

チェーンを補強材に用いた補強土壁の 原位置試験による安全性の確認について

北村 明洋¹・木村 亮²

¹昭和機械商事 株式会社 補強土グループ (〒559-0011大阪市住之江区北加賀屋1-3-23)

²京都大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

チェーンを補強材に用いた補強土壁工法は、チェーンの大きな引抜き抵抗力を利用している点や、運搬、施工が容易な点などに特徴があり、現在40例の施工実績がある。補強土壁は構造上ある程度の変形を許容する土構造物であるが、施工に適さない盛土材を使用すると、許容値以上の過大な変形を生じることがある。また、補強材の引抜き抵抗力は、盛土の土質および締固め状態により大きく異なるため、設計時に想定した引抜き抵抗力が確保されているのかが、補強土壁の安定に対して重要なポイントとなる。本報告では、補強土壁における壁面変位を把握するためのデジタル写真測量および、補強材の原位置引抜き試験を行った事例を紹介する。

キーワード 補強土壁, チェーン, デジタル写真測量, 原位置引抜き試験

1. はじめに

近年、我が国では経済的な観点から用地買収が少なく、直壁に近い構造物が積極的に施工されている。その中でも従来型のコンクリート擁壁と比較して力学的に有利であることから補強土壁の開発、施工がなされてきた。補強土壁とは盛土中に土粒子とは異なる物質を補強材として設置することによって、補強材と土粒子との摩擦力や支圧抵抗力によって安定化させた土構造物の一種である。

現在、代表的な補強土壁工法としては補強材として帯鋼を利用したテールアルメ工法、ジオグリッドなどの高分子材料を補強材としたジオテキスタイル工法、アンカーの支圧抵抗力を期待した多数アンカー工法の3つが挙げられるが、これらの工法以外の補強土壁工法の開発も

盛んである。

チェーンを補強材に用いた補強土壁工法（以下チェーンウォール工法：NETS登録番号KK-060029-V）は、チェーンの持つ特性を利用した工法である。図-1に本工法の構造概略図を示した。チェーンは、一つ一つのチェーンリンクが接合部ではヒンジ構造であり、モーメントが作用しない構造となっている。さらには各リンクが各々90度の角度をもって構成されているため、地盤中ではその物理的形状により大きな摩擦力を期待できる構造部材となる。また、チェーンウォール工法ではチェーンの末端に支圧板を取り付け、支圧板のアンカー力による高い引抜き抵抗を期待している。本工法の施工上の特徴としては、部材が軽量であるため人力により運搬、組立できることや、安全性が高いことなどが挙げられる。

