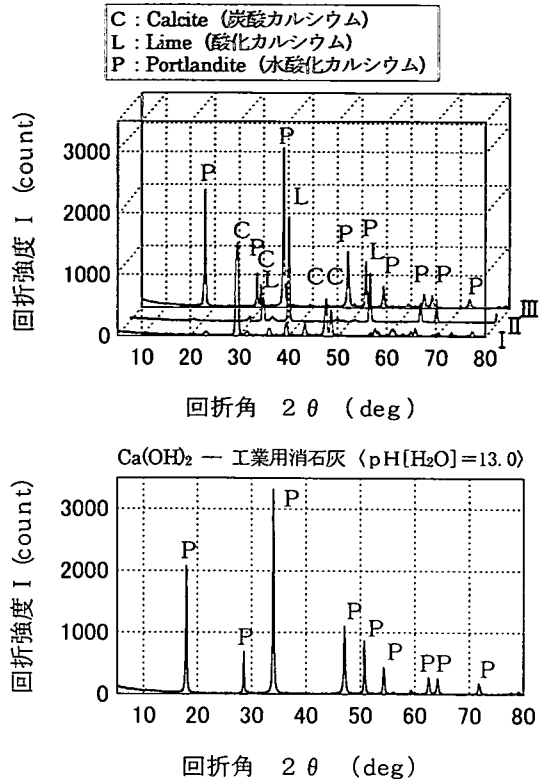


図-1 X線回折パターンの比較（原殻、牡蠣殻焼成生石灰、牡蠣殻消石灰、工業用消石灰）

長さ110mm、幅55mm、厚さ30mm)を電子顕微鏡で観察したところ、厚さ0.2~1 μm の板状の方解石片が重なり合う空隙の多いカードハウス構造を呈することが認められた。また、化学成分組成を調べたところ、表-1に示すように殻は酸化カルシウムを多く含み、強熱により多量の炭酸ガス(気体二酸化炭素)を揮散することがわかった⁵⁾。

図-1は、炭酸カルシウムが主成分である原殻を高温で焼却すると酸化カルシウムが焼成され、酸化カルシウムの水和、消化により水酸化カルシウムが生成される過程をX線回折パターンの変化(上図・I→II→III)をもって表したものである。ここに、原殻の煨焼には窯業用の丸型電気炉(容量3 ℓ)を使用し、焼却の温度は約1000 $^{\circ}\text{C}$ 、時間は60分間とした。また、完全な消化物にいたるには酸化カルシウム100gあたり蒸留水65mlを要し、加水後水和熱によって内容物の温度は105~120 $^{\circ}\text{C}$ まで上昇した。生成した水酸化カルシウムの色調は白色もしくはやや灰白色であり、指先で軽く圧すだけで粉末状となる小塊が点在する。この図には、比較のために市販の工業用消石灰1号のX線回折パターン(下図)も示したが、原殻の

表一 牡蠣殻消石灰および工業用消石灰の化学成分組成

化学成分	牡蠣殻消石灰	工業用消石灰
二酸化ケイ素 (%)	0.51	0.13
酸化アルミニウム (%)	0.22	0.06
酸化第二鉄 (%)	0.06	0.02
酸化カルシウム (%)	71.1	75.0
酸化マグネシウム (%)	1.41	0.64
酸化カリウム (%)	0.02	0.01以下
酸化ナトリウム (%)	0.61	0.05
強熱減量 (%)	25.8	23.7

焼成、水和により得た牡蠣殻消石灰に認められる $2\theta = 18^\circ, 34^\circ, 47^\circ, 51^\circ$ 付近の回折ピークは、工業用消石灰の回折ピークに合致していることがわかる。

表一は、2種類の消石灰の化学成分組成をまとめたものである。牡蠣殻消石灰は不純分（二酸化ケイ素、酸化アルミニウム、酸化第二鉄、酸化マグネシウムの合計）を2.2%含んでいるのに対して、工業用消石灰は0.85%しか含有していない。それでも、試作した牡蠣殻消石灰は工業用消石灰1号の規格である酸化カルシウム $\geq 70\%$ および不純分 $\leq 3\%$ ⁶⁾を満足している。

このように、原殻からの加工に手間を要する牡蠣殻消石灰に重点を置いた背景には、地下水位が比較的高く、軟弱箇所が多い七尾湾沿岸平野部ではあるものの、道路土工に関するこれまでの実績をみるかぎり、スタビライザによる改良深さ（50cm程度）の範囲内で在来路床土の含水比、粘性や塑性指数の低下を目的に生石灰を使用した施工例は稀であって、以前は消石灰を、近年ではセメント系固化材を採用する機会が多いことがある。

次章に述べる室内でのCBR試験および一軸圧縮試験には、作製する供試体ごとのばらつきを小さくするために、堆積場に設置してある殻破砕機で10mm未満の大きさに砕いた殻片のうち、4.75mmふるいを通過し、2mmふるいに留まる部分のみを使用した。この寸法は土質的な粒径区分では細礫に該当するが、形は粒状ではなく薄片状に近い。粒度を調整した殻片に含まれる水分量をJIS A 1203「土の含水比試験方法」⁷⁾を準用して、密度をJIS A 1202「土粒子の密度試験方法」⁷⁾を準用して調べたところ、それぞれ1%未満、2.58g/cm³となった。

殻片の性質について、著者らの一部は重錘落下により径0.85~0.425mmのほぼ粒状にまで細かくした殻片の吸水性を、アクリル製円筒の中に粘土層-殻片層の順に、または、粘土層-殻片層-粘土層の順に充填した模型を使って調べたことがある。その結果、粘土層の水分は経時的に殻片層へ移動し、移動量は2層状よりも3層状の方が多くなるという知見を得た^{8),9)}。参考までに、原殻から粉粒までを扱った文献¹⁰⁾によれば、原殻を細かくす

表一 西谷内土の土質試験結果

物理的性質		
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.59	
砂分 (%)	29.8	
シルト分 (%)	40.0	
粘土分 (%)	30.2	
均等係数	30.0	
曲率係数	0.58	
液性限界 (%)	75.0	
塑性限界 (%)	38.4	
塑性指数	36.6	
力学的性質		
最適含水比 (%)	34.8	
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.20	
透水係数 (cm/s)	7.07×10^{-7} [変水位]	
化学的性質		
有機物含有量 (%)	8.9	
強熱減量 (%)	11.6	
pH	H ₂ O	4.8
	KCl	3.5
土の工学的分類	有機質粘土 [高液性限界: OH]	

表一 西谷内土の化学成分組成

二酸化ケイ素 (%)	50.8
酸化アルミニウム (%)	20.9
酸化第二鉄 (%)	6.69
酸化カルシウム (%)	1.10
酸化マグネシウム (%)	1.24
酸化カリウム (%)	0.89
酸化ナトリウム (%)	0.51
二酸化チタン (%)	1.06
酸化マンガン (%)	0.14
五酸化リン (%)	0.28
三酸化硫黄 (%)	0.13
強熱減量 (%)	15.5

