

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	グラウンドアンカーの劣化度モデルと維持・更新に関する検討
Title(English)	STUDY FOR THE MAINTENANCE AND REPLACEMENT OF GROUND ANCHORS USING DETERIORATION MODEL
著者(和文)	浜崎 智洋, 笠間 清伸, 前田 良刀, 田口 浩史
Authors(English)	Tomohiro Hamasaki, Kiyonobu Kasama, Yoshito Maeda, Kouji Taguchi
出典(和文)	土木学会論文集C (地圏工学), Vol. 71, No. 3, pp. 191-203
Citation(English)	Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering), Vol. 71, No. 3, pp. 191-203
発行日 / Pub. date	2015, 8
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は土木学会に帰属します。 Copyright (c) 2015 Japan Society of Civil Engineers.

グラウンドアンカーの劣化度モデルと 維持・更新に関する検討

浜崎 智洋¹・笠間 清伸²・前田 良刀³・田口 浩史⁴

¹正会員 西日本高速道路株式会社 九州支社 (〒818-0131 福岡県太宰府市水城2-25-1)

E-mail: t.hamasaki.aa@w-nexco.co.jp

²正会員 九州大学大学院准教授 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

E-mail: kasama@civil.kyushu-u.ac.jp

³正会員 株式会社ドーユー大地 (〒733-0037 広島市西区西観音寺町17-17)

E-mail: y.maeda@cdaichi.co.jp

⁴正会員 日本地研株式会社 (〒812-0894 福岡市博多区諸岡5-25-25)

E-mail: taguchi@chiken.co.jp

グラウンドアンカー(以下,「アンカー」という)は,地すべりや切土などの斜面安定化のために,プレストレスを地盤に導入し土塊の変位を抑止する工法である。昭和40年代以降,アンカーは削孔などの施工技術の進歩とともに広く普及し,代表的な斜面安定対策工法となった。その間,防食などの耐久性に関する各種基準が整備・確立されてきた。しかしながら,防食性能が低い“旧タイプアンカー”では,腐食等によりアンカーの損傷が顕在化しており,今後それらの更新対策が増加していくことが予想される。本検討では,高速道路の切土のり面に施工された旧タイプアンカーを対象に,健全度調査の信頼性の推定や,ワイブル分布を活用したアンカーの損傷予測の推計を行い,それらを活用して切土のり面の定量的な健全性(安定性)評価の提案をおこなった。

Key Words : ground anchor, deterioration model, stability assessment, maintenance, replacement

1. はじめに

グラウンドアンカー(以下,「アンカー」という)は,アンカー頭部,引張り部,アンカー体部から構成され,引張り部を介して所定のプレストレスを定着地盤に伝達し,反力構造物と地盤を一体化させて,のり面・斜面を安定化させる工法である。

高速道路では,昭和42年(1967年)頃に東名高速道路で初めて採用されて以来,削孔技術や施工技術の進歩など多くの施工実績や研究成果による改良が加えられてきた。また,各種基準の整備に伴い,工法に対する信頼性が高まり,現在では経済的な切土のり面(以下,「のり面」という)の安定化策として,約11.2万本が施工されている(平成24年(2012年)3月時点)。

この間,品質や長期耐久性の向上を図るため,鋼材の周囲を耐食性のある2種類の異なった材料(グラウト,防錆油,エポキシ樹脂などの合成樹脂や連続繊維補強材など)で保護した“二重防食”構造の採用や,地中部のアンカー体に対する水密性の確保などの改善を講じてき

た¹⁾。

このような二重防食構造が採用された“新タイプアンカー”に対し,防食性能が低い“旧タイプアンカー”は,腐食等によりアンカーの損傷が顕在化しつつある。平成26年(2014年)1月に提言がなされた「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会」報告書²⁾では,今後大規模な更新が必要となることを予想しており,如何に合理的なのり面の維持・更新を行うかが喫緊の課題となっている。しかしながら,旧タイプアンカーは,鋼材の腐食などに代表される材料の耐久性や長期間経過した状況下での残存引張り力の変動など,抱かえている課題は重大かつ複雑である³⁾。

旧タイプアンカーとは,二重防食構造を有していないアンカーの総称である。二重防食構造とは,「腐食環境が裸のPC鋼材に到達するまでに耐食性のある2種類以上の異なった材料で保護された状態」と定義され,昭和末期(1990年頃)以降採用されている。

図-1に示すように,九州・沖縄の高速道路には約2.8万本のアンカーが施工され,旧タイプアンカーは全体の

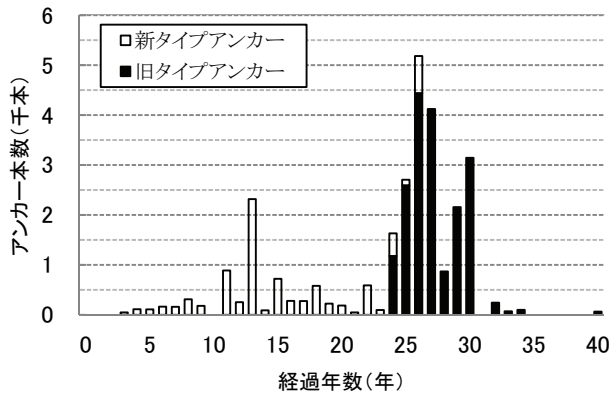
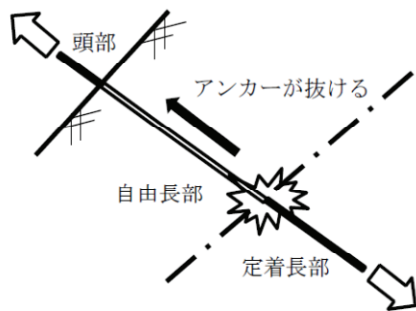


図-1 九州・沖縄の高速道路におけるアンカーの実態

(1)アンカーの自由長部や定着長部など地中部の損傷が原因で、アンカー頭部が破損する事例



(2)アンカーの地表部の損傷が原因で、アンカー頭部が破損する事例

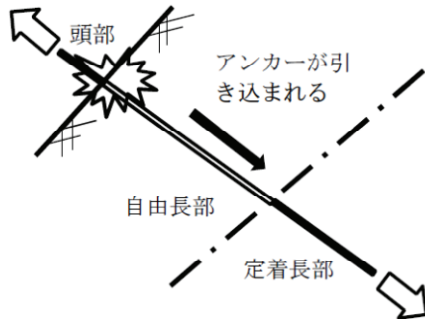


図-2 アンカー頭部損傷のメカニズム

約 67%を占めている(平成 24 年(2012 年)4 月時点)。また、旧タイプアンカーの平均経過年数は 27 年を超え、のり面の安定性を保持するためには、アンカーの定期的な点検・調査が必要不可欠となっている。

