

脱炭素化に有効なリサイクル材を利用した高耐久路盤材について

前田道路株式会社 技術部

江向 俊文

1. はじめに

アスファルト舗装を効率的に維持管理していくため、構造的な破損の深層化を防ぐことを検討していく必要がある。アスファルト舗装の破損が深層化した場合、打ち換えによる補修工事が必要となるがこの場合、切削オーバーレイによる補修と比べ費用が増大し、また交通規制が長時間必要になるなど、工事の難易度は格段に上昇してしまう。また補修工事に使用できる資金は潤沢に存在するわけではなく、将来的な大規模な補修が増える事態は避けたく、このため表基層以下の上層路盤層の安定処理による舗装の高耐久化は有用な手法であると考えられる。

併せて最近では、舗装工事の分野においても CO₂ 排出量削減を主とする環境負荷軽減に関する課題は避けて通れなくなっている。アスファルト舗装工事から発生する CO₂ 排出量のほとんどがアスファルトプラントにおける骨材の乾燥と加熱に伴う燃料消費によるものであり、燃料消費量を低減できる技術の開発が期待されている。

そこで本報告では、舗装の高耐久化を図りつつ環境負荷を軽減するため、骨材加熱を伴わない上層路盤用材料として、セメント・アスファルト乳剤安定処理混合物（以下、CAE 混合物）に着目し、適用性について検証を行った。

2. CAE 混合物の特長

CAE 混合物は、アスファルト乳剤（以下、乳剤）とセメントを併用するため、セメントによる力学的な強度と乳剤によるたわみ性を兼ね備えた特性を有している。

CAE 混合物を用いた工法としては路上路盤再生工法と中央混合方式（常温プラント混合方式）に大別される。本報告では、CAE 混合物の適用拡大を目的として、施工上の制約が少なくかつ任意の材料を

表-1 CAE 混合物の使用材料

目標とする粒度範囲			使用材料と配合割合 (%)	
ふるい目と通過質量百分率 (%)			材料名	配合割合
19.0mm	2.36mm	0.075mm	コンクリート再生路盤材 (RC40-0)	70
100-50	60-20	15-0	アスファルト再生骨材 (R5-0)	30

表-2 一軸圧縮試験結果

配合 No.	配合割合 (%)		一軸圧縮強さ (MPa)	一次変位量 (1/100cm)	残留強度率 (%)
	乳剤	セメント			
1	2.0	1.5	2.25	18.3	76.8
2	5.0	4.0	2.13	21.1	77.8
3	7.0	5.1	2.20	23.6	76.3
品質規格			1.5~2.9	5~30	65以上

使用可能な、中央混合方式 CAE 混合物を対象として検証を進めた。各種評価結果を以下に示す。

1) 使用材料と配合割合

使用材料について、主骨材はコンクリート廃材の利用促進の観点からコンクリート再生路盤材 (RC40-0) とし、粒度調整のための補足材としてアスファルト再生骨材 (R5-0) を使用している (表-1)。舗装再生便覧¹⁾に示された目標とする粒度範囲を満足するよう、RC40-0 と R5-0 を 70:30 の割合で配合している。

また、CAE 混合物に要求される強度特性は一軸圧縮試験により求められるが、一軸圧縮強さの他に一次変位量と残留強度率も基準となる。中央混合方式であるため、乳剤およびセメントの配合割合は容易に任意に設定することが可能となる。そこで、乳剤とセメントの配合割合を変化させ、一軸圧縮試験を実施した。結果を表-2に示すが、乳剤とセメントの比率を調整することで、試験を実施したすべての配合において、一軸圧縮試験の品質規格を満足できることが確認できた。

2) 収縮クラック抵抗性

セメント系の固化材を使用して安定処理した際、収縮に伴うクラックの発生が懸念される。そこで、収縮クラックの発生に関する抵抗性を評価するため、既往の研究結果²⁾を参考に、応力緩和試験を実施した。供試体に一定の荷重を瞬間的に荷重し、荷重したままの状態でも荷重の大きさが時間経過により、どのように変化していくかを測定する試験である。

試験条件は表-3に示すとおりであり、CAE混合物の配合は表-2のNo.1とした。また、アスファルト安定処理混合物およびセメント安定処理混合物と比較を行った。結果は図-1のとおりであり、CAE混合物に関しては乳剤の効果により、アスファルト安定処理と類似した傾向を示しており、荷重された荷重が時間経過とともに分散されていくことが推測できる。これより、セメント安定処理混合物に比べ、収縮クラックの発生に対してはかなり安全側にある混合物であることが確認できる。

