

平成 28 年度

九州大学 西日本高速道路(株)
包括連携協定

第 8 回 連携推進会議
【第二部】

平成 29 年 2 月 15 日

目 次

1. 研究紹介	
1) 車線規制区間でのスムーズな合流のための 交通誘導対策に関する研究	1
2. 平成 28 年度の共同研究成果報告(中間報告)	
1) あと施工アンカーの性能評価に関する研究	2
2) 鋼構造物の腐食技術に関する研究 －Al・Mg 金属溶射の部分適用時における境界部処理手法に関する研究－	4
3) のり面对策の有効性に関する数値解析的研究	6
4) ウルトラファインバブル水の界面特性に関する研究	8
5) のり面の安定解析に関する研究	11
6) 道路構造物管理におけるモニタリング手法の検討	13

車線規制区間でのスムーズな合流のための交通誘導対策に関する研究

九州大学 外井哲志

1. 背景と目的

日本の高速道路は全国的に老朽化が進んでおり、中央自動車道・笹子トンネルの天井板落下事故などを契機として、計画的に道路の全面的改修（特定更新事業）を実施していくことになった。特定更新事業の対象区間では、車線規制を実施する工事が長期間に及び、交通容量が低下して交通渋滞の頻発することが予想される。また、車線規制は交通事故や利用者の不満の原因ともなる。したがって、交通容量の低下を抑制するとともに交通事故や利用者の不満を極力抑える車線規制を実施することが必要である。本研究では、(1)車線規制区間における交通容量の減少を緩和する規制方法および(2)車線規制区間における運転者の不満（不公平感）を減らす誘導方法を提案することを目的とする。

2. 既往文献

IC合流部の合流と工事車線規制に関する報告は多数あり、実務的な対策案に関する示唆に富んでいる。それらには、工事規制区間を短縮する、連続車線規制を分割・規制区間を短縮する、IC合流部の合流範囲を狭くし本線とランプの交互合流を実現する、規制区間付近にLED注意喚起灯の設置する、自発光式ペースメーカーで誘導する、コーンのピッチを短くする、ネット等を張って連続しているように見せる、などが効果的であるという報告がある。また、「渋滞学」では「車間距離を大きくとり、速度を下げない走行が渋滞緩和に効果的」であるという知見が得られている。一方、合流とドライバー心理に関する文献では、誘導の方法として「早期合流法」と「後期合流法」を紹介したうえで、後者の方がドライバーのジレンマを解消でき、交通容量も増加することを示唆している。

3. 含まれる問題の分野とアプローチ

交通流への影響としては、1)交通容量の減少（合流箇所の分散による交通流の乱れ：平均車頭時間の増大）による通過時間の増大と、2)渋滞長の増大による上流への影響(ICの閉塞、渋滞時間の増大)が考えられる。交通事故の危険性として、1)直進車線から合流車線への車線変更による追突事故、2)合流車線から直進車線への割り込みによる追突事故、3)渋滞末尾への追突事故、4)渋滞内での追突事故がある。これらに対しては、追従理論、渋滞学（セルオートマトンなど）、交通シミュレーションソフトウェア、のほか自作プログラムで対応できる。このほか、運転者の心理的ストレス（葛藤）として、直進車線に並んでいて、合流車線を走る車に先を越される焦燥感（不公平感）、および合流車線を走る運転者の「ズル」をするうしろめたさなどがある。こうした問題に対処するには、社会心理学、社会的ジレンマ理論、ゲーム理論などに基づく考察が必要になる。

4. 交通容量低下の原因仮説と考えられる対策

車線減少部での交通容量低下の原因としては、1)合流による交通流の乱れ（2車線から1車線への車線減少前）、2)車道幅員の狭小化による速度低下（車線減少の直前）、3)合流後の1車線区間での希望速度の相違による平均速度の低下などが考えられる。

原因1)に対する対策としては、①合流区間の限定、②1車線区間の短縮、③工事区間の分割、④交互合流の啓発などが考えられ、原因2)に対する対策として、幅員減少に対する圧迫感を減らすことが必要であり、①幅員を減少させる区間を長くとり、②滑らかな車線幅員の減少、③側壁等（あるいは圧迫感を感じさせるもの）の除去などが考えられる。図-1は考えられる対策を図示したものである。

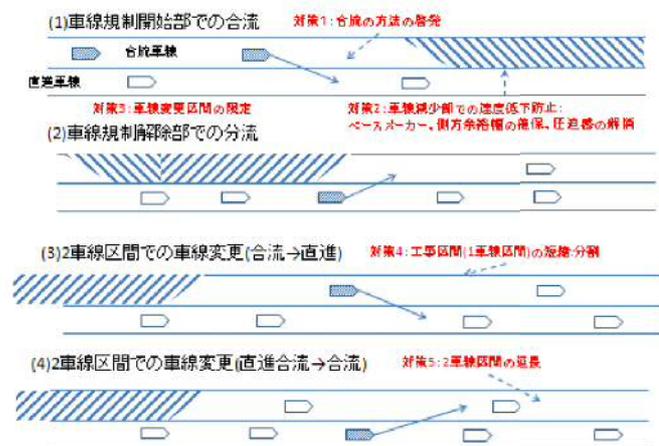


図-1 考えられる対策

あと施工アンカーの性能評価に関する研究

九州大学大学院 日野伸一
九州大学大学院 園田佳巨

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の補強、補修および付帯設備の取り付け等にあと施工アンカーが広く使用されている。しかし、供用開始から年数が経過したあと施工アンカーの中には、経年劣化の進行に伴い、取替え等の措置を必要とするものが数多く存在している。以上の問題を踏まえ、現在、一般的に使用されているあと施工接着系アンカーとは異なり、鋼材が腐食しない限り半永久的に使用可能である新たなあと施工機械式拡張アンカー(以下、金属拡張アンカーと称す)の定着機構について研究を行った。この金属拡張アンカーの実験的検討は別途実施している。本稿は、実験の再現解析を試み、定着機構を明らかにするとともに、その合理的設計法を構築することを目的としたものである。

2. 実験結果の解析的検証

2.1 解析概要

今回開発された金属拡張アンカーは、**図-1**に示すような部品から成る特殊な機構をもつアンカーであり、**図-2**のとおり、引張力が作用すると楔状のナットにより拡張板が押し広げられ、その支圧力により引き抜きに抵抗する。

図-3に金属拡張アンカーに関する埋め込み深さの概念について示す。実験から、金属拡張アンカーは埋め込み深さを $4d$ 確保すれば、あと施工アンカーの一般的な破壊性状であるコーン状破壊が発生せず、鋼棒の破断が先行することが確認されている。しかし、実験のみでは、コンクリート内部の応力状態を確認できず、金属拡張アンカーの設計法を確立するために、FEM解析による様々な検証を実施する必要がある。本稿では、まず実験時と同じ埋め込み深さで、実験と解析での整合性を確認し、それから**図-3**に示すとおり埋め込み深さをパラメータとした解析を実施して、その影響について検討した。実験時の埋め込み深さは $4d$ であるが、解析では比較検討のため $1d, 2d, 3d, 4d$ の4パターンとした。なお、アンカーの降伏条件には von Mises の降伏条件に従う Swift の式を用いた。また、コンクリートにはパラボリック・モール・クーロンの降伏条件を適用し、引張側では引張破壊エネルギーと要素の等価長さから算出した軟化勾配を有するバイリニアの線形軟化モデルを用いた。金属拡張アンカーは実施工時、所定のトルクで締め付けることでコンクリートに支圧力を導入してから供用する。解析でのトルク導入は**図-2**のとおり、アンカー羽根上端を固定した状態で鋼棒を引抜き、コンクリートに支圧力を作用させることで表現した。本解析では、拡張板が楔状ナットおよびコンクリートと同時に接触する接触解析を行うため、接触条件が実験時と整合性をとれるようにすることが重要である。実験時、所定のトルクを導入するとコンクリート中に拡張板が貫入し、それ以降、拡張板・コンクリート間での相対変位が生じなかった。それを踏まえ、初期トルク導入時はアンカー・コンクリート間の相対変位などを考慮した摩擦モデルとし、トルク導入による支圧力再現後はコンクリート・拡張板間は一度接触してからは付着の切れることのない完全付着モデルとすることでより現実的な解析を実施した。解析モデル図を**図-4**に示す。コンクリートおよびアンカーの寸法に関しては全て実験時と同様の値を使用した。各材料定数について**表-1**に、実験および解析で得られた荷重-鋼棒引抜き方向変位関係図を**図-5**に示す。