るほど最大、最小密度および修正CBRは大きくなることであり、また、径9.5~2mmの殻片と浚渫土との混合材料を扱った文献¹¹⁾には、混合材料の体積変化率は殻片量を多くするほど小さくなり、透水性は殻片混入率60%までは段階的に向上することが報告されている。

3. 牡蠣殻片を混入した安定処理土のCBRおよび強度特性

(1) 試料土の性質

室内試験には、石川県鹿島郡中島町西谷内〔にしやち〕

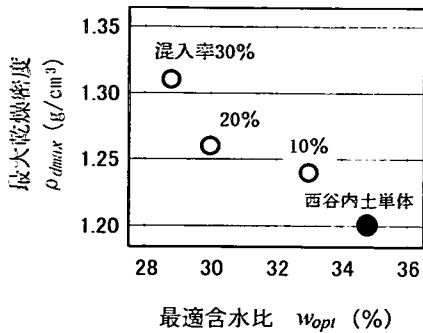


図-2 室内破碎殻を混入した西谷内土の最適含水比と最大乾燥密度との関係

表-5 室内試験における材料の配合条件

シリーズ	室内破碎殻混入率 ¹⁾ [径4.75~2mm]	牡蠣殻消石灰 または 工業用消石灰の添加率 ²⁾
L-6	—	6%
L-8	—	8%
L-10	—	10%
OL-6	30%	6%
OL-8	30%	8%
OL-10	30%	10%

1) 西谷内土の乾燥質量に対する値。

2) Lシリーズ：西谷内土の乾燥質量に対する値。

OLシリーズ：西谷内土と室内破碎殻との合計乾燥質量に対する値。

地区の町道脇で採取した土を使用した。以後、本論文ではこの土を西谷内土と称することにする。

試験には、一旦空気乾燥した西谷内土を2mmふるいでふるって、これを通過した部分を用いた。西谷内土の土質試験結果を表-3に、化学成分組成を表-4に示す。一般に、石灰安定処理土の長期強度発現、いわゆるポズラン反応の進行には二酸化ケイ素や酸化アルミニウムの溶出を必要とするが、西谷内土はこれらの酸性成分を70%以上含んでいることから大きな処理効果が期待される。その一方で、反応生成物の成長を阻害する有機物も、処理効果を予測する際の目安とされている2~4%^{(12), (13)}を超えた9%程度(文献14)の旧試験法に準拠して測定)含有している。この量は、中島町内の6地点で採取した表層土の中でも多い方に属する。なお、X線回折を行って西谷内土の鉱物組成を調べたところα-石英、長石、モンモリロナイト、ハロイサイトなどが確認された。

(2) 締固め試験および CBR 試験の結果

初めに、前述した径4.75~2mmの殻片(室内破碎殻)

を混ぜ合わせた西谷内土の締固め特性を調べる目的でJIS A 1210, A-a法に準拠した試験⁷⁾を行った。この試験では殻片の混入率を西谷内土の乾燥質量の10, 20および30%としたが、ランマーで繰り返し突固めても土中に散在する殻片がさらに細分化することはなかった。

試験結果を図-2に示す。この図には、西谷内土単体としたときの結果(記号●)も併せて記入してある。殻片の混入率を高くするにしたがって少しずつ最適含水比は低下し、最大乾燥密度は増加する傾向にあることがわかる。それでも、乾燥密度の変動幅はおよそ0.1g/cm³、対応する含水比の変動は6%程度であることから、殻片の量を多くするだけでは混入土の締固め度の向上にはつながらないと判断することができる。

このことを踏まえて、次のCBR試験における材料の配合を表-5のように設定した。ここで牡蠣殻消石灰、工業用消石灰の添加率は西谷内土単体の乾燥質量に対する値(Lシリーズ)、あるいは、西谷内土と殻片との合計乾燥質量に対する値(OLシリーズ)であり、また、殻片の混入率は西谷内土単体の乾燥質量に対する値である。

CBR試験では、改良対象土が軟弱である場合を想定して、西谷内土の含水比を先の図-2に示した最適含水比約35%から3%ずつ高くしながらJIS A 1211の方法⁷⁾に倣った突固め(ただし、非繰返し法)を行い、こね返しの兆候が現れた時点の含水比44%を単体、すなわち、消石灰添加前のLシリーズの設定値とすることにした。同様に、径4.75~2mmの殻片を30%混入した西谷内土についても、その最適含水比である約29%から3%ずつ含水比を高くして行って、突固め中にこね返しの現象が認められた47%を消石灰添加前のOLシリーズの設定含水比とした。

牡蠣殻消石灰、工業用消石灰の区別なく、水分を調整した西谷内土および殻片混入土に消石灰を添加すると1.5~3.5%の含水比低下を生じ、その量は添加率に比例して多くなった。これによりL, OLシリーズの供試体作製時には過転圧とはならず、消石灰添加率6~10%に対する供試体の乾燥密度はLシリーズにおいて概ね1.0~1.2g/cm³、OLシリーズでは1.1~1.3g/cm³となった。

図-3は、CBR試験の結果をまとめたものである。ここで西谷内土単体、殻片のみを混入した西谷内土(記号△)のCBRは供試体作製後直ちに4日間の水浸養生を行って求めた値であり、消石灰を添加したLおよびOLシリーズ(O, ●)のCBRは「安定処理土のCBR試験方法」⁽¹⁵⁾に準じて空气中養生6日間、水浸養生4日間を経て求めた値である。水浸期間中の体積変化に関して西谷内土単体、殻片混入土の供試体はともに負側を推移し、収縮量はそれぞれ約0.5mm、約1mmとなった。LおよびOLシリーズの供試体については消石灰の種類や量にかかわらず、いずれも正側1mm未満、膨張比に換算して1

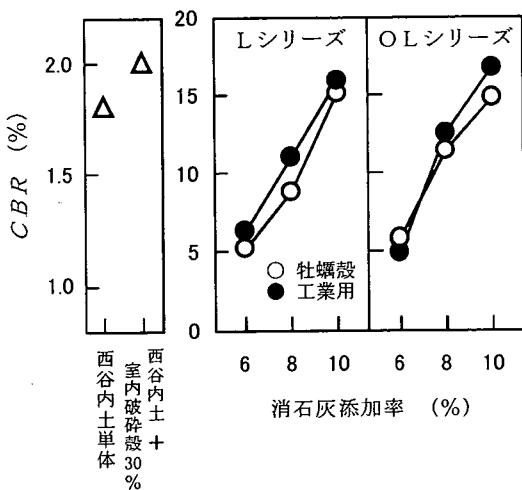


図-3 CBR試験の結果

%以下となった。この値を道路舗装における路床土の質的区分に照合すると良好な路床土に属する⁷⁾ことになるが、供試体の収縮量や膨張量と殻片混入の有無、消石灰添加率との関連性を確認するまでにはいたらなかった。

