



構築材料を全て建設副産物とした環境負荷低減に寄与する安定処理路盤の開発

鹿島道路㈱ 技術研究所

//

//

//

鹿島道路㈱ 関東支店 技術部

名城大学 理工学部 環境創造工学科

田口 翔大

横田 慎也

神下 竜三

武藤 朱音

西海 昌彦

道正 泰弘

1 はじめに

近年、各産業・業界において、環境負荷低減技術が積極的に開発されている。舗装業界も例外ではなく、環境負荷低減に寄与する舗装技術として、遮熱性舗装や中温化技術、および建設副産物の有効利用が一般に広く認知されている。これらの技術は、CO₂排出量削減に寄与することができ、昨今よく耳にするカーボンハーフやカーボンニュートラルに貢献し得る技術であるものとする。

ここで、代表的な建設副産物であるコンクリート塊は、現在約99%が再資源化されており、その多くはコンクリート塊を破碎処理した再生クラッシュラン（以下、RC）が路盤材として利用されている現状がある。一方で、近年では需要と供給のバランスから、コンクリート用再生骨材への利用が推進されるなど、更なる活用方法の拡大が求められている¹⁾²⁾。

本研究は、より環境負荷低減効果を高めることを目的として、全ての材料が建設副産物で構築される路盤材料（以下、100%リサイクル安定処理路盤）の開発を行ったものである。環境負荷低減効果の高い舗装材料は、今後の持続可能なインフラ

形成には不可欠であり、RCを利用したより環境負荷低減効果の高い舗装材料を開発することができれば、今後の継続的なコンクリート塊の再資源化に寄与できるものとする。本研究の結果、開発した100%リサイクル安定処理路盤の適用可能性および有効性を確認したので、以下に報告する。

2 開発の概要

2-1 開発目標

本研究の目標は、より環境負荷低減効果を高めた路盤材料の開発であるため、材料は全て建設副産物とし、汎用性の高い上層路盤としての性能確保を目標とした。

本研究の検討フローを図-1に示す。まず、使用材料の検討として、RCに添加する固化材の調査および選定を行った。次に、室内配合検討では、100%リサイクル安定処理路盤の基礎物性を確認した。

最後に、実大走行試験によって、舗装構築時における施工性の確認や、走行試験後の供用性の確認を行うことで、有効性を総合的に評価した。

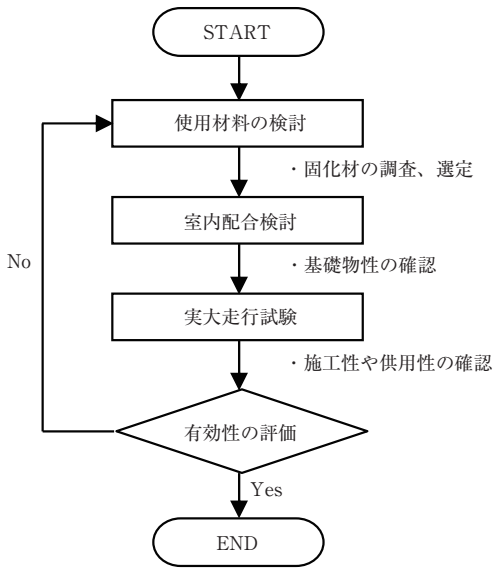


図-1 本研究の検討フロー

2-2 使用材料

使用材料を表-1に示す。100%リサイクル安定処理路盤に使用する骨材は、RCの粒径40mm～0mm（以下、RC-40）とし、固化材には製造時のCO₂排出量が大いセメントを使用せず、潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末のみを使用した。高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を引き出すために必要となるアルカリ性の刺激材（以下、刺激材）についても建設副産物とするため、建設副産物の調査および要素試験を実施し、硬化性状が最も良好であった刺激材Aを選定した。刺激材Aの主成分は水酸化カルシウムである。

また、比較対象として、材料に粒度調整砕石（以下、M-40）と高炉セメントB種を用いた一般的なセメント安定処理路盤についても検討を行った。

表-1 使用材料

分類	詳細	記号
骨材	コンクリート再生クラッシュラン	RC-40
	粒度調整砕石	M-40
固化材	高炉スラグ微粉末	BFS
	高炉セメントB種	BB
刺激材	刺激材A	A