写真-1は、NETISの発注者指定型により施工された

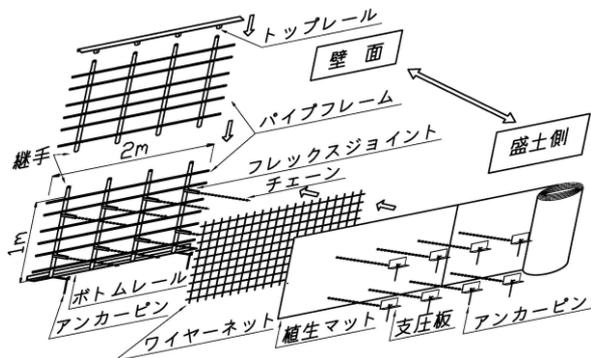


図-1 チェーンウォール工法構造概略図



写真-1 チェーンウォール工法外観

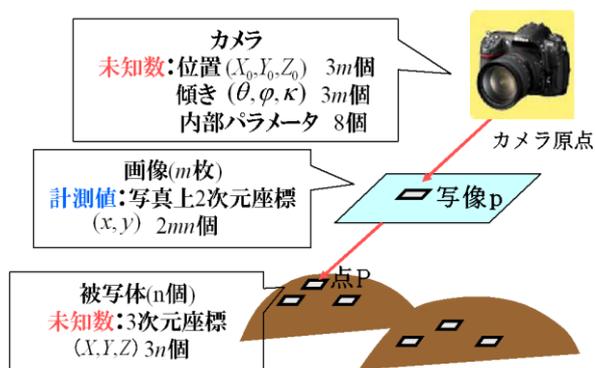


図-2 デジタル写真測量の原理

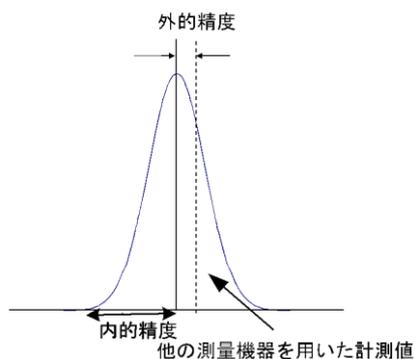


図-3 デジタル写真測量における精度

「東九州道（清武～北郷間）猪八重トンネル北第三工事用道路」の事例である。

2. デジタル写真測量

(1) デジタル写真測量の概要

デジタル写真測量¹⁾²⁾とは、市販のパソコンとデジタルカメラを用いて対象点の3次元座標を求める手法である。対象物の寸法・形状を低コストで簡便に計測できること、特に多数の計測点を同時に迅速に計測できるという点に強みを有している。

デジタル写真測量は写真上の二次元座標 (x, y) から、カメラの撮影位置 (X_0, Y_0, Z_0) と姿勢 (θ, ϕ, κ) および計測点三次元座標 (X, Y, Z) を算出する手法である。デジタル写真測量の基礎理論は、カメラレンズの中央と写真上に写った対象点、そして実際の対象点が一直線上にあるという条件、共線条件式である。複数の写真、全対象点において共線条件式をたてたのち初期値の周りでテーラー展開により線形化し、連立方程式を作ったのち繰り返し最少二乗法を用いて解を算出する。

$$\begin{aligned} x + \Delta x &= -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y + \Delta y &= -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

表-1 18mmレンズ利用時の撮影距離と推定精度の関係

撮影距離	$L \leq 10\text{m}$	$10\text{m} < L \leq 17\text{m}$	$L > 17\text{m}$
推定精度	0.5 mm	1.0 mm	2.0 mm



写真-2 ターゲットと台座

ここで、 c はレンズの焦点距離、 m_{ij} はカメラ回転列、 $\Delta x, \Delta y$ はレンズひずみ補正項である。デジタル写真測量の簡単な原理を図-2に示す。

また、デジタル写真測量における正確さを表す指標として2種類の精度があり、図-3にあるように内的精度と外的精度として定義されている。

ここで、内的精度とは収束計算における標準偏差であり、外的精度とはノギスなどの他の測量機器で検出した変位量とデジタル写真測量で検出した変位量との差である。外的精度はカメラレンズの焦点距離と計測距離との相関関係からある程度の推定が可能となっており、焦点距離が18 mmのレンズに関しては撮影距離との関係が表-1のように表されている。

(2) デジタル写真測量の補強土壁への適用

デジタル写真測量は、過去にトンネルの内空変位³⁾や高速道路の法面⁴⁾、長大斜面⁵⁾などに適用されてきたが、急傾斜斜面である補強土壁の現場に適用された例は少ない。これは補強土壁の現場の多くが急傾斜地であり、計測対象物に対して正面からの撮影が困難なことによる。さらに、本工法は壁面緑化工法であるため壁面に直接ターゲットを取付けることができないので、写真-2に示すターゲット台座を用いた。ターゲット台座は約20 cm前方にターゲットを取付ける構造になっており、側方および直下からの撮影が可能である。

デジタル写真測量をおこなった現場は、元々道路盛土の壁面が重力式コンクリート擁壁であった現場であったが、コンクリートの打ち打ち継ぎ目の上部からはらみだし方向の変位が発生したため、擁壁の上部を取り除き、取り除いた箇所にチェーンウォール工法を採用した。写真-3に施工前の本現場の概要を示した。また、補強土

壁の概略図を図-4に示した。

図-4にあるように補強土前面は約5 mなだらかな斜面が続いた後に、崖となっており正面からの撮影は困難な撮影条件であり、横からの撮影を行った。その際に、図-4においてなだらかな斜面となっている箇所、補強土壁上部の道路上から撮影を行った。また、本補強土壁は、壁高さ3.5 m、壁面勾配が1.5 分となっている。