3) 初期安定性

打ち換え工事において上層路盤を施工した場合、交通規制時間を短くするため、できる限り早く基層、表層を施工することが必要となる。そのため、上層路盤には施工直後の早期の強度発現（初期安定性と称す）が求められる。そこで、初期安定性を評価するため、舗装・調査試験法便覧に準拠し、ホイールトラッキング試験を実施した。ここでもアスファルト安定処理混合物およびセメント安定処理混合物と比較を行ったが、CAE混合物とセメント安定処理混合物については、供試体作製直後に20°Cで試験を実施し、アスファルト安定処理混合物については、作製約2時間経過後、供試体表面が50°Cになった時点で、温度50°Cで試験を実施した。

試験結果は図-2に示すとおりであり、CAE混合物およびセメント安定処理混合物は、アスファルト安定処理混合物に比べ変形量が小さく、初期安定性が高いことが確認できる。これは施工直後、セメントの水和反応や乳剤の分解が完全に進行していかなくても、骨材の噛み合わせで十分な支持力を有していることを意味しており、初期わだち掘れの発生に対し

表-3 応力緩和試験条件

項目	条件
供試体寸法	φ10×12.7cm, 最大粒径25mm
作製方法	2.5kgランマ, 3層25回突き
養生方法	20°C, 7日間湿空養生
荷重条件 測定項目	予備荷重: 設定ひずみ0.2%を10回荷重 本荷重: 変位量0.5mmを100mm/minで荷重 荷重直後から1,000secまで応力を測定
評価項目	残留応力比 = σ_t / σ_0 (σ_0 : 荷重直後応力, σ_t : 荷重tsec後応力)

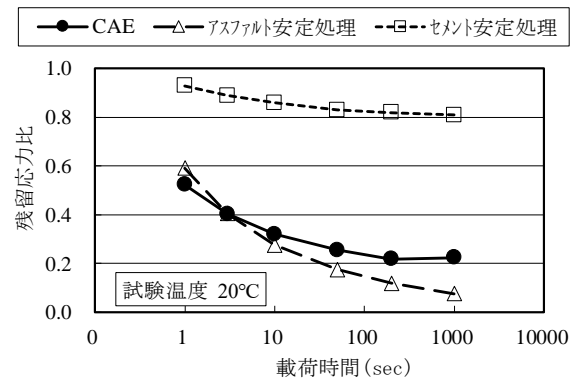


図-1 応力緩和試験結果

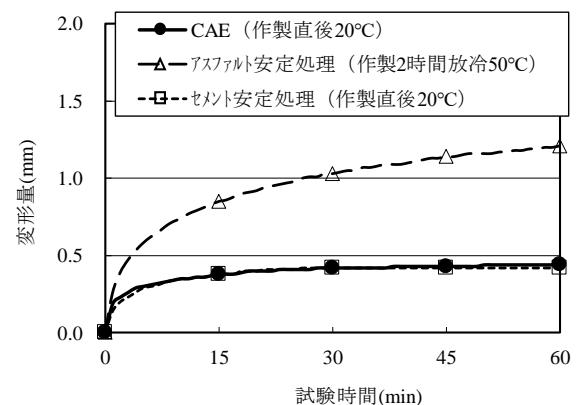


図-2 初期安定性測定結果

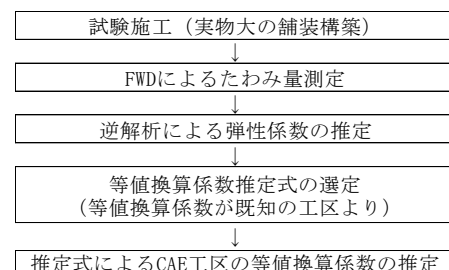


図-3 等値換算係数の推定手順

でも十分な抵抗性を有していると言える。

4) 耐久性 (等値換算係数)

耐久性の評価として、図-3に示す手順で、車道の

舗装厚さを設計する際に用いる等値換算係数の推定を行った。

試験施工の概要は図-4に示すとおりであり、表-2に示した3種類のCAE混合物の他、粒状路盤(M-30)とアスファルト安定処理についても評価を行った。推定結果を表-4に示すが、比較工区のM-30およびアスファルト安定処理混合物について、舗装再生便覧に示された値と同程度の推定値が得られており、推定式は適当であることが分かる。

