

2.3.10. 土中に設置した鋼製補強材の供用期間中にわたる経年的な変化への対処方法

(1) はじめに

本項では、土中に設置されることから一般に維持管理が困難な部材である補強材について、供用期間中にわたる経年的な変化への対処方法を明らかとすることを目的とする。道路橋示方書・同解説IV下部構造編 2.3.10-1)7.9 節(1)2)では、橋台背面アプローチ部の構造は、経年的な変化への対処方法が明らかであることが求められている。

ここでは、補強土壁に一般的に用いられる補強材の中でも鋼製補強材（帯鋼および棒鋼）に着目した。まず、鋼材の土中腐食に関する既往研究を整理し、及び現状行われている鋼製補強材の耐久性を確保するための方法を整理した。そのうえで、供用開始後 49 年目までの鋼製補強材サンプルの腐食減量の実測データを整理し、長期間経過後の腐食減量の見込みを統計的に分析した。また、近年認められた著しい腐食が生じた事例についてその要因を整理し、同様の要因による腐食を生じさせないために前提となる条件を明確にした。

以上の結果に基づき、経年的な変化への対処方法を整理し、鋼製補強材を用いた補強土壁の経年的な変化への対処方法として補強土壁の更新を想定し、計画時に更新時期の目安とできるデータとその前提となる条件を明確にした。

(2) 土中の鋼製材料の腐食に関する防食対策の概要と既往の研究事例

土中の鋼製材料の腐食に関する基本的な特徴を把握するために、鋼杭、鋼矢板および鋼製補強材に関する土中腐食性状の実態を整理した。

1) 鋼杭、鋼矢板の土中腐食性状の研究事例

守屋ら^{2.3.10-2)}は、全国 20 地点で経過年数 26 年までの一般的な土壌における埋設環境にある土木用鋼材を対象に、腐食に関する調査結果の整理を実施した（図-2.3.10.1）。その結果、沿岸部の鋼材腐食は顕著な結果となっており、埋設された鋼材の腐食速度は経年的に低下し、鋼材の 100 年後の片面あたり平均腐食減量は約 1mm であるとしている。ここで、守屋らの研究においては、鋼材の腐食減量の指標としてその片面あたりの値が用いられている。片面あたりの値が用いられている理由は、「鋼管杭の場合、杭頭部が基礎等コンクリートで閉鎖環境にあるため、鋼管杭内面はほとんど腐食しない。このため鋼管杭の腐食減量は外面のみの片面腐食と考えられる。」とされている。ここで、その形状の特性に鑑みれば、鋼製補強材のうち、棒鋼については鋼管杭と同様にその周面が土と接する考え方である。対して、鋼製補強材の帯鋼については、その全周が土と接する点に違いがある。

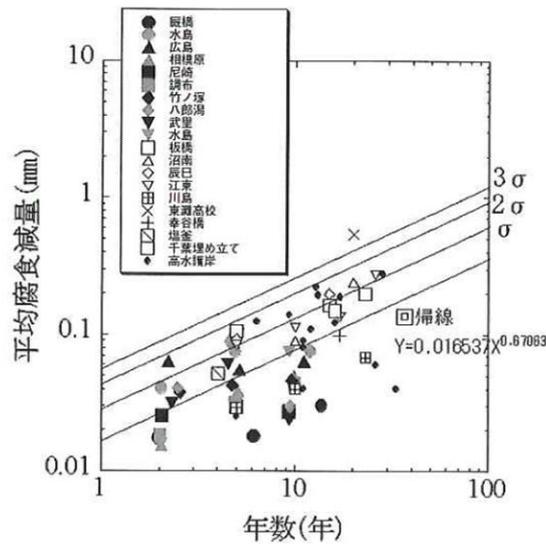


図-3 平均腐食減量の経年変化

(a) 平均腐食減量の経年変化

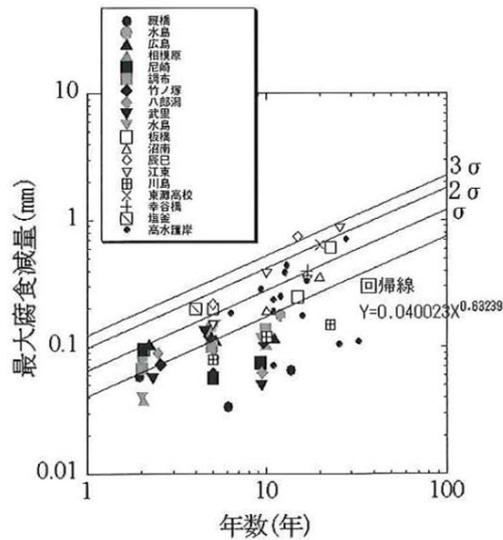


図-6 最大腐食減量の経時変化

(b) 最大腐食減量の経年変化

図-2.3.10.1 土木用鋼材の腐食減量の経年変化^{2.3.10-2)}

守屋ら^{2.3.10-2)}は、腐食速度が経年的に低下することから、 $Y=BX^A$ で整理することが妥当とし、腐食減量データの最小二乗法による回帰式として次式を得ている。

平均腐食減量(Y)の回帰式 $Y=0.0165X^{0.671}(\text{mm})$ (1)

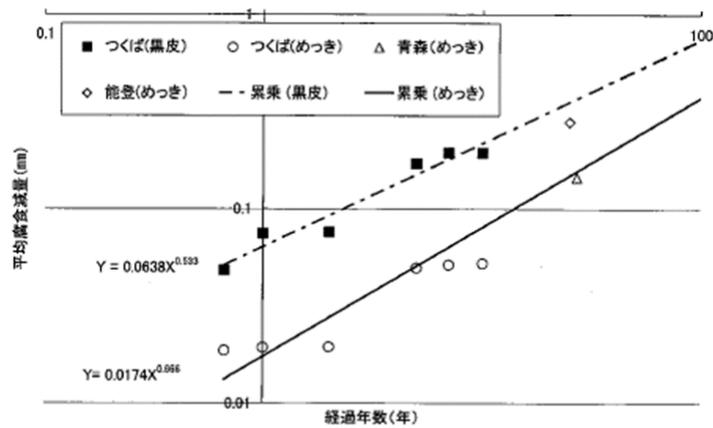
X: 経過年数(年)

最大腐食減量(Y)の回帰式 $Y=0.0400X^{0.632}(\text{mm})$ (2)

X: 経過年数(年)

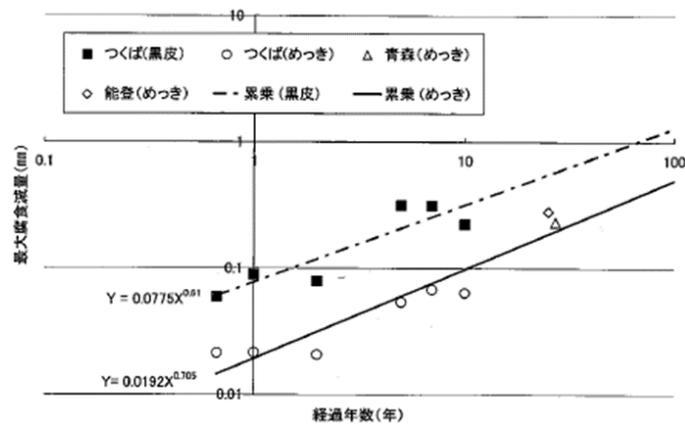
2) 鋼製補強材の腐食性状に関する研究事例

補強土壁マニュアル^{2.3.10-3)}では、経過年数 27 年までの補強土壁を対象に、鋼製補強材の腐食実態の調査結果が示している(図-2.3.10.2、表-2.3.10.1)。結果としては、めっき(HDZ35)した鋼製補強材の盛土内における 100 年後の腐食減量(平均)の予測値は、両面あたりで 0.37mm(片面あたり 0.19mm)、腐食減量(最大)の予測値は、両面あたりで 0.49mm(片面あたり 0.25mm)と示されている。



技資図 6-8 モニタリング試験結果(平均腐食減量, 両面)

(a) 平均腐食減量の経年変化



技資図 6-9 モニタリング試験結果(最大腐食減量, 両面)

(b) 最大腐食減量の経年変化

図-2.3.10.2 鋼製補強材の腐食減量の経年変化^{2.3.10-3)}

表-2.3.10.1 回帰式より算出した腐食減量（両面）（mm） 2.3.10-3

種類	回帰式		75年	100年
	めっき 無し	平均腐食減量		
最大腐食減量		$Y = 0.0775X^{0.61}$	1.08	1.29
めっき 有り	平均腐食減量	$Y = 0.0174X^{0.666}$	0.31	0.37
	最大腐食減量	$Y = 0.0192X^{0.705}$	0.40	0.49

3) 土中の鋼製材料の防食対策の概要

(2)1)および 2)より、鋼管杭等と鋼製補強材の腐食減量を比較すると、鋼製補強材の数値が低いことがわかった。これは、守屋ら^{2.3.10-2)}の研究が沿岸部の地点の地盤でも腐食減量を調査しているのに対し、補強土壁は盛土材料に適用条件を設けているため、腐食減量が小さいと考えられる。