本現場における変位計測では写真-2に示したターゲット台座を21 個、各計測結果の重ね合わせを行う際に固定されていると仮定する固定点を6 個設置した。図-5に本現場におけるターゲットの配置図を示した。また、写真-4にターゲットの設置状況を示した。

本現場における補強土壁では2010 年5 月にターゲットを設置しており、計測期間を3ヶ月ごとと設定した。本研究では計測回数を2 回とし、それぞれの計測結果から変位を検出した。この計測時期は2010 年5 月、8 月の2回の計測となっている。

(3) 写真測量結果

各計測時における、内的精度を表-2,3に示す。表にあるように内的精度は各計測時共に、はらみだし方向の内的精度が1 mmを下回っており、非常に精度よく計測が行えたと考えられる。また、本計測においては焦点距離18 mmのレンズを使用しており、1, 2回目の計測の際の

撮影距離はそれぞれ17 m, 16 mとなっており表-1から外的精度は1 mmと推定される。重ねあわせを行った際の精度は外的精度と内的精度の和で表すため本計測のはらみだし方向の精度は1.36 mmとなる。

図-6に各計測時の結果から求めたはらみだし方向の変位量を示した。また、図には本計測の精度である±1.36 mmのポイントも載せている。この図で丸で囲んだ箇所からも明らかなように、Line 5, Line 7を除いた各ラインにおいて一番下部、コンクリート擁壁に近い箇所が最も変位しており、本補強土壁のはらみだしの変形モードは壁面下部からのはらみだしであると考えられる。しかしながら、変形の絶対量は最大値で5.1 mmとなっており、補強土壁の許容安全基準である壁高の3%である10 cmと比較するとほとんど変位していないことが分かる。

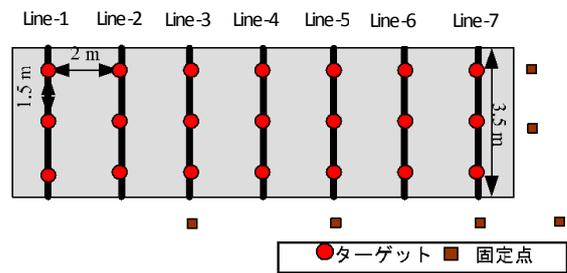


図-5 ターゲット配置図



写真-3 施工前の本現場の外観



写真-4 補強土壁のターゲット設置状況

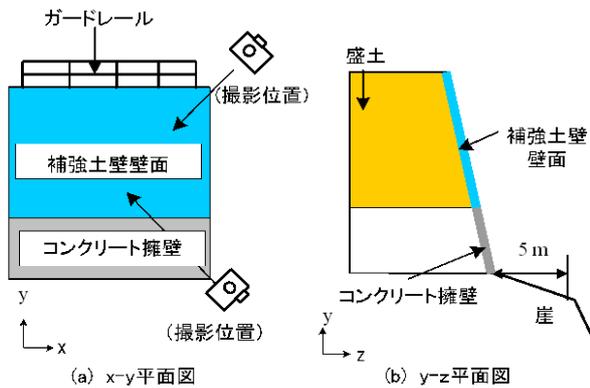


図-4 本現場の概略図と撮影位置

表-2 1回目の計測の内的精度 (mm)

x方向 (補強土壁面方向)	±3.14
y方向 (上下方向)	±0.54
z方向 (はらみだし方向)	±0.26

表-3 2回目の計測の内的精度 (mm)