(a) 拡張版



(b) 楔状ナット



(c) 金属拡張アンカー全体

図-1 アンカーを構成する部品

拡張版の上端を固定した状態で引抜くことでトルク導入を擬似的に再現した。

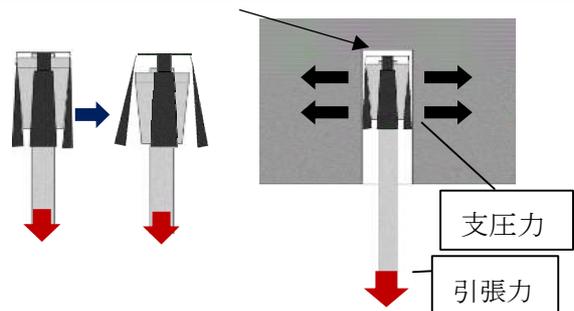


図-2 拡張アンカー抵抗メカニズム

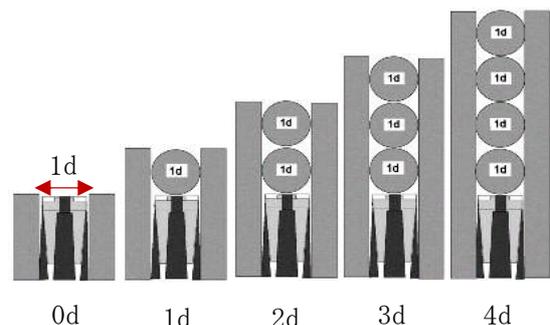


図-3 アンカー埋め込み深さ種類

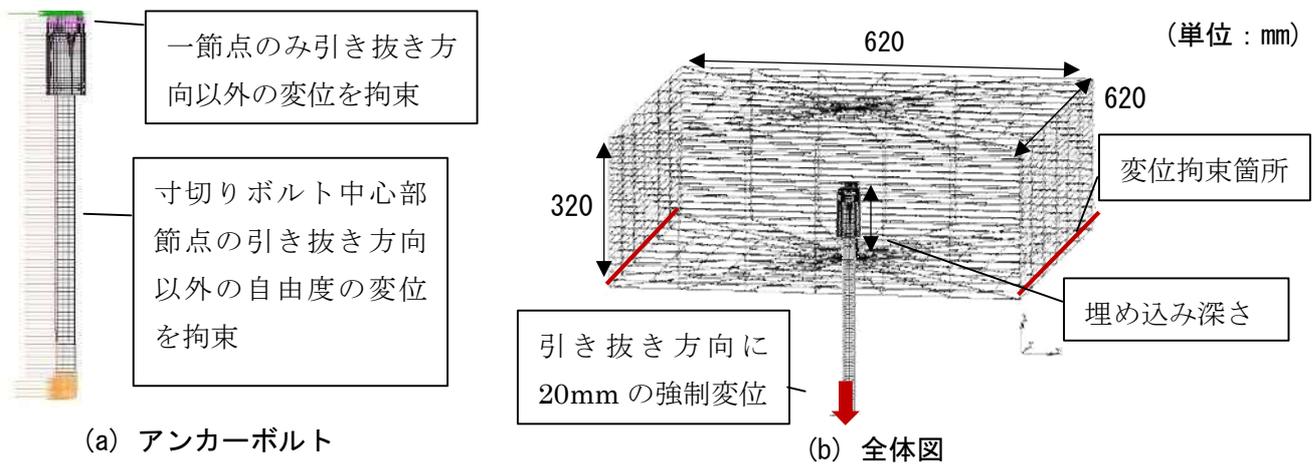


図-4 解析モデル図

2.2 解析結果

図-5に示す荷重-変位図より、実験の再現解析である埋め込み深さ4dに関して実験結果と解析結果の荷重-変位がおおむね一致する結果を得られたことが分かる。これにより解析の妥当性が確認された。埋め込み深さ1d,2d,3dに関しては鋼棒の降伏が先行したが、最終的にはコンクリートが荷重を負担できなくなり、拡張板・楔状ナット間の相対変位が急激に上昇し、荷重が除荷したため、抜けと判定しその時点を終局と判定した。また、この時点で拡張板近傍のコンクリートも圧縮側で降伏を迎えていたことも確認された。

一例として埋め込み深さを極端に浅くした1dおよび実験時と同じ埋め込み深さの4dに関して、終局時のひび割れ分布状況を図-6に示す。ひび割れコンター図については、明確なひび割れが生じる4000 μ に到達した箇所を表示範囲の上限とし、灰色で示した。図-6(a)に示す、埋め込み深さ1dに関しては、埋め込み深さが浅いことで自由表面にまで達するひび割れが卓越したが、鋼棒の降伏がアンカーの抜けよりも先行する結果となった。図-6(b)に示す、実験時と同じく埋め込み深さを4dとしたモデルに関しては、コンクリートのひび割れが一部自由表面まで到達したが、破壊の支配的要因とはならず、実験の終局状況と同じく、コンクリートのコーン状破壊やアンカーの抜けが発生する前に鋼棒が降伏し、その後引張り強度に到達することで終局を迎えた。

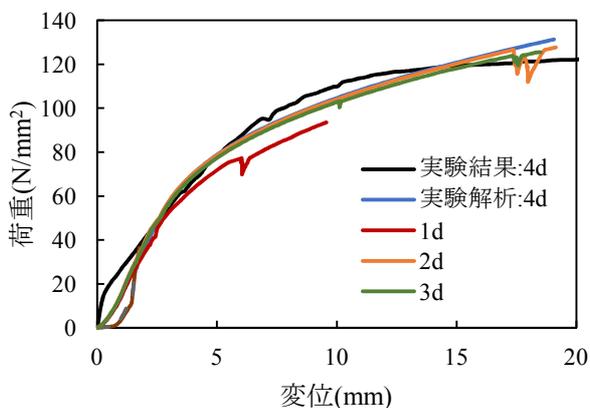


図-5 荷重-変位図

表-1 材料定数

		鋼材
弾性係数(kN/mm ²)	21	200
降伏強度(圧縮強度) (N/mm ²)	24	300
引張強度(N/mm ²)	2.4	520
ポアソン比	0.2	0.3

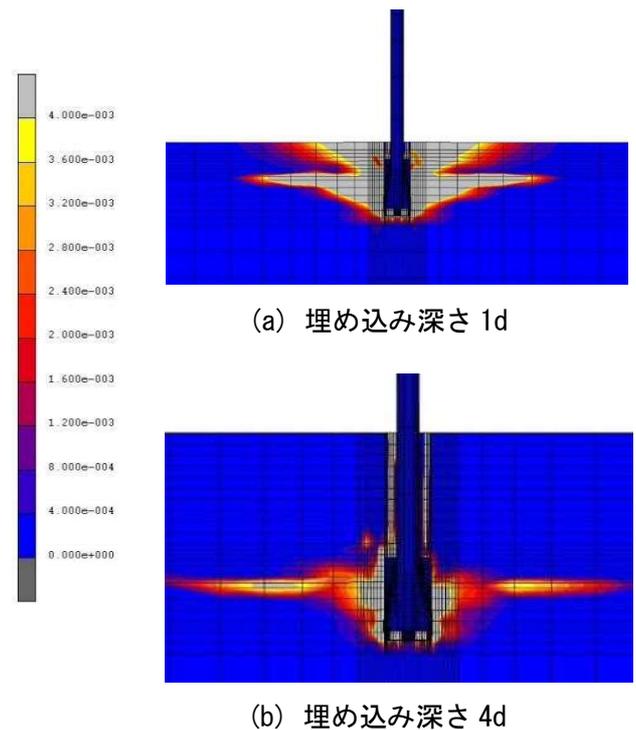


図-6 終局時ひび割れ分布 (単位: μ)