道路橋示方書IV^{2.3.10-1)}及び各補強土壁マニュアル^{2.3.10-3), 2.3.10-4)}に記載されている鋼管杭と鋼製補強材において講じることとされている防食の仕様について表-2.3.10.2に示す。鋼管杭と鋼製補強材で地盤・盛土材料の仕様と防食処理・腐食しろの方法はそれぞれ異なり、特に、地盤・盛土材料の条件については、鋼管杭は条件を設けておらず、鋼製補強材は条件を設けていることが大きく異なる。防食対策については、海水等の影響のない一般的な地盤条件において、鋼管杭は腐食しろを外面1mmとすればよいとされているが、鋼製補強材は腐食しろに加えめっき処理を講じることとされている。鋼製補強材を用いる場合の盛土材料の電気化学的性質の基準は、国内導入時にフランスの基準を参考に、pH、電気比抵抗、塩化物含有量及び硫化物含有量に関する規格値が設定された。電気比抵抗について、国内の基準はフランスの基準に比べ非常に厳しい値としている。

表-2.3.10.2 防食仕様の概要（鋼管杭と鋼製補強材との比較）

	環境の条件(腐食要因)	地盤・盛土材料の規定値				防食処理	腐食しろ
		pH	塩化物含有量	硫化物含有量	電気比抵抗		
補強土壁 (鋼製補強材)	(通常)海水や鋼製補強材の腐食を促進させる酸性土壌等の影響を受けない場合	5~12	0.02%以下 (水辺: 0.01%以下)	0.03%以下 (水辺: 0.01%以下)	5000 Ω・cm 以上 5000 ~1000 Ω・cm	亜鉛めっき 帯鋼:両面700g/m ² 以上(HDZ35) 棒鋼:両面550g/m ² 以上(HDZ55) 亜鉛めっき 帯鋼:両面1000g/m ² 以上(HDZ50) 棒鋼:両面550g/m ² 以上(HDZ55)	1.0mm (鋼製補強材の両面または周面)
	(厳しい)海水や鋼製補強材の腐食を促進させる酸性土壌等の影響を受ける場合	(記載無し)				耐用期待年数と環境条件に応じて、腐食しろの設定や防食対策を個別に検討	
鋼管杭	(通常)海水や鋼の腐食を促進させる工場排水等の影響を受けない場合	(腐食調査を行わない)				施さない	1.0mm (鋼管杭の外面)
	(厳しい)海水や鋼の腐食を促進させる工場排水等の影響を受ける、常時乾湿を繰り返す場合	(記載無し)				十分な防食処理	

(3) 鋼製補強材の腐食実態に関する調査

(2)で示したように土中の鋼管杭等の腐食性状と鋼製補強材の腐食性状では差異が見られた。また、上述した2つの研究とも供用後、約30年以内の構造物に対する調査結果から将来的な腐食減量を予測している。よって、長期的な腐食減量の予測精度の信頼性を上げるためには、より長期間経過したサンプルを含めて統計的に整理することが必要であると考えられる。なお、鋼製補強材のうち棒鋼の調査サンプル数が十分でないため、ここでは帯鋼の調査結果のみを示す。

1) 調査対象

表-2.3.10.3は、腐食実態の分析で対象とした鋼製補強材のサンプルの一覧である。2014年時点で実施された全国3地点の14サンプル(表-2.3.10.3青点線枠)の腐食減量の調査に加えて、新たに7地点の9サンプル(表-2.3.10.3赤実線枠)の腐食減量の調査を実施した。調査は、地盤埋設試験または既設補強土壁の部材の試掘により実施した。結果として経過年数49年までの全国10地点の23サンプルの補強材の腐食減量の調査結果を整理し、その調査結果から経過年数と腐食減量の関係を分析した。図-2.3.10.3に、調査した補強土壁の一例を示す。

表- 2.3.10.3 分析した鋼製補強材のサンプルの一覧

	地点	鋼材	亜鉛めっき仕様	土質分類	経過年数	平均腐食減量 (mm)	最大腐食減量 (mm)	調査目的
1-1	青森県今別町	補強材 (帯鋼)	Z45 450g/m2(両面)	—	27	0.145	0.229	—
2-2	岩手県大船渡市	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	細粒分混じり砂質礫(GS-F)	20	0.138	0.138	長期間経過
3-3	群馬県長野原町	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	細粒分混じり砂質礫(GS-F)	12	0.154	0.198	長期間経過
4-4	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	黒皮	砂質土	0.667	0.048	0.06	地盤埋設試験
4-5	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	黒皮	砂質土	1	0.075	0.089	地盤埋設試験
4-6	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	黒皮	砂質土	2	0.076	0.079	地盤埋設試験
4-7	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	黒皮	砂質土	5	0.145	0.162	地盤埋設試験
4-8	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	黒皮	砂質土	7	0.195	0.313	地盤埋設試験
4-9	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	黒皮	砂質土	10	0.195	0.222	地盤埋設試験
4-10	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	砂質土	0.667	0.019	0.021	地盤埋設試験
4-11	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	砂質土	1	0.019	0.021	地盤埋設試験
4-12	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	砂質土	2	0.020	0.021	地盤埋設試験
4-13	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	砂質土	5	0.050	0.054	地盤埋設試験
4-14	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	砂質土	7	0.052	0.068	地盤埋設試験
4-15	茨城県つくば市	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	砂質土	10	0.052	0.064	地盤埋設試験
5-16	山梨県上野原市	連結材 (コネクティブ)	Z27 270g/m2(両面)	粘性土質砂質礫(GCsS)	49	0.268	0.32	経年後の追跡調査
6-17	長野県岡谷市川岸地内	連結材 (コネクティブ)	Z27 270g/m2(両面)	細粒分質砂質礫(GFS)	38	0.265	0.349	長期間経過
6-18	長野県岡谷市小坂地内	連結材 (コネクティブ)	Z27 270g/m2(両面)	細粒分質砂質礫(GFS)	38	0.271	0.334	長期間経過
7-19	石川県 (H19 能登半島地震)	補強材 (帯鋼)	Z50 500g/m2(両面)	—	25	0.281	0.281	平成 19 年被災調査
8-20	三重県	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	細粒分質礫質砂(SFG)	20	0.100	0.114	長期間経過
9-21	広島県安芸太田市中筒賀地内	連結材 (コネクティブ)	Z27 270g/m2(両面)	細粒分混じり砂質礫(GS-F)	37	0.382	0.390	長期間経過
9-22	広島県安芸太田市上筒賀地内	連結材 (コネクティブ)	Z27 270g/m2(両面)	細粒分砂混じり礫(G-FS)	37	0.221	0.251	長期間経過
10-23	愛媛県来島海峡歩道橋	補強材 (帯鋼)	HDZ35 700g/m2(両面)	細粒分混じり砂質礫(GS-F)	1	0.022	0.022	構造物改修工事の調査



図-2.3.10.3 調査した補強土壁の一例（山梨、竣工後49年経過）

2) 調査方法

a) サンプル採取方法

腐食減量を測定するにあたって、鋼製補強材またはコネクティブのサンプルを採取した。供用中の補強土壁では、図-2.3.10.4に示したように壁面材を削孔しコネクティブを採取した。採取後には、図-2.3.10.5に示したように代わりとなる新たなコネクティブを設置し、壁面材を含めて元の形状・材料となるように復元した。供用が終了した補強土壁に対しては、撤去時にサンプルを採取した。

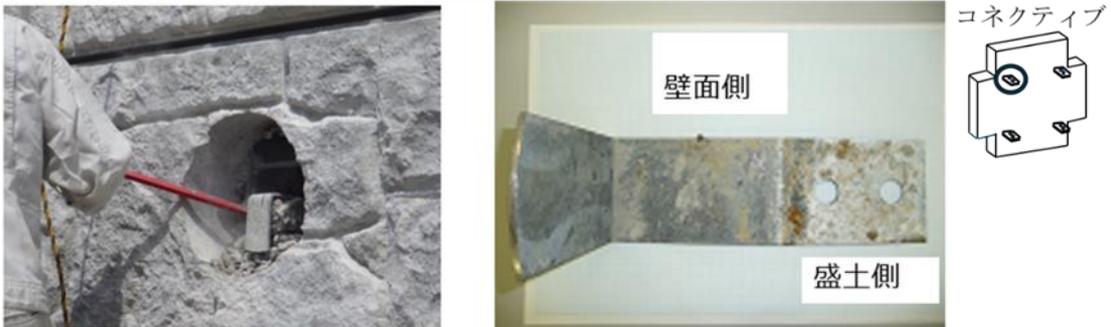


図-2.3.10.4 壁面材削孔によるサンプル採取の例



① コネクティブ接続



② 盛土材充填



③ 補修用配筋



④ ポリマーセメント充填



⑤ 型枠設置状況



⑥ モルタル充填



⑦ 補修完了

図-2.3.10.5 供試体採取後の壁面材の復元方法の例 ^{2.3.10-5)}

b) サンプル採取の状況

採取した鋼製補強材等のサンプルについては、腐食減量の測定に供するために下処理を行った。下処理の手順は図- 2.3.10.6 のとおりで、まず、採取した供試体を水洗いし (②)、除錆後 (③) に薬液 (希硫酸水溶液) で浸漬して残存亜鉛めっきを除去し、水洗乾燥後に亜鉛めっき除去後 (④) を測定用の供試体とした。