この図において、殻片混入土のCBRは西谷内土単体に比べて微増に止まるものの、牡蠣殻消石灰または工業用消石灰を8%以上添加すると支持力の改善効果が明確に現れてくること、さらに、径4.75~2mmの殻片を30%混入してもCBRの増加を、言い換えれば、消石灰による土粒子の凝集、団粒化作用(コロイド表面に吸着したカルシウムイオン C_a^{2+} による土粒子の結合)を妨げる要因とはならないことがわかる。

このような結果が消石灰使用時特有のものであるかどうかを調べるために、セメント系固着材(一般軟弱土用)を10%添加して作製したL、OLシリーズの供試体の養生7日目(空气中3日+水浸4日)¹⁵⁾におけるCBRを求めたところLシリーズで20%、OLシリーズでは21%となった。したがって、CBRを指標に有機物含有量約9%の西谷内土に対する効用を消石灰(牡蠣殻、工業用)とセメント系固着材とで比較すると後者が4%程度大きいものの、安定材を変えても依然として殻片混入の有無がCBRの大きさにおよぼす影響は認められなかった。

(3) 一軸圧縮試験の結果

この試験では、前出表-5に示した配合条件のうち、CBRがおよそ6%未満(設計CBR 4%相当)であったL-6およびOL-6を除いた4種類について強度特性や変形特性を調べることにした。

一軸圧縮試験に用いた供試体の寸法は直径約50mm、高さ約100mmであり、供試体の作製にあたってはLシリーズ用の材料(西谷内土+消石灰)、または、OLシリーズ用

の材料(西谷内土+径4.75~2mmの殻片+消石灰)を内径50mm、高さ125mmの二つ割モールドの中に入れ、これを49kNの載荷装置により5mm/minの速度で静的に締固めた。なお、供試体の含水比および乾燥密度は、先のCBR試験におけるシリーズごとの値を目標とした。

所定の計量後、直ちに供試体をビニール袋に入れて厳密封し、温度20°Cの恒温器内に静置(空气中養生)した。空气中養生期間の最長はL-8およびOL-8で56日、L-10およびOL-10については180日とした。また、供試体の水に対する抵抗性を調べる目的で、L-8およびOL-8は空气中養生に引き続いて、L-10およびOL-10は空气中養生日数が56日に達した供試体のうち半数をビニール袋から取り出して、これらを20°Cの水温に調節した水槽の中に静置(水浸養生)した。水浸養生期間の最長は、いずれも56日とした。

一軸圧縮試験には容量0.98kNおよび4.9kNの載荷装置を使用し、JIS A 1216に示されている試験方法⁷⁾に準じて一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} とを求めた。さらに、養生終了時の供試体寸法と作製時の寸法との差から体積変化率 ξ を算出した。L-8、10およびOL-8、10の試験に先立ち、消石灰を添加せずに作製した供試体の q_u を求めたところLシリーズ、すなわち西谷内土単体で0.04MN/m²、OLシリーズでは0.03MN/m²となった。

図-4は、空气中で養生した供試体を対象に実施した一軸圧縮試験の結果をまとめたものである。まず、Lシリーズ(左図a)をみると、牡蠣殻消石灰を添加して作製した供試体(記号○、△)の一軸圧縮強さ q_u と工業用消石灰を用いた供試体(●、▲)の q_u との間に顕著な差はなく、 q_u は添加率を高くするにしたがって大きくなること、さらに、L-10における q_u の経時変化からポズラン反応の進行にともない長期にわたって強度が発現する傾向にあることがわかる。一方のOLシリーズ(右図b)でも、 q_u は消石灰量が多いほど、そして、空气中養生日数が長くなるほど大きくなっており、OL-10の養生180日における $q_u=0.29$ MN/m²(牡蠣殻消石灰添加)、0.37MN/m²(工業用消石灰添加)はLシリーズの $q_u=0.31$ MN/m²(牡蠣殻)、0.33MN/m²(工業用)に比較しても遜色のない強度増となっている。

供試体の体積変化率 ξ は、消石灰の種類とは無関係に空气中養生期間の最長を56日としたL-8およびOL-8で膨張側1.5%程度、最長180日としたL-10およびOL-10では2%程度であった。

図-5は、水浸養生を施した供試体に対する一軸圧縮試験の結果をまとめたものである。この図には、供試体作製時および空气中養生56日の q_u も併せて示してある。 q_u の推移をみるとLシリーズ(左図a)、OLシリーズ(右図b)ともに空气中養生から水浸養生へ移行した当初の段階で供試体作製時の強度レベルにまで一旦低下す

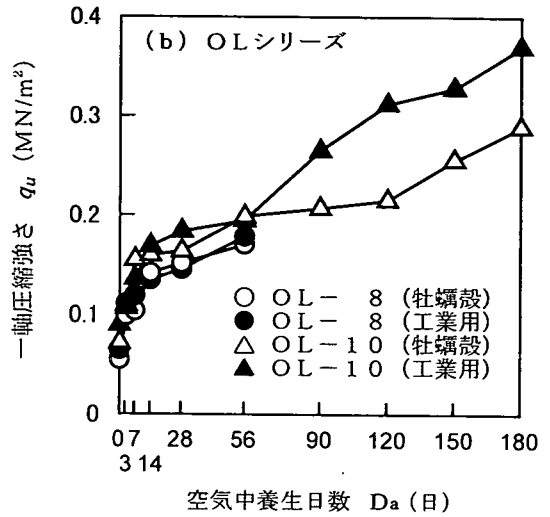
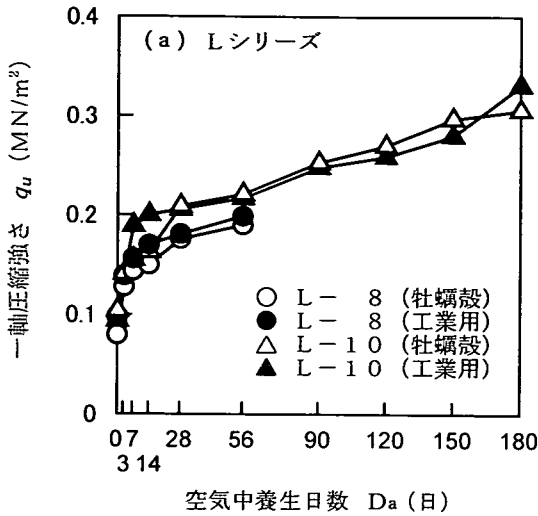