x方向 (補強土壁面方向)	±2.78
y方向 (上下方向)	±0.54
z方向 (はらみだし方向)	±0.36

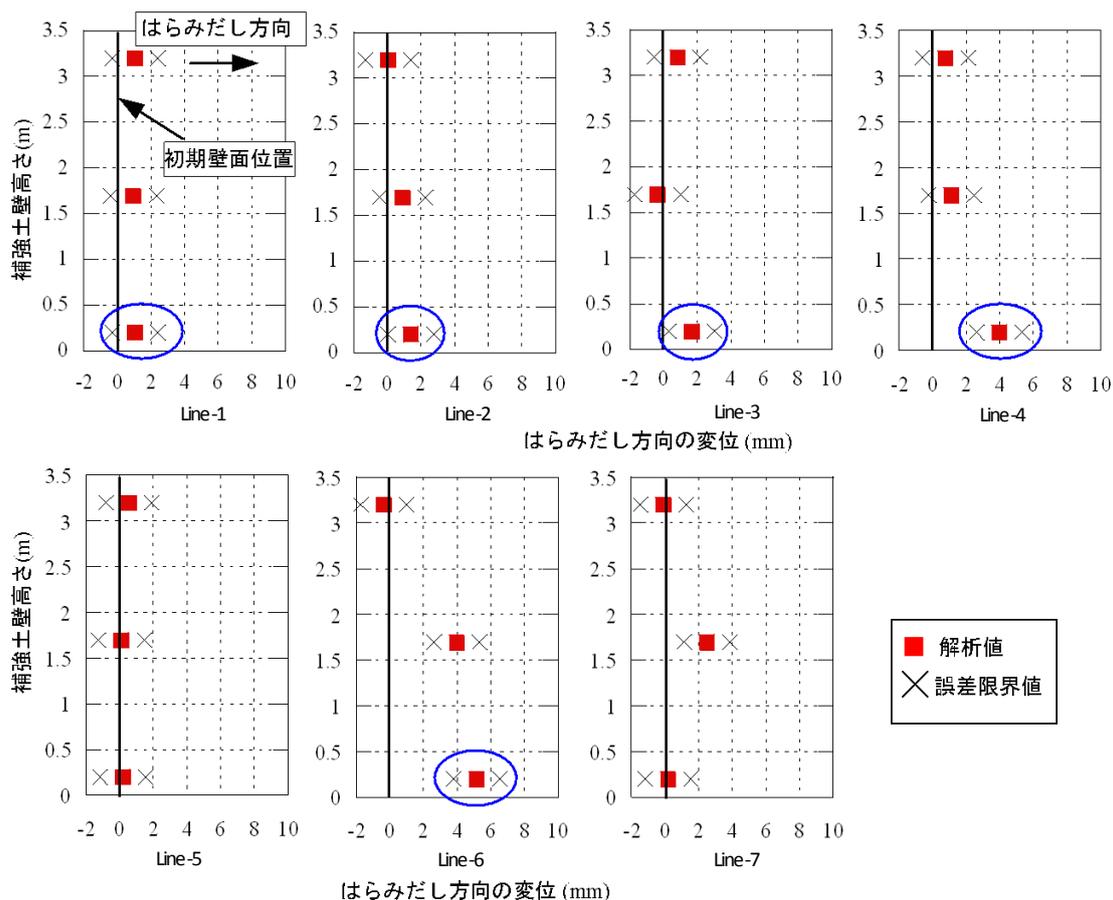


図-6 はらみだし方向の変位

3. 原位置引抜き試験

(1) 原位置引抜き試験の概要

補強材の引抜き抵抗力は、盛土の土質および締固め状態により大きく異なるため、設計時に想定した引抜き抵抗力が確保されているのかが、補強土壁の安定に対して重要なポイントとなる。よって、チェーンウォール工法の安全性確認のため、本設用チェーンと別に引抜き試験用のチェーンおよび支圧板を設置して補強材の引抜き試験を行った。

図-7に試験体の設置位置断面を示す。試験体はチェーン単体およびチェーン + 支圧板を各々3本設置し、深度は路面よりチェーン単体を2.8 mの深さに、チェーン + 支圧板を3.0 mの深さに設置した。試験体には、壁面の影響を考慮して壁面から0.50 m区間の土とチェーンを縁切りするためにシース管を入れている。チェーンの有効長は1.0 mとし、土中にチェーンが直接埋設されている部分の長さを表す。試験体設置の詳細を表-4に、設置時の状況を写真-5に示した。

引抜き試験は、写真-6に示すように反力版を壁面に取付け、油圧ジャッキを用いて変位速度を1 mm/min一定に制御しながら行い、引抜き変位量および引抜き荷重を測定した。