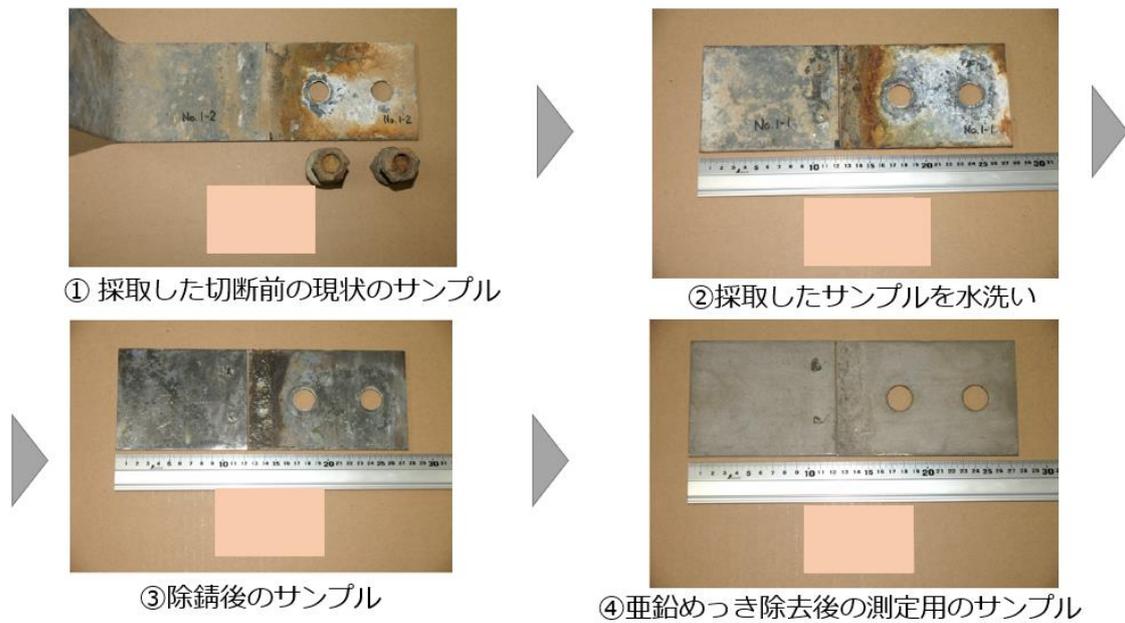


図- 2.3.10.6 採取したサンプルの下処理の手順

c) 腐食減量の測定方法

腐食減量の測定にあたっては、サンプルの表面に凹凸があると、肉厚測定では安定して適正な計測をすることが困難であることが多いため、重量測定を基本とした。ただし、明らかに孔食等の不均一な腐食が生じている場合には、肉厚測定も併せて実施し腐食減量が過少に評価されることがないようにした。重量測定および肉厚測定による腐食減量の測定方法を図- 2.3.10.7 に示す。



重量測定	①残存亜鉛めっき除去後の鋼材重量の算出 電子天秤等を用いて、1サンプルを計量する。
	②鋼材の欠損重量の算出 ＝初期鋼材重量－残存亜鉛めっき除去後鋼材重量
	③腐食減量の算出 ＝鋼材の欠損重量/(鋼の比重×サンプルの面積)
肉厚測定	①残存亜鉛めっき除去後の鋼材厚みの計測 厚み計を用いて、残存亜鉛めっき除去後の1サンプルに対し、それぞれ16箇所程度(長さ方向25mm or30mm、幅方向10mm or20mm)の厚みを計測する。
	②腐食減量の算出 ＝初期鋼材厚み－残存亜鉛めっき除去後の鋼材厚み

図- 2.3.10.7 腐食減量の測定方法（重量測定、肉厚測定）

3) 腐食減量の統計分析

a) 分析方法

測定した腐食減量データに対して線形回帰分析を行い、長期間経過後の腐食減量（Y）の予測値を算定した。線形回帰分析においては、線形予測子として式(3)に示す一般化線形モデル（GLM）を用いた。なお、説明変数（ X_1 ）については(2)で示した既往の研究事例^{2.3.10-3)}を参考に経過年数のみとした。

$$Y = \omega_0 + \omega_1 X_1 + \varepsilon \quad (3)$$

リンク関数については、誤差関数との関係を踏まえて指数関数を仮定した。ここで、腐食減量は正の値しかとりえないことから、誤差関数についてはこれを考慮したモデルとするために腐食減量のばらつきが対数正規分布に従うと仮定した。統計量（期待値、95%予測区間等）の算定は、推定値の安定性や信頼性を評価するためにジャックナイフ法を用いた。

b) 分析結果

図-2.3.10.8 に、経過年数と腐食減量の最大値の関係を示す。図には、統計量として平均及び95%予測区間を示した。この結果によれば、例えば100年後には鋼製補強材の腐食減量（最大）は95%の確率で約0.9mm（両面当たり）の範囲に収まると推定される。同様に、図-2.3.10.9には鋼製補強材の腐食減量（平均）を示しており、95%の確率で0.75mm（両面当たり）の範囲に収まると推定される。

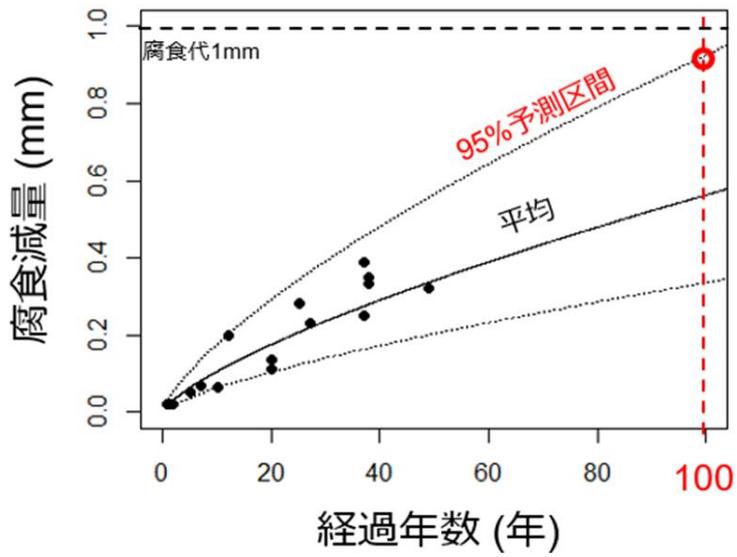


図-2.3.10.8 鋼製補強材の腐食減量の調査結果 (最大)

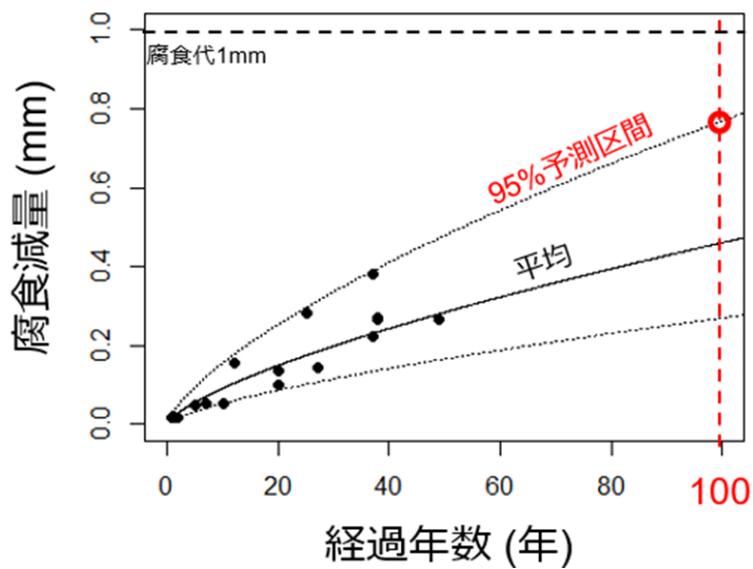


図-2.3.10.9 鋼製補強材の腐食減量の調査結果 (平均)

図- 2.3.10.10 は鋼製補強材の腐食減量（最大）のデータを守屋ら^{2.3.10-2}の鋼管杭の腐食減量（最大）と比較した。図に示した平均値および95%予測区間は鋼製補強材のデータに対しての値である。

鋼製補強材の腐食減量は、守屋ら^{2.3.10-2}の調査結果の下限付近に分布している。守屋ら^{2.3.10-2}の調査結果では、大きな腐食減量が確認されたデータがあるが、その理由は海岸近くでは局所的な腐食減量が大きかったとされている。鋼製補強材を用いる補強土壁では、使用する盛土材料の条件について電気化学的性質を限定している^{2.3.10-3}が、鋼管杭にはこれを要件としておらず、その効果が表れたものである可能性が考えられる。

鋼製補強材では、耐久性を確保するための方法として通常は亜鉛めっき処理に加えて一般に腐食しろ1mmが確保されている。鋼製材料の防食法としては、表面処理として亜鉛めっきがあり、腐食しろと合わせて十分な対策を行えば、一般的な環境下においては十分な耐久性を有しているとみることができる^{2.3.10-6}。なお、本検討は、供用開始後49年目までの限られた数および期間のデータに基づいて分析したものであり、今後も継続的にサンプルを追加して結果の信頼性を向上させる必要があると考えられる。