アンカーの点検・調査では、アンカー頭部や支圧された構造物の劣化状況の把握、周辺地盤の動きの観察、およびアンカーの残存引張り力の測定が実施される。残存引張り力を精度よく測定する場合は、リフトオフ試験と呼ばれる大規模な試験装置を必要とし、労力的にも経済的にも多大な負担を用する。そのため、のり面に多数施工されたアンカーから一部(例えば、全体の 5~10%程

(1)アンカーが地中部で抜け(切れ)頭部コンクリートが浮いた状況



【頭部外観】



【コンクリートキャップ撤去】

(2)アンカーが地中部へ引き込まれ頭部コンクリートが浮いた状況



【頭部外観】



【コンクリートキャップ撤去】

写真-1 アンカー頭部の変状例

度)を抽出してリフトオフ試験を実施するのが一般的である⁴⁾。したがって、アンカーの点検・調査は、目視や打音を主体とした外観の評価・確認に依存せざるを得ないのが実態である。

しかしながら、アンカーの健全度評価を実施するにあたり、外観の目視や打音を主体とした点検・調査の信頼性評価を定量的に検討したものはない。また、残存引張り力による評価だけではアンカーが潜在的にどのような余力を有しているか、あるいは損傷(劣化)過程のどの段階に位置しているかは不明瞭となっている。

さらには、これらの点検・調査結果は、その時点でのアンカー自体の機能評価に留まっているのが現状であり、肝要であるのり面全体の健全性(安定性)評価の把握にまでには至っていないといった種々の課題を抱かえている。

本稿では、これらの現状を踏まえ、九州・沖縄の高速道路における旧タイプアンカーの健全度調査結果等をもとに、ワイブル分布を活用したアンカーの損傷予測の推計や、アンカーの更新が必要であるのり面の抽出やその優先順位等を判断する手法の構築に向けて、新たな提案を行うものである。

2. アンカーの損傷と のり面の安定性

(1) アンカーの損傷形態

アンカーは抑止工法の一つであり、緊張力の大小にかかわらず鋼材に能動的に引張力が導入され、地表面の受圧板と一体となつてのり面の安定を図るものである。したがって、導入されている引張力が亡失することは致命的となり、それは場合として、アンカーが飛び出したり、頭部防護工が破損したりすることで損傷が発現する。

アンカーが飛び出すメカニズムとしては、図-2 および写真-1 に示すように、アンカーの破断や定着長部からのアンカー体の抜けが考えられ、その反動で頭部防護工が破損に至ることもある。また、頭部定着具の損傷に伴いアンカーが地中に引き込まれた場合、反動で頭部防護工が破損に至るケースもある。

このようなアンカー損傷の原因は、不完全な防錆処理に起因するものが多く、鋼材の腐食は定着長部よりも自由長部の方が顕著であることも明らかとなっている⁹⁾。特に旧タイプアンカーは、アンカー頭部をコンクリートで直接保護しているケースが多く、モルタルや骨材などの異物がクサビの間に詰り、それが原因となってアンカーとクサビの間ですべりが生じたり、水の浸入により腐食が進行しやすい状態となっている。

アンカー頭部に飛び出しなどの致命的な事象が発現するのは機能喪失の最終段階であり、アンカー頭部の損傷が表面上確認されなかったとしても、地中部において潜在的な損傷・劣化が進行している可能性は否定できない。

(2) のり面安定性の目安

建設段階におけるアンカーによるのり面の安定化策の実施にあたっては、対策前の安全率(一般的には

$F_s \leq 1.00$)に対して、計画安全率が $F_{sp}=1.20$ を満足できるよう計画されている⁹⁾。

既往の研究⁷⁾によると、計画安全率を $F_{sp}=1.10$ とすることがひとつのボーダーラインと考えられており、すべり面形状、地下水位、地盤定数などの設計条件の不確実性を考慮して計画安全率 $F_{sp}=1.20$ を設定してきた背景がある。

したがって、計画安全率と対策前の安全率との差分の $0.10 \sim 0.20$ に相当するアンカーの損傷は、のり面の安定性や増打ち等の更新対策を検討するうえでひとつの目安となる。また、既往の研究⁹⁾では、17%程度のアンカーが機能を失うまでに何らかの対策が必要であると報告されている。

3. 旧タイプアンカーの健全度調査

(1) 調査内容

本検討では、旧タイプアンカーが施工されたのり面のうち、23～33 年が経過した全 32 箇所ののり面において、全 4,030 本のアンカーを対象に、頭部外観調査(以下、「外観調査」という)、頭部状況調査(以下、「頭部調査」

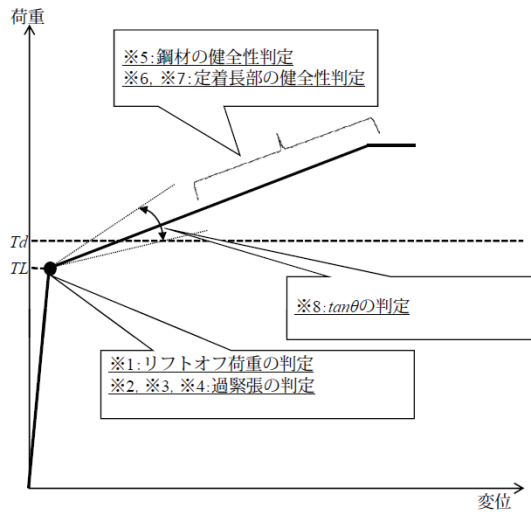
表-1 旧タイプアンカーの健全度評価判定例(損傷状況と判定ランク)