図-4 空气中養生における一軸圧縮強さの経時変化

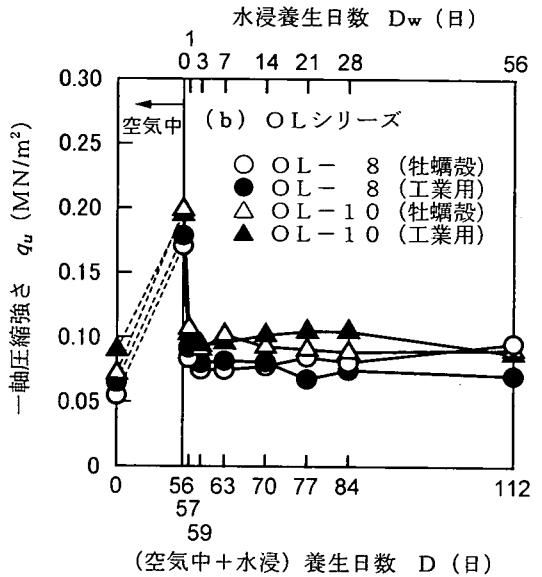
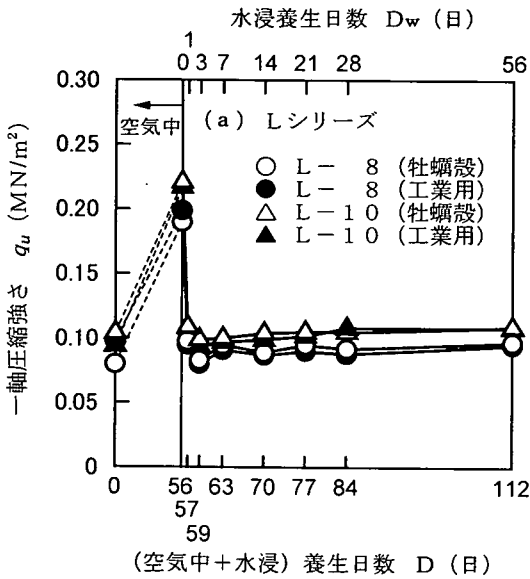


図-5 水浸養生期間中の一軸圧縮強さの推移

るものの、その後はとくに増加も減少もせず、ほぼ一定した水浸強度を保持している。さらに、水中静置の状態にあっても消石灰の違いによる強度差は現れないことがわかる。

水浸養生中の供試体の飽和度 S_r について、水浸初日の S_r はLシリーズにおいて86~90%、OLシリーズでは89~92%であったが、日数の経過とともに湿潤質量は漸次増加し、水浸21日の時点で大半の供試体は $S_r = 100\%$ に達した。それでも、養生中に過度の膨張を生じて崩壊し

たり、欠損した供試体は一切認められず、水浸56日における体積変化率は双方のシリーズともに膨張側1%未満であった。

次に、図-6は一軸圧縮強さ q_u と変形係数 E_{50} との関係を示す。ここで、(a) は空气中で養生した全ての供試体を対象に整理した結果であり、(b) および (c) は空气中と水浸とを組み合わせた養生条件のもとで試験を行った供試体について整理した結果である。

(a) において、 E_{50} は q_u の増加にともなって大きく

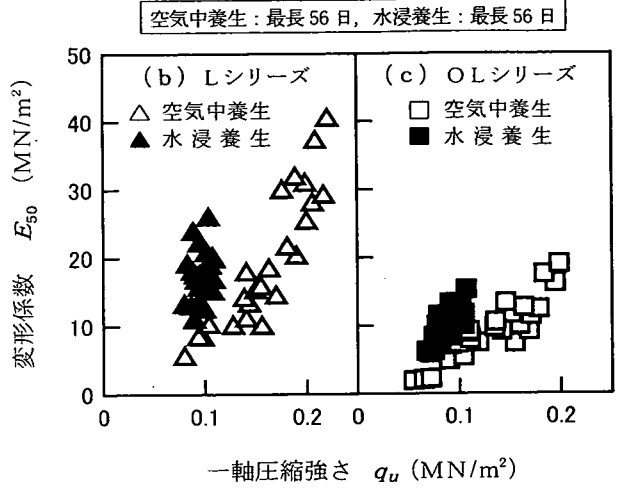
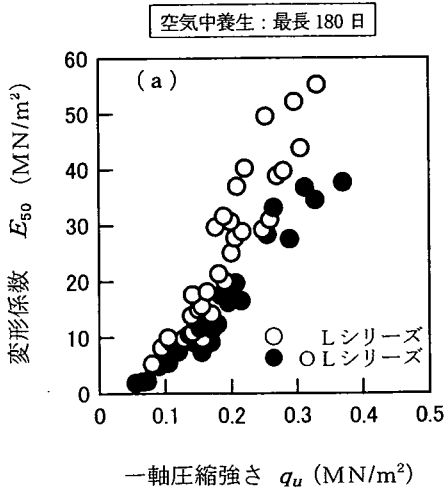


図-6 一軸圧縮強さと変形係数との関係

なるものの、OLシリーズ(記号●)の E_{50} はLシリーズ(○)の E_{50} に比べて全般的に小さいことがわかる。これは、OLシリーズの供試体は土とは形状、性質が明らかに異なる殻片を多く含んでいるために、供試体の均質性がLシリーズほど高くないことに起因しているものと考えられる。したがって、供試体のせん断特性におよぼす乱れの影響を懸念すれば、今回の室内試験で採用した殻片混入率30%がおおよその上限と推察される。

(b)において、水浸養生したLシリーズの供試体(記号▲)の q_u は0.08~0.11MN/m²であり、強度差はわずか0.03MN/m²であるのに対して、 E_{50} の変動は10~26MN/m²とかなり広い範囲にわたっている。同様に、(c)のOLシリーズの供試体(■)においても $q_u=0.07\sim0.11$ MN/m²に対応する E_{50} は6から16MN/m²の間で変動している。これら E_{50} の範囲を空气中で養生した供試体(△, □)に照合すると、Lシリーズでは q_u がおおよそ0.15~0.2MN/m²の供試体に、OLシリーズについては0.12~0.2MN/m²の供試体に相当することとなり、変形係数の大きさは同じでも気中強度と水浸強度との間には2倍近くの差があることがわかる。

図-7に示すように、水浸養生した供試体の応力-ひずみ曲線の特徴は、圧縮応力 σ も圧縮ひずみ ϵ もともに小さく、最大圧縮応力にいたるまでの曲線の傾きが大きいにある。著者らは、空气中養生から水浸養生へ移行した供試体の破壊ひずみ ϵ_f が依然として小さいままである理由、言い換えれば、供試体の弾性レベルが変化しない理由を追究するために、空气中養生または水浸養生を施した供試体の一部を採取して電子顕微鏡で観察したり、X線回折を行って回折ピークの比較を試みたが、疑問を解消する明確な根拠を得ることはできなかった。