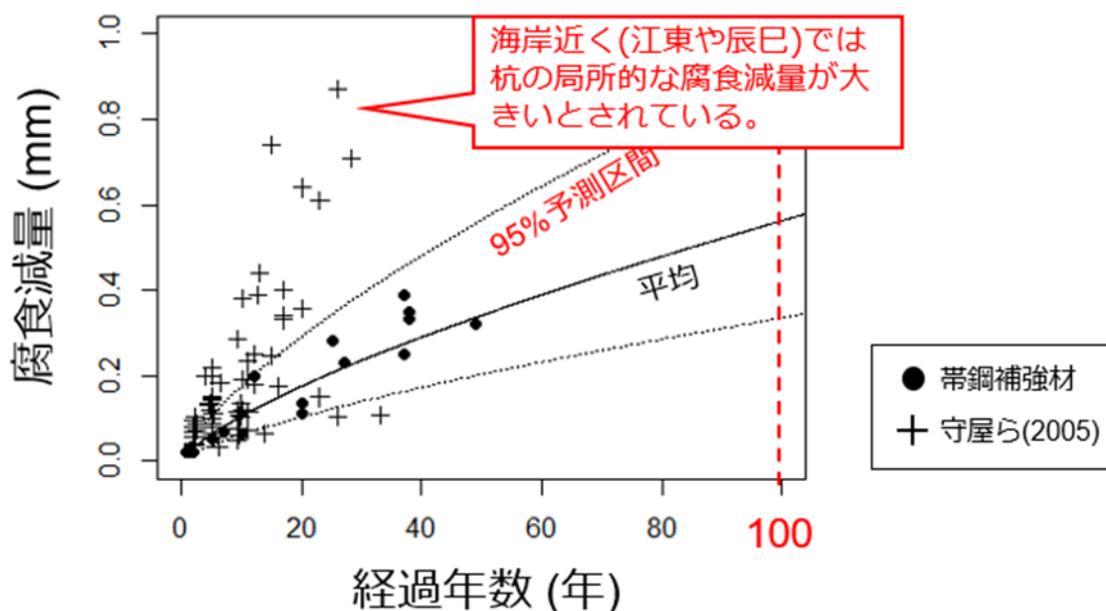


図- 2.3.10.10 最大腐食減量（鋼製補強材+守屋ら（2005））

(4) 特異な腐食事例とその対応（適用条件の明確化）

著しい腐食が発生した事例は国内においてこれまでに2事例が確認されており、1事例においては原因究明のための調査が完了している。ここでは、調査が完了した1事例についてその要因を整理し、同様の要因による腐食が生じないために前提となる条件を明らかにした。以下に、1)本事例の経緯、2)使用部材の特性、3)腐食要因特定のための調査の方法、4)原位置調査結果、5)室内試験結果、6)当該補強土壁の補強材腐食メカニズム及び7)当該補強土壁の崩壊メカニズムと今後の対策について示す。また、もう一方の事例については、現在も調査中であるが、現時点の調査結果において、前述の調査が完了している事例と同様の要因による腐食であることが示唆されているため、これを8)その他の特異事例として紹介する。

1) 経緯

竣工後34年を経過した帯鋼補強土壁（壁高9.75m）において、補強材の著しい腐食が発生した。この事例では、1982年9月の竣工後から34年を経過した2016年9月に、台風により補強土壁の壁面材の一部が延長約9mにわたって崩落した。その際に、一部の鋼製補強材が著しく腐食していたことが確認された（図-2.3.10.11）。

復旧のために補強土壁が解体（2020年4月）されることにあわせて、腐食要因特定のための調査が実施された。



図- 2.3.10.11 状況写真

2) 使用部材の特性

表-2.3.10.4 は、当該補強土壁の壁面材及び補強材の材料仕様について示したものである。壁面材は鉄筋コンクリート製である。補強材には亜鉛めっき鋼板が用いられており、その亜鉛めっきには Z27（めっき付着量 270g/m²）以上が規格されている。なお、当該補強土壁では当時規格を満足する Z45（めっき付着量 450g/m²）が用いられていたことが確認された。現在ではリブ付き補強材の導入により、めっき付着方法も改良され、溶融亜鉛めっき HDZ35（めっき付着量 700g/m²）が標準的に用いられている。

表-2.3.10.4 当該補強土壁の部材の特性

主要部材	規格・仕様 ^{※1}	
	当該補強土壁構築時（1982年） ^{※1}	【参考】現行（2024年） ^{※2}
壁面材	材 質：コンクリート二次製品 （設計基準強度 $f_{ck}=21\text{N/mm}^2$ ） 寸 法：縦1,500mm×横1,500mm×厚180mm	材 質：コンクリート二次製品 （設計基準強度 $f_{ck}=30\text{N/mm}^2$ 以上） 寸 法：縦1,500mm×横1,500mm×厚140mm
補強材	形 状：平滑ストリップ 材 質：溶融亜鉛めっき鋼板（JIS G 3302） 寸 法：幅100mm×厚3.2mm 防蝕①：SPGS亜鉛めっき 亜鉛めっき付着量Z27(270g/m ²)以上 防蝕②：腐食しろ1.0mm	形 状：高強度リブ付きストリップ 材 質：溶接構造用圧延鋼材（JIS G 3106） 寸 法：幅60mm×厚4.0mm 防蝕①：溶融亜鉛めっき 亜鉛めっき付着量HDZ35(700g/m ²)以上 防蝕②：腐食しろ1.0mm
盛土材	粗粒土、硬岩ずり 粒径250mm以下 細粒分25%以下	粗粒土、硬岩ずり 粒径250mm以下 細粒分25%以下

※注1 指針・マニュアルに記載されているもののうち、当該補強土壁に使用されたものを記す。

現行においては、マニュアルでは過去から網羅的に記載されているもののうち、通常において使用・流通しているものを記す。

※1 建設省土木研究所_土木研究所資料 補強土壁設計施工指針（案）（1981年3月） または
財団法人土木研究センター_補強土（テールアルメ）壁工法 設計・施工マニュアル（1982年8月）

※2 一般財団法人土木研究センター_補強土（テールアルメ）壁工法 設計・施工マニュアル 第4回改訂版（2014年8月）

3) 腐食要因特定のための調査方法

腐食要因特定のために、土中での鋼材の腐食への影響が疑われる要因を網羅的に洗い出し、当該現場における関連性を特定するため当該補強土壁の撤去解体に併せて各種の試験・調査を実施した。以下に、a)土中の鋼材への影響が疑われる要因、b)調査項目（原位置調査、室内試験）及びc)調査測線および測点について述べる。

a)土中の鋼材腐食への影響が疑われる要因

土中の鋼材腐食に関する既往の研究^{例えば 2.3.10-7)} や当該補強土壁の置かれる条件等を踏まえて、土中の鋼材への腐食促進に関する影響として表-2.3.10.5 に示す4つに着目した。

表- 2.3.10.5 腐食促進に関する要因

腐食メカニズム	腐食促進の要因
通常腐食	水と酸素の継続的かつ持続的な供給
電氣的（マクロセル）腐食	補強材延長上での土質差
微生物腐食	硫酸塩還元菌、硫黄酸化細菌の代謝（硫酸等の発生）
外部からの異物混入による腐食	肥料や凍結防止剤等（塩化物、硫化物等）

b)調査項目（原位置調査、室内試験）

a)で示した4つの要因と本事例の関連性を特定するために表- 2.3.10.6 に示す調査を実施した。表- 2.3.10.6 に示した要因以外の要因についても取りこぼすことがないよう、原位置の調査時には常に目視にて異常の有無を確認し、平面図上に記録した。

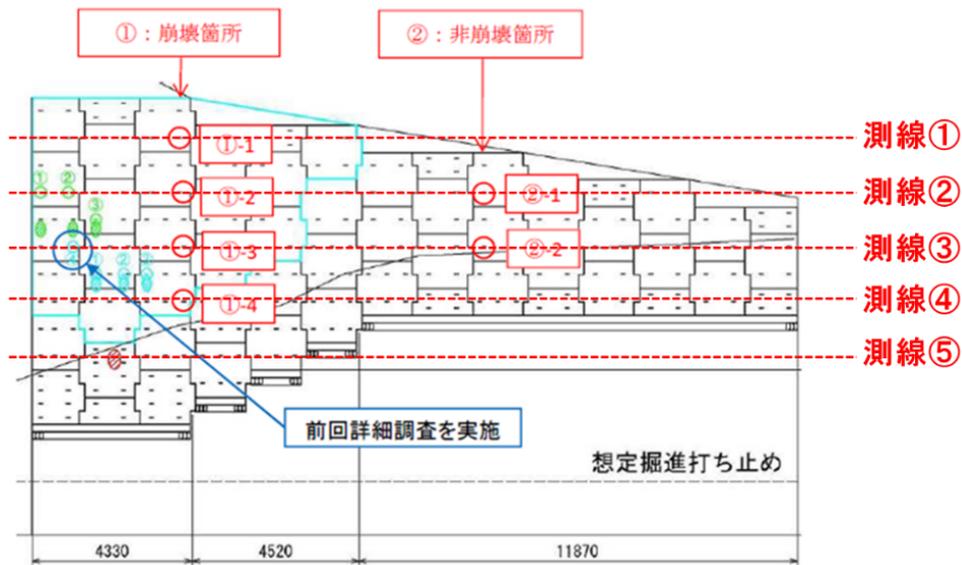
表- 2.3.10.6 腐食要因の特定のために実施した調査項目一覧

調査及び試験項目			通常腐食		マクロセル腐食		バクテリア腐食					バクテリア腐食			異物混入による腐食						
			環境	実体	環境		環境					実体	環境		実体	塩化物		硫化物	その他		
			水酸素	α オキシ水酸化物	土質差	酸素差	有機物	硫化物(硫酸)	含水	pH(5-9)	酸化還元電位(嫌気)	硫酸塩還元菌	硫化物(硫黄)	含水	pH(≒2)	硫黄酸化細菌	塩分	β オキシ水酸化物		肥料	
原位置	目視・プロット	腐食箇所	○		○	○			○				○						○		
		土質差	○		○	○			○				○							○	
	原位置計測	土壌pH						○	○				○	○					○		
		土壌水分	○			○			○				○				○				
		土壌塩分																			
室内	物理試験(盛土材)	粒度試験			○																
		密度試験			○																
		含水比試験	○			○															
	土質化学試験(盛土材)	pH測定試験							○					○							
		比抵抗試験			○	○															
		塩化物イオン											○						○		
		硫化物イオン										○									
		酸化還元電位	○			○								○							
	鋼材腐食調査(補強材)	断面観測																		○	
		元素定性分析(EDX)																		○	
		構造解析(XRD)		○	○	○		○					○				○	○	○	○	
	微生物調査(盛土材・補強材)	微生物定性分析												○		○				○	
		微生物定量分析												○		○				○	