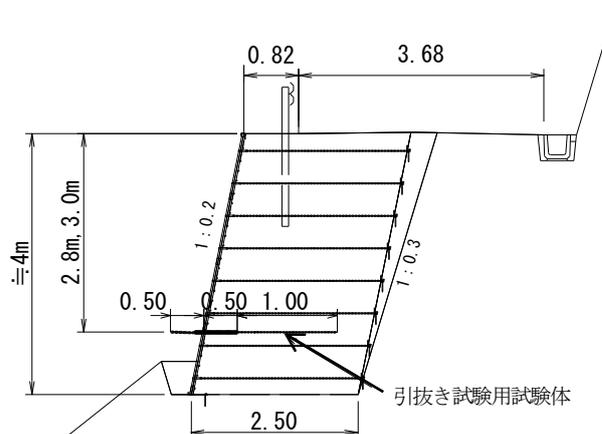


図-7 設置位置断面 (単位 m)

表-4 原位置引抜き試験用試験体の設置詳細

試験体	種別	有効長 (m)	深度 (m)
チェーン	CWC-63*	1.0	2.8
チェーン + 支圧板	CWC-63 幅 200×高 100 mm	1.0	3.0

*CWC-63: 線径 6.3 mm, 外径 23.0 mm, 内ピッチ 37.8 mm



写真-5 試験体設置状況

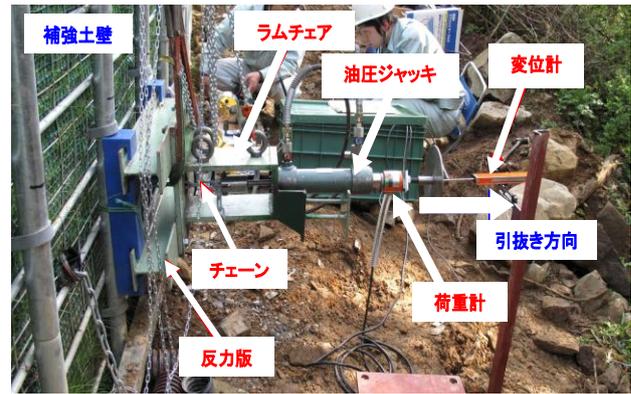


写真-6 引抜き試験状況

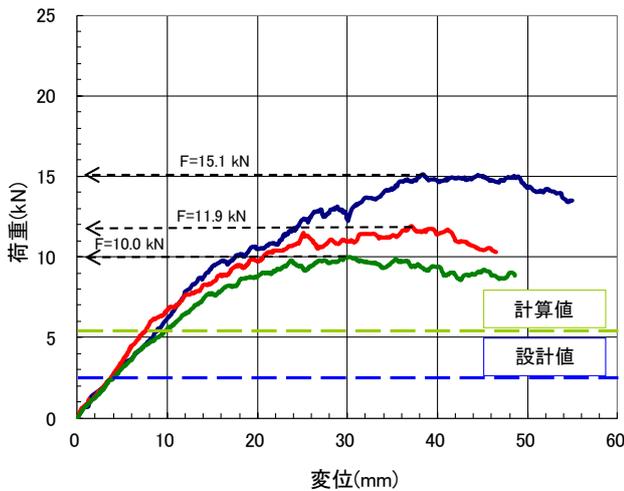


図-8 変位と荷重の関係 (チェーン単体)

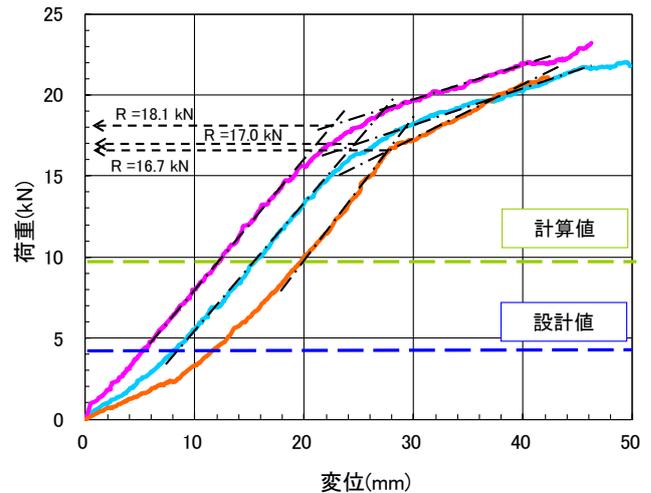


図-9 変位と荷重の関係 (チェーン + 支圧板)