RC-40とM-40の基本物性を表-2に、粒径加積曲線を図-2に示す。RC-40は密度、吸水率、およびすり減り減量がいずれもM-40よりも大き

表-2 RC-40とM-40の基本物性

項目	RC-40	M-40
密度 (g/cm ³)	2.263	2.600
吸水率 (%)	5.41	0.88
すり減り減量 (%)	22.5	15.2
通過質量百分率 (%)	53.0	100
	37.5	100
	19.0	86.0
	4.75	36.9
	2.36	23.0
	0.075	1.5
		6.8

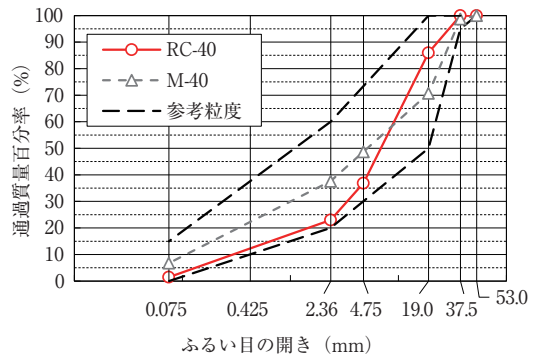


図-2 RC-40とM-40の粒径加積曲線

くなっている。これは、RC-40の周りに付着したモルタル分が大きく影響しているものと考えられる。また、RC-40の粒度は、図中に示す参考粒度範囲（安定処理路盤に用いる骨材の品質の目安³⁾）内となるように調整した。

3 室内検討結果

3-1 刺激材の効果に関する事前検討

既往の研究⁴⁾によると、RC-40はアルカリ性を示すため、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を引き出す効果があることが分かっている。そこで、高炉スラグ微粉末を固化材に使用した場合の刺激材の必要性を確認することを目的とした事前検討を実施した。試験ケースを表-3に示す。骨材はいずれもRC-40を用い、固化材添加量はいずれも

表-3 試験ケース（予備検討）

No.	固化材と刺激材	記号	添加量
1	高炉スラグ微粉末	BFS	4.0%
2	高炉スラグ微粉末+消石灰	BFS+CH	4.0%+0.4%
3	普通セメント	NC	4.0%

4.0%に設定し、刺激材については本予備検討に限り、建設副産物に比べ成分のばらつきが少ないと考えられる消石灰(CH)を用いた。刺激材添加量は固化材質量の10%とし、参考として普通セメント(NC)の試験も行った。

試験は、試験法便覧⁵⁾(E011、E013)に準拠して実施し、突固め試験は高炉スラグ微粉末を4.0%添加した試験ケース No.1にて実施した結果、最適含水比が13.6%となったため、ケース No.2、No.3においても最適含水比を13.6%と見なした。最適含水比に調整したRC-40にて供試体を作製し、一軸圧縮強度試験を実施した結果を図-3に示す。固化材に高炉スラグ微粉末を用いた場合、刺激材の添加により、一軸圧縮強度が高くなることを確認した。よって、以降は刺激材を使用することを前提として検討を行った。

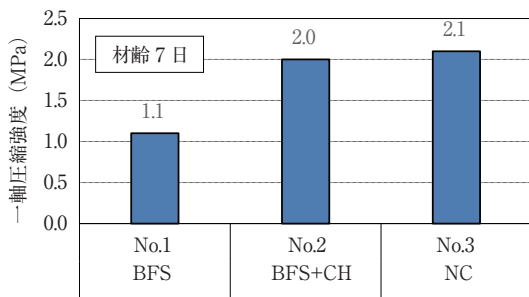


図-3 一軸圧縮試験結果 (予備検討)

3-2 配合試験

事前検討結果を踏まえ、刺激材を建設副産物である刺激材 A とした場合の本配合試験を実施した。試験は予備検討と同様に、試験法便覧に準拠して実施した。一軸圧縮強度の目標値は、安定処理路盤の上層路盤の性能を満足するように、2.9MPaとした。

(1) 刺激材添加量

予備検討の結果を踏まえ、建設副産物である刺激材 A の添加量を決定するための検討を行った。高炉スラグ微粉末の添加量は予備検討結果を踏まえ仮に5.5%とし、刺激材添加量は高炉スラグ微粉末添加量の1割である0.55%を最小として、骨材乾燥質量に対して0.55%、2%、5%の3点で刺