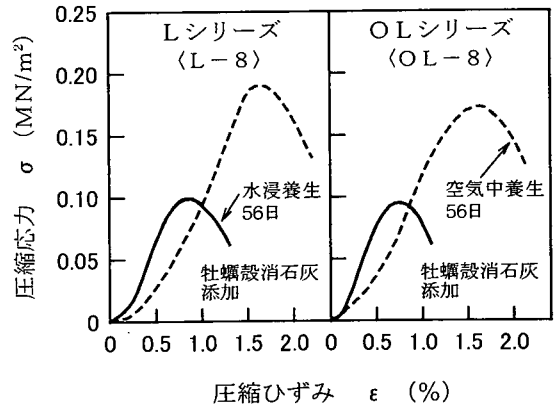


図-7 応力-ひずみ曲線の例

いずれにしてもL、OLシリーズの水浸強度に大きな差はなく、対応する変形係数の範囲はともに空气中養生時の半分程度となっていることから、殻片混入の有無は供試体の水に対する抵抗性の大小には直接関与しないものと考えられる。

4. 模擬路床による改良効果の確認

前章で述べたように、有機質粘土を牡蠣殻消石灰あるいは市販の工業用消石灰で安定処理する場合、有機質粘土に殻片を混入した上で石灰安定処理する場合双方の工学的性質を調べるために行った一連の室内試験において、牡蠣殻消石灰は工業用消石灰に近い効用を有するとみな

しても差し支えないこと、また、小径の殻片ならば混入量を改良対象土の3割程度までとしても処理効果を阻害する要因になる恐れは少ないことが示され、とりわけ、後者は殻片の活用を目指した路床構築の実現の可能性を見出した結果といえる。

そこで、著者らは研究の次の目標を、将来の現道での実施工に資する基礎データの収集に置いて、屋外で

- ① 殻破碎を振動ローラを代用して行う場合の作業効率
- ② 路上混合方式で殻片混入路床を構築する際の施工性と仕上がり状態
- ③ 路床支持力の経時変化および支持力の改善に効果的な殻片混入量

について調査、検証することにした。

(1) 施工の概要および路床の仕上がり状態

模擬路床の構築試験は、2000年11月上旬に中島町浜田地区にある町の管理地(公園整備地)の一角で実施した。

現地は原地盤の上に礫混じりの客土が10~15cmの厚さで転圧されており、地表面下1ないし1.2mで地下水の滲出が認められた。今回の試験では、客土材をブルドーザで撤去、不陸整正した面を在来路床面とみなした。整正後、JIS A 1214「砂置換法による土の密度試験方法」¹⁶⁾に準じて8箇所で原位置密度を測定したところ、平均値として0.97g/cm³が得られた。

路床面下約50cmで採取した地盤土の土質試験結果を表一6に、化学成分組成を表一7に示す。先の室内試験に用いた西谷内土(前出表一3, 4)と比較すると、土性的には粒度組成に占める粘土分の割合が大きく、液性限界が高いものの、これら以外の結果は似通っていることがわかる。また、化学的には二酸化ケイ素、酸化アルミニウムの含有量や強熱減量が多い点でほぼ一致している。

「安定処理土のCBR試験方法」¹⁵⁾に準拠して予備的に求めたCBRを参考にして、模擬路床の構築試験ではセメント系固化材を使用することにした。この場合、改良土から六価クロムが稀に土壌環境基準を超える濃度で溶出する恐れがあるので、念のために、室内配合試験の段階(材齢7日)および路床構築後(材齢28日)に別途「環境庁告示46号溶出試験」を実施した。その結果、2回の分析とともに、当該改良土は基準値である0.05mg/l以下を満足することが確かめられた。

これら事前の調査や試験と並行して、構築現場から1.5kmほど離れた牡蠣殻の堆積場では振動ローラ(3t, コンバインド型)を用いた殻破碎作業を行った。

初めに、適正な転圧回数を求めるために、堆積場の平坦な所に厚さ22mmの鉄板を敷き並べ、その上に野積みされている原殻をバックホウで約20cmの厚さにまきだして、振動ローラを1回走行させるごとに所要量の殻片を採取、直ちに標準網ふるいでふるって粒度分布を調べた。図一

表一6 地盤土の土質試験結果

物理的性質		
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.56	
砂分 (%)	21.1	
シルト分 (%)	36.7	
粘土分 (%)	42.2	
均等係数	————	
曲率係数	————	
液性限界 (%)	120.4	
塑性限界 (%)	39.6	
塑性指数	80.8	
力学的性質		
最適含水比 (%)	37.8	
最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.18	
平均CBR (%)	0.8	
透水係数 (cm/s)	2.13×10 ⁻⁷ [変水位]	
化学的性質		
有機物含有量 (%)	9.4	
強熱減量 (%)	11.7	
pH	H ₂ O	5.1
	KCl	4.0
土の工学的分類	有機質粘土 [高液性限界: OH]	

表一7 地盤土の化学成分組成

二酸化ケイ素 (%)	58.6
酸化アルミニウム (%)	18.7
酸化第二鉄 (%)	4.66
酸化カルシウム (%)	1.25
酸化マグネシウム (%)	1.36
酸化カリウム (%)	1.25
酸化ナトリウム (%)	0.42
二酸化チタン (%)	1.12
酸化マンガン (%)	0.11
五酸化リン (%)	0.26
三酸化硫黄 (%)	0.17
強熱減量 (%)	11.6

8は、転圧回数と殻片の粒度分布との関係を示す。転圧は5回を限度として行ったが、原殻は転圧1回でおよそ1/3以下の大きさに砕かれ、かつ、連続粒度となった殻片は転圧3回を超えるとそれ以上細分化されないことがわかる。

この結果にもとづき、正規の殻破碎では振動ローラによる転圧回数を3回として、模擬路床の構築試験に供する約5トンの殻片を準備することにした。殻破碎および袋詰め作業に要した実時間は4時間程度であり、また、殻片の含水比は3~10%であった。

模擬路床は、表一8に示すように材料の配合を4種類

転圧回数	通過質量百分率 (%)									
	0.075mm ← ふるいの呼び寸法 → 37.5mm									
3回	7	9	16	22	30	42	56	81	97	100
4回	8	11	17	22	29	41	59	83	98	100
5回	8	10	17	23	31	43	58	83	98	100