3. まとめ

1) 金属拡張アンカーの引抜き実験状況を基に解析モデルの寸法および接触条件などを仮定した解析より、荷重-変位関係において実験時とおおむね一致する結果を得られ、解析モデルの妥当性が確認された。
2) 本報の範囲内ならば、解析結果より4dの場合は鋼棒破断、3d,2d,1dの場合は鋼棒の降伏後にコンクリートの破壊となることが分かった。

鋼構造物の防食技術に関する研究 —Al・Mg 金属溶射の部分適用時における境界部処理手法に関する研究—

九州大学大学院 貝沼 重信
西日本高速道路 緒方 辰男

1. はじめに 近年、橋梁等の塗装仕様の鋼構造物の防食性能を回復するために、耐食性に優れる Al-5%Mg 合金溶射（以下、Al-Mg 溶射）を腐食性の高い部位に部分的に適用される事例が増加している。この場合、Al-Mg 溶射皮膜と既存の塗膜に重ね部を設ける必要があるが、重ね部の耐食・防食性能については明らかにされていない。そこで、著者らは先行研究¹⁾で Al-Mg 溶射皮膜と塗膜の重ね部を模擬した試験体を製作し、腐食促進試験（JIS K 5600-7-9 サイクル D）を行うことで NaCl による高腐食環境における耐食・防食性能について検討した¹⁾。本研究では大気環境下において前述の試験体の暴露試験を実施することで、様々な腐食要因が Al-Mg 溶射皮膜と塗膜の重ね部の耐食・防食性能に及ぼす影響を検討した。本稿では寒冷・飛来海塩環境における大気暴露試験結果について述べる。

2. 試験方法 試験体の基材には 150×70×6mm の寸法の裸普通鋼材（JIS G3106 SM490A）を用いた。試験体は Al-Mg 溶射および塗替え塗装用の Rc-I 塗装系（以下、Rc-I 塗装）の重ね部位を想定し作成した（以下、OVL 試験体）。溶射皮膜は一般に皮膜内の気孔を樹脂で充填する封孔処理が行われる。そこで、封孔処理が溶射皮膜の耐食・防食性能に及ぼす影響を検討するために、Al-Mg 溶射皮膜に封孔処理した OVL-S 試験体も製作した。また、塗膜あるいは溶射皮膜のみの部位と重ね部の耐食・防食性能を比較するため、溶射のみを施した部位（以下、溶射部）、重ね部および塗装のみを施した部位（以下、塗装部）の 3 つの仕様の領域を試験体の長辺方向を 3 等分して並列配置した。試験体には Al-Mg 溶射の犠牲陽極の有効範囲を検討するために、0.2mm と 12mm の線・帯状傷を機械加工した²⁾。試験体と傷の形状・寸法および皮膜の構成を図-1 に示す。大気暴露試験は北海道苫小牧市内の南側の海岸から約 2m に位置する雨洗効果のある海岸線（Lat.42°35'N, Long.141°27'E）で実施した。なお、暴露地点における飛来海塩量 w_{NaCl} の年平均値は 3.4mdd である。また、設置角度は 45°の対空面および対地面、暴露期間は 2016 年 5 月から約 6 ヶ月間とした。回収した試験体は、構造化投影位相シフト法を用いた非接触式 3 次元計測装置を用いて表面性状を計測し、その結果に基づき塗膜部の膨れ面積と膨れ高さを算出した。なお、膨れ面積と膨れ高さは重ね部の健全領域における皮膜高さの上位 95%を閾値とし、この閾値に比して高い領域を抽出することで算出した。

3. 試験結果 試験終了後の傷幅 12mm の帯状傷の試験体外観を図-2 に示す。全ての試験体の対空面と対地面について、重ね部に塗膜膨れが発生しているが、溶射部と塗装部は健全な状態を維持している。OVL 試験体と OVL-S 試験体ともに傷部と傷部近傍に白色あるいは赤褐色の腐食生成物が生じており、白色の腐食生成物の発生量は対地面に比して対空面が多い。白色の腐食生成物は Al-Mg 由来の Al_2O_3 や MgO 等の酸化物であり、溶射皮膜をアノード、鋼素地をカソードとした溶射皮膜の犠牲防食作用により傷部近傍の鋼素地が防食されたと考えられる。一方、対地面および傷部の中央については、Fe 由来の赤褐色の腐食生成物が発生しており、先行研究¹⁾における腐食促進試験結果とは異なっている。これは大気環境では腐食促進試験に比して鋼板表面の濡れ時間が少ないためと考えられる。その結果、ガルバニック腐食電流の発生が抑制され、犠牲防食効果が小さくなったと考えられる。対空面の傷部近傍については、降雨あるいは海水の付着により鋼素地と溶射・塗膜の境界部に水が浸入・滞留しやすい環境となるため、傷部近傍のみ犠牲防食効果が発現したと考えられる。

傷幅 12mm の帯状傷を有する試験体の膨れ性状を図-3 に示す。なお、鋼素地の最小値を 0（基準面）とした。また、12mm 試験体の重ね部の膨れ面積と膨れ高さをそれぞれ図-4 と図-5 に示す。OVL-S 試験体の対空面は、OVL

