

# 樹木を保全した斜面安定工法に関する頭部載荷試験

東京農工大学農学部 中村浩之  
 (財) 林業土木施設研究所 井上孝人  
 長崎県長崎林業事務所 古藤秀明  
 ○日鐵建材工業(株) 岩佐直人

## 1、はじめに

均一な地盤を対象とした鉄筋挿入補強土工法を、自然斜面のような表層部が軟らかい地盤に適用する場合には、表層土の摩擦抵抗がほとんど期待できないため、比較的大きな支圧板を補強材頭部に付けたり、支圧板と他の方法とを組み合わせることで補強材に発生する軸力をより効果的に発揮させる必要がある。

その一つの方法である補強材頭部を連結して補強効果を高めようとする方法について、模型試験を主体とした研究<sup>(1)</sup>を実施してきており、その結果補強材頭部を連結することで引き留め効果が高まることを確認している。

今回、補強材の頭部をワイヤーロープで連結して斜面を安定化させる工法が自然斜面内に施工された現場において、ワイヤーロープの効果及びその影響範囲等を確認するために、補強材頭部を強制的に変位させる頭部載荷試験を行ったので、その結果について報告する。

## 2、試験概要

長崎県長崎市福田本町の自然斜面に施された鉄筋挿入補強土工法の現場は、勾配が $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ の斜面で、基盤(輝石安山岩)の上に褐色森林土壌及び風化安山岩が層厚約 $1\text{m} \sim 2\text{m}$ に堆積しており、直径 $20\text{cm} \sim 70\text{cm}$ の広葉樹が密生している。頭部載荷試験は、この区域のうち載荷時に樹木根系の影響がほとんどない箇所を選んで実施した。

補強材には、長さ $3\text{m}$ 、外径 $28.5\text{mm}$ の自穿孔式中空棒鋼を使用しており、各補強材は、基盤内の定着長 $1.7\text{m}$ で、1辺 $2\text{m}$ の正三角形をほぼ描くように配置してある。また補強材頭部には支圧面積約 $0.22\text{m}^2$ の三角形形状の支圧板が取り付けられており、3本の補強材を長さ $7\text{m}$ のワイヤーロープ(径 $8\text{mm}$  6×24 G種)1本で連結している。

図2-1に載荷装置を示す。載荷する補強材の頭部に径 $20\text{mm}$ のワイヤーロープを取り付け、初期の弛みをとるためにあらかじめ緊張させた後、油圧ジョッキによって最大 $4.2\text{tf}$ (載荷装置の限界)まで連続して載荷を行ない、載荷荷重及び図2-2に示す補強材の頭部変位量を計測した。なお載荷開始時、荷重 $2.5\text{tf}$ 時及び最大荷重時に、ワイヤーロープの振動数及び弦長を計測して張力を算出した。