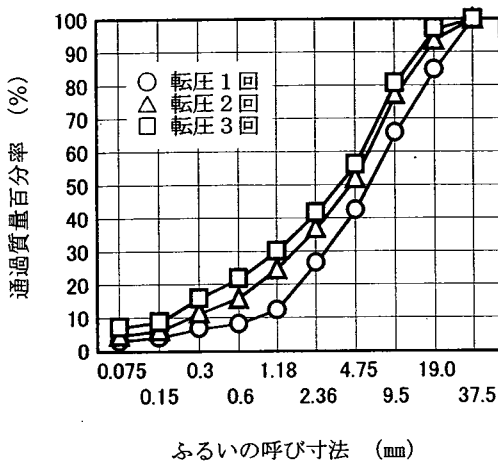


図-8 現地破碎殻の粒度分布

とし、1区画あたりの土工量を幅2m、長さ10m、改良深さ0.4mとして構築することにした。ここで、径37.5~0mmの殻片(現地破碎殻)の混入率、セメント系固化材の添加率はいずれも改良対象土の乾燥質量に対する値であり、殻片についてはこれに含まれる水分を減じて計量した。なお、殻片混入率の上限を20%としたのは前章に述べた室内試験で得られた知見、すなわち、単粒度の小径の殻片を含む安定処理土の強度特性から推測された混入率の限度(30%)を考慮に入れたことによる。

構築手順としては工区1, 3, 4では堆積場から搬入した殻片をバックホウで敷きならし、このうち、工区1については直ちにスタビライザで1回の混合作業(混合速度4m/min)に着手、工区3および4では殻片層の上にセメント系固化材を散布してから混合を行った。また、工区2においては在来路床面にセメント系固化材を散布後、混合作業に取り掛かった。今回はこの作業が終了した段階の在来路床面からの平均高さ(上がり)を基準に、振動ローラ(3t、コンバインド型)が1往復するごとに上がりを測定し、圧縮沈下の進行がほぼ認められなくなるまで転圧を継続した。締固め作業終了後には、各工区3箇所で砂置換法¹⁶⁾により原位置密度および含水比を測定した。

表-9は、転圧にともなう在来路床面からの上がりの減少過程および模擬路床の仕上がり状態を示す。

まず、転圧回数について、殻片のみを混入した工区1では転圧3回目の途中でこね返しの兆候が現れたために

表-8 路床構築試験における材料の配合条件

工区 ¹⁾	現地破碎殻混入率 ²⁾ [径37.5~0mm]	セメント系固化材 添加率 ³⁾ [一般軟弱土用]
1	20%	—
2	—	10%
3	10%	10%
4	20%	10%

- 1) 1工区あたり幅2m、長さ10m、改良深さ0.4m。
- 2) 在来路床土の乾燥質量に対する値。破碎殻は水分量を差し引いて計量。
- 3) 在来路床土の乾燥質量に対する値。

表-9 在来路床面からの上がりおよび模擬路床の仕上がり状態

在来路床面からの上がり (mm)					
工区	1	2	3	4	
転圧回数	0回	197	55	132	206
	2回	108	24	60	121
	4回	[39] ¹⁾	13	37	63
	6回	—	5	29	47
	8回	—	3	27	44
模擬路床の含水比および乾燥密度					
含水比 (%)	47.3	44.4	42.3	43.1	
乾燥密度 (g/cm ³)	1.08	1.19	1.27	1.23	
締固め度 ²⁾ (%)	— ³⁾	90	88	87	

- 1) 2往復した段階で過転圧の現象が認められたために、作業を中断。参考値として記載。
- 2) JIS A 1211の突固め方法に準じて求めた乾燥密度に対する値。
- 3) 所定の突固め回数に達する前に過度のこね返しが発生。

作業は2往復で中断した。工区2~4ではこね返しは発生せず、6回目と8回目の上がりとの間にはほとんど差がなかったため、作業は4往復に止めた。その結果、仕上がり厚さは通常セメント安定処理を施した工区2で当初の設定に近い約40cm、そのほかは殻片を多く混入した工区ほど在来路床面からの上がりが大きくなった。

次に、構築した路床の締固め度について、表-9に示すようにいずれの工区も乾燥密度は原地盤の乾燥密度0.97g/cm³を上回り、工区3および4では地盤土の最大乾燥密度1.18g/cm³(前出表-6)をも超えていた。さらに、混合直後の構築材料をJIS A 1211の方法⁷⁾に準じて突固めたときの供試体の乾燥密度1.32~1.45g/cm³との比を求めたところ87~90%、すなわち、最大乾燥密度の推定値1.39~1.53g/cm³の83~86%の締固め度に相当していることがわかった。なお、振動ローラとランマーとの締固めエネルギーの相違から、工区3および4で採取した構築

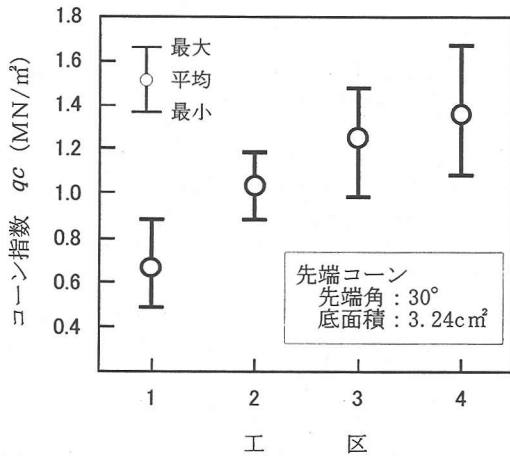


図-9 原位置コーン貫入試験の結果(路床構築当日)

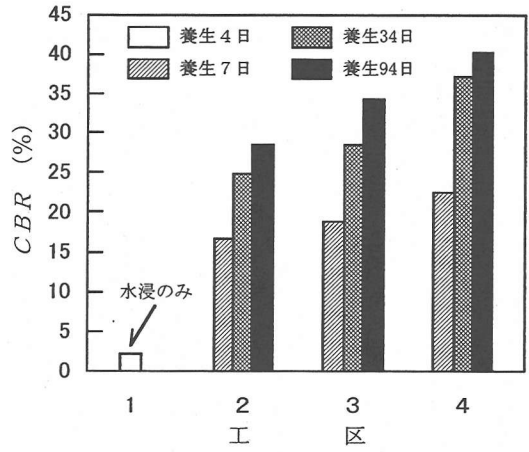


図-10 現場混合材料のCBRの推移(室内試験)

材料を室内で突固めたときの乾燥密度には、径の大きい薄片の割れによる密度増が幾分含まれている。また、工区1で採取した材料は突固め中に過度のこね返しが生じたので、所定の回数(67回/層)まで突固め作業を継続することができなかった。

文献17)には、路床構築における品質管理の限界値として最大乾燥密度の85~90%以上および出来形管理の限界として基準高土5cm以内が示されており、これらを各工区の仕上がり状態に照合すると工区4が概ね限界内となり、したがって、今回のような小形の振動ローラで転圧作業を行う場合には、連続粒度の殻片の改良対象土への混入率の上限は20%が1つの目安になるといえる。