激材添加量と一軸圧縮強度との関係を検討した。一軸圧縮試験結果を図-4に示す。本検討の範囲においては、刺激材の添加量によらず、いずれの添加量においても目標値を満足する結果が得られ、固化材添加量に対して10%以上の刺激材を添加すれば、刺激材 A においても強度発現効果が得られることが確認された。

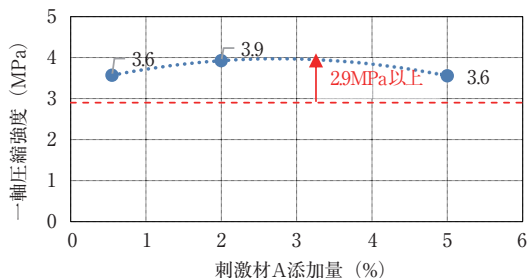


図-4 一軸圧縮試験結果 (刺激材添加量の検討)

(2) 突固め試験

100%リサイクル安定処理路盤材の突固め試験を実施し、最適含水比と最大乾燥密度を確認した。また、参考として、M-40と高炉セメントB種を使用したセメント安定処理路盤材についても同様の試験を行った。突固め試験時の固化材添加量は、100%リサイクル安定処理路盤材については5.5%とし、セメント安定処理路盤材については既往の知見から3.0%とした。また、刺激材添加量は、図-4に示す検討結果と、施工時の混合性のばらつきを考慮し2%とした⁶⁾。試験結果を図-5に示す。100%リサイクル安定処理路盤材の乾燥密度はM-40を使用したセメント安定処理路盤材と比べて低く、最適含水比が高い結果となった。これは、RCの密度が低く吸水率が大きいことが影響しているものと考えられる。

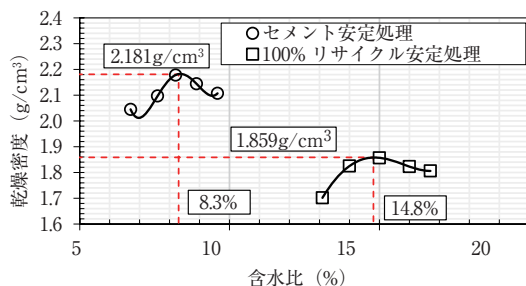


図-5 突固め試験結果

(3) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、突固め試験で得られた最適含水比に調整した材料を用いて供試体を作製し実施した。試験結果を図-6に示す。目標とする一軸圧縮強度2.9 MPaを満足する固化材添加量は、100%リサイクル安定処理路盤材で5.6%、比較対象の粒度調整碎石と高炉セメントB種を使用した安定処理路盤材は3.8%となった。

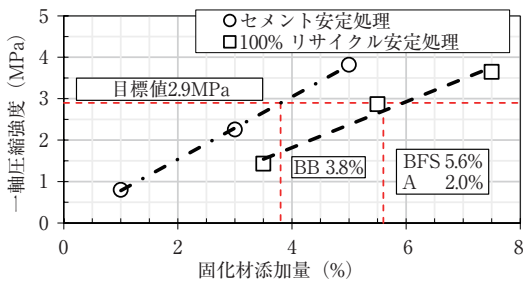


図-6 一軸圧縮試験結果

固化材添加量増加に伴う一軸圧縮強度の関係は、通常のセメント安定処理路盤と比較して、100%リサイクル安定処理路盤材は、固化材添加量に対する一軸圧縮強度の増加はやや緩やかとなった。

以上より、使用材料の全てを建設副産物とした100%リサイクル安定処理路盤材は、固化材の添加量を調整することで目標とする一軸圧縮強度2.9 MPaを満足することから、アスファルト舗装における上層路盤用のセメント安定処理路盤材として適用できると考える。

(4) 環境安全性評価

100%リサイクル安定処理路盤を対象に、土壌汚染対策法で定められている土壌の環境安全性評価試験⁷⁾を実施したところ、含有量、溶出量とも環境基準値以下であり、人体や周辺環境に対して安全であることを確認した。なお、表-4に示すように、高炉スラグ微粉末を使用することにより、六価クロム溶出量が減少する傾向も確認され、より環境安全性の高い材料であることも確認した。