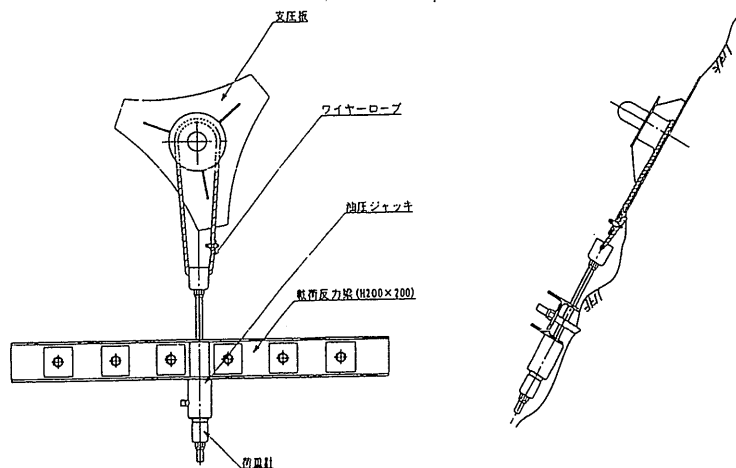


図2-1 載荷装置概要

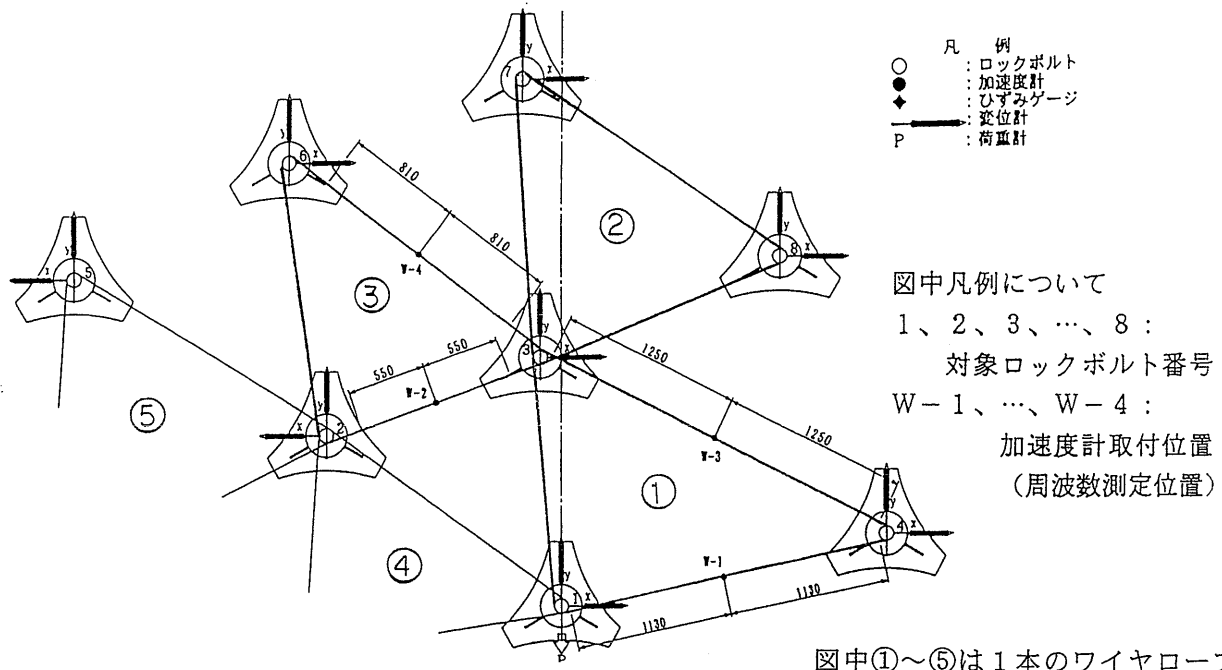


図 2-2 荷重点付近の補強材配置状況

### 3、試験結果

図 3-1 (a)~(d)に荷重と補強材頭部の変位量 (X方向、Y方向)との関係を示す。ここで、X方向は斜面左右方向 (左向きを正)、Y方向は斜面上下方向 (下向きを正)を表している。またNO. 1の補強材のX方向変位が荷重 2 t f 付近で急激に大きくなっているが、これは試験終了後の補強材の状態及び载荷中の他データより考えると、土中の石が移動したために生じた現象であると推定され、図中には、この現象を修正した値を 1 X' と表している。

荷重点であるNO. 1の補強材と直接連結されているNO. 2、NO. 3、NO. 4の補強材の変位量のうち、NO. 3のY方向変位がNO. 2、NO. 4より大きく変位しており、X方向変位を見るとNO. 4の変位が他よりやや大きい。これはNO. 3とNO. 4及びNO. 1が1本のワイヤーロープにより連結され且つ初期緊張度が高いためと考えられる。

一方NO. 1とは間接的に連結されているNO. 5~NO. 8の変位量は、NO. 2~NO. 4の変位量の約1/10の1しか生じていない。しかし、NO. 3の変形による影響を強く受けていると考えられるNO. 6、NO. 7の各方向の変位量及びNO. 8のX方向変位量は大きい。