○：対応する項目

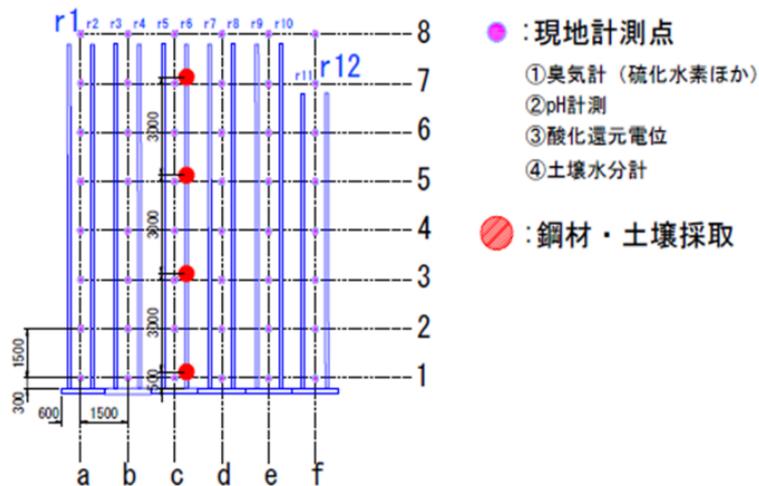
c)調査測線および測点

図-2.3.10.12 に原位置調査の実施箇所および室内試験用のサンプルの採取箇所を示す。図-2.3.10.12 (a)より、高さ(深さ)方向に1500mm 間隔で測線を設置し、各測線毎に図-2.3.10.12 (b)に示すように、各高さの平面に1500mm 格子で測点を設置した。設置したそれぞれの測点にて、原位置調査を実施した。また各測線にて盛土材および補強材のサンプルを採取し、各種室内試験に供した。



(a) 調査測線 (正面図)

測線① : 48測点



(b) 調査測点 (断面図)

図- 2.3.10.12 現地計測位置

4) 原位置調査結果

a) 撤去時の盛土の状態

図-2.3.10.13 より、盛土材料には泥岩（軟岩）が用いられていたようであったものの、全体的に高含水で粘土質であった。盛土は、部分的にその色相が著しく異なり、色相に応じて補強材の腐食の程度も異なった。地山側の灰色を呈した範囲では補強材の腐食の程度は軽微であった。対して、壁面側の褐色を呈した範囲で補強材の腐食が顕著であった。

なお、図-2.3.10.14 に示すように、盛土の中には木片、コンクリートガラ、巨礫（最大径900mm 程度）等の異物が混入していた。



図- 2.3.10.13 現場調査測点(左)、補強材腐食状況(右)

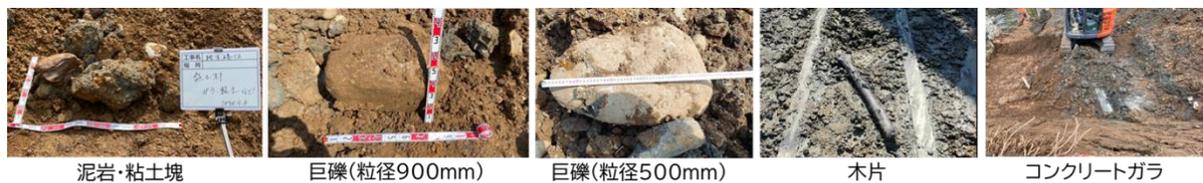


図- 2.3.10.14 盛土内の混入物

b) 原位置調査結果

図-2.3.10.15 に、原位置で測定した補強材の腐食・破断箇所、盛土材の変色位置および土壌の pH の分布を示す。その結果、補強材の腐食が著しい範囲と土壌が酸性を呈した範囲が整合的であった。

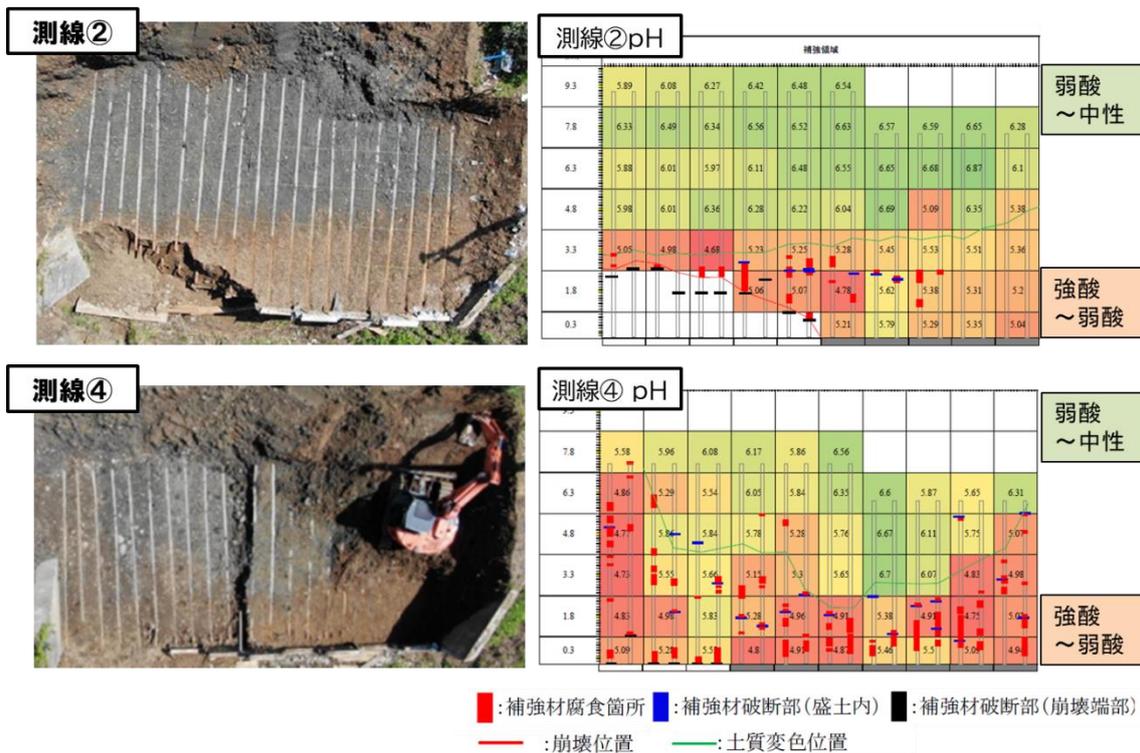


図- 2.3.10.15 原位置調査結果の例

c)盛土材の特定および酸性化の特性

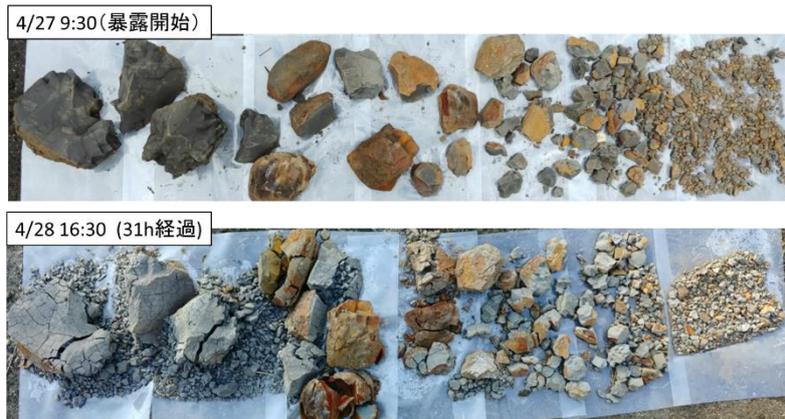
a)及びb)の結果から、盛土材の土質は泥岩（軟岩）が主体であり、また部分的に酸性を示していたことから、硫化物を多く含む「海成泥岩」が使用されていたことが疑われた。

図-2.3.10.16には、使用されていた盛土材の外観を示した。図中(b)には、盛土材に含まれていた泥岩の岩塊を気中で暴露した際の外観の変化を示した。暴露前には岩塊の状態を保っていたものの、暴露開始から31時間後には著しく細粒化が進行した。また、図中(c)に示したように岩塊の断面には針状の析出物が認められた。盛土材を屋外にて暴露し、その前後でpHを計測した結果、図中(d)のように84時間の暴露により酸化が進行することが確認された。