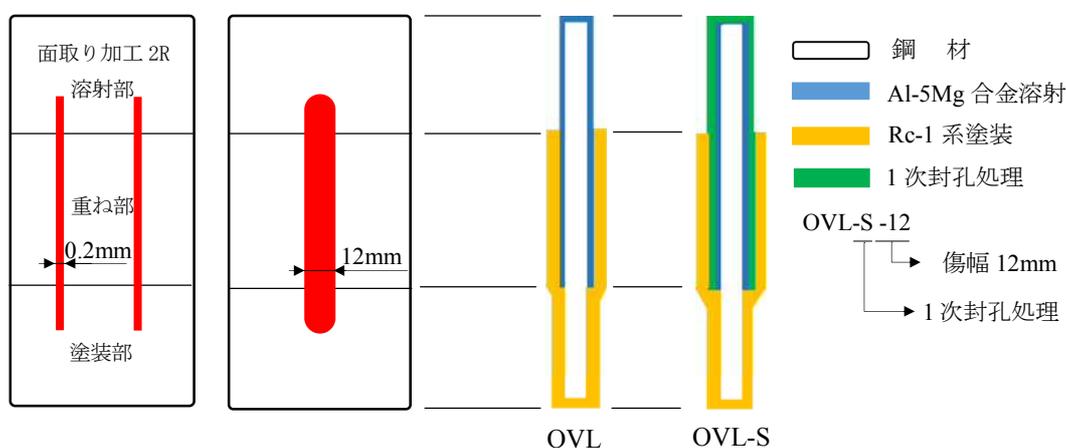


図-1 試験体と傷の形状・寸法および皮膜の構成

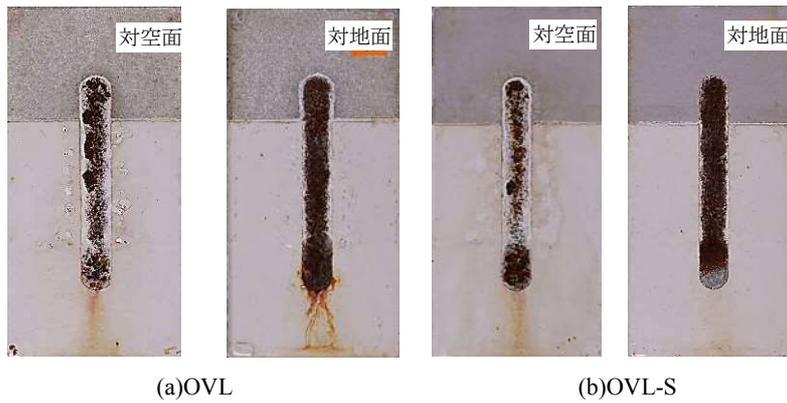


図-2 試験体の外観（暴露6ヶ月）

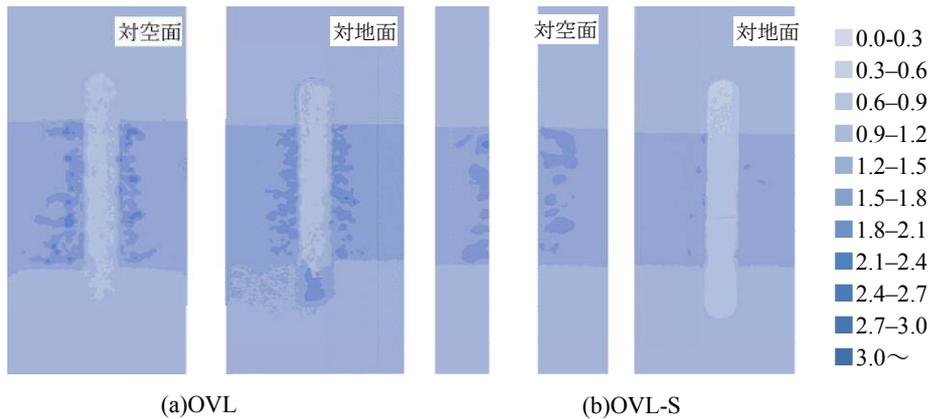


図-3 試験体の膨れ性状

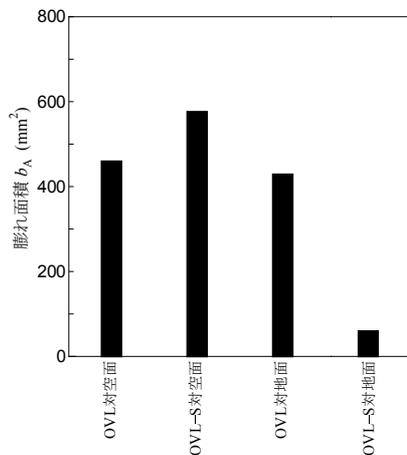


図-4 膨れ面積

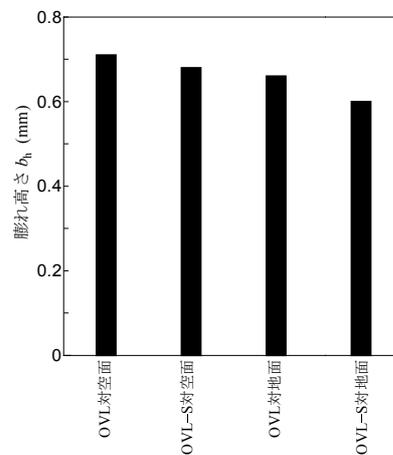


図-5 平均膨れ高さ

試験体に比して膨れ面積が大きく、膨れ高さは小さくなっている。これは先行研究¹⁾と同様に、封孔処理剤を使用することで鋼素地と溶射の境界部に水が滞留しやすく、膨れ面積の増加および皮膜内の腐食の進行を促進したと考えられる。一方、対地面については OVL 試験体の膨れ面積および膨れ高さが OVL-S 試験体に比して大きくなっている。これは対空面や腐食促進試験に比して傷部近傍の濡れ時間が短いためであると考えられる。濡れ時間が短くなる場合の重ね部の防食・耐食性能に対する封孔処理の影響は、今後検討する必要がある。

4. まとめ 1) 腐食促進試験に比して、濡れ時間が短くなる大気環境については、傷部の鋼素地に対する Al-5Mg 合金溶射皮膜の犠牲防食作用は発現しにくい。2) 雨がかりする大気暴露環境については、封孔処理しない場合、対空面の平均膨れ高さや膨れ面積は対地面とほぼ同程度になる。一方、封孔処理した場合の対空面の膨れ面積は、対地面に比して著しく増加する。

参考文献 1) 貝沼重信, 郭小竜, 小林淳二, 武藤和好, 宮田弘和: NaCl による高腐食性環境における Al-5Mg 合金溶射皮膜の耐食・防食特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A, Vol.72, No.3, pp.440-452, 2016. 2) 貝沼重信, 八木孝介, 郭小竜, 小林淳二, 佐島隆生: 防食皮膜試験体に導入するクロスカットの機械加工法に関する基礎的検討, 鋼構造年次論文報告集, Vol.24, No.107, pp.739-740, 2016.

H28 年度のり面対策の有効性に関する数値解析的研究報告書

九州大学基幹教育院 教授 陳 光斉

1. 研究目的

斜面崩壊における解析は、大変形、破壊、剛体運動などを含んでおり、応力・変形の解析から破壊、剛体運動まで全過程をシミュレーションする必要がある。解析対象となる岩盤は不連続面（例えば、大はプレート境界から小は断層、節理、亀裂まで）を有しており、外力を受けると極めて複雑な反応を示す。従って、その挙動を予測するには高度な解析技術の開発が不可欠である。不連続性岩盤の安定性解析に不連続変形法 (DDA、Discontinuous Deformation Analysis) が提案され、岩盤工学においてブロック構造をなす岩盤の大変形、破壊現象を数値解析するための、より有効な解析方法として認識されてきた。本研究は、不連続変形法 DDA を用いたのり面崩壊の解析手法およびのり面対策の有効性に関する実用的な評価手法の開発と提案を行うもの。

2. 研究計画

(1) 2次元 DDA によるアンカー補強効果の評価手法の開発

既開発した実用的な 2次元 DDA ソフトウェアは UC Berkeley をはじめ、数多くの大学・研究機関および企業に導入された。1996年豊浜トンネル岩盤崩落災害を含め、防災工学に数多くの実践的な適用事例も完成した実績があった。本研究においては、のり面の安定解析には強度低減法による DDA 安定解析手法を確立し、アンカーの補強効果を評価する。特にアンカーの損傷による補強効果影響を検討する。

(2) 3次元 DDA プログラムの開発

より精度の高い対策効果評価や最適対策工における計画案の作成には、3次元 DDA が必要である。3D-DDA プログラムの開発には、一番複雑で良く解決されていないブロック間の接触問題を先に解決する。Goodman 氏や Cundall 氏らが代表的な接触モデルを提案したが、依然として種々問題が残されているので、最新の接触理論に基づき、entrance block と contact cover system の概念を導入し、複雑な接触モデルにおいても高効率の解析を実現し、既存の 3次元 DDA プログラムに(1)凹形岩石の相互貫入、(2)引張崩壊モードの欠落、(3)せん断崩壊モードにおける不正確性などの問題を解決する。また、3次元 DDA の実用化のために、GIS の DEM と斜面すべり面を利用した斜面モデルの自動作成技術、3D レーザースキャナーと連携した斜面モデルの自動作成技術、簡単モデルの組み合わせによる複雑なモデルの作成技術を開発する

(3) 3次元 DDA シミュレーションによる最適対策工の検討

3D-DDA を用いたアンカー補強効果の評価手法を確立し、アンカーの数、分布における最適な補強案を検討する。特に、新材料で作成された新型アンカーに着目し、その対策工効果を評価する。

3. 研究成果

(1) 強度低減法による DDA 安定解析手法の確立

既存の斜面安定解析手法として極限平衡法が広く用いられているが、この手法は均一な斜面に平面や円弧滑り面と仮定しており、不連続性のある複雑な斜面への適用に制約される。一方、不連続変形法 (DDA) は任意な形状の潜在滑り面でも解析できるが、現在 DDA による斜面安定解析手法は確立されていない。このような背景から、本研究は、強度低減アプローチを適用し、必要な解析の手順および判定基準を明確にした上で、DDA による斜面安定解析手法を確立した。

DDA は、層理面、節理、断層や亀裂などの不連続性によって生じる岩石ブロックの集まりとしてブロックシステムの動学的挙動を有限要素法的と同様の定式化で解析する手法である。斜面安定解析では、斜面の抵抗力は式(1)に示す Mohr-Coulomb の式に基づくせん断強度 τ_f とする。

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

ここに c は粘着力、 σ は滑り面上の垂直応力、 ϕ は内部摩擦角である。安全率の決定にはせん断強度を低減するアプローチを用いている。即ち、式(1)に低減因子 SRF で割り、

$$\frac{\tau}{SRF} = \frac{c}{SRF} + \sigma_n \frac{\tan \phi}{SRF} \quad (2)$$

$$c' = \frac{\tau}{SRF}, \quad \phi' = \tan^{-1}\left(\frac{\tan \phi}{SRF}\right) \quad (3)$$