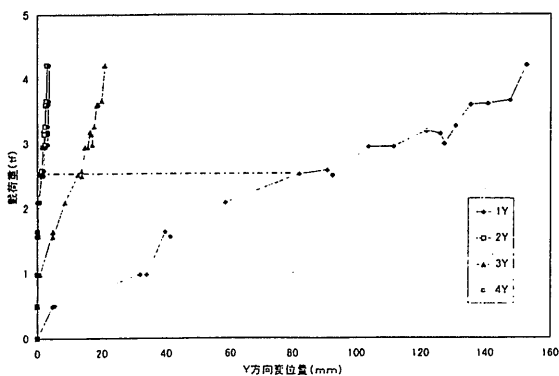


図 3-1 (a) NO. 1~NO. 4 Y方向変位と  
荷重の関係

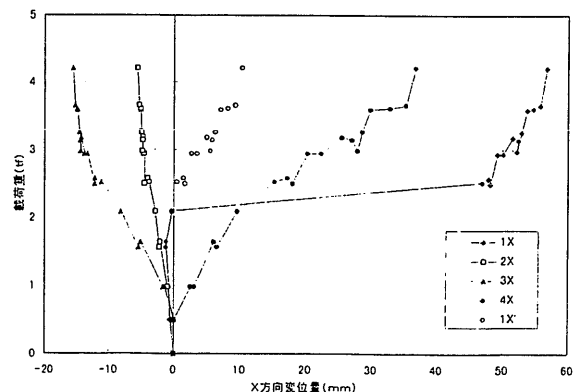


図 3-1 (b) NO. 1~NO. 4 X方向変位と  
荷重の関係

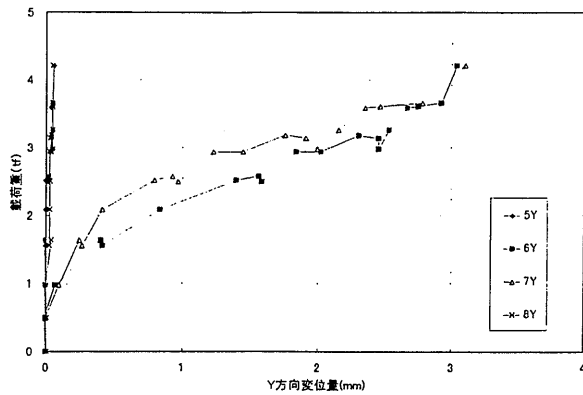


図3-1(c) NO. 5~NO. 8 Y方向変位と  
 載荷重の関係

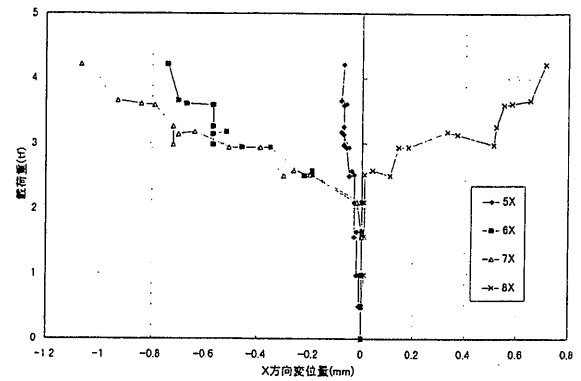


図3-1(d) NO. 5~NO. 8 X方向変位と  
 載荷重の関係

図3-2は、荷重1 tf ごとの補強材の変位ベクトルを表している。図3-1で示したように、載荷点であるNO. 1の変形に伴って、NO. 3とNO. 4がNO. 1の方向へ大きく変形している状況がよくわかる。NO. 2の補強材もNO. 1と直接連結されているが、その変位量が小さいのは、各補強材の位置関係とワイヤーロープの初期緊張度の違いによるものと考えられる。

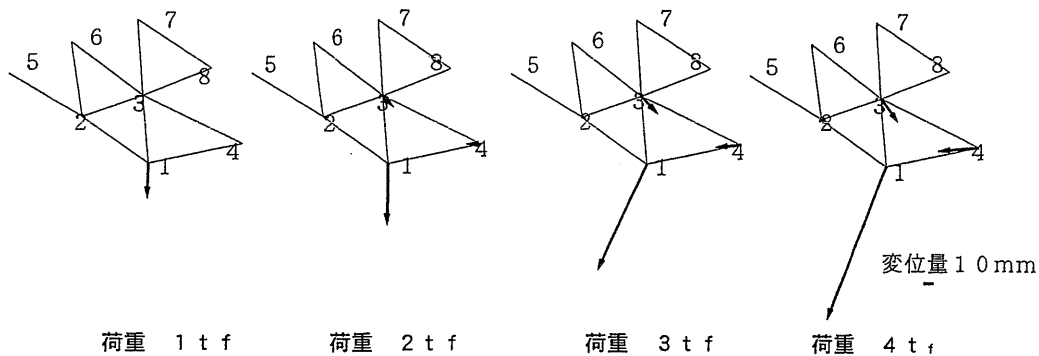


図3-2 荷重1 tf ごとの補強材の変位ベクトル

なお、載荷中に影響範囲を確認できたのはNO. 2~NO. 8の6箇所補強材だけであったが、載荷終了後にワイヤーロープの緊張度を調査したところ、NO. 1の載荷によって影響を受けていたのは、NO. 1より約10 m上の補強材まではワイヤーロープの緊張度が高く、この位置までは確実に影響を受けていたと判断された。したがって、補強材を局部的に変位させた場合、周辺への影響範囲は、荷重が小さい段階では最低2段階目までであるが、荷重が大きくなるにしたがってその影響範囲が拡大することが確認できた。