これらの観測された盛土材の特徴は、既往の知見における海成粘土の特徴（表-2.3.10.7及び表-2.3.10.8）に合致するものであり、したがって当該補強土壁に使用された盛土材の主体である泥岩は海成泥岩（粘土）であると判断される。



(a)盛土材中の泥岩（軟岩）



(b)盛土材中の泥岩の暴露による外観の変化（細粒化）



(c)盛土材中の泥岩の析出物



(d)盛土材の暴露（空気酸化）

図- 2.3.10.16 使用されていた盛土材の外観

表- 2.3.10.7 露頭で観察される淡水成粘土と海成粘土の特徴 2.3.10-8)

	淡水成粘土	海成粘土
色	青緑色～緑灰色（一般的に明るい）	暗青灰色（黒みを帯びることもある）
割れ方	大きくブロック状に割れる，露頭は壁状になることが多い。	小さく貝殻状に割れる，露頭は崩れやすい。
析出物	藍鉄鉱（ピビアナイト，リン酸第一鉄）が見られる。藍鉄鉱は一般に青色で塊状・斑点状であるが，しだいに褐色に変わる。	硫黄の黄色粉・石膏（ジブサム，硫酸カルシウム）の針状結晶を析出する。
pH	中性	酸性

表- 2.3.10.8 露頭直後の海成粘土の判別方法 2.3.10-8)

空気酸化による方法	採取した土壌を1～2日空气中に放置し空気酸化させた後にpHを測定する方法。また，外観観察でも石膏の針状結晶が出てくるため判別可能。
強制酸化による方法	採取した土壌に過酸化水素水を加えることにより強制的に酸化させた後のpHを測定する方法。海成粘土では過酸化水素水を加えると発泡し，pHが酸性となる。

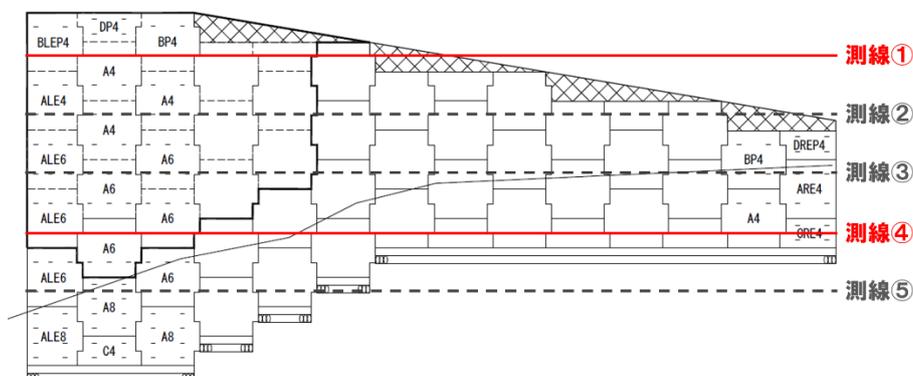
5) 室内試験結果

当該補強土壁の撤去解体に合わせて採取した盛土材及び補強材について、物理試験、化学試験、微生物学的試験等を実施した。表-2.3.10.9に各試験結果の一例として、図-2.3.10.17の測線および測点に関する結果を示す。以下に、主な試験結果として、a)盛土材の物理試験結果・化学試験結果、b)補強材の腐食調査結果及びc)微生物試験結果についてその概要を述べる。

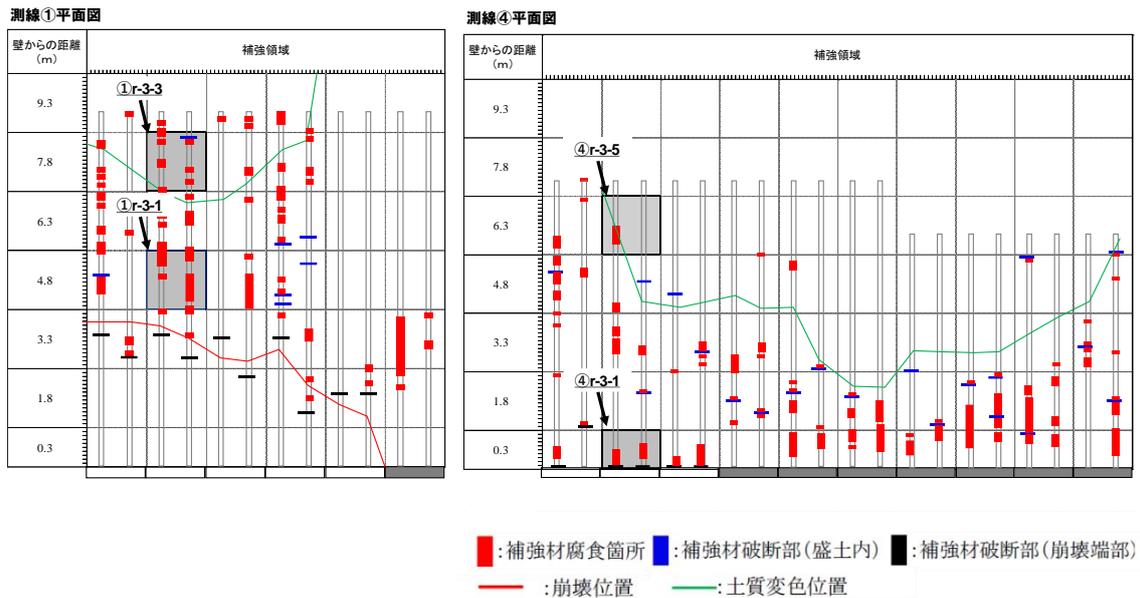
表-2.3.10.9 室内試験結果の例

試験・計測項目		測線①		測線④		【参考】 マニュアル ^{※1} 基準値
		測点①r-3-1 褐色土	測点①r-3-3 灰色土	測点④r-3-1 褐色土	測点④r-3-5 灰色土	
物理試験 (盛土材)	粒度試験(細粒分%)	16.9	15.3	37.8	35.1	25%以下
	密度試験	2.636	2.703	2.6	2.607	—
	含水比試験(%)	45.6	52.0	35.9	35.6	—
	有機物含有量(%)	7.9	7.1	6.9	7.3	—
	スレーキング率(%)	—	—	98.5%		30%以下
化学試験 (盛土材)	pH測定試験	5.6	5.8	6.4	6.6	pH5~12
	電気比抵抗($\Omega \cdot \text{cm}$)	52632	21277	10000	9091	5,000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 以上
	塩化物イオン(%)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02%以下
	硫化物イオン(%)	0.006	0.031	0.035	0.043	0.03%以下
	酸化還元電位(mV)	575	510	595	596	—
鋼材腐食調査 (補強材)	断面観測	孔食, 均一腐食	孔食, 均一腐食	孔食, 均一腐食	孔食, 均一腐食	—
	構造解析(XRD)	—	α オキシ水酸化鉄	—	—	—
微生物調査 (補強材)	微生物定性 定量分析	—	硫酸酸化細菌(多い)	硫酸酸化細菌(多い)	—	—
		—	1.0×10^6	4.4×10^6	—	—
		—	硫酸塩還元菌(多い)	硫酸塩還元菌(多い)	—	—
微生物調査 (盛土材)	微生物定性 定量分析	—	$1.5 \times 10^6 \sim 2.4 \times 10^7$	$2.2 \times 10^7 \sim 3.5 \times 10^8$	—	—
		—	硫酸酸化細菌(多い)	硫酸酸化細菌(多い)	—	—
		—	1.9×10^7	3.1×10^6	—	—
【参考】 原位置計測	土壌pH	5.5	5.2	5.28	5.55	pH5~12
	土壌水分(%)	51.6	52.6	57.6	50	—
	土壌塩分(%)	0.046	0.062	0.033	0.036	0.02%以下
	酸化還元電位(mV)	242	137	112	111	—
	電気比抵抗($\Omega \cdot \text{cm}$)	—	—	2529	3470	5,000 $\Omega \cdot \text{cm}$ 以上

※1 一般財団法人土木研究センター_補強土(テールアルメ)壁工法設計・施工マニュアル第4回改訂版(2014年8月)



(a)測線・採取位置(正面図)



(b) 測点・採取位置 (平面図)

図- 2.3.10.17 測線・測点および試験位置 (表- 2.3.10.9)

a) 盛土材の物理試験結果・化学試験結果

表- 2.3.10.9 より物理試験及び化学試験の結果からは、次のことが示される。

- ・全体的に硫化物含有率が高く、ほとんどがマニュアル^{2.3.10-3)}の規定外の値を示した。
- ・盛土材の細粒分含有率が規定されている値以上であった(①は低いが生かされた可能性)。
- ・室内試験における pH の値はマニュアル規定内であるものの全体的に酸性側の値であった。
- ・測線④の泥岩のスレーキング率 (NEXCO 試験法 110) は 98.5%であり、極めてスレーキング性の高い盛土材であった。