低減後の粘着力 c' と ϕ' を用いて DDA 解析を行い、斜面が安定から崩壊へ転じた時の SRF の値は安全率 F とする。また、崩壊の判定方法としては、①目視による斜面ブロックの滑動があった、②ブロック変位の急上昇点があった、③前後時刻の変位を用いて幾何学的に円を描き、曲率が大きくなったなどの基準が提案されたが、本研究では、それぞれの基準においてその妥当性を検討し、曲率の判定基準が一番妥当であることを明らかにした。

さらに、アンカーボルトによる斜面補強の効果を検証する機能を DDA に追加した。

(2) 3次元 DDA プログラムの開発

二次元 DDA は高度に開発されており、地盤工学や防災工学において広く利用されているが、三次元 DDA は依然として実用段階に至っていない。例えば、既存の三次元 DDA に(1)凹形岩石の相互貫入、(2)引張崩壊モードの欠落、(3)せん断崩壊モードにおける不正確性などの主な問題があった。本研究は、新たな接触アルゴリズムの導入と摩擦力と粘着力によるせん断強度や引張強度に基づく安定解析機能を導入することによって、既存の三次元 DDA を改良した。接触アルゴリズムは DDA プログラミングのコアテクノロジーであり、本研究ではエントランス・プレーン法と呼ばれる新しい接触探索アルゴリズムを提案した。このことにより、凹型岩石相互貫入の問題を解決し、様々な形状の岩石ブロック間における複雑な表面が接する複数の接触箇所を見つけることを可能とした。さらに、接触アルゴリズムによって、接触面積を正確に算出し、粘着力を考慮したせん断強度および引張強度による破壊判定の機能を導入することに成功した。

ウルトラファインバブル水の界面特性に関する研究

研究分担者 春藤 淳臣 九州大学大学院 統合新領域学府 准教授

研究分担者 松野 寿生 九州大学大学院 工学研究院 准教授

研究代表者 田中 敬二 九州大学大学院 工学研究院 教授

共同研究者 福永 靖雄 西日本高速道路(株)九州支社 保全サービス事業部長

1. 背景と目的

粒径が数百 nm 以下の気泡を分散させた水をウルトラファインバブル (UFB) 水とよぶ。UFB 水は、通常の水と比較して、単位体積当たりの空気界面積が著しく大きいため、様々な効果が期待されている。一方、UFB 水自体の物性は未だほとんど明らかにされておらず、基礎的なデータの取得が急務となっている。本研究では UFB 水の界面特性を評価することで、種々の高分子材料の改質技術としての可能性について検討することを目的とした。

2. 研究進捗

2-1. UFB がコロイドの分散状態に及ぼす影響

これまでに、UFB 水に超音波を照射すると、ヒドロキシラジカルが発生することを確認した。したがって、固体材料に吸着した UFB に超音波を照射することによって、その界面近傍にヒドロキシラジカルを発生できると考えられる。そこで、UFB とそれから発生するヒドロキシラジカルを利用したコロイドの分散状態の制御について検討した。コロイドとしてナノセルロース (NC) 水分散液に着目した。NC は、植物繊維を物理的に解繊することで得られる高アスペクト比のナノ繊維である。本年度は、粒子追跡法に基づき、NC 水分散液の局所領域における物性とその空間分布を評価した。粒子追跡法では、測定試料にプローブ粒子を分散させ、その熱運動を解析する。粒子の動きは周囲媒体の動的な特徴を反映するため、同法に基づき粒子周囲の局所物性の評価が可能である。

0.1 wt% の NC 水分散液 (NCw) は、微結晶セルロースをスラリー化した後、水中対向衝突を複数回繰り返して得た。NC の平均直径と長さはそれぞれ 21 ± 3 nm、 455 ± 187 nm であった。NC 水分散液を遠心分離し、上澄みを UFB 水で置換して、UFB を含む NC 水分散液 (NCu) を得た。NCw および NCu は、1 時間超音波を照射した。未処理および超音波処理後の NCw あるいは NCu にポリスチレン (PS) 粒子を混合し、室温にて 24 時間静置して測定試料とした。様々なサイズの PS 粒子 (直径、 $d = 1 \sim 75 \mu\text{m}$) をプローブとして用いた。

PS 粒子の熱運動は、倒立顕微鏡に付属した電荷結合素

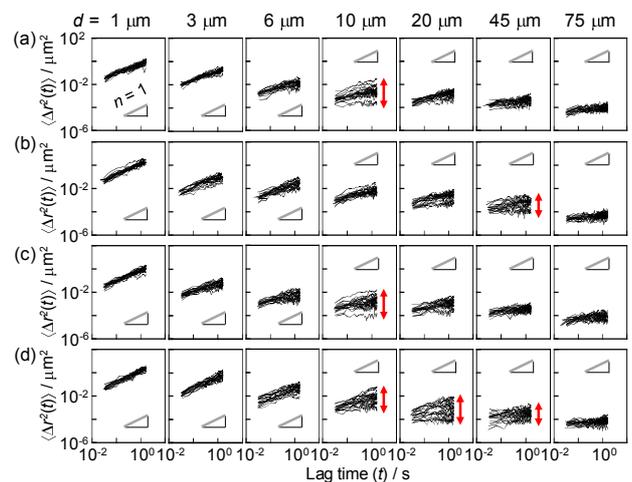


図 1. (a, c) 未処理および (b, d) 超音波処理した (a, b) NCw および (c, d) NCu 中における PS 粒子の平均二乗変位と観測時間の関係。

子 (CCD) カメラを用いて検出した。同一試料中の異なる 20 点にて、それぞれ 10 回ずつ測定を行った。

図 1 は、(a, c) 未処理および (b, d) 超音波処理した (a, b) NCw および (c, d) NCu 中における PS 粒子の平均二乗変位 ($\langle \Delta r^2(t) \rangle$) と観測時間 (t) の関係である。図中の実線は、1 つの粒子の熱運動を解析して得た $\langle \Delta r^2(t) \rangle$ に対応する。 t に対する $\langle \Delta r^2(t) \rangle$ のプロットの傾き (n) が 1 の場合は、粒子が酔歩モデルに従って熱運動していることを意味する。いずれの試料においても、 $d = 1 \mu\text{m}$ の PS 粒子を用いた場合、ほとんど全てのプロットは $n \sim 1$ であった。しかしながら、 d の増加に伴い n は減少し、 $d = 75 \mu\text{m}$ の場合では、 $n \sim 0$ となった。こ

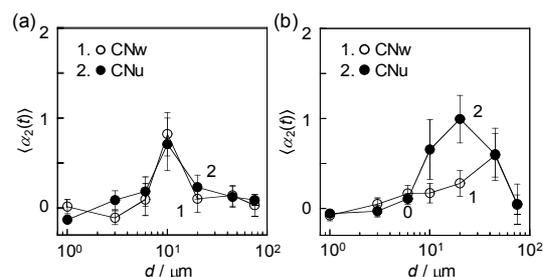


図 2. (a) 未処理および (b) 超音波処理した NCw および NCu における $\langle \alpha_2(t) \rangle$ と d の関係。

これは、粒子サイズが増加すると、その熱運動は NC の凝集構造によって抑制されることを示している。また、 $d = 10 \sim 45 \mu\text{m}$ において、 $n \sim 0$ および $n > 0$ のプロットが確認された。これは、系の物性は空間的に不均一であることを示唆している。

不均一性の程度を議論するため、ノンガウシアンパラメーター ($\alpha_2(t)$) を算出した。系が不均一の場合、 $\alpha_2(t) > 0$ となる。図2は、 $t = 0 \sim 1.5 \text{ s}$ における $\alpha_2(t)$ の平均値、 $\langle \alpha_2(t) \rangle$ と d の関係である。未処理の NCw および NCu において、 d の増加に伴い $\langle \alpha_2(t) \rangle$ 値は増加し、 $d = 10 \mu\text{m}$ で最大となった後、減少した。したがって、NCw および NCu の物性は、 $10 \mu\text{m}$ 程度の空間スケールにおいて、不均一であるといえる。興味深いことに、超音波処理後、24時間静置した場合、 $\langle \alpha_2(t) \rangle$ が最大となった d 値は、NCw および NCu において、それぞれ $45 \mu\text{m}$ および $20 \mu\text{m}$ であった。これは、超音波照射と静置によって、不均一性の空間スケールが増加することに対応しており、その程度は、UFB の存在によって抑制されることを示している。本検討の結果から、UFB と超音波処理によって、水中の NC の凝集構造、ひいては不均一性を制御できる可能性が確認された。