調査等内容	判定代表例				
頭部外観調査	 アンカーの飛び出しがある	 頭部キャップに著しい錆や浮きがある	 頭部に錆やオイル漏れがある	 軽微な錆やオイル漏れがある	 健全
頭部状況調査	 アンカーに引抜けがある	 著しい腐食がある	 全体的に腐食がある	 軽微な錆がある	 健全
リフトオフ試験	リフトオフ荷重が認められない、過緊張が閾値を超えている、またはリフトオフ後の挙動に問題がある	リフトオフ荷重に大きな増減があり、リフトオフ後の挙動に一部問題がある	リフトオフ荷重に大きな増減があるが、リフトオフ後の挙動が一定レベルまで問題ない	リフトオフ荷重は正常であるが、リフトオフ後の挙動が一部正常な範囲を外れている	リフトオフ荷重ならびにリフトオフ後の挙動が正常である
損傷判定ランク	(V)機能喪失	(IV)劣化加速後期	(III)劣化加速前期	(II)劣化進展期	(I)潜伏期
損傷判定内容	アンカーの機能を失っているもの、または著しい機能低下に該当すると思われるもの	アンカーの変状が著しく、今後、機能を失うまたは著しい機能低下の可能性が有るもの	アンカーに一部変状があり、機能面への影響はあるが、アンカー機能は保持されていると思われるもの	アンカーに一部変状はあるが、アンカーの機能低下への影響はないと思われるもの	順調に機能しているもの

```

graph TD
    START([START]) --> D1{リフトオフ荷重の判定 ※1}
    D1 -- "リフトオフ荷重が認められない" --> B3[過緊張である ※3]
    D1 -- "リフトオフ荷重が認められる" --> D2{過緊張の判定 ※2}
    D2 -- "過緊張である" --> D4{過緊張が閾値以上か判定 ※4}
    D2 -- "過緊張ではない" --> D3{リフトオフ荷重が設計アンカー力の20%未満か判定}
    D3 -- "20%未満" --> D4
    D3 -- "20%以上" --> D5{弾性変形の範囲の判定 ※5}
    D5 -- "弾性変形の範囲が認められない" --> D4
    D5 -- "認められる" --> D6{定着長部の健全度の判定 ※6}
    D6 -- "定着長部が健全ではない" --> D7{変位の増加状況の判定 ※7}
    D6 -- "定着長部が健全である" --> D8{tanθの判定 ※8}
    D8 -- "適正な範囲である" --> I[I]
    D8 -- "適正な範囲を外れている" --> II[II]
    D7 -- "閾値以下で生じている" --> D4
    D7 -- "閾値以下で生じない" --> D9{定着長部の健全度の判定 ※6}
    D9 -- "定着長部が健全ではない" --> D10{変位の増加状況の判定 ※7}
    D9 -- "定着長部が健全である" --> D7
    D10 -- "閾値以下で生じている" --> D4
    D10 -- "閾値以下で生じない" --> D9
    D4 -- "閾値以上" --> V[V]
    D4 -- "閾値未満" --> D5
    D5 -- "弾性変形の範囲が認められない" --> V
    D5 -- "弾性変形の範囲が認められる" --> D9
    D7 -- "閾値以下で生じている" --> IV[IV]
    D7 -- "閾値以下で生じない" --> III[III]
    D10 -- "閾値以下で生じている" --> IV
    D10 -- "閾値以下で生じない" --> III
  
```

- 図-3(a) リフトオフ試験による判定フロー



注) 図中の※番号は図-3(a)中の※番号に対応

図-3(b) リフトオフ試験による判定模式図

健全度調査の具体的な調査内容・手法について、外観調査では、全 4,030 本のアンカー頭部の防護コンクリートの浮きや破損、保護キャップの腐食や防錆油の漏れなどの状況を目視・打音により調査した。頭部調査は、外観調査のうち 5~10%程度を抽出し、防護コンクリートや保護キャップなどのアンカー頭部の保護材を除去し、定着具や鋼材の腐食・破損、クサビやナットの定着状況などについて調査した。また、リフトオフは、頭部調査後に油圧式ジャッキを用いて載荷し、残存引張り力および荷重-変位挙動について調査した。

なお、外観調査時にアンカーが飛び出して明らかにアンカーが破断しているものは機能喪失と評価判定できるため、頭部調査やリフトオフは行っていない。さらに、頭部調査によりリフトオフ作業時の安全性が確保できないと判断したアンカーもリフトオフは行っていない。今回の検討では、全 4,030 本のアンカーに対し、外観調査時に機能喪失と評価判定されたアンカーは全 2 本であり、後述する損傷予測の推計等の検討に及ぼす影響はないと考える。

(2) 健全度判定

旧タイプアンカーの健全度評価判定は、表-1に示す損傷状況にあわせ5段階の判定ランク（以下、「ランク」という）とし、その損傷判定内容を設定した。

外観調査と頭部調査については、各ランクに示す部材ごとの限度見本を設定し評価を行った。

リフトオフは、残存引張り力の程度⁹⁾や荷重-変位特性¹⁰⁾に着目して、各々に評価する方法が提案されている。ここでは、図-3(a)・(b)の判定フローと判定模式図でリフトオフ荷重とリフトオフ後の荷重-変位特性を合せて判定することや、リフトオフの判定に着目して経年的な損

表-2 健全度調査ごとの判定結果

(単位；本)

判定ランク	外観調査	頭部調査	リフトオフ
I	3,395	0	103
II	117	59	114
III	498	179	13
IV	18	18	3
V	2	1	11
合計	4,030	257	244

表-3 外観調査とリフトオフの判定比較

(単位；本)

		リフトオフ					
		I	II	III	IV	V	計
外 観 調 査	I	65	79	9	1	7	161
	II	7	4	0	0	0	11
	III	30	31	4	2	4	71
	IV	1	0	0	0	0	1
	V	-	-	-	-	-	0
	計	103	114	13	3	11	244

傷の進行を把握することを試みた。

(3) 健全度判定結果

各調査の判定結果を表-2に示す。外観調査では、頭部調査やリフトオフと比較して、ランク“Ⅰ”の比率が非常に高く、ランク“Ⅴ”の比率が非常に低い結果となった。これは、腐食などによる地中部におけるアンカーの損傷が頭部(地表部)に発現し難いことや、一定期間遅れて発現するためと考えられる。このように、外観の目視・打音だけではアンカーの損傷・劣化を把握するには限界があり、外観調査だけの単独調査による判定だけでなく、他の調査による判定もあわせて健全度評価を行う必要があることを示唆している。頭部調査とリフトオフは、ランクによっては大きな差異はあるが、ランク“Ⅳ~Ⅴ”の比率など損傷進行の程度は同様な傾向を示した。

一般的に、アンカーの健全度評価は、いくつかの調査結果をもとに総合的に行っている。つまり、外観調査や頭部調査のランクが低くても、リフトオフのランクが高ければ、リフトオフの判定結果が優先される。しかしながら、頭部調査やリフトオフはアンカー全数の 5~10%程度のみを抽出しているにすぎないため、簡易な調査である外観調査をのり面の健全性(安定性)評価として活用するには、頭部調査やリフトオフとの差異を如何に補完するかが課題となる。

(4) 外観調査の信頼性推定

同一のアンカーにおいて、外観調査の判定をリフトオフの判定と対比したものが表-3 である。外観調査でアンカーが飛び出したものなどのように、明らかにアンカーが破断している場合は、リフトオフを実施していないため対象外となる。

双方の判定が「一致するもの、あるいは一致しないが外観調査がリフトオフより危険側の判定の場合(表-3 の着色部分)」を、「検出率」と定義して数値化した。また、「リフトオフのランク“V”を外観調査で検出できなかったもの(表-3 の太線部分)」を、「潜在的な損傷率」と定義して数値化した。その結果、リフトオフを実施した全 244 本に対し、検出率は 58.2%であり、潜在的な損傷率は 4.5%であった。また、外観調査時に機能喪失と評価判定されたアンカー全 2 本を加味した場合の全 246 本に対しては、検出率は 58.5%、潜在的な損傷率は 4.5%となった。