図-9は「ポータブルコーン貫入試験方法」¹⁸⁾に準拠して、施工当日に各工区6箇所(12点)で測定したコーン指数 q_c を示す。殻片混入率の高い工区ではコーンの先が大きな殻片に接触する頻度が高く、このため q_c の最小値、最大値の範囲が広がっている。それでも、 q_c の平均値は工区1, 2, 3, 4の順に大きくなっており、これは先の表-9に示した路床の仕上がり状態(乾燥密度)に概ね関連している。文献19)によれば、 $q_c = 1.0 \text{ MN/m}^2$ で小形の自走式スクレーパが走行可能、 $q_c = 1.2 \text{ MN/m}^2$ でダンプトラックが走行可能とされており、この図において前者には工区2の q_c の平均値が、後者には工区3および4の q_c がそれぞれ該当することになる。したがって、トラフィカビリティの面からみると、安定材の添加率が同じであれば改良対象土に殻片を混入する方が、そして、その量は10%とするよりも20%とする方が改善効果は大きいことになる。

(2) 路床支持力の経時変化

今回の試験では構築した路床の日照、風雨など自然環

境下における性状の変化を把握する目的で、取えて表面を覆うことなくそのまま降雪、融雪期を迎えることとし、およそ半年が経過した時点で改めて路床支持力を調べることにした。ただし、その間の支持力の推移を、スタビライザによる混合作業が終了した直後に各工区で採取し、実験室へ搬送した構築材料のCBRを約3ヶ月にわたって求めることで確認することにした。

2001年1月中旬から2月上旬にかけて北陸地方は例年を超える降雪となり、現地の最大積雪深は約90cmに達した。各工区の路床面は、その後の雪解けにともない3月中旬まで概ね湿潤状態にあった。

図-10は、採取した構築材料(現場混合材料)で作製した供試体を対象に実施したCBR試験の結果を示す。ここで、セメント系固化材を含まない材料(工区1)の養生条件は水浸のみ4日であり、固化材を含む材料(工区2~4)については空気中で3, 30, 90日間養生した後にそれぞれ水浸養生を4日間行った。この図において、工区2~4で採取した材料のCBRは日数の経過とともに、また、殻片混入率の高い順に大きくなっていることがわかる。とりわけ、殻片混入率を20%として構築した工区4では、正規の養生日数7日¹⁵⁾で通常の改良目標値である $\text{CBR} = 20\%$ に到達している。

次に、道路路床にかぎらず基礎地盤の変形や強さなど支持力に関する性状を調べるにあたっては平板載荷試験を採用するケースが多いが、一般に載荷の影響がおよぶ範囲は深さ方向に載荷板直径の1.5~2倍とされており²⁰⁾、道路の分野で多用されている直径30cmの載荷板では深さ45~60cmが主要応力圏となる。前出表-9に示したように、構築した路床の仕上がり厚さは転圧後の在来路床面からの上りを合わせて40~45cmであり、したがって、平板載荷試験から求められる地盤反力係数 K_{30} には、改

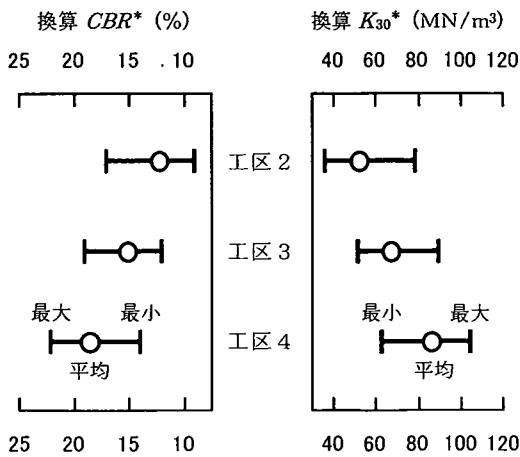


図-11 インパクト値から換算した CBR および地盤反力係数 (路床構築後約半年経過時)

良層だけでなく軟弱な原地盤の耐荷性能も一部含まれることになる。

そこで、著者らは構築してから半年後に実施する支持力調査には、深さ方向20cm程度までを検出範囲とする「簡易支持力測定器」を用いることにした。この器械は、加速度計内蔵のランマーを45cmの高さから落下したときに生じる衝撃加速度の最大値（インパクト値： I_a ）を K_{30} や CBR などに換算する機能を備えている^{21), 22)}。ただし、殻片混入地盤で測定したインパクト値が自然地盤や造成地盤のインパクト値にそのまま対応するとは言い難く、厳密には、構築した路床を模倣した土槽で予め関係式を求めておく必要がある。

調査は2001年5月中旬に実施、各工区9箇所（18点）でインパクト値 - CBR およびインパクト値 - K_{30} を測定した。図-11はインパクト値からの換算 CBR*、換算 K_{30} * を整理した結果である。工区1では全測点で計測・換算限度を下回っていたために工区2～4についての比較となるが、換算 CBR*、換算 K_{30} * は工区2, 3, 4の順に大きくなっており、路床構築当日に測定したコーン指数 q_c （前出図-9）と同様の傾向にあることがわかる。

文献23)によれば、種々の地盤での実測結果を根拠に現場 CBR の1/5がコーン指数 q_c に対応するとされており、これを引用して換算 CBR* の平均値（記号○）から工区2, 3, 4の q_c を算出したところ、それぞれ2.4, 3.0, 3.8 MN/m² となった。これらの q_c は路床構築当日の実測平均値（前出図-9：○）の2.3～2.8倍に相当することから、表面曝露の状態にあっても路床土の改良効果は維持されていたものと考えられる。また、換算 CBR* を先の図-10に照合すると全般に半減してはいるものの、工区4の換算 CBR* の平均値は19%であり、この調査で

連続粒度の殻片を2割混入した路床の支持機能は依然として高いことが確認された。

5. まとめ

国内に点在する牡蠣養殖地では堆積場に多量に野積みされた殻の処分に苦慮している所が多く、殻の減量化に向けて効率のより高い再資源化技術の開発が推し進められている。

本研究の対象とした七尾湾沿岸養殖地の生産量は国内の2%程度であり、このため、活用策を講じるにあたっては殻の発生量に見合った、そして、近隣地域を含む範囲内で恒常的に利用できる方法を摸索する必要がある。

著者らは、七尾湾沿岸平野部の地盤が比較的軟弱であることに着目して、単粒度および連続粒度に調整した殻片のアスファルト系舗装の路床構築材料としての利用の可能性を室内試験、屋外試験を通して探究した。その結果、薄片状を呈する殻材であってもこれを安定材とともに軟弱な路床土に混ぜ合わせると、支持力は経時的に増加することが明らかとなった。