(2) 原位置引抜き試験結果

図-8にチェーン単体の引抜き変位量と引抜き荷重の関係を示す。また、図-9にチェーン + 支圧板の引抜き変位量と引抜き荷重の関係を示す。原位置引抜き試験ではチェーンを長くすると、引抜き抵抗が大きくなってピーク値を計測する以前にチェーンが破断する恐れがあるので有効長を1.0 mと短くした。実際の補強土壁に使用する場合は、2.5 m以上の長さにチェーンを敷設する。

チェーンウォール工法はチェーンの摩擦抵抗力および、チェーンの末端に取付けた支圧板の支圧抵抗力によって引抜き力を得る工法である。設計に際しては、チェーンの引抜き抵抗力を次の(2)、(3)式により求める⁹⁾。

$$F_{fi} = \alpha \pi B L \sigma_{vi} \tan \phi \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha_0 \left(\frac{100}{\sigma_{vi}} \right)^{0.6} \quad (3)$$

ここで、 F_{fi} : i 段目のチェーンの引抜き抵抗力 (kN/本)、 α : 摩擦補正係数、 B : チェーンのリンク幅 (m)、 L : チェーン長 (m)、 σ_{vi} : i 段目のチェーン位置にお

る鉛直応力 (kN/m^2)、 ϕ : 土の内部摩擦角 ($^\circ$)、 α_0 : 正規化摩擦補正係数である。

支圧板の抵抗力はTerzaghiの支持力公式を用いた(4)式より計算する。

$$Q_p = A_p (\beta c N_c + q_p N_q - q_p) \quad (4)$$

ここで、 Q_p : 支圧板の極限引抜き抵抗力 (kN)、 A_p : 支圧板の面積 (m^2)、 β : 基礎底面の形状係数、 c : 盛土材料の粘着力 (kN/m^2)、 q_p : 地盤の拘束圧 (kN/m^2)、 N_c 、 N_q : 支持力係数とする。なお、計算に用いる強度定数 c 、 ϕ は、極限支持力が明瞭でない局所せん断破壊が生じると考えて低減する。設計においてはチェーンの引抜きに対する安全率を2、支圧板の引抜きに対する安全率を3として安定計算を行う。

支圧板の引抜き抵抗力は、多数アンカー工法と同様に、地盤を剛塑性とみなしたすべり線法によって算定する。多数アンカー工法は、タイバーに一辺30 cmの正方形のアンカープレート(本工法の支圧板に比べて受圧面積が4.5倍)を取付け、タイバーの摩擦抵抗力は考慮せずアンカープレートの引抜き抵抗力により盛土の安定を図るものである。

なお、計算により補強材の引抜き抵抗力を求めるときに使用する盛土材の土質定数は、 $\phi=35^\circ$ 、 $c=0\text{ kN/m}^2$ 、 $\gamma_t=18\text{ kN/m}^3$ とした。

原位置引抜き試験より得た引抜き特性は、次のような事項である。

a) チェーン単体の場合

原位置引抜き試験の結果は、図-8に示したように測定値にバラツキがあるものの $F=15.1, 11.9, 10.0\text{ kN}$ であった。図-8に示す計算値は、式(3)の正規化摩擦補正係数を $\alpha_0=1.4$ (密な礫質砂の実験値⁶⁾)として、式(2)により求めたチェーンの引抜き抵抗力 $F=5.4\text{ kN}$ である。また、図中の設計値は実際の安定照査に用いる安全率を2とした値である。補強材としての必要なチェーンの引抜き抵抗力は、十分に満たされているものと考えられる。