次に、アンカー全数を母集団、リフトオフを標本とみなし、母集団から抽出した標本数 n における潜在的な損傷率を標本比率 r とし、母集団の潜在的な損傷率となる母比率 R を信頼度95%で推定すると、式(1)のような推定区間が得られ、 $1.9\% \leq R \leq 7.1\%$ の範囲をとることとなった。つまり、アンカー全数における潜在的な損傷率は1.9%~7.1%と推定された。

$$r - 1.96 \sqrt{r \cdot \frac{1-r}{n}} \leq R \leq r + 1.96 \sqrt{r \cdot \frac{1-r}{n}} \quad (1)$$

4. アンカーの劣化度モデル

(1) 劣化度モデルの検討

代表的なアンカーの劣化度モデルの推定手法として、健全度判定の経年的な推計を多段階または二値として評価する方法が挙げられる。多段階評価の代表的な方法であるマルコフ過程を仮定したモデルは、遷移確率を一定としているため劣化速度を過小評価している可能性があることが指摘されている¹¹⁾。ここでは、アンカーの損傷予測の推計だけでなくのり面の健全性(安定性)の検討を行うにあたり、アンカーの劣化を損傷/健全の二値で評

価する必要があるため、2母数ワイブル分布を適用することとした。

(2) 損傷の定義

今回の検討に用いたデータは、多段階の健全度判定データであるため、これらを損傷の閾値として設定する必要がある。ここでは、閾値未満の判定データを打ち切りデータ、閾値以上の判定データを損傷データとして取り扱った。例えば、ランク“II”を閾値とした場合、ランク“I”を打ち切りデータ、ランク“II~V”を損傷データとして用いた。

また、信頼性解析においては、故障(損傷)までに要した時間データが重要となる。今回の健全度調査においては、それぞれのランクに達したと考えられる真の経過年数を明確に定めることは不可能である。そこで、損傷までの経過年数を、32 箇所のそれぞれの旧タイプアンカーが施工されたのり面を含む高速道路の区間が供用開始された時点から、健全度調査が実施された時点までとした。したがって、これらのデータは、データごとに打ち切り時間が異なるランダム打ち切りデータとして取り扱った。

(3) ワイブル分布モデルの検討

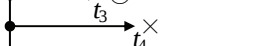
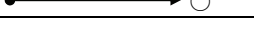
ワイブル分布¹²⁾は、物質の時間に対する故障や破壊などの劣化現象や寿命を統計的に記述するため広く利用されている関数である。ワイブル分布の不信頼度関数 $F(t)$ は式(2)で表わされ、そのパラメータを求めることで故障(損傷)時間の分布を推定できる。また、この場合の平均故障寿命 $MTTF$ は式(3)で推定される。ここで、 t は時間、 m は形状パラメータ、 η は尺度パラメータ、 $\Gamma(\cdot)$ はガンマ関数である。

$$F(t) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\} \quad (2)$$

$$MTTF = \eta \cdot \Gamma \left(\frac{1}{m} + 1 \right) \quad (3)$$

m および η の推定は、用いたデータが不完全データ(ランダム打ち切りデータ)であることから、累積ハザード法¹³⁾を適用した。累積ハザード法による m および η の推定例を表-4 に示す。ここでは、得られたデータを損

表-4 累積ハザードの算出例 (1)

データ解析図 (○; 健全, ×; 損傷)	故障までの 時間 (t_i)	t_i から $t_i + \Delta t$ までの 故障数	t_i の直前における 未故障数 (k_i)	ハザードの推定値 ($h(t_i) = x_i / k_i$)	累積ハザードの 推定値 ($H(t_i)$)
	t_1	x_1	k_1	x_1 / k_1	$h(t_1)$
	t_2	0	k_2	—	—
	t_3	x_3	k_3	x_3 / k_3	$h(t_3) + H(t_1)$
	t_4	x_4	k_4	x_4 / k_4	$h(t_4) + H(t_3)$
	t_5	0	k_5	—	—

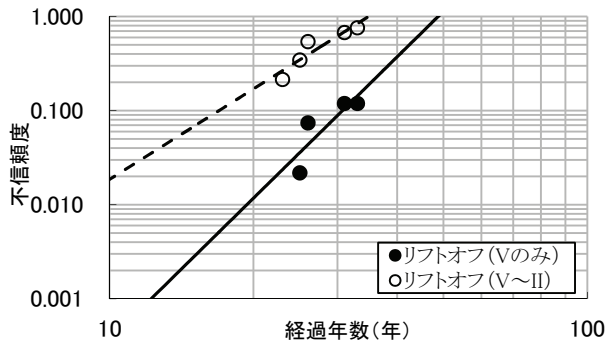


図-4 ランク別のワイブルプロット(リフトオフの場合)

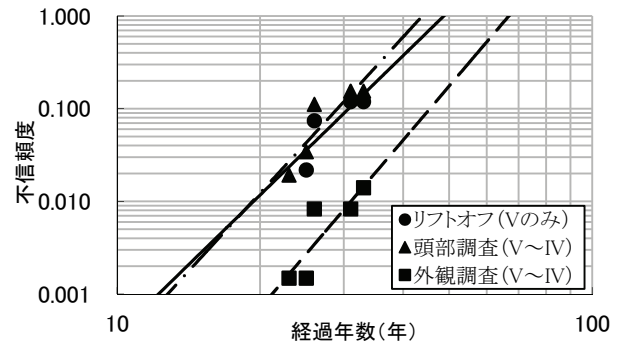


図-5 調査別のワイブルプロット

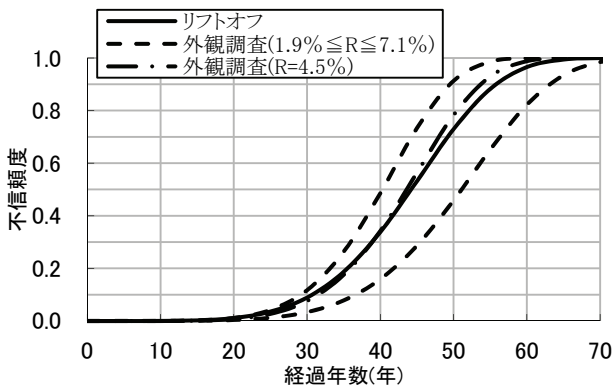


図-6 旧タイプアンカーの損傷予測

傷データと健全データとに区別せずに経過年数が小さい順に並び替え、損傷データのみについてハザードの推定値 $h(t_i)$ を求め、その和から累積ハザード値 $H(t_i)$ を計算し、対数座標における回帰直線の傾きおよび切片をそれぞれ m および η として推定を行った。なお、ハザード推定値の算定にあたっては、経過年数ごとの損傷を1個のハザード推定値として取扱った。

(4) 累積ハザード法によるワイブル解析

a) ランク別のワイブルプロット

リフトオフによる判定をもとに、ランク“V”と“II”をそれぞれ閾値としたワイブルプロットとその近似直線を図-4に示した。この場合、ランク“V”の場合の相関係数は0.911、ランク“II”の場合の相関係数は0.955となり、近似直線への適合がよいことから、これらのデータがワイブル分布に適合していることが示された。