CAE混合物については、乳剤およびセメントの配合割合が少ない配合No.1の混合物について、便覧値と同等であり、配合No.2とNo.3の混合物については、さらに等値換算係数が大きくなることが確認され、耐久性については問題ないと言える。

5) CO₂原単位の算出

「舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック」³⁾に従い、各種上層路盤用材料のCO₂原単位を算出した。なお、CAE混合物については、固化材として一般的に普通ポルトランドセメントを用いるが、中央混合方式を前提とした場合、任意の固化材を少量であっても均一に混合することが可能となる。そこで、他産業再生資材の有効利用かつCO₂排出量の削減を目的に高炉スラグ微粉末の活用を試みた。高炉スラグ微粉末は、アルカリ刺激材を添加しないと硬化しないため、強度発現の遅れが懸念されたが、主骨材のRC-40が刺激材の役割を果たし、若材令における強度発現についても普通セメントと比較して差

異はなく、高炉スラグ微粉末もCAE混合物に使用可能であることは確認できている⁴⁾。これを踏まえ、CAE混合物については、一般的に用いられる普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種のほか、高炉スラグ微粉末の場合についてもCO₂原単位を算出した。

表-5に算出結果を示す。使用する材料の種別や配合など算出条件も併記した。素材のみについては再生アスファルト安定処理混合物が最もCO₂原単位は小さいが、路盤材料として評価した場合、材料の加熱製造に伴う燃料消費によるCO₂排出量が大きく影響し、CAE混合物のほうがCO₂原単位は小さくなる。また、高炉スラグ微粉末を使用したCAE混合物

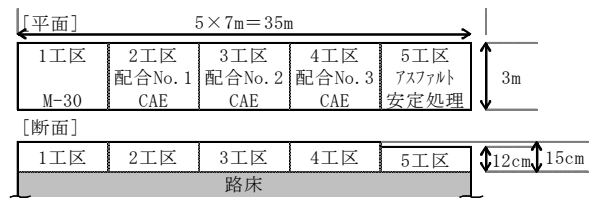


図-4 試験施工概要

表-4 等値換算係数の推定結果

混合物	配合割合(%)		等値換算係数 a_i	
	乳剤	セメント	推定結果	便覧値
CAE No.1	2.0	1.5	0.65	0.65
CAE No.2	5.0	4.0	0.74	
CAE No.3	7.0	5.1	0.85	
比較工区：粒調碎石M-30			0.34	0.35
比較工区：アスファルト安定処理			0.83	0.80

表-5 CO₂原単位の算出結果

路盤材種別	算出条件 (使用材料と配合)	【路盤材料1tあたり】						【路盤層1m ² あたり】 [*]			
		CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /t)						(a)	(b)	(c)	(d)
		素材	輸送	製造	その他	路盤材料	等値換算係数	T _A =1cm 相当の 厚さ	標準 密度 t/m ³	CO ₂ 原単位 (kg-CO ₂ /m ²)	
CAE	普通セメント	再生砕石:再生骨材=70:30 乳剤2%,普通セメント1.5%	22.0	0.9	3.2	7.7	33.8	0.65	1.54	2.20	1.14
	高炉セメントB種	再生砕石:再生骨材=70:30 乳剤2%,高炉セメントB種1.5%	16.4	0.9	3.2	7.7	28.2				0.96
	高炉スラグ微粉末	再生砕石:再生骨材=70:30 乳剤2%,高炉スラグ微粉末1.5%	8.5	0.9	3.2	7.7	20.3				0.69
再生粒度調整砕石	再生砕石	8.1	0.0	1.9	7.7	17.7	0.35	2.86	2.20	1.11	
セメント安定処理	砕石(C-40),普通セメント3%	34.4	5.7	2.8	7.7	50.6	0.55	1.82	2.20	2.02	
再生アス安定処理	再生骨材50%,軟化剤0.25% ストレートアスファルト1.25%	7.5	2.9	33.8	7.7	51.9	0.80	1.25	2.35	1.52	

※(a): 舗装再生便覧記載値, (b)=1cm÷(a), (d)=1m²×(b)/100×(c)×路盤材料CO₂原単位

については、再生粒度調整砕石と同程度になる。

次に、路盤材の種類によって所定の支持力を得るために路盤層厚さ（路盤材使用量）が異なってくるため、舗装体へ用いた場合の単位量あたりのCO₂原単位を算出し、路盤材料ごとに比較を行ってみた。

空港舗装では路盤層厚さは路盤材種別に応じて定められた等価値によって決定されるが、CAE混合物については等価値が定められていない。そこで、道路舗装における等値換算係数を使用することとした。