以下に、本研究で得られた成果を列挙する。

(1) 原殻の焼成、水和により得た消石灰（牡蠣殻消石灰）は市販の工業用消石灰に比べて粒が粗く、不純分をいくらか多く含んでいるものの、有機質粘土に対する安定処理効果は工業用消石灰とほぼ同等とみなされる。

(2) 単粒度の殻片（径4.75～2mm）混入量が改良対象土の3割までであるならば、殻片混入の有無は消石灰を添加して作製した供試体の CBR、気中および水浸強度の大きさや吸水膨張量、体積変化率の推移に関与しない。

(3) 上記(2)に関連して、殻片混入の有無にかかわらず、供試体の水浸強度は気中強度のおよそ半分まで減少する。ただし、変形係数については、水浸後に極端に小さくなる兆候は認められない。

(4) 振動ローラで転圧、破碎した連続粒度の殻片（径37.5～0mm）の改良対象土への混入量の上限を2割とするとき、通常の路上混合方式による施工に支障はきたさず、管理（締固め度および出来形）の限界に適った路床を構築することができる。

(5) トラフィックビリティおよび路床支持力の改善効果は、連続粒度の殻片混入量を2割として構築した路床（セメント安定処理）が最も大きくなったことから、上記(4)と併せてこの混入量が実用上の目安と判断される。

今回の試験で構築した模擬路床は規模が小さかったことから使用した殻片の量も少なく、このため、殻破碎および運搬の工程をともなう当該土工の経済性を通常の路床改良工事と比べて評価するまでにはいたらなかった。なお、次の段階である現道の路床構築においては、建設

機械で破碎した殻片と併せて、殻の野積み量を減らすために堆積場で平常的に破碎し、倉庫内に多量に残置されている殻片も活用する方向で工事手頃の立案を進めており、殻の破碎量と使用量との均衡が保てれば、経費面で不利となる要因は少ないと考えられる。

謝辞：研究の実施にあたり、適切なお助言を頂戴した石川県中島町役場建設整備課の端 新四郎氏、七尾西湾漁業協同組合の吉野 了氏に深甚なる謝意を表す。また、結果の整理にご協力いただいた福井工業高等専門学校環境都市工学科の卒業研究生諸君に厚く御礼申しあげる。

参考文献

- 1) 西村晋一, 森 照樹, 竹中晋也: カキ殻暗渠の施工事例について, 農業土木学会京都支部研究発表会講演要旨集, Vol. 51st, 3-19, pp. 124-125, 1994.
- 2) 宮城県水産研究開発センター: 養殖漁場改善対策調査事業, 宮城県水産研究開発センター事業報告, pp. 72-77, 1996. 3.
- 3) 運輸省第二港湾建設局塩釜港工事事務所: 石巻港サンドコンパクションパイル工法中詰材調査報告書, 1992.
- 4) 北陸農政局統計情報部: 石川県農林水産統計年報(水産編)平成11年~12年, 2000. 12.
- 5) 宮本正規, 廣瀬幸雄, 山田幹雄, 谷口克也: カキ殻の再資源化について, 石川県工業試験場技術ふれあい'98発表会要旨集, pp. 27-30, 1998. 9.
- 6) (社)日本道路協会: 舗装試験法便覧, pp. 130-134, 1988. 11.
- 7) (社)地盤工学会: 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 2000. 6.
- 8) 安藤淳悟, 山田幹雄, 奥村充司, 佐野博昭, 坪川 茂, 荒木俊幸: 破碎した牡蠣殻の吸水性および破碎殻混入土の締固め特性に関する一考察, 土木学会中部支部平成11年度研究発表会講演概要集, VII-23, pp. 655-656, 2000. 3.

- 9) 安藤淳悟, 山田幹雄, 奥村充司, 佐野博昭, 坪川 茂, 荒木俊幸: 破碎した牡蠣殻の地盤表層改良材としての有用性に関する基礎的研究, 日本材料学会第4回地盤改良シンポジウム発表論文集, IV-1, pp. 127-132, 2000. 11.
- 10) 橋立洋一, 福田定治, 奥村樹郎, 小林正直: カキ殻混り砂の工学的特性について, 第28回土質工学研究発表会平成5年度発表講演集, D-6, 327, pp. 869-872, 1993. 6.
- 11) 李 基豪, 風間基樹, 寺田賢二郎, 柳澤栄司: 破碎されたカキ殻を含む浚渫粘土の透水特性, 土木学会論文集, 第652号/III-51, pp. 245-256, 2000. 6.
- 12) (社)日本石灰協会・石灰安定処理委員会編: 石灰による軟弱地盤の安定処理工法, 鹿島出版会, pp. 14-19, 1983. 11.
- 13) (社)無機マテリアル学会: セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, pp. 511-587, 1995. 11.
- 14) (社)土質工学会: 土質試験の方法と解説, pp. 145-151, 1991. 2.
- 15) (社)日本道路協会: 舗装試験法便覧, pp. 135-143, 1988. 11.
- 16) (社)地盤工学会: 地盤調査法, pp. 388-396, 1995. 12.
- 17) (社)日本道路協会: アスファルト舗装要綱, pp. 149-158, 1992. 12.
- 18) (社)日本道路協会: 舗装試験法便覧, pp. 22-26, 1988. 11.
- 19) (社)日本道路協会: 道路土工一施工指針, pp. 45-51, 1986. 11.
- 20) (社)土質工学会: 土質工学会基準—地盤の平板載荷試験方法—同解説, 1983. 1.
- 21) 近畿地方建設局近畿技術事務所: 測定器使用マニュアル作成委員会基準(案)「簡易支持力測定器による試験方法—第1版—」, 1996. 5.
- 22) 近畿地方建設局近畿技術事務所: 簡易支持力測定器利用の手引き, 1997. 9.
- 23) (財)鉄道総合技術研究所: SI単位版 鉄道構造物等設計標準・同解説—土構造物—, pp. 173-174, 2000. 2.
(2001. 11. 21 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON APPLICABILITY OF CRUSHED OYSTER SHELL AS MATERIALS FOR COMPOSING SUBGRADE

Mikio YAMADA, Katsuya TANIGUCHI, Mitsushi OKUMURA,
Hiroaki SANNO and Masaki MIYAMOTO

The reusing of oyster shell deposits at the dump yard can be considered as an indispensable work for reducing the amount of wastes and conserving the scenery in the place of production. The objectives of present study are to investigate experimentally the strength and bearing capacity characteristics of stabilized soils containing crushed oyster shell and to clarify its applicability as subgrade materials by exploring test results. The results obtained from laboratory tests indicated that the unconfined compressive strength and CBR value increased in proportion to the stabilizer additive content and curing time. In addition, the coefficient of subgrade reaction and field CBR value converted from the impact acceleration value (I_a) showed that the bearing capacity of improved subgrade increased with an increase in crushed oyster shell content. Based on these results, it may be beneficial to use crushed oyster shell as subgrade materials.