2-2. UFB が生体成分に及ぼす影響

高分子材料のバルク特性を維持したまま、表面に生体適合性を賦与する簡便な手法の開発が求められている。これまでに、疎水性高分子である PS 薄膜表面の UFB 水処理が、タンパク質や細胞などの生体成分の吸着・接着に与える影響を評価し、UFB の存在が細胞スキャホールド上での細胞増殖を促進することを確認している。本年度は、疎水性エラストマーであるポリイソブレン (PI) に対する UFB 水処理が、細胞挙動に及ぼす影響を評価した。

試料として、数平均分子量 (M_n) が 316k 、分子量分布指標 (M_w/M_n) 1.08 の PI を用いた。試料はトルエン溶液からシリコンおよびホウケイ酸ガラス基板上に製膜し、真空乾燥を施した。膜を UFB 水に室温下 12 時間浸漬することで表面処理を施した。また参照として、純水に浸漬した試料も調製した。膜表面におけるタンパク質吸着特性は、ローダミン標識フィブロネクチンを用いた蛍光顕微鏡観察に基づき評価した。膜表面に対する細胞接着性はマウス線維芽細胞 L929 を用いることで検討した。培地として、10% ウシ血清含有 RPMI1640 を用い、細胞を 310 K 、5% CO_2 環境下で所定時間培養後、位相差顕微鏡観察に基づき評価した。また、インテグリン依存型細胞接着の阻害剤であるエチレンジアミン四酢酸 (EDTA) が、細胞挙動に及ぼす効果を検討し

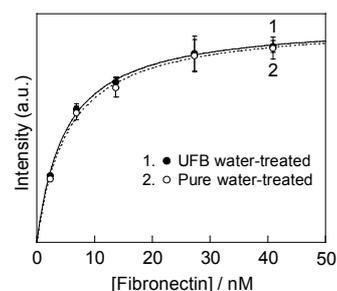


図3. PI 膜に対する蛍光標識フィブロネクチンの吸着量の濃度依存性。曲線はラングミュア吸着等温式に基づくフィッティング。

た。

図3は、蛍光顕微鏡観察に基づき評価したフィブロネクチン吸着量の濃度依存性である。プロットは実験値であり、曲線はラングミュア吸着等温式に基づくフィッティング結果である。高濃度域において曲線は一定値に収束したことから、フィブロネクチンは PI 膜に対し単層吸着することが示唆された。また、吸着量は、UFB 水処理の有無には依存しないことがわかった。

図4(a, b)は、培養3日後における L929 細胞の位相差顕微鏡像、また、図4(c)は、細胞の増殖曲線である。培養初期における細胞接着性は、膜の処理法によらず、数および形態ともに同程度であった。一方、培養後期においては、UFB 水処理膜に接着した細胞数が、純水処理膜のそれと比較し多くなり、増殖速度が増加することがわかった。図4(d, e)は、UFB 水処理膜および純水処理膜に接着した細胞の面積ヒストグラムである。UFB 水処理膜では、純水処理膜と比較し、面積の大きな細胞の割合が増加し、また、最頻値がより大きくなったことから、細胞の伸展性が向上したと言える。このことは、UFB 水処理により細胞が増殖しやすい PI 表面が構築されたことを示している。タンパク質吸着

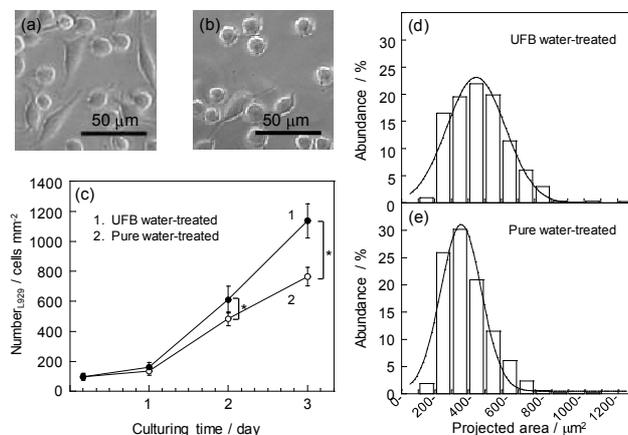


図4. (a, b) 培養3日後における L929 細胞の位相差顕微鏡像。(a) UFB 水処理および(b) 純水処理。(c) 細胞の増殖曲線。 $P^* < 0.05$ 。(d, e) 培養3日後における細胞の面積ヒストグラム。(d) UFB 水処理および(e) 純水処理。

量は UFB 水処理に影響されないことから、吸着したタンパク質の変性状態が UFB 水処理に依存して異なっている可能性がある。

一般的に、血清存在下における細胞接着性は、接着関連タンパク質であるフィブロネクチン中に存在する RGD（アルギニン-グリシン-アスパラギン酸）配列と細胞膜タンパク質であるインテグリンとの相互作用に強く依存する。そこで、インテグリン依存型細胞接着を阻害することが知られている EDTA 存在下で培養することで、フィブロネクチンの寄与の評価を試みた。その結果、培養 4 時間後における細胞接着量は、EDTA の有無によらず同レベルであった。このことは、増殖曲線(図 4(c))において、初期接着量が UFB 処理の有無に依存していないことを考慮すると、培養初期の細胞接着には、フィブロネクチンの積極的な関与はないことが示唆される。今後は、培養後期におけるフィブロネクチンの寄与について検討することが課題である。

空気と水のみから調製できる UFB 水は高い安全性も期待できることから、バイオマテリアルの改質技術に適している。本検討の結果から、UFB 水は、疎水性の高いエラストマーから作製した細胞用スキャホールドの表面改質法の新規技術として応用できる可能性が確認された。

3. 結論

NC 水分散液に超音波を照射すると、不均一性の空間スケールが増加した。その増加は、UFB の存在によって抑制されることが確認された。また、疎水性の高いエラストマーから作製した細胞スキャホールド表面に UFB 水処理を施すことで、繊維芽細胞の増殖を向上させられることがわかった。UFB が表面・界面に及ぼす影響について、その有効性や普遍性の多角的な検証が今後の課題である。

のり面の安定解析に関する研究

九州大学大学院 笠間清伸 西日本高速道路(株) 浜崎智洋

九州大学大学院 古川全太郎 九州大学工学部 伊藤裕孝

1. 目的

近年、ゲリラ豪雨や巨大地震等により斜面崩壊が多数発生しており、局所的な豪雨や想定外の地震動など狂暴化する自然外力に対して、既存の盛土や切土のり面を補強する技術が希求されている。我々の研究グループでは、斜面や盛土に排水機能を有するスパイラル羽根付き鋼管（以下、排水性補強材とよぶ）を打設することで、地盤の安定性を向上させる地盤補強技術の開発を試みている。排水性補強材を斜面に打設する効果は、①平常時では、地盤内に存在する地下水位を低下でき、地盤が不飽和化することで強度が増加すること、②スパイラル状の羽根が法面滑動時の抵抗となり、斜面の安定性が向上する、③豪雨時や地震時には、地盤内に流入する水や発生する水圧を素早く逃がすことができるなどがあげられる。

本報では、排水性補強材を試験施工した高速道路盛土を対象に、降雨量、地下水位、サクシオンおよび体積含水率の観測値を用いて、排水性補強材の有効性について評価した。

2. 内容

2.1 対象盛土と現地計測の概要

対象とした盛土は佐賀県鳥栖市の高速道路盛土で、2016年9月19日に排水性補強材を図-1のように打設した。排水性補強材は長さ6mであり、3~4m間隔で、最下部から1.5mの高さに12本、3.5mに10本、中段から1.5mの高さに9本の計31本打設した。図-1に示す各位置に、地下水位計、土壤水分計、テンシオメータを設置し、排水性補強材打設前後の地下水位、体積含水率、サクシオンを1