単位面積に等値換算係数を加味した等値換算厚さ（ $T_A=1\text{ cm}$ 相当）を乗じて容積を算出し、さらに標準密度と路盤材料のCO₂原単位を乗じることにより路盤材料ごとの単位量（ $1\text{ m}^2 \times T_A\ 1\text{ cm}$ ）あたりのCO₂原単位を算出した。

この結果についても、表-5に示すとおりであり、CAE混合物は再生アスファルト安定処理混合物に比べ、路盤層としては厚くなるが、路盤材料としてのCO₂原単位が小さいため、舗装体として単位量あたりの比較を行ってみてもCO₂原単位は小さくなった。さらに、高炉セメントB種や高炉スラグ微粉末などを使用することで、再生粒度調整砕石よりも小さくなり、比較検討を行った路盤材料のなかでは、高炉スラグ微粉末を使用したCAE混合物が、CO₂原単位が最も小さくなることが分かった。

3. 適用性の評価

上記、検証結果よりCAE混合物について、脱炭素化および高耐久化に関し、優位性は確認できた。さらに他の上層路盤用材料との相対関係を分かり易く表現するため、ポジショニングマップを用いた評価を行ってみた。

耐久性の評価として等値換算係数（表-4参照）、脱炭素の評価としてCO₂原単位（表-5参照）を設定し、これらを二軸に用いてポジショニングマップに示したものが図-5となる。マップの右上に配置されるほど、優位な評価になるように軸の方向を設定しているが、CAE混合物が優れていることがこの結果より確認することができる。

しかし、図-5はある特定の評価値に基づく結果であり、全国広範囲に渡り適用性を考えていく上では、

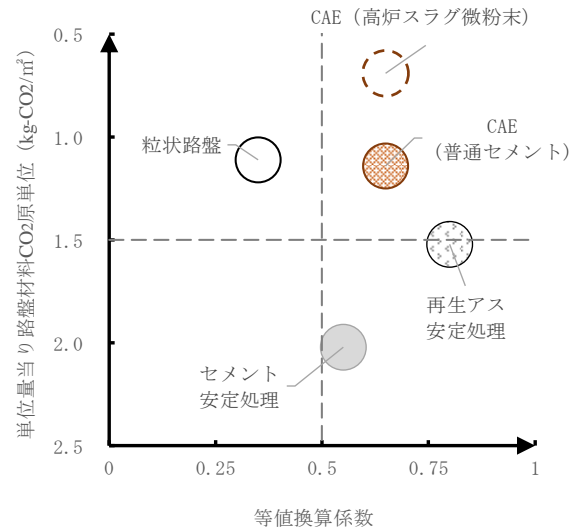


図-5 上層路盤用材料の相対位置
(等値換算係数とCO₂原単位)

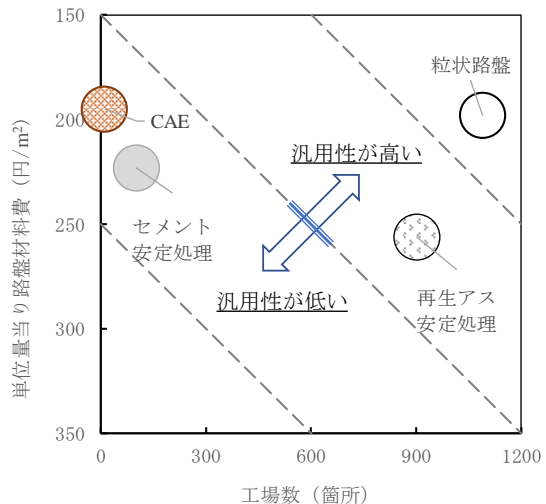


図-6 上層路盤用材料の汎用性評価
(工場数と材料費)

表-6 上層路盤用材料の材料費の算出

路盤材種別	材料費* (円/t) (現場持込)	密度 (t/m ³)	等値換 算係数	材料費 (円/m ²) ($T_A=1\text{cm}$)
CAE(乳剤2%, セメント1.5%)	5,761	2.20	0.65	195
粒状路盤	3,147	2.20	0.35	198
セメント安定処理	5,583	2.20	0.55	223
再生アス安定処理	8,700	2.35	0.80	256