表-4 六価クロム溶出量試験結果

材料名	溶出量	規格値
RC-40	0.014 mg/L	0.05mg/L 以下
100%リサイクル安定処理路盤	0.011 mg/L	

3-3 室内検討結果まとめ

室内検討の結果、得られた知見を以下に示す。

- ① 高炉スラグ微粉末を固化材に用いた際の安定処理路盤の強度発現には、アルカリ刺激材が必要である。
- ② 刺激材 A の添加量が強度発現性に与える影響は小さくなく、固化材添加量の10%以上の刺激材を添加することで強度発現に寄与することができる。
- ③ 固化材添加量は、一般的なセメント安定処理路盤と比較し多くなる傾向にある。
- ④ 100%リサイクル安定処理路盤は環境に対して安全な材料であり、六価クロム溶出を抑える効果がある。

4 実大走行試験

4-1 走行試験概要

実大走行試験の検討フローを図-7に示す。実大走行試験の目的は、実大規模の舗装体を構築することによる施工性の評価、並びに構築後の舗装体にて輪荷重走行試験を実施することで供用性を確認するものである。試験は、実大舗装ロードシミュレータによって実施した。ロードシミュレータ諸元を表-5に、ロードシミュレータ外観を写真-1に示す。

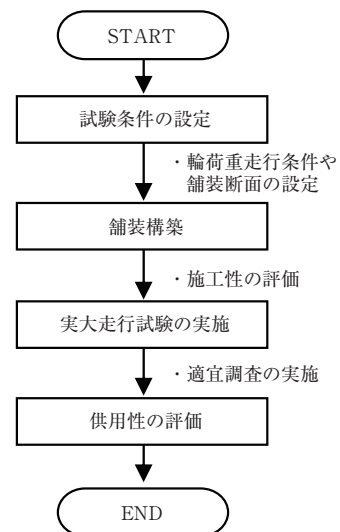


図-7 実大供試体実験の検討フロー

表－5 ロードシミュレータ諸元

項目	単位	内容
輪荷重	kN	～68.6
横方向トラバース	mm	1,000
走行速度	km/h	5
舗装幅員	mm	4,000
舗装延長	m	30



写真－1 ロードシミュレータ外観

(1) 試験条件、舗装断面、調査項目

輪荷重走行条件は、輪荷重59 kN（ダブルタイヤ）とし、2.5万輪ごとに140 mm左右にずらす（舗装の中心線と、その中心線を片側タイヤの芯が通るように移動させる）ことを基本とした。舗装計画交通量はN₄交通とし、載荷は49 kN換算輪数でN₄交通の10年間の疲労破壊輪数である15万輪以上となるよう20万輪まで実施することとした。舗装断面の設計はT_A法によって行った。開発した100%リサイクル安定処理路盤と、比較用の粒度調整碎石と高炉セメントB種を用いた安定処理路盤の断面を設定し、その等値換算厚係数は舗装設計便覧⁸⁾を参照し、いずれも0.55とした。路床の設計CBRは6であり、その場合の信頼度90%における必要等値換算厚を満足する舗装断面を設定した。舗装断面の概要を図－8に示す。調査は、路

	係数	厚さ	T _A '
5cm 密粒度アスファルト混合物	1.0	5cm	5cm
15cm 100%リサイクル安定処理路盤 または セメント安定処理路盤	0.55	15cm	8.25cm
20cm 粒状路盤	0.25	20cm	5cm
路床 (CBR = 6)	計	40cm	18.25cm

図－8 舗装断面の概要

面性状調査と舗装構造調査を行うこととし、走行5万輪ごとに実施した。調査項目を表－6に示す。

表－6 調査項目

項目	調査内容	試験方法*
路面性状	ひび割れ率	S029
	わだち掘れ量	S030
舗装構造	舗装支持力	S047
	等値換算厚	

*いずれも舗装調査・試験法便覧⁶⁾による

(2) 舗装構築

安定処理路盤の配合諸元を表－7に示す。100%リサイクル安定処理路盤およびセメント安定処理路盤の配合は、現地混合による安全率の考え³⁾から、室内配合検討によって得られた固化材添加量を2割増加させ、刺激材については配合試験時と同様の2.0%とした。100%リサイクル安定処理路盤の施工状況を写真－2に示す。固化材および刺激材を目標とする添加量となるように散布し、スタビライザによる攪拌後、ローラによって締め固めることで施工することができ、一般的なセメント安定処理路盤と同様の施工で十分に対応が可能であることを確認した。