時
間ごとに測定した。また、盛土の各領域の湿潤密度、乾燥密度、間隙比は表-1に示した。

現場の降雨量と地下水位の関係を図-2に示した。打設前後における降雨特性の差が大きかったため、排水性補強材の排水効果の有効性評価にあたっては、雨量の指標として実効雨量を用いて検討を行った。

2.2 実効雨量と地下水位変動の相関分析

排水性補強材の地下水位低減効果を調べるために、2016年4月から11月の約8か月間に計測された降雨量と地下水位の観測結果を対象に相関分析を実施した。ここで、9月に排水性補強材が打設されたため、5月から8月の4か月を打設前、打設後の10月から11月を打設後とよぶ。

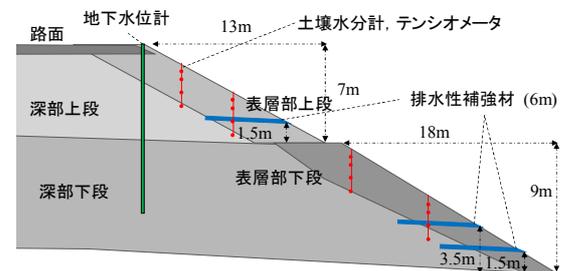


図-1 現場の断面模式図
表-1 盛土の湿潤密度、乾燥密度、間隙比

	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	間隙比
表層部上段	1.878	1.461	0.850
表層部下段	1.973	1.580	0.698
深部上段	1.898	1.488	0.823
深部下段	1.936	1.535	0.739

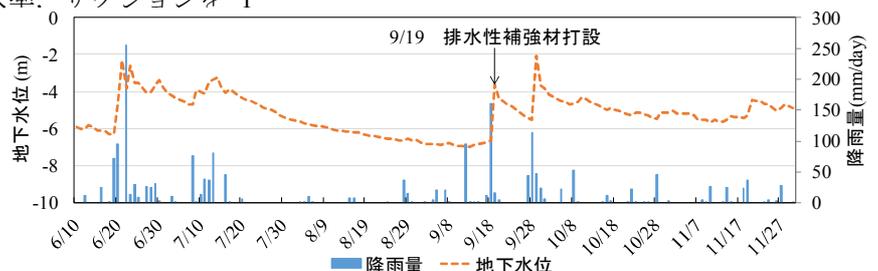


図-2 降雨量と地下水位

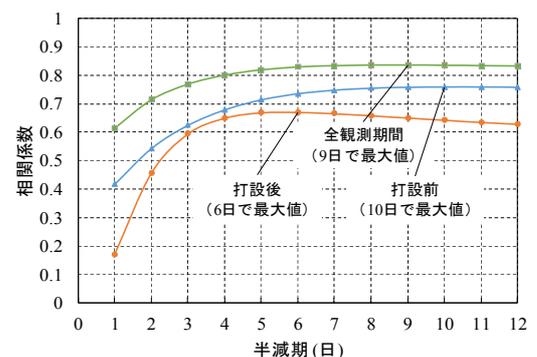


図-3 各期間における相関係数と半減期

そして、全観測期間での、地下水位と実効雨量の相関係数と、半減期との関係を図-3 に示す。排水性補強材の打設前では、半減期が 10 日の場合において相関係数が最も大きかったのに対して、打設後は半減期が 6 日の場合が最も相関が高くなった。したがって、排水性補強材により半減期が 4 日短くなったことから、排水性補強材による盛土内水位の消散効果を検証できた。

全観測期間で地下水位と最も相関が高かった半減期 9 日の場合の実効雨量と、地下水位との関係を図-4 に示す。実効雨量が 150mm 以下の場合には、排水性補強材による優位性は見受けられない。しかし、実効雨量が 150mm を超えても打設後の地下水位の上昇は緩やかで、近似直線の傾きを比較しても打設前より打設後の方が緩やかになった。これは、排水性補強材の打設位置が、地表から約 4.5m であり、打設後は地下水位が少なくとも 4m 以上に達していないことから、排水性補強材は、その位置以上の高さにおける地下水位の低下に有効であることを示唆している。

2.3 体積含水率による排水効果の検証

半減期 9 日の場合の実効雨量と深さ 50cm に設置した体積含水率の関係を図-5 に示す。ただし、体積含水率の計測は、6月から開始したため、実効雨量も6月以降の結果を用いた。排水性補強材の打設後は、打設前に比べて同程度の実効雨量に対して約 1~2%の体積含水率の減少が見られた。したがって、排水性補強材を打設することで盛土内を不飽和化できることが示唆された。

2.4 サクシヨンの計測結果の分析

図-6、図-7 に、深さ 0.5m と 1.0m での、7月と11月の体積含水率とサクシヨンの変動を示した。サクシヨンが負値をとるということは、その測定位置の地盤が飽和状態ということであり、打設後はサクシヨンの最低値が負値をとっていないことから、排水性補強材により盛土内が不飽和化したと考えられる。

3. 結論

排水性補強材を打設した高速道路盛土を対象に、降雨量、地下水位、体積含水率及びサクシヨンの観測データに基づき、排水性補強材の地下水位低減効果と盛土の不飽和化効果を検証した。得られた結果を以下に示す。

- (1) 排水性補強材により実効雨量の半減期が 4 日短縮され、盛土内水位の消散効果を得た。
- (2) 排水性補強材の打設位置以上における地下水位の低下効果を得た。
- (3) 盛土の体積含水率を 1~2%減少させ、盛土内を不飽和化させる効果を得た。

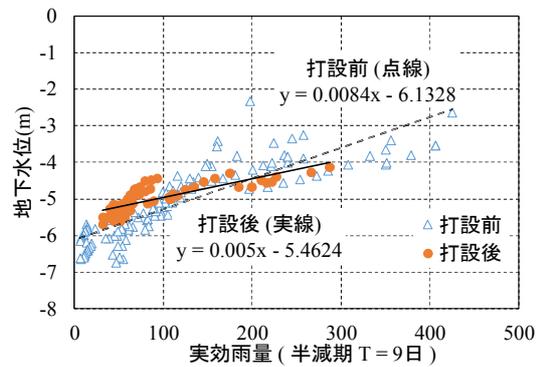


図-4 地下水位と実効雨量の関係

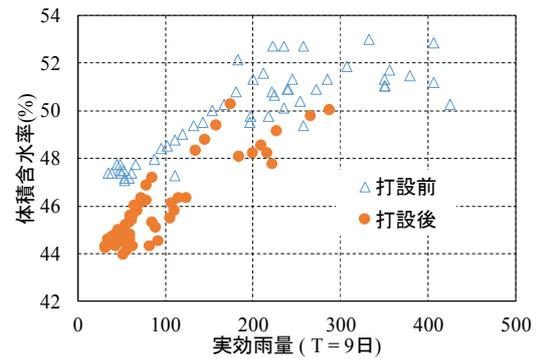


図-5 実効雨量と体積含水率の関係

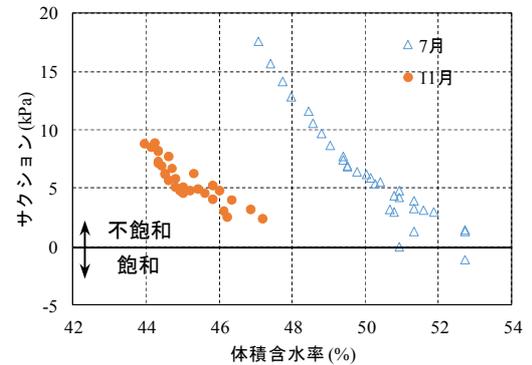


図-6 サクシヨンと体積含水率(0.5m)