b) チェーン + 支圧板の場合

チェーン単体の引抜き試験ではピーク荷重が認められるが、図-9の試験結果から支圧板を取付けた場合にはピークがなく引抜き荷重は漸増することがわかる。よって、引抜き抵抗力を引抜き変位量～引抜き荷重曲線の急変する点と考えると、図-9に示すように弾性的挙動を示す部分と塑性的挙動を示す部分の交点として求めた。試験の結果、引抜き抵抗力は $R=18.1, 17.0, 16.7\text{ kN}$ であった。図中の計算値は、式(2)で求めたチェーン単体の値 ($F=5.54\text{ kN}$)に、式(4)で求めた支圧板の引抜き抵抗力 ($Q_p=4.24\text{ kN}$)を加えた値 ($R=9.78\text{ kN}$)である。設計値はチェーンおよび支圧板の引抜けの安全率を考慮した値である。補強材としての必要な支圧板の引抜き抵抗力は、十分に満たされているものと考えられる。

チェーンウォール工法において、チェーンに加えて支圧板を取付ける目的は、仮に壁面へチェーンの引抜き抵抗力以上の過剰な土圧が作用した場合においても、チェーンが破断しない限り、支圧板によってチェーンの抜け出しを防ぐことができるからである。また、支圧板の受圧面は幅 $200\times$ 高さ 100 mm の小型であるが、壁面積 1 m^2 当り4ヶ所と比較的多く設置するため、補強領域全体の安定性を高めることが期待できる。

4. まとめ

壁面変位のデジタル写真測量および、補強材の原位置引抜き試験を行った結果をまとめると以下の通りである。

- ・重力式コンクリート擁壁の打ち継目上部のはらみだしに対する復旧工事としてチェーンウォール工法が採用され、デジタル写真測量により壁面の変位計測を行うことで安全性が確認できた。

- ・本設用とは別のチェーンおよび支圧板を設置して補強材の原位置引抜き試験を行うことにより、チェーン、支圧板ともに十分な引抜き抵抗力を持つことを実証した。

補強土壁は壁面の剛性よりも盛土中にある補強材と土粒子との摩擦抵抗力や、支圧抵抗力によって安定を保つ工法である。しかし、施工においては掘削土砂などの発生土を使うのが一般的であるため、盛土材の土質や施工の状況によっては過大な変形を生じる場合もある。

補強土壁の壁面変位の管理基準は一般に壁高の $\pm 3\%$ および $\pm 30\text{ cm}$ 以内と規定されているが、例えば壁高 5.0 m に対して前方へ 15 cm 変形した場合には圧迫感があり、景観上も好ましい状況とはいえない。

これらのことから、補強土壁では壁面の変位計測の重要性は高く、簡便に多点を短時間で計測でき、急傾斜地でも測定可能なデジタル写真測量が現場管理用ツールとして有効であると考える。

チェーンを補強材とする補強土壁の実際の設計においては、チェーンの引抜き抵抗力を精度よく推定することが合理的な設計に向けての重要な点である。現場で使用する盛土材は、その地域の土を用いるのが普通であるから、多種の土質に対して引抜き抵抗力を推定しなければならない。このため、引続き多様な現場で原位置引抜き試験を行う予定である。

参考文献

- 1) 秋元圭一, 服部 進, 井本治孝 (2001) : デジタル画像計測法を用いた精密工業計測, 電子情報通信学会誌, D-II, Vol. J84-D-II, No.7, pp.1299-1309.
- 2) 秋本圭一, 服部 進, 大西有三, 三浦 悟 (2001) : 画像計測法のトンネル内空形状計測への応用, 土木学会論文集, No.687, III-56, pp.289-301.
- 3) 大西有三, 中井卓巳, 龍 明治, 西山 哲 (2003) : トンネルの変形計測のためのデジタル写真測量法の研究, 材料, Vol.52, No.8, pp.1006-1011.
- 4) 西山 哲, 大西有三, 大津宏康, 矢野隆夫, 龍 明治, 李 徳河(2004) : デジタル画像計測法の斜面防災モニタリングシステムへの応用に関する研究, 応用地質, Vol.44, No.6, pp.331-340.
- 5) 長野洋平, 大西有三, 西山 哲, 大窪克己, 浜崎智洋 (2006) : 斜面モニタリングへの精密写真測量の適用, 土木学会年次学術講演概要集第3部, Vol.61, pp.431-432.
- 6) 昭和機械商事(株) : チェーンウォール工法 設計マニュアル(2008).