表－7 安定処理路盤の配合諸元

混合物名 (使用材料)	添加量 (%)		
	固化材		刺激材
	室内	現場	
セメント安定処理路盤 (M-40 + BB)	3.8	4.6	－
100%リサイクル安定処理 (RC-40 + BFS + A)	5.6	6.7	2.0



写真－2 100%リサイクル安定処理路盤の施工状況

4-2 走行試験結果

(1) 路面性状の変化

49 kN換算輪数20万輪走行後の路面状況を写真－3に、走行20万輪後の横断形状を図－9に、タイヤ走行位置におけるわだち掘れ量の平均値の推移を図－10に示す。いずれの舗装断面の工区に



写真-3 路面状況 (20万輪走行後)

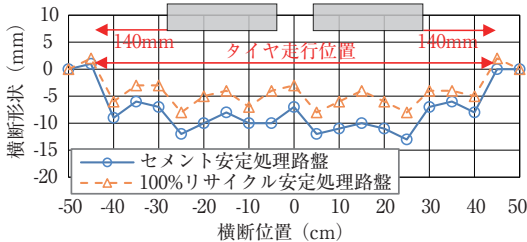


図-9 横断形状 (20万輪走行後)

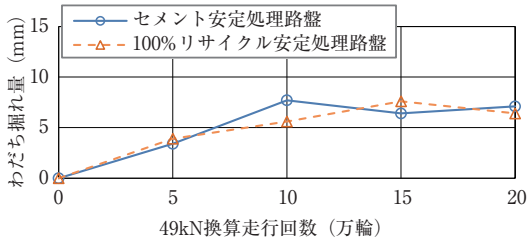


図-10 平均わだち掘れ量の推移

においても、ひび割れは発生しておらず、わだち掘れ量においては走行5万輪後の時点で初期わだちが確認されたものの、その後進行するような傾向は確認されなかった。

(2) 舗装構造の健全性

舗装構造調査は、FWDを用いた舗装支持力調査を実施した。FWDによって得られた D_0 たわみ量の推移を図-11に、たわみ量から推定した残存 T_A の推移を図-12に示す。これらの結果は各舗装断面の計測点3点の平均値を示している。

セメント安定処理路盤および100%リサイクル安定処理路盤ともに、 D_0 たわみ量と残存 T_A の初期値は同程度であり、 D_0 たわみ量は N_4 交通の許容たわみ量である0.9 mm以下を満足し、残存 T_A については設計値よりは低い値であったものの、載荷20万輪まで必要等値換算厚を満足する結果であった。ここで、100%リサイクル安定処理路盤については、載荷回数が増加するに従い D_0 たわみ量は減少し、残存 T_A は増加する傾向が確認

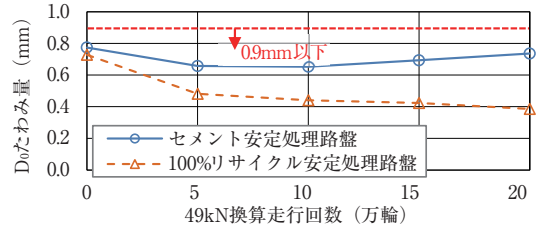


図-11 D_0 たわみ量の推移

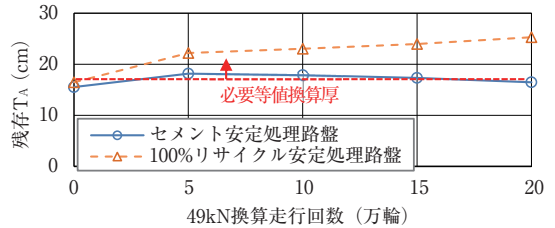


図-12 残存 T_A の推移

されたが、これは100%リサイクル安定処理路盤の強度が材齢とともに増加したことが影響しているものとする。

4-3 実大走行試験まとめ

実大走行試験の結果、得られた知見を以下に示す。

- ① 100%リサイクル安定処理路盤は、一般的なセメント安定処理路盤と同様の施工で構築が可能である。
- ② 走行試験後の路面性状は良好で、舗装構造も健全であり、一般的なセメント安定処理路盤と同等の性能を有している。