ワイブル分布の不信頼度関数をもとに各パラメータおよび平均故障寿命を推定すると、ランク“V”の場合に($m=5.16$, $\eta=47.5$, $MTTF=43.7$)、ランク“II”の場合に($m=4.56$, $\eta=29.9$, $MTTF=27.3$)が、それぞれ得られた。これは、データが摩耗故障型($m>1$)に該当し、時間の経過とともに故障(損傷)が発生する確率が高くなることを示

している。このようにランクが高くなるにしたがい、プロットが時間軸の大きい側へ移動していることが示され、ランクが高いほどその進行には時間を要するといった損傷の発現と経過年数との関係が定量的に把握できることが明らかとなった。

b) 調査別のワイブルプロット

各調査でそれぞれ閾値を設定した場合のワイブルプロットとその近似直線を図-5に示した。これらについても同様に、ワイブル分布の不信頼度関数をもとに各パラメータおよび平均故障寿命を推定すると、リフトオフでランク“V”の場合に($m=5.16$, $\eta=47.5$, $MTTF=43.7$)、頭部調査でランク“IV”の場合に($m=5.81$, $\eta=42.8$, $MTTF=39.6$)が、それぞれ得られ、プロットは類似傾向を示した。

しかしながら、外観調査で同程度のランク“IV”を閾値とした場合は($m=6.03$, $\eta=66.6$, $MTTF=61.8$)となり、時間軸が大きい側へ乖離したプロットとなった。

このように、外観調査でアンカーの健全度やのり面の安定性を定量的に評価するには、他の調査結果をもとに補完する必要性があらためて示された。

(5) 損傷予測の推計

損傷予測の推計にあたっては、残存引張り力の程度や荷重-変位特性から、地中部におけるアンカーの損傷・劣化を精度よく捉えることが可能なリフトオフと、簡易な外観調査に着目した。

リフトオフのランク“V”を故障(損傷)と定義して、ワイブル分布により損傷予測の推計を行なったものと、外観調査でのランク“V”をもとに、20年以上が経過した旧タイプアンカーの潜在的な損傷率を考慮して補正し損傷予測の推計を行なったものを、線形座標として図-6に示した。具体的な補正方法については、表-5に示すように、その時点の対象となる調査数に式(1)で得られた潜在的な損傷率を乗じて累積ハザード推定値を算出した。

このように、リフトオフによる損傷推計は外観調査に

表-5 外観調査における累積ハザード推定値の算出(R=4.5%の場合)

経過年数 (年)	調査数 (本)	Vの数 (本)	対象となる未 損傷数(本)	潜在的な損傷 数(本)	補正後の損傷 数(本)	累積ハザード 推定値($H(t_i)$)
23	939	2	4,030	42	44	0.011
25	1,193	0	3,091	54	54	0.028
26	1,659	0	1,898	75	75	0.068
31	68	0	239	3	3	0.080
33	171	0	171	8	8	0.125
計	4,030	2	—	182	184	—

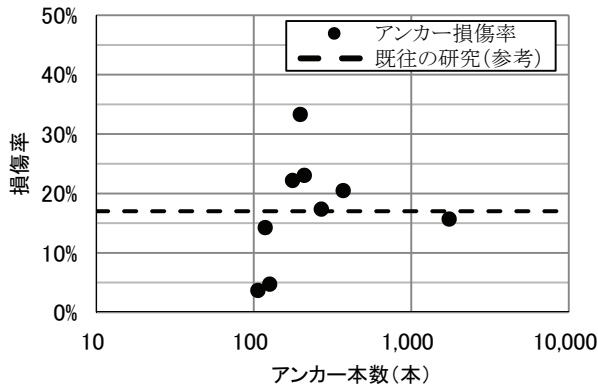


図-7 更新対策時の旧タイプアンカー損傷率の実態

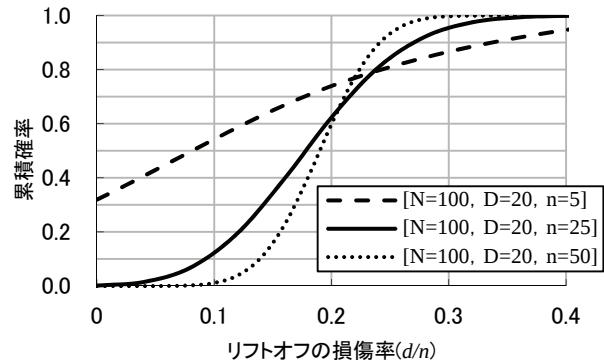


図-8 超幾何分布による累積確率

潜在的な損傷率で補正した推定範囲内に位置し、 $R=4.5\%$ で補正したものと近似でき、信頼性推定による補正を行うことにより、外観調査結果を用いた損傷予測の精度向上を図ることができた。なお、 $R=4.5\%$ で補正した場合に($m=5.79$, $\eta=46.5$, $MTTF=43.0$), $R=1.9\%$ で補正した場合に($m=5.67$, $\eta=54.5$, $MTTF=50.4$), $R=7.1\%$ で補正した場合に($m=5.83$, $\eta=42.9$, $MTTF=39.7$)がそれぞれ得られた。

5. 劣化度モデルの活用

(1) 更新対策実施のり面の実態

アンカーでのり面の安定化策を実施した場合、仮にいくつものアンカーが損傷しても直ちにのり面の崩壊に至る可能性は低い。しかしながら、建設時点の機能が低下していることは明白であり、いつ・どの段階で増打ち等の更新対策に踏み切るかを見極めることは、合理的なのり面の維持・更新を実施するうえで肝要である。

そこで、過去に新タイプアンカーを用いて増打ち等の更新対策を実施した、あるいは更新対策に向けた検討を行っている全9箇所ののり面の実態を調査した。これらののり面は、ワイブル分布を活用し損傷予測の推計を行った全32箇所には含まれていない。図-7に、当時の調査結果をもとにした、9箇所ののり面におけるアンカー

損傷率の実態を示した。損傷率とは、各のり面におけるリフトオフによるランク“V”の比率である。なお、リフトオフは、各のり面のアンカー全数の5~30%程度をそれぞれ抽出して実施したものである。図-7に示すように、分布にバラツキはあるものの、損傷率が4~33%に達した時点で更新対策に着手している実態が把握でき、17%程度のアンカーが機能なくなるまでに何らかの対策が必要であったという既往の研究結果と、傾向が類似していることが示された。