本工法の場合、計画安全率1.2に対する1本の補強材の標準的な抑止力(補強力)は、2 tf ~ 4 tf であるから、本試験における最大載荷重は、ほぼ補強材1本の最大抑止力に相当する。したがって実際に補強材1本に最大荷重4.2 tf 相当の抑止力が作用した場合には、本試験で確認された最大荷重時の影響範囲までワイヤーロープによって荷重が伝達されると考えられる。

図3-3は、補強材の変位方向変化量と荷重の関係を示している。変位方向変化量とは、各補強材固有の変形方向を0°としたときの各載荷時の変形方向のなす角度の変化量という意味であり、各荷重時の補強材の変形方向のバラ

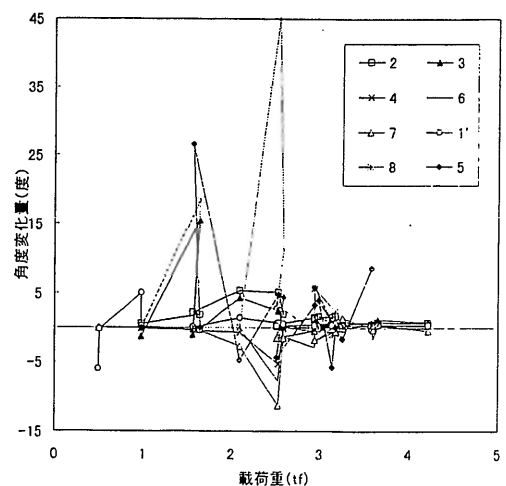


図3-3 補強材の変位方向変化量と  
 載荷重の関係

ツキを表す指標と言える。

同図より、荷重が小さい段階では変位方向にバラツキがあるが、荷重が大きくなるにつれて変位方向のバラツキが小さくなっている。載荷点NO. 1と直接連結されているNO. 2、NO. 3、NO. 4の補強材は荷重2.5 tf以上では、ほとんどゼロとなり各補強材がそれぞれ一定の方向に変位している傾向にある。なおNO. 1と間接的に連結されているNO. 6及びNO. 7は荷重3.5 tf以上で値がほとんどゼロとなっている。

これは、荷重が小さい段階では、ワイヤーロープに生じる張力が小さいため、補強材の動きを十分に拘束していないために生じる現象であると考えられる。

図3-4は、NO. 1とNO. 4、NO. 3とNO. 4、NO. 3とNO. 2及びNO. 3とNO. 6を連結するワイヤーロープの張力と載荷荷重との関係を示している。ここで、張力は計測した振動数と弦長より(1)式より求めた値である。

$$f = \frac{\sqrt{(T \cdot g / m)}}{2 \cdot L} \dots (1) \text{式}$$

ここで、f：振動数 (Hz)、T：張力 (kgf)

g：重力加速度 (980 cm/sec)、m：ワイヤーロープ単位長さ重量  
L：弦長

図よりワイヤーロープの初期緊張力は30~70 kgf程度であり、荷重の増加とともにワイヤーロープに生じる張力がほぼ直線的に大きくなっている。なお同じ荷重で各ワイヤーロープの張力に差が生じるのは、補強材の変位・ワイヤーの初期緊張度の差によるものと考えられ、特にNO. 1とNO. 4のワイヤーロープの張力が他より値が大きいのは、載荷点NO. 1の変位の影響を強く受けているためと考えられる。

さらに、図3-3で示した各補強材の変位方向が一定となる荷重2.5 tfのときの張力を同図より読みとると300 kgf~400 kgfであることがわかる。

図3-5は、頭部連結材に使用しているワイヤーロープの引張り試験結果を表しており、ワイヤーロープの荷重-変位曲線はS字型を示していることがわかる。つまりワイヤーロープが弾性的な挙動を示すのはある程度変形した段階からであり、本工法で使用しているワイヤーロープの場合は伸び量約10 mm、引張り荷重が500 kgf付近からである。この値は図3-4で示した各補強材の変位方向が一定となる荷重2.5 tf時にワイヤーロープに生じる張力300 kgf~400 kgfとほぼ一致していることから、各補強材は、ワイヤーロープが弾性変形状態になる際の荷重段階から拘束されるものと推定できる。