※2022年4月、東京地区

様々な評価値を加え、総合的に判断していくことも必要となる。

そこで、「汎用性」の視点から評価値として、材料

費（単位量当り）および供給力（全国工場数）を設
け、ポジショニングマップの作成を行った。結果は
図-6 に示すとおりである。なお、材料費の算出は表
-6 に基づいて行っている。右上に配置されるほど汎
用性が高い評価になるよう軸の方向を設定したが、
CAE 混合物については、工場数（製造拠点）が圧倒
的に少ないため、汎用性については低い評価となっ
てしまう。

4. 製造方法の検討

前項において CAE 混合物の汎用性における課題
として、「製造拠点の不足」が明らかになった。そこ
で、製造方法について検討を行うこととした。

CAE 混合物の製造フロー（使用材料の流れと製造
工程）は図-7 に示すとおりであり、アスファルトプ
ラントと比べ骨材の加熱工程等が無く、比較的容易
な設備で製造可能であることが分かる。

これを踏まえ、「必要な時、必要な場所で製造する」
をコンセプトに、移動式 CAE 製造プラントの開発を
行った。

開発したプラントの概要を図-8 に示す。製造能力

を 100t/hr としており、骨材ホッパ（2 基）、傾斜ベル
コン、セメントチャージビン、水および乳剤ポンプ
そしてミキサーから成り、設備の設置に必要な面積
は $28\text{m} \times 6\text{m} = 168 \text{m}^2$ となる。なお、設備一式は大型ト
レーラー 3 台を用いて移動可能であり、組み立てに
必要な時間は、3 日間である。

これにより、任意の場所において CAE 混合物の製
造が可能となり、コンクリート廃材やアスファルト
廃材の破碎処理施設に併設して設置することが理想
的であると考えられる。