なお、リフトオフの損傷率が4~5%と低いり面は、頭部調査の結果等を総合的に勘案して更新対策の検討を行っている。

(2) リフトオフによる信頼性評価

のり面の健全性(安定性)評価を行うためのアンカー損傷率の算出にあたっては、標本となるリフトオフの本数がその評価の精度に多大な影響を与えられ。

ここで、大きさ N 個の母集団で、損傷と定義される個数を D とし、母集団から n 個の標本を取り出したとき、標本のなかで損傷と定義される個数が d である確率は式(4)に示す超幾何分布¹⁴⁾で定義され、その累積確率は式(5)で表わされる。

$$f(d) = {}_D C_d \cdot {}_{N-D} C_{n-d} / {}_N C_n \quad (4)$$

$$F(x) = \sum_{d=0}^x \binom{D}{d} \binom{N-D}{n-d} / \binom{N}{n} \quad (5)$$

これを用いて、リフトオフの本数とその結果から、のり面のアンカー損傷率が $D/N=20\%$ に達していることを推定する場合、どのような信頼性を有しているかを検証した。

ここで、 $N=100, D=20$ のときに、リフトオフ(標本)における損傷率 d/n とのり面全体のアンカー損傷率 D/N が 20% に達している累積確率との関係は、図-8 のように示される。これによると、 $F(x)=0.90$ 以上の確率で母集団の損傷率 D/N が 20% であることを得るためには、 $n=5$ 本の場合は $x=2$ 本($d/n=0.4$)、 $n=25$ 本の場合は $x=7$ 本($d/n=0.28$)、 $n=50$ 本の場合は $x=13$ 本($d/n=0.26$)の損傷を把握する必要がある。また、 $n=5$ 本の場合は、損傷数が $x=0$ 本($d/n=0.0$)であっても、母集団の損傷率 D/N が 20% となる確率は $F(0)=0.32$ となり、 $n=25$ 本と $n=50$ 本の場合と比較して大きな誤差を有していることが示された。

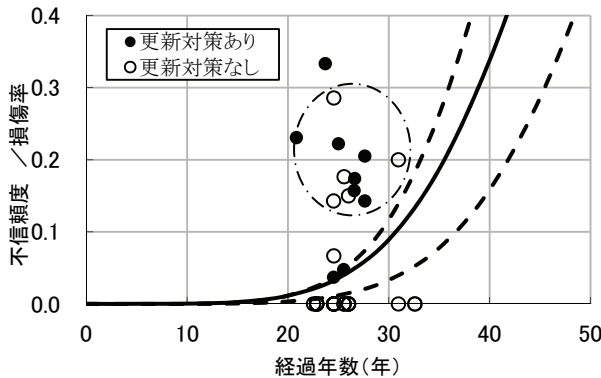


図-9 損傷予測と損傷率の実態



写真-2 対象のり面の全景

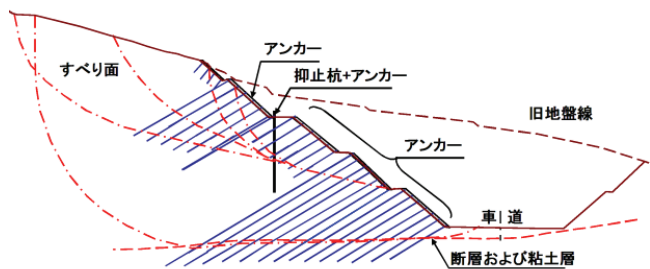


図-10 対象のり面の概略横断図

表-6 累積ハザードの算出例(2)

データ解析図 (○; 健全, ×; 損傷)	故障までの 時間 (t_i)	t_i から $t_i+\Delta t$ までの 故障数	t_i の直前における 未故障数 (k_i)	ハザードの推定値 ($h(t_i)=x_i/k_i$)	累積ハザードの 推定値 ($H(t_i)$)
	t_1	x_1	k_1	x_1/k_1	$h(t_1)$
	t_2	x_2	k_2	x_2/k_2	$h(t_2)+H(t_1)$
	t_3	x_3	k_3	x_3/k_3	$h(t_3)+H(t_2)$
	t_4	x_4	k_4	x_4/k_4	$h(t_4)+H(t_3)$
	t_5	0	k_5	—	—

また、既往の研究¹⁹⁾では、アンカーを有するのり面の残存引張り力を面的に把握するためには、アンカー全数の1/4程度以上のアンカーに対してリフトオフを行う必要性を推奨している。

したがって、アンカーの損傷が顕在化してきた場合は、面的な残存引張り力の把握と合わせて、アンカー全数が100本程度ののり面であれば、25%程度を抽出してリフトオフを実施することが健全性評価の精度向上のために必要と考える。

(3) アンカー更新と損傷予測との関係

図-9に、図-6で示したアンカーの損傷予測と合わせて、旧タイプアンカーの健全度調査を実施した全32箇所ののり面における経過年数と損傷率との関係(図-9中の○; 更新対策なし)と、図-7で示した全9箇所ののり面における経過年数と損傷率との関係(図-9中の●; 更新対策あり)を示した。更新対策ありの9箇所ののり面は、更新対策なしの32箇所の健全度判定をもとに推計した損傷予測に比べ、時間軸が小さくかつ損傷率が高い側へプロットされ、損傷の進行が速いことが示された。また、更新対策なしののり面のうち、一点破線で囲まれた範囲にプロットされたのり面は、今後早期に更新対策の実施に至る可能性が高いことを示唆している。

このことから、一般的な損傷予測ベースにのり面ごとの損傷率をプロットすると、損傷進行度が明らかとなり、あわせて損傷率の閾値を適切に設定することで、のり面の健全度(安定性)の良否や更新等対策の必要性の適否の評価が可能となることが示唆された。

6. 劣化度モデルの検証

(1) 対象としたのり面¹⁶⁾

建設段階で旧タイプアンカーで安定化策が実施されたあるのり面(以下、「対象のり面」という)を対象に、経年的な点検データを用いて、ワイブル分布を活用した損傷予測の推計を行い、劣化特性の把握と新タイプアンカーの増打ちによる更新対策時期等の検証を試みた。

対象のり面は、昭和 62 年(1987 年)に供用が開始され、最大 5 段(最大切土高 35m 程度)、約 2,000 本の旧タイプアンカーが施工されている(写真-2 参照)。のり面の安定化策は現場打ちのり枠とアンカーを主体とし、一部に鉄筋補強工や抑止杭が実施されている。アンカーは、すべり面と設置位置(ブロックや段数)でアンカー長等が異なり、 $L=10\sim 50\text{m}$ のものが幅広く施工されている(図-10 参照)。

このように、のり面の安定化策としては技術的難易度が高い部類に属している。更新対策は、建設段階で想定したすべり面に対して、機能を失った旧タイプアンカーが分担していた同程度の抑止力分を負担させるため、現場打ちのり枠内に独立受圧板を用いて新タイプアンカーを増打ちしている。これらは、供用開始後概ね 21～26 年で実施したものである。