以上より、本工法の頭部連結効果には頭部連結材として使用しているワイヤーロープの力学的特性が強く影響を及ぼしていることがわかった。

次に、頭部連結材に使用する材料物性の差が連結された各補強材の動きにどのような影響を及ぼすのかを把握することを目的にして基礎的な二次元FEM解析を行った。

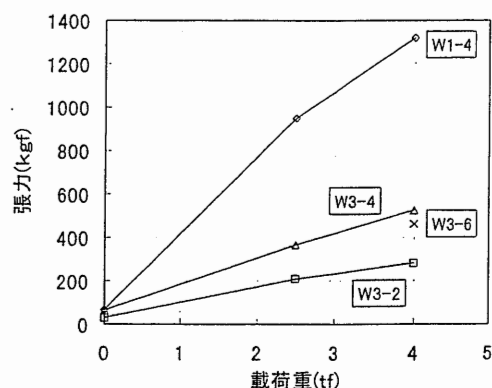


図3-4 ワイヤーロープの張力と載荷荷重の関係

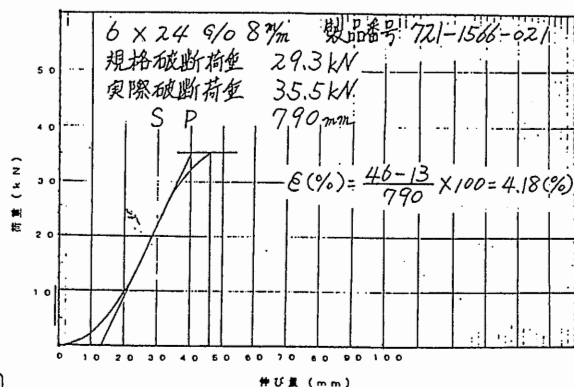


図3-5 ワイヤーロープの引張り試験結果

#### 4、FEM解析

解析モデルを図4-1(a)～(b)に示すが、各部材のモデル化にあたっては、ワイヤーロープをトラス要素、補強材を先端をXY方向に拘束されたバネ要素（バネ係数は本試験で得られたNO.1の荷重-変位曲線より得られた値を採用した）、支圧板を格点として解析を行った。

解析に用いた各部材の物性を表4-1に示す。ワイヤーロープのヤング率は図3-5より求め、また比較のために連結材にコンクリート法枠のような剛性の大きい部材を使用した場合についても表している。

図4-2は、20m×20mの範囲に補強材及び頭部連結材を1辺2mの正三角形形状に配置して、その中央最下部に荷重1tfを載荷した際の、各補強材の変形状態を表している。

連結材がワイヤーロープの場合、載荷点付近の変位は約20mmと大きいものの、載荷による変形は載荷点付近の局部に限定されている。一方、連結材にコンクリート法枠のような剛性の大きい部材を使用した場合には、載荷点付近の変位は小さいものの、その影響範囲は斜面全体に及んでいる。

したがって、ワイヤーロープのような材料を連結材に用いた場合は、局部的に生じた変形はその周辺域のみで生じており、周辺域に広がるにつれて徐々にその変形量は小さくなっており、斜面全体には影響を及ぼさない。一方、コンクリート法枠のような剛性の大きな連結材は変形量は小さく、斜面全体の一体化はなされているものの、局部的に生じた変形が斜面全体に影響し健全な箇所をも不安定化させる可能性があると考えられる。