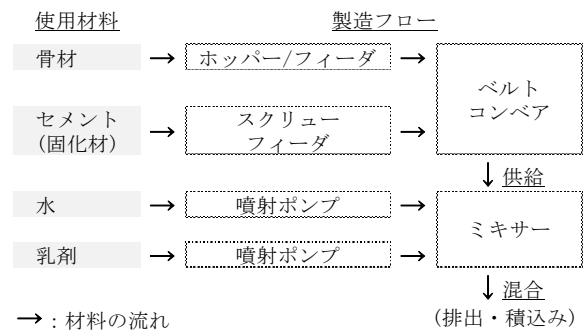


図-7 CAE 混合物の製造フロー

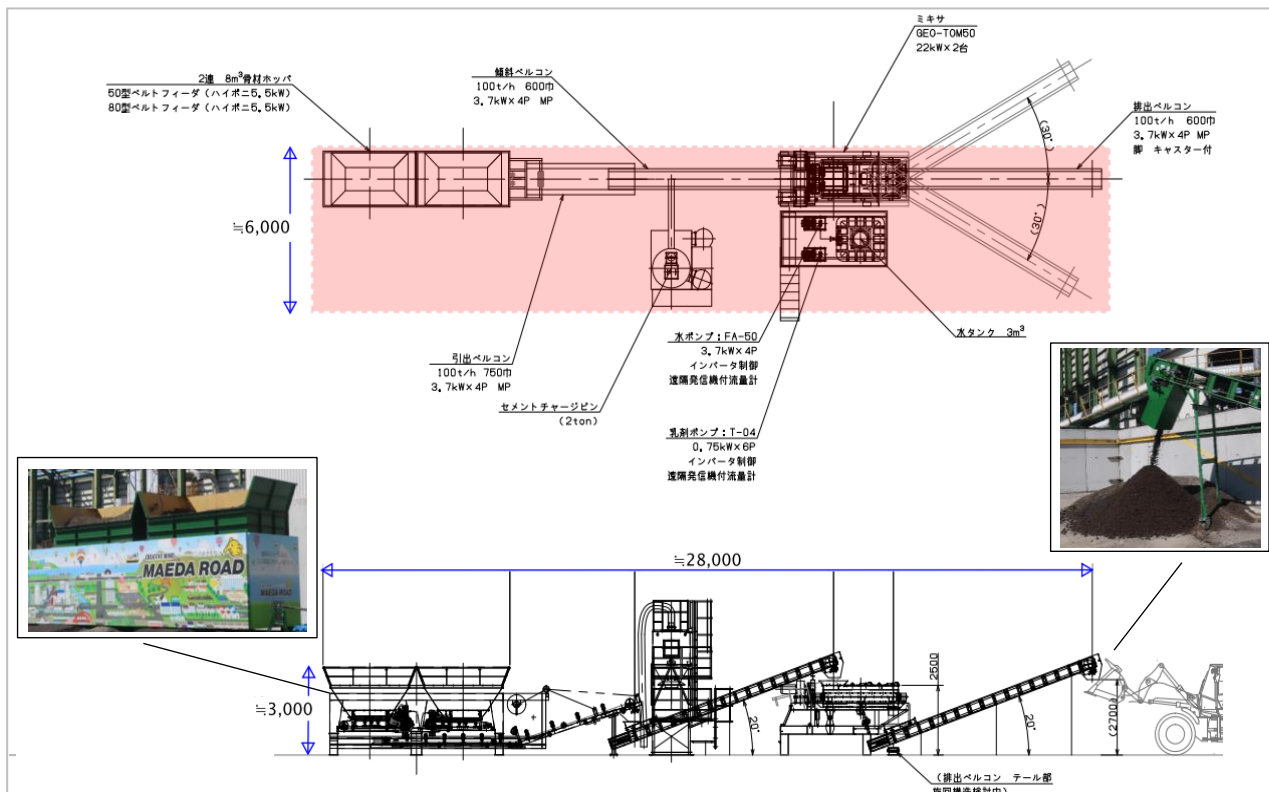


図-8 移動式 CAE 製造プラント

5. 期待される付加価値

リサイクル材の活用，脱炭素化と高耐久化の他に期待される付加価値として，液状化被害の軽減について評価を行った。

図-9 に示す振動実験台上に土槽を設置し，地震動を模擬した振動を与えた。実験の概要は図-10 に示すとおりであり，路盤用材料として，粒度調整碎石（M-30），CAE 混合物およびセメント安定処理混合物の3種類を用いた。

加振 200 回後の路盤上面の状況を図-11 に示す。M-30 については，下層の液状化に伴い路盤層が脆弱化してしまった。セメント安定処理混合物は，下層が沈下し，路盤下面に空洞が発生，それに伴いひび割れが発生した。一方，CAE 混合物については，路盤上面に異常は見られず，実験を実施した3種類の中で最も健全な状態を保っていた。

以上の実験より，CAE 混合物を路盤層に用いることで，下層に液状化が発生したとしても，一時的ではあるが舗装体の構造的な被害を軽減できる可能性があると言える。

6. おわりに

CAE 混合物は，数十年前から存在する，決して新しい舗装材料ではないが，最近の地球規模での環境問題への意識の高まりを受け，常温製造であるという利点を改めて見直し，今後活用の場を広げていきたいと考える。

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会:舗装再生便覧(平成22年版), 2010.

- 2) 阿部頼政:セメント・アスファルト乳剤混合物の力学的性状に関する基礎研究, 土木学会論文集, 第354号/V-2, pp.127-135, 1985.
- 3) (公社)日本道路協会:舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック(平成26年1月), 2014.
- 4) 谷口博, 越健太郎, 齋藤啓大:高炉スラグ微粉末を固化材に用いた中央混合方式 CAE 混合物に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会, V-394, pp.787-788, 2012.



図-9 振動実験台

15cm	路盤層	【路盤用材料】 ①M-30, ②CAE, ③セメント安定処理	【土槽寸法】 ・ 120×80×100cm
85cm	地盤層	【地盤用材料】 珪砂	【加振条件】 ・ 水平一方向 ・ 加振200回 ・ 震度5強~6弱相当

図-10 振動実験概要

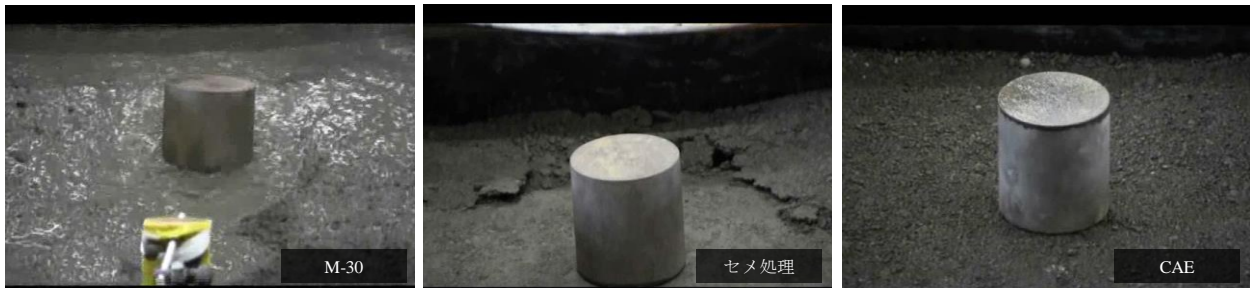


図-11 振動実験後状況(加振200回後)