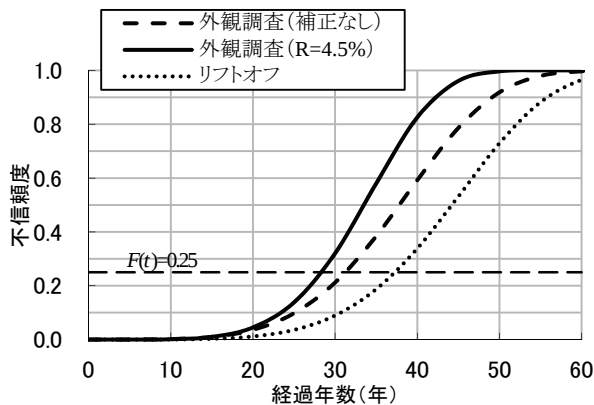


図-11 対象のり面の損傷予測

(2) アンカーの損傷状況

対象のり面は、平成 10 年(1998 年)頃からアンカー頭部に諸変状が発生し、徐々にそれが顕在化してきていた。また、地下水位の上昇等によって一部のアンカー荷重が漸増傾向に推移してきた。アンカー頭部の損傷は、設計アンカー力以上の荷重増加によって生じたアンカーの引き込まれや抜け(定着長部の付着切れやアンカーの破断)などが要因と考えられる。

なお、現在のところ増打ちした新タイプアンカーの損傷は確認されていない。

(3) 累積ハザード法によるワイブル解析

累積ハザード法によるワイブル解析の適用にあたって、用いたデータは不完全データ(定時打ち切りデータ)である。ここでは、定時打ち切りデータとして、頭部の外観目視等により明らかにアンカー機能を失っているもの、およびアンカーの変状が著しくアンカー機能を失っている可能性が高いものを損傷と定義し、それ以外を健全データとしてそれぞれワイブル解析に適用した。なお、用いたデータは旧タイプアンカーを対象としたものであり、増打ちした新タイプアンカーはデータに含まれていない。

また、個々の故障(損傷)までに要した真の時間データを明確に定めることは不可能であることから、対象のり面における損傷までの経過年数は、対象のり面を含む高速道路の区間が供用開始された時点から各損傷が明らかとなった時点までとした。

ワイブル解析にあたっては、得られた損傷データのみを損傷までの時間が小さい順に並び替え、ハザードの推定値 $h(t_i)$ を求め、その和から累積ハザード値 $H(t_i)$ を計算し、式(2)および式(3)に示すワイブル分布のパラメータ m および η の推定を行った(表-6 参照)。なお、ハザード推定値の算定にあたっては、経過年数ごとの損傷を 1 個のハザード推定値として取扱った。

(4) 損傷予測の推計

図-11 にワイブル分布による損傷予測の推計を行うに

表-7 頭部の外観目視等による累積ハザード推定値の算出(R=4.5%の場合)

経過年数 (年)	損傷の数 (本)	対象となる未 損傷数(本)	潜在的な損傷 数(本)	補正後の損傷 数(本)	累積ハザード 推定値($H(t_i)$)
11	5	2,097	—	5	0.002
13	3	2,092	—	3	0.004
14	9	2,089	—	9	0.008
15	4	2,080	—	4	0.010
16	4	2,076	—	4	0.012
17	20	2,072	—	20	0.022
18	7	2,052	—	7	0.025
23	72	2,045	92	164	0.105
計	124	—	92	216	—

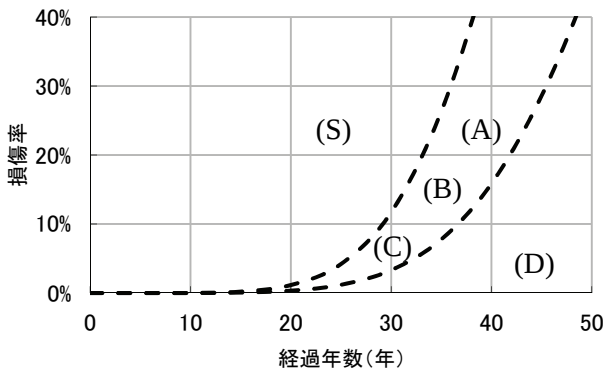


図-12 アンカー損傷率からみたのり面の健全性評価区分

あたり、頭部の外観目視等による潜在的な損傷率を $R=4.5\%$ と仮定して補正した場合と、補正しない場合の結果を示した。また、図-6 で示した他の全 32 箇所ののり面におけるリフトオフによる損傷予測の推計もあわせて対比した。潜在的な損傷率による補正にあたっては、経過年数が 20 年を超過した時点の対象となる調査数に、所定の潜在的な損傷率を乗じて累積ハザード推定値を算出した(表-7 参照)。

その結果、補正した場合に ($m=5.24$, $\eta=36.0$, $MTTF=33.1$), 補正しない場合に ($m=4.61$, $\eta=41.0$, $MTTF=37.4$) が、それぞれ得られた。また、補正しない場合においても他の全 32 箇所ののり面に比べ損傷の進行がかなり速いことが示された。

(5) 更新対策との関連性

対象のり面は、供用開始後概ね 21~26 年が経過した頃にアンカーの増打ちによる更新対策工事を実施してきた。その間、対象のり面のアンカーの不信頼度は、 $F(t)=0.06\sim 0.17$ ($R=4.5\%$ で補正した場合) と $F(t)=0.05\sim 0.12$ (補正しない場合) であった。

対象のり面の当初設計は、対策前の現況安全率 ($F_s=0.95$) に対し、対策後の計画安全率 ($F_{sp}=1.20$) を目標としている。よって、許容できるアンカーの損傷率の目安は 25% と想定できる。

図-11 に示すように、頭部の外観目視等による潜在的な損傷率 $R=4.5\%$ で補正した場合、供用開始後概ね 28 年で不信頼度が $F(t)=0.25$ を超過する予測となった。また、潜在的な損傷率で補正しない場合においても、このままのペースで損傷が進めば、供用開始後概ね 31 年経過する頃には不信頼度が $F(t)=0.25$ を超過する予測となり、近年の更新対策工事の実施時期は適当であったことが裏付けられた。

このように、不信頼度の閾値を設定することでワイブル解析による経年的な損傷状況の把握が可能となる。

7. 健全性評価モデルの提案

旧タイプアンカーを対象としたあらたな損傷判定ランクの提案、健全度調査の信頼性推定、およびそれらを用いたワイブル解析による劣化度モデルの検討や検証結果を踏まえ、図-12 に示すアンカーを有するのり面の健全性評価区分モデルの作成を行った。図中の破線は、図-6 に示した潜在的な損傷率の上限値と下限値を考慮したものである。また、図中の(A), (B), (C), (D)および(S)はそれぞれ以下のように区分した。