硫化物を多く含んだ海成泥岩等に起因する土壌の酸性化については、国内でも多くの研究事例がある。例えば川崎^{2.3.10-9)}によって日本における酸性硫酸塩土壌の出現位置と地質が示された。松下ら^{2.3.10-10)}は、硫酸塩によるコンクリートの劣化に着目し、黄鉄鉱起源の硫酸イオンにおける硫酸性地盤となる環境要因を分類し、硫酸性地盤となる危険度の高い地盤を図示しさらにコンクリートの腐食度のランク付けを示している。本事象が確認された地域も、上記で紹介した松下らの文献によると硫酸イオンによるコンクリートの腐食程度の厳しさを「Aランク：高い」地域に位置している。

b) 補強材の腐食試験結果

表- 2.3.10.9 より、X線回帰分析 (XRD) により腐食した補強材から酸化物 α -オキシ水酸化鉄が検出された。一方で、塩素による腐食の際に見られる β -オキシ水酸化鉄は検出されなかったことから、塩化物による要因は排除された。

c) 微生物試験結果

盛土材及び補強材に対するリアルタイムPCR法による微生物の定性・定量分析の結果からは、次のことが示される。

- ・採取した盛土材中には $10^7 \sim 10^8$ オーダの細菌が存在していた。これは、河川水～活性汚泥の中間にあたる汚染度である。
- ・盛土材及び補強材の鏝から硫酸塩還元菌および硫黄酸化細菌が多く検出された。このことから、次の2点が示唆される。①硫酸塩還元菌および硫黄酸化細菌の代謝によって生成した硫化水素および硫酸イオン等の硫黄系化合物が腐食に大きく影響を与えた。②硫黄酸化細菌の活動域が好気かつ pH1～2 前後の強酸性域であることから、盛土は強酸性土壌となった時期もある。

6) 当該補強土壁の補強材腐食メカニズム

以上の調査・試験結果より、当該現場の補強材腐食メカニズムを整理すると図-2.3.10.18 のようである。すなわち、現地で確認された海成泥岩は地中(嫌気状態)では中性を示すが、開削され盛土材として使用されたことにより、水や酸素に触れ、海成泥岩に内在していた黄鉄鉱が酸化することで硫酸イオンを形成し、盛土が酸性化されていったと考えられる。また酸化速度については、久馬^{2.3.10-11)}や松下ら^{2.3.10-10)}によると通常であれば緩慢に進行するが、好気性細菌である鉄酸化細菌や硫黄酸化細菌が介在すると酸化反応が急激に進行するとの報告もある。当該現場においても硫黄酸化細菌が多く検出されたため、急激に酸化が進行し、かつ硫黄酸化細菌の存在から、その活動域である pH2 程度の強酸性域まで達したことが示唆された。補強材の防蝕対策の1つである亜鉛めっきは、強酸性や強アルカリの環境では急激に溶解する。当該現場においては強酸性による亜鉛の溶解により防蝕効果が消失し、鋼材の腐食促進に至ったと考えられる。なお、久馬^{2.3.10-11)}によると酸性化した盛土は酸化限界を迎えると、酸は滲透される、あるいは土中の塩基性物質により中和され次第に中性域に進行するとされており、中和反応の結果生じた多量の CaSO_4 が、石膏の微細結晶のネストや、棒状結晶として見出されるとされており、現場や土質試験による pH の中性傾向の値(表-2.3.10.9)や泥岩断面に析出した結晶が確認された(図-2.3.10.16)ことが、酸性の盛土が中性化していることを表していると考えられる。

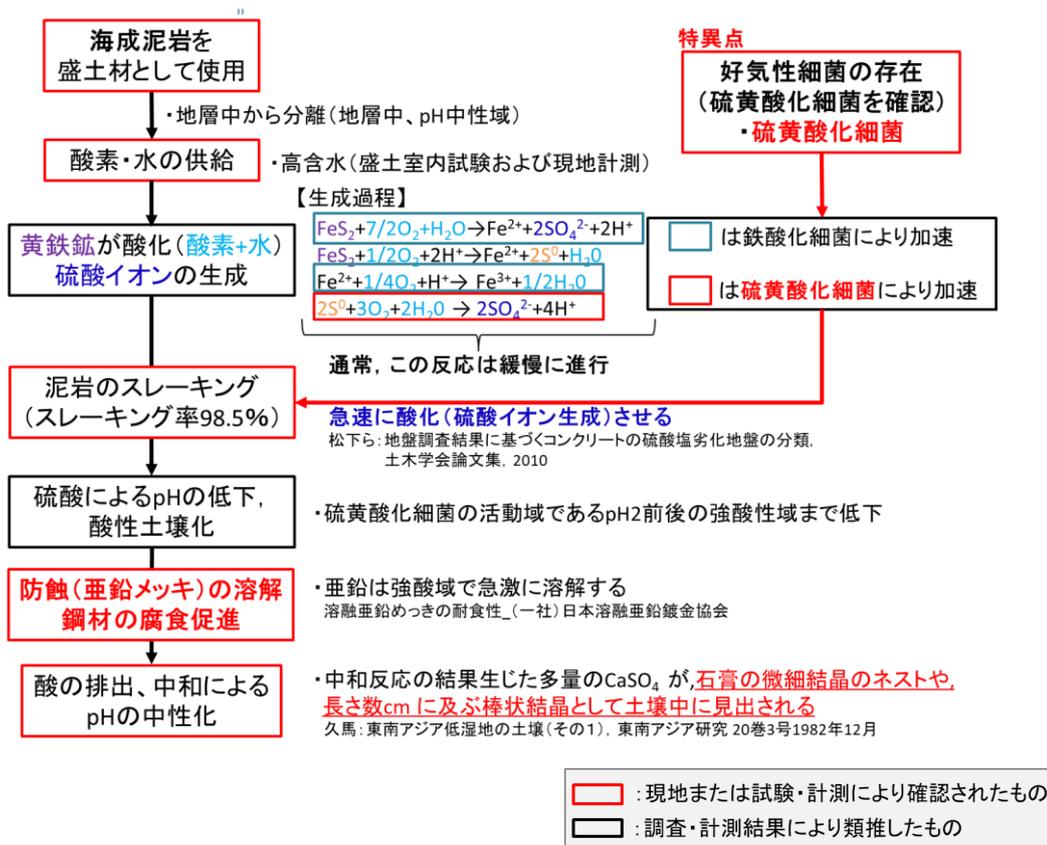


図- 2.3.10.18 海成泥岩に起因した土質変化および補強材腐食のメカニズム

7) 当該補強土壁の崩壊メカニズムと今後の対応方針

以上の結果から特定された当該補強土壁の崩壊メカニズムと今後の対策を示す。

a) 補強土壁の崩壊メカニズム

当該補強土壁の崩壊メカニズムを、素因、要因、変状、損傷・崩壊に分類して改めて要約して示すと次のとおりである。

- 【素因】 マニュアル規定範囲から逸した盛土材料の使用
- 【要因】 海成泥岩に起因する酸性硫酸塩土壌化
- 【変状】 酸性環境での亜鉛めっきの溶解による補強材の腐食促進
- 【損傷・崩壊】 補強材の破断、壁面材の脱落、盛土材の漏出

b) 今後の対応方針

当該補強土壁の崩壊メカニズムを踏まえた、今後の対応方針を整理する。

図-2.3.10.18 で示したように、盛土材料に問題となる海成泥岩が使用され、この海成泥岩が①スレーキングし②酸性硫酸塩土壌化したことが要因であるから、これらにいかに対処するかを検討する。

盛土材料の選定時において、問題となる海成泥岩を排除するためには、①スレーキング及び②酸性硫酸塩土壌化を試験等によって検出することが有効であると考えられる。

①のスレーキングについては、スレーキング試験によりスレーキング性の高い岩石を特定することが可能である。スレーキング試験については、現在も、施工時の建設機械の走行による衝撃等による粘土化や長期にわたる乾湿の繰返しによる細粒化等の特性を確認するための試験として位置付けられている。したがって、スレーキング試験を土中に存する鋼製材料の耐久性の確保のために必要な試験として位置付けるとともに、注意喚起を行っていくことが必要である。

②酸性硫酸塩土壌化については、当時のマニュアルから現在まで一貫して、pH の条件の範囲を示すことで酸性域及びアルカリ域の盛土材料の適用を除外している。しかしながら、当該補強土壁のように、海成泥岩の経年の酸化反応による中性から酸性への変質が示唆されている。したがって、pH の条件だけでなくスレーキング試験と併用する必要があると考えられる。

8) その他の腐食事例

前述の事例のほか、確認された著しい腐食事例について紹介する。

現場は 2003 年に構築された帯鋼補強土壁であり、構築後 15 年経過した時点で補強材の著しい腐食が確認された事例である。当該補強土壁では点検において盛土の沈下及び壁面のはらみ出しが確認されたことから、詳細調査として補強材と土の摩擦抵抗を確認するための原位置引抜き試験を実施したところ、補強材の著しい腐食が確認された(図-2.3.10.19)。