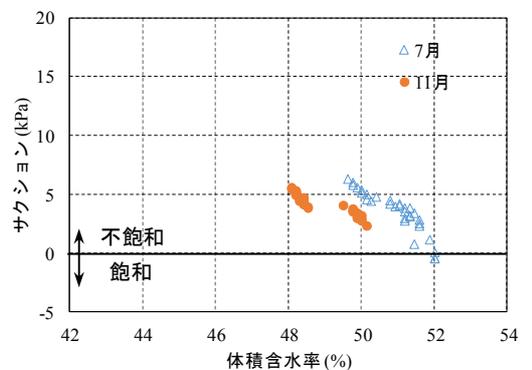


図-7 サクシヨンと体積含水率(1.0m)

道路構造物管理におけるモニタリング手法の検討 —三次元データによる高速道路のり面の維持管理手法の検討—

九州大学大学院工学研究院 三谷 泰浩

1. はじめに

近年、供用年数の経過により高速道路のり面の損傷や劣化が増加しており、点検の重要性が高まっている。のり面の点検情報は基本的に図1に示す基図で管理されており、点検情報は図中に記録される。また、特に損傷の多いのり面に関しては図2に示す外観目視点検展開図（CAD図）を用いて、基図よりも詳細な点検結果が記録される。

のり面の点検は近接目視等で行われ、損傷箇所は現地でスケッチされる。さらに、基図は平面に投影された二次元で表されるために、図面上のひび割れなどは実際の長さを表すものではないことから、位置や形状の概観を示す程度の情報しか持たない。そのため、損傷の進行等を正確に捉えているわけではなく、健全度の判定は実際には現地でしかできない。

そこで本研究では対象物の位置座標、RGB、反射強度等を点群データとして取得するレーザスキャナと、異なる視点から撮影した複数枚の写真から三次元モデルを構築する写真測量の結果をもとにGIS（Geographic Information System）を用いて、三次元データによる点検結果の正確な位置、形状、長さといった維持管理に有用な情報を蓄積・活用するための仕組みを検討する。

2. GISによる三次元モデルの構築

のり面の勾配は場所によって異なり、表面には凹凸があるため、のり面の形状やひび割れを正確に表すには三次元で表現することが合理的である。そこで、レーザスキャナ計測により取得される正確な位置情報をもつ点群データを位置座標の基準とする。

のり面を三次元化する流れを図3に示す。外観目視点検展開図では工種、排水設備および損傷箇所の形状が詳細に記されているため、基図以外にこれが存在する場合は外観目視点検展開図を用いる。この平面図と平面に投影した点群データの型枠や目地といった特徴点との共通点を抽出し、図4に示すように位置合わせを行う。

さらに、レーザスキャナ計測結果の点群データから数値標高モデル（DEM：Digital Elevation Model）を作成し、外観目視点検展開図に高さ情報を与え、GISにより三次元表示したものを図5に示す。これにより、過去の点検結果の形状、位置を正確に表したのり面のGISモデルを構築することができる。

3. 写真測量の計測結果を用いた点検情報の作成

近接目視による点検結果のスケッチに代わるも



図1 基図による点検結果

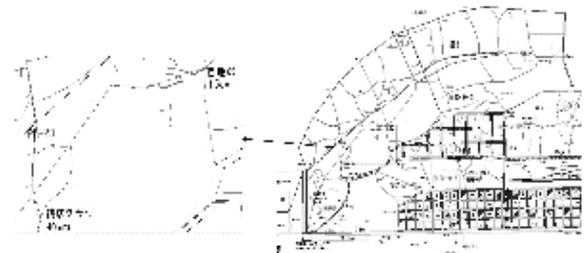


図2 外観目視点検展開図

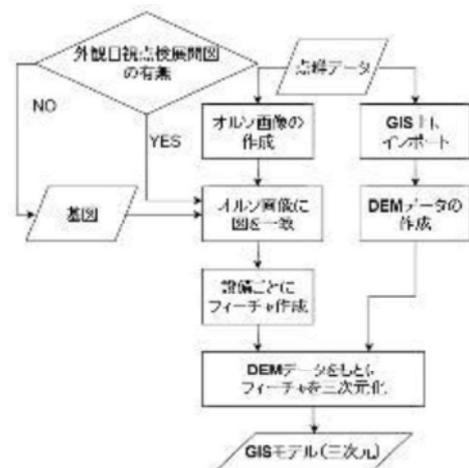


図3 GISによるモデルの構築

のとして、現地で複数枚の撮影を行うことで、のり面の高精細なRGBを持つ三次元モデルを取得できる写真測量の結果を用いて点検情報の作成を行う。

写真測量は、のり面の小段からの近景および対面するのり面からの遠景撮影された約 100 枚の写真を用いる。ただし、撮影されたデータは位置座標や尺度を有しないため、**図 6**に示す手順で、点群データから型枠などの特徴点をもとに位置座標を付与し、GIS モデルに統合する。統合した写真測量の結果から、ひび割れや溶脱物といった箇所をトレースし、点検データの幾何情報を作成する。このようにして、現地で撮影した写真から、損傷箇所を点検情報として GIS モデルに統合できる。

第二のり面の型枠工を対象として、写真測量の結果をもとに作成したひび割れ箇所と、三次元モデル化した外観目視点検展開図のひび割れ箇所の比較結果およびひび割れの属性情報を**図 7**に示す。その結果、近接目視によって作成された外観目視点検展開図と比較してひび割れの本数は約 2.5 倍多く、ひび割れの総延長は約 1.2 倍長く記録することができた。作成したひび割れの点検情報は正確な形状、長さ、位置情報を持ち、さらに個別の損傷箇所に対して判定結果等の属性情報を格納できるため、損傷箇所の維持管理のための有効な情報になりうる。

4. おわりに

本研究では、レーザスキャナにより計測された点群データを用いて、のり面や小段などの設備の形状を正確に表す三次元の GIS モデルを作成することができた。さらに、写真測量の結果から点検情報を作成し、提案した GIS モデルに統合した。その結果、正確な位置、形状、属性情報を格納できるだけでなく、従来よりも詳細な点検結果を得ることができた。今後、この仕組みを用いて点検情報を蓄積することで、損傷箇所の経時的な変化の把握や、健全度の定量的な評価を行うことで、のり面の維持管理の高度化に寄与できると考えられる。

<参考文献>

- 1) 福森秀晃他：3次元レーザスキャナを用いた路面形状計測に関する研究，土木情報利用技術論文集，vol. 17，pp. 225～232，2007.
- 2) 丹野英照：高速道路構造物の点検データ取得のための新しい計測技術の適用可能性の検討，九州大学卒業論文，2016.



図 4 特徴点による位置合わせ

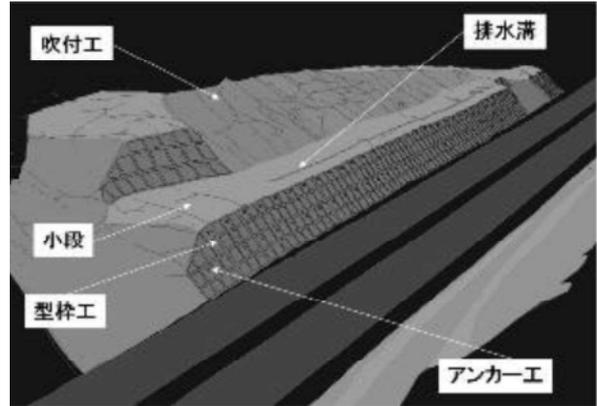


図 5 GIS モデルの三次元表示

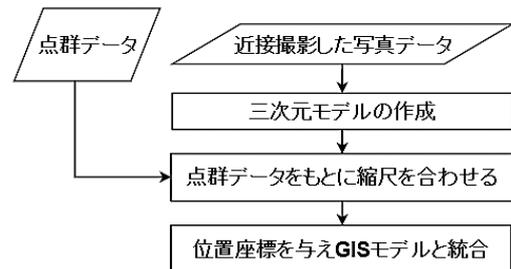


図 6 写真測量データの GIS モデルへの統合の流れ



(a)比較結果

2016/01/12Dひび割れ						
駅名	判定	上下線	のり面工種	区・区画	のり面の区画番号	
1.380374	E	20	型枠工	2		1311
1.335811	A1	20	型枠工	2		1311

(b)ひび割れに格納された属性情報

図 7 ひび割れの維持管理データ