5 有効性の評価

本研究で検討した100%リサイクル安定処理路盤と一般的なセメント安定処理路盤(固化材はNCおよびBB)について、使用材料の CO_2 排出量とコストの試算を行った結果を図-13に示す。100%リサイクル安定処理路盤は、固化材を高炉スラグ微粉末に変更することによる CO_2 排出量の大幅な削減効果、および骨材をRC-40に変更することによるコスト削減効果があることを確認した。なお、材料費の試算は実大走行試験を実施した地域における算出結果であり、地域差があることを付記しておく。

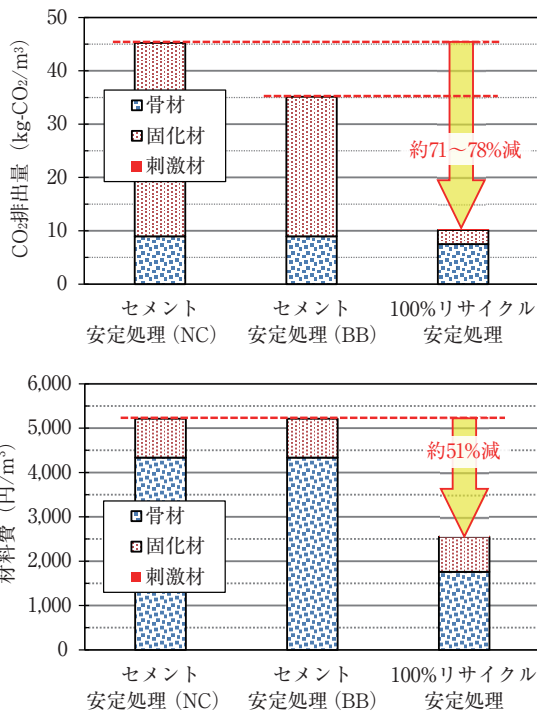


図-13 CO₂排出量・材料費試算結果

100%リサイクル安定処理路盤の有効性を評価した結果を表-8に示す。100%リサイクル安定処理路盤は、使用材料によるCO₂削減効果やコスト削減効果が認められたのに加え、一般的なセメント安定処理路盤と同様の施工機械による施工が可能であるため、施工機械に要する費用は同程度であると想定される。また、施工時間についても、刺激材の散布という工程が一つ追加となるものの、一般的なセメント安定処理路盤と同程度といえる。これらのことから、100%リサイクル安定処理路盤は一般的なセメント安定処理路盤と比較し、CO₂削減効果およびコスト面において優位性のある材料であると考えられる。

表-8 100%リサイクル安定処理路盤の有効性評価結果

項目		評価結果*
CO ₂ 排出量削減効果		約71~78%減
コスト	材料費	約51%減
	施工費	同程度
施工時間		同程度

*一般的なセメント安定処理路盤と比較した結果

6 おわりに

筆者らは、全ての材料が建設副産物で構成される100%リサイクル安定処理路盤の開発を行った。実大走行試験により、一般的なセメント安定処理路盤と同等の性能を有することを確認し、その特徴から環境負荷低減効果やコスト削減効果があることを確認した。

今後は、RC-40の品質が変化した場合の諸性状の確認等、当工法が一般的に普及することを想定した際の課題の抽出および解決を進めたいと考えている。



〔謝辞〕本研究を実施するにあたり、東和アークス(株)、ゴトウコンクリート(株)関係諸氏から多くの支援を賜りました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 国土交通省：平成30年度建設副産物実態調査結果、2020.1.
- 2) (一社)日本アスファルト合材協会：アスファルト合材NO.144、p.56、2022.10.
- 3) (一社)日本道路協会：舗装施工便覧、2006.2.
- 4) 谷口博ほか：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、(一社)土木学会第67回年次学術講演会、V-394、2012.
- 5) (一社)日本道路協会：舗装・調査試験法便覧(平成31年度版)、2019.3.
- 6) (一社)日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル、2009.12.
- 7) 環境省：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン、2022.8.
- 8) (一社)日本道路協会：舗装設計便覧、2006.2.