図- 2.3.10.19 補強材の腐食状況

前述の事例を参考に、当該補強土壁では腐食の要因を特定するための詳細調査を計画し、現在調査を継続して実施している。現時点においても調査・分析中であるため、ここでは現時点で調査を完了した「補強材に発生した錆の成分分析」および「盛土材の電気化学的性質」並びに現時点での考察しうる要因について報告する。

a) 補強材に発生した錆の成分分析（イオンの定量分析および硫化物測定）

補強材に発生した錆について、各種イオンの定量分析および硫化物測定を実施した。分析結果を表-2.3.10.10に示す。

分析の結果、補強材に発生した錆からは、硫酸イオンおよび硫化物が多く検出された。このことから、硫酸イオン及び硫化物等が補強材の腐食に影響したものと推測される。

表- 2.3.10.10 補強材に発生した錆の成分分析結果

錆採取位置 (補強材表面・裏面)	イオン定量結果 (%)						硫化物 (%)
	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	
表面	0.0067	0.0076	0.0005未満	0.0005未満	0.0011	0.5800	1.3000
裏面	0.0008	0.0071	0.0005未満	0.0005未満	0.0015	1.1000	0.8600

b) 盛土材の電気化学的性質

原位置にて採取した盛土材の電気化学的性質を表- 2.3.10.11 に示す。

試験にて計測した結果、硫化物含有率について、マニュアル^{2.3.10-3)}の規定外の値を示した。また酸化還元電位がマイナス値と嫌気状態を示していることから、硫酸塩還元菌等による硫化水素等の硫化物を生成しやすい環境であることが確認された。

当該現場において使用された盛土材は、同一路線における道路工事で発生した現地発生土を用いたとされている。盛土材を採取したと考えられる当該地域は、和泉層群と呼ばれる地層が広く分布しており、その特徴として主に礫岩、泥岩、砂岩泥岩の互層からなっていることから、泥岩を盛土材として使用した可能性が考えられる。

表- 2.3.10.11 使用された盛土材の電気化学的性質

	pH	電気比抵抗 (Ω・cm)	塩化物含有量 (%)	硫化物含有量 (%)	酸化還元電位 (mV)
測定結果	8.6	6451	0.0006	0.035	-48
(マニュアル規定値)	(5~12)	(5000以上)	(0.02以下)	(0.03以下)	—

現在も調査・分析を進めている段階ではあるが、盛土材及び補強材の錆の中から硫化物等の硫黄化合物が顕著に検出されたことから、他方の事例と同様に、硫黄化合物が腐食の要因となった可能性が考えられる。硫化物の供給源は、盛土材の電気化学的性質で硫化物含有量が高かったことから盛土材から発生したものである可能性が高い。なお現在は、現時点で推定されている要因以外の可能性も含め、前述の事例と同様に網羅的な検証を進めている。

(5) 土中に設置される鋼製補強材の供用期間中にわたる経年的な変化への対処方法

以上の結果等を踏まえて、土中に設置される鋼製補強材の供用期間中にわたる経年的な変化への対処方法について検討する。

道路橋示方書 I ^{2.3.10-12)} によれば、図- 2.3.10.20 に示すように、「部材等の設計耐久期間に対して所要の耐久性を確保するための方法は、方法 1 から 3 のいずれかに区分し、補修、更新等の想定される維持管理を適切に設計に反映しなければならない。」とされている。

鋼製補強材では、耐久性を確保するための方法として通常は腐食しろの確保に加え、亜鉛メッキによる防食が施されている。腐食しろを確保する方法は、方法 1 に分類され、その腐食しろの値としては、その使用目的が仮設等のごく短期間の場合を除き一般に 1mm が確保されている。図- 2.3.10.8 によれば、盛土材の電気化学的性質の条件の範囲を限定した条件では、例えば 100 年後に腐食減量は 1mm 以下となる確率は 95%以上であった。

6.2 耐久性確保の方法と照査

- (1) 部材等の設計耐久期間に対して所要の耐久性を確保するための方法は、以下の方法 1 から 3 のいずれかに区分し、補修、更新等の想定される維持管理を適切に設計に反映しなければならない。
- 方法 1：設計耐久期間内における材料の機械的性質や力学的特性等の経年変化を前提とし、これを定量的に評価した断面とすることで、その期間内における当該部材等の耐荷性能に影響を及ぼさないようにする方法
- 方法 2：設計耐久期間内における材料の機械的性質や力学的特性等の経年変化を前提とし、当該部材等の断面には影響を及ぼさない対策の追加等の別途の手段を付加的に講じることで、その期間内における当該部材等の耐荷性能に影響を及ぼさないようにする方法
- 方法 3：設計耐久期間内における材料の機械的性質や力学的特性等に及ぼす経年の影響が現れる可能性がないか、無視できるほど小さいものとするすることで、当該部材等の耐荷性能に影響を及ぼさないようにする方法
- (2) 鋼部材やコンクリート部材における耐久性の照査は、Ⅱ編の 6 章、Ⅲ編の 6 章、Ⅳ編の 6 章の関連する規定による。

図- 2.3.10.20 鋼材の耐久性確保の方法 ^{2.3.10-12)}

ここで、維持管理の観点では、補強材は土中に設置される部材であるため、通常は補強材の状態を直接目視して確認することや補強材の状態に応じてその補強材を交換することは困難である。補強材の腐食が進展すると、最終的には補強材の破断に至る。補強材の破断が部分的に生じる場合には、部分的なはらみ出しとして、外観の変化に表れる。したがって、日常や定期的な点検において外観上表れる変状を予兆として、詳細調査を実施して補強材の状態を確認するのがよいと考えられる。

(6) まとめ・今後の予定

本項の検討の範囲で得られた知見を以下に示す。

- ・ 供用開始後 49 年目までの補強材の腐食減量の調査結果を統計的に分析し、100 年後の腐食減量の見通しを評価するとともに、腐食要因となる盛土材の適用条件を整理した。
- ・ 補強材の腐食傾向は盛土材料の影響を受けるため、鋼製補強材を用いた補強土壁では盛土材の電気化学的性質^{2.3.10-3)},^{2.3.10-4)}の条件を設定したうえで、補強材の防食仕様を所要の亜鉛めっきと腐食しろを施すこととしている。
- ・ 全国 10 地点 23 サンプルの補強材の腐食減量を測定し、これを統計的に評価した。その結果、100 年後の補強材の腐食減量（最大）は 95%の確率で約 0.9mm（両面当たり）の範囲に収まると推定された。
- ・ 補強材の腐食減量は、守屋ら^{2.3.10-2)}の鋼管杭の腐食減量の調査結果の下限付近に分布していた。補強土壁では盛土材の条件を限定している効果が表れたものである可能性が考えられる。
- ・ 補強材の著しい腐食が認められた近年の事例について、その要因と対応方針を検討した。当該補強土壁の撤去再構築に合わせて実施された網羅的な調査と様々な観点の試験の結果から、腐食要因は、盛土材に使用された海成泥岩の酸性硫酸塩土壌化であることを特定した。酸性硫酸塩土壌化する海成泥岩は、現在、盛土材の圧縮性等の観点で実施されるスレーキング試験により特定することが可能である。もう一方の腐食事例においては、調査中であるが、現時点の調査・分析において鑄成分や土質から”硫化物”が多く検出されていることから、硫化物が腐食に影響していることが示唆された。両事例の共通事項としては盛土材に含有している硫化物が多く、補強土壁工法のマニュアルに示されている盛土材の電気化学的性質の硫化物含有量の規定値以上の含有量が確認されたことが挙げられる。今後はスレーキング試験を補強材の耐久性を確保するうえで必要な試験としての位置付けも検討する必要がある。また、盛土材料に現地発生土を用いる場合には、その電気化学的性質に留意することが望ましい。
- ・ 以上の結果を踏まえて、土中に設置される鋼製補強材の供用期間中にわたる経年的な変化への対処方法の考え方を整理した。
- ・ なお、今回実施した鋼製補強材の腐食減量の分析は限られた数のデータに基づいたものであり、今後も継続的にサンプルを追加し、結果の信頼性を向上させる必要がある。

参考文献

- 2.3.10-1) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編，丸善出版，2017
- 2.3.10-2) 守屋進，村瀬正次，中野啓眞：鋼杭、鋼矢板の土中腐食性状の統計的検討，土木技術資料 47-3，2005

- 2.3.10-3) 一般財団法人 土木研究センター：補強土（テールアルメ）壁工法 設計・施工マニュアル 第4回改訂版，一般財団法人 土木研究センター，2014
- 2.3.10-4) 一般財団法人 土木研究センター：多数アンカー式補強土壁工法 設計・施工マニュアル 第4版，2014
- 2.3.10-5) 株式会社高速道路総合技術研究所，一般社団法人日本テールアルメ協会：令和2年度 帯鋼補強土壁工法の耐久性に関する研究，共同研究報告書，2021
- 2.3.10-6) 公益社団法人 日本道路協会：道路土工一擁壁工指針，丸善出版，2012
- 2.3.10-7) 門井守夫，高橋紹明，矢野浩太郎：金属材料の土壤腐食についての研究 第1報 -土壤に関する基礎的実験-，防食技術 (Corrosion Engineering)16号，1967
- 2.3.10-8) 電気学会・電食防止研究委員会：電食防止・電気防食ハンドブック，オーム社，2011
- 2.3.10-9) 川崎弘：わが国の酸性硫酸塩土壤の分布と対策，農業技術協会 44 巻 9 号，pp.409-414，1989
- 2.3.10-10) 松下博通，佐川康貴，佐藤俊幸：地盤調査結果に基づくコンクリートの硫酸塩劣化地盤の分類，土木学会論文集 E Vol.66，2010
- 2.3.10-11) 久馬一剛：東南アジア低湿地の土壤－その 1.マングローブ下の堆積物に由来する土壤－，東南アジア研究 20 巻 3 号，1982
- 2.3.10-12) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，丸善出版，2017