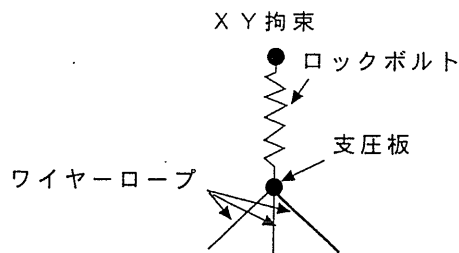


図4-1(a) 解析モデル基本系

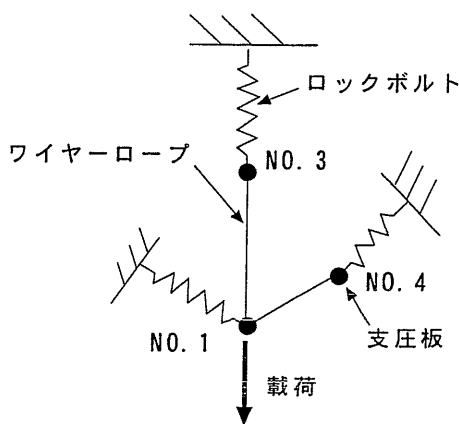
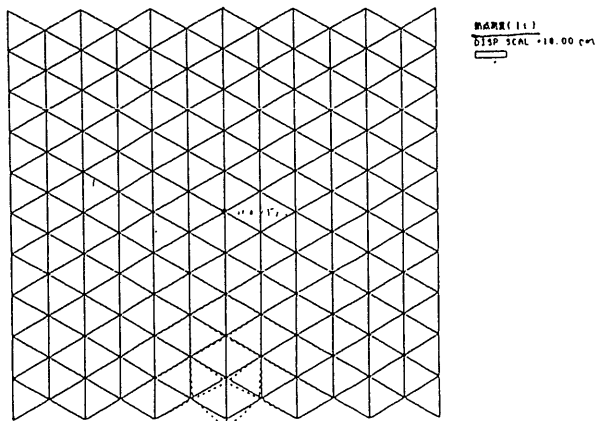


図4-1(b) 解析モデル例 (NO.1周辺)

表4-1 各部材の力学的特性

部材		ワイヤーモデル	剛体モデル
補強材	バネ定数(kgf/cm <sup>2</sup> )	109	109
	ヤング率(kgf/cm <sup>2</sup> )	260,000	—
ワイヤーロープ	断面寸法	φ8-6×24	—
	軸断面積(cm <sup>2</sup> )	0.229	—
	バネ定数(kgf/cm <sup>2</sup> )	300	—
	ヤング率(kgf/cm <sup>2</sup> )	—	無限大

ワイヤーモデル



剛体モデル

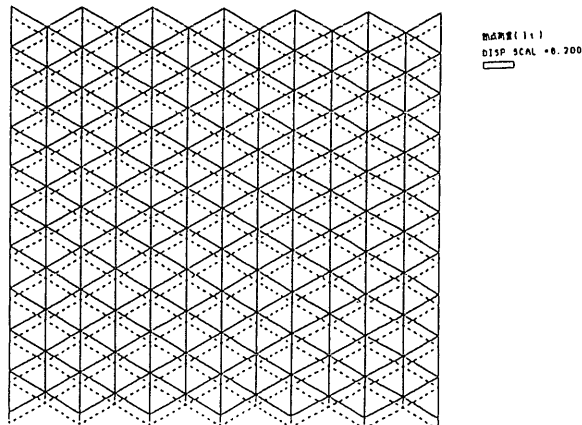


図4-2 解析結果 (各補強材の変形範囲)

本工法の発想は樹木根系の役割を人工的な材料で補完できないかというところから生まれてきた。自然斜面では、樹木が風等で倒れたり、斜面内の一部の崩壊とともに樹木が移動したとしても、その影響が斜面全体に及ぼすことはほとんど見られないことから、本工法における頭部連結材は、この樹木根系と似たような役割をする材料であるとも考えられる。

## 5、まとめ

斜面に打設された補強材の頭部をワイヤーロープで連結して斜面を安定化させる工法のワイヤーロープの効果及びその影響範囲等を確認するために、補強材頭部を強制的に変位させる頭部載荷試験を行なった結果以下のことがわかった。

- (1) ワイヤーロープの初期緊張力は30kgf～70kgfである。
- (2) 補強材を局部的に変形させると、荷重が小さい段階では2段目までが影響範囲であるが、荷重が大きくなるにつれてその影響範囲は徐々に広がる。
- (3) ワイヤーロープによる荷重伝達は、ワイヤーロープの荷重－変位関係に依存している。現在使用しているワイヤーロープの場合は、伸び量10mm程度（伸び率0.5%程度）に達した段階から補強材同志を拘束しはじめる。
- (4) 二次元FEM解析の結果、頭部連結材がワイヤーロープのような材料では、変位が大きいもののその影響範囲は局部的であるのに対し、砕工のような剛性の大きい材料の場合は、変位は小さいものの局所的に生じた変形は斜面全体に及ぼす。

なお本試験は、輝石安山岩を基盤とする自然斜面において施工中の現場をお借りして実施したもので、載荷に伴って補強材に発生するひずみ、広い範囲でのワイヤーロープの張力変化等のデータを得ることは日数等の点から困難であった。今後は、補強材のひずみ、広い範囲におけるワイヤーロープの張力変化等のデータを収集して、自然斜面において支圧板を有し頭部を連結された鉄筋挿入補強土工法の安定メカニズムを確認していく必要がある。

## <参考文献>

(1) 中村浩之、笹原道之、井上孝人、岩佐直人

鉄筋挿入補強土工法における頭部連結に関する実験的検討 平成10年度砂防学会研究発表会概要集