- (A) ; アンカー損傷率が著しく大きい、または損傷の進行が著しく速いため、更新(補強)対策を講じる必要性がかなり高いと思われるもの(損傷率が 20% 以上のもの)。
- (B) ; アンカーの損傷率が大きい、または損傷の進行が速いため、場合によっては更新(補強)対策の必要性があると思われるもの(損傷率が 10% 以上 20% 未満のもの)。
- (C) ; アンカーの経年変化に伴う損傷の進行や顕在化に注視する必要があると思われるもの(損傷率が 10% 未満で破線で囲まれたところに位置するもの)。
- (D) ; 引き続き定期的な点検・調査を行う必要があるもの(損傷率は 10% 未満で破線よりも経過年数が大きい区域に位置するもの)。
- (S) ; 一般的なアンカーと比べ損傷の進行が著しく速い場合があるため、更新(補強)対策の可否を視野に追加調査を講じる必要があると思われるもの(破線の左側に位置するもの)。

これにより、(A), (B), (C), (D)および(S)の評価区分やその経年変化に着目することで、更新対策や追加調査の実施の要否が提案できる。

8. まとめ

高速道路ののり面に施工された旧タイプアンカーを対象として、あらたな損傷判定ランクの提案、信頼性の推定、およびそれらを用いたワイブル分布を活用したアンカーの損傷予測の推計を試みた。その結果、下記の事項が明らかとなった。

- (1) 外観調査は、頭部調査やリフトオフと比較して損傷の発現が認識し難く、地中部の潜在的な損傷や劣化を精度よく把握するには、複数の調査をあわせて実施する必要があること。
- (2) 外観調査の信頼性推定を行うことで、リフトオフとの精度の差異を補完できる可能性があり、20 年以上が経過した旧タイプアンカーでは、信頼度 95% で潜在的な損傷率を 1.9%~7.1% 有していること。

- (3)アンカーの健全度評価判定例やリフトオフの判定フローの設定により、経年的な旧タイプアンカーの損傷や劣化過程段階の把握が可能であること。
- (4)リフトオフによるランダム打切りデータや定時打切りデータである不完全データを用いて、累積ハザード法によるワイブル解析により、旧タイプアンカーの損傷予測の推計が可能であること。
- (5)リフトオフや外観調査をもとにした全体的な損傷予測による不信度と調査等で得られるのり面毎の実際の損傷率を対比することにより、のり面毎の相対的な健全性(安定性)の把握が可能であること。
- (6)あわせて、損傷と定義するランクや、その比率の閾値を適切に設定することにより、経年的な健全性(安定性)や更新対策の実施の要否を評価できること。
- (7)のり面毎の損傷率を精度よく算定するためには、100本程度のアンカーを有するのり面では、25%程度を抽出してリフトオフを実施することで、精度向上が図られること。

9. おわりに

本稿では、旧タイプアンカーの損傷データに対してワイブル解析を適用し、その有用性が確認でき、ワイブル分布を活用することでアンカーの損傷予測の推計が可能となった。しかしながら、今回の検討に用いたデータは、それぞれのランクに達したと考えられる真の経過年数が不明確であるとともに、ランダム打切りデータのサンプリング期間が約 10 年と乏しいなどの幾つかの課題がある。

したがって、経年的なデータの収集をさらに進めることで、アンカーのより精度が高い劣化度モデルの構築が可能となると考えている。あわせて、アンカー増打ちなどの更新対策のサンプルモデルを蓄積していくことで、アンカーの損傷とのり面安定性の関係を精度よく評価できるものとする。

今後もアンカーの維持管理と劣化度モデルに関する検討を深度化し、アンカーを有するのり面のアセットマネジメントの構築に向けた一助としたいと考える。

参考文献

- 1) 地盤工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説(JGS4101-2000)，2000.
- 2) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会：報告書，pp.52-53，p.66，2014.
- 3) 山田浩：グラウンドアンカー工法技術の進歩とその歴史(その 2)ー耐久性と維持管理ー，斜面防災技術，Vol.35, No.3, pp.13-20，斜面防災対策技術協会，2009.
- 4) Fédération Internationale de la Précontrainte: Recommendations, The Design and Construction of Prestressed Concrete Ground Anchorages, 1996.
- 5) 佐藤亜樹男，松山裕幸，緒方健治：グラウンドアンカーの腐食による機能低下の実態，第 25 回日本道路会議，2003.
- 6) 西日本高速道路(株)：設計要領第 1 集土工編，pp.3-28，2013.
- 7) 羽根田汎美，緒方晴樹：地すべり対策の実態と復旧安全率について，日本道路道路公団試験所報告(昭和 55 年度)，pp.34-40，1981.
- 8) 田久勉，田山聡，樫山哲二，藤巴太郎，小山純二：グラウンドアンカー健全度を考慮したのり面安定性の検討，土木学会第 66 回年次学術講演会概要集，2011.
- 9) 日本アンカー協会：グラウンドアンカー維持管理マニュアル，pp.74-75，鹿島出版会，2008.
- 10) 藤原優，横田聖哉，竹本将：高速道路におけるグラウンドアンカーの健全度評価，地盤工学会誌，Vol.57, No.6, pp.42-43，2009.
- 11) 大津宏康，Suksawat TAWEEPHONG，木許翔，上出定幸：目視点検結果およびリフトオフ試験結果に基づくグラウンドアンカー工の劣化予測，土木学会論文集 F4(建設マネジメント)，Vol.68, No.4, pp.79-88，2012.
- 12) 村上雅人：なるほど統計学，海鳴社，2002.
- 13) 鈴木和幸，益田昭彦，右田勉，横山慎二：信頼性データ解析，日科技連，2009.
- 14) 村上雅人：なるほど確率論，海鳴社，2003.
- 15) 藤原優，酒井俊典：グラウンドアンカーの残存引張り力分布特性に着目したアンカー法面の維持管理，土木学会論文集 C(地盤工学)，Vol.68, No.2, pp.260-273，2012.
- 16) 中村大樹，浜崎智洋，笠間清伸，田口浩史：グラウンドアンカーを有する切土のり面の劣化度モデルに関する検討(その 2)，地盤工学会第 49 回地盤工学研究発表会講演集，2014.

(2014. 9. 25 受付)

STUDY FOR THE MAINTENANCE AND REPLACEMENT OF GROUND ANCHORS USING DETERIORATION MODEL

Tomohiro HAMASAKI, Kiyonobu KASAMA, Yoshito MAEDA and Kouji TAGUCHI

Ground anchor technique has been widely used for stabilizing cut slopes and embankments in Japan for the last thirty years. As ground anchors are anticipated to be deteriorated by geological environments such as ground water and natural disasters such as earthquake and typhoon, it is necessary to evaluate appropriately the damage of anchors as well as the stability of slope reinforced by deteriorated ground anchors. This paper analyzed the reliability of soundness diagnosis based on the past regular surveys and lift-off tests statistically, proposed a deterioration model for a single ground anchor using the Weibull distribution and finally assessed the stability of reinforced slope with the proposed model.