

鉄筋挿入工法における頭部連結に関する実験的研究

(財)林業土木施設研究所	井上孝人
日鐵建材工業(株)	岩佐直人
同上	加藤貴章
同上	杉村美咲

1、はじめに

国土の約70%が山地であるわが国では、豪雨や地震によって毎年のように斜面が崩壊し、土砂災害を引き起こしている。そのため様々な斜面安定工法が採用され高い効果を発揮している。一方近年の景観・環境に対する意識の高まりとともに、斜面安定工法においても景観・環境への要求が高まり、樹木を可能な限り残すことが求められている。

そこで筆者等は樹木を保全した斜面安定工法として、比較的剛性の大きい補強材と比較的支圧面積の大きな支圧板及びワイヤーロープからなる頭部連結材で構成される工法を提案しており、平成13年3月末までに約10万 m^2 の施工実績がある。しかし、頭部連結材に関する効果に関しては、定量的なデータが少なく、現段階では設計に取り入れるまでには至っていない。

そこで、頭部連結材の効果を定量的に把握することを目的として、本工法が施された自然斜面上において移動層が基盤上を滑落する崩壊形態を想定した斜面模型実験を行ったので、その結果について報告する。

2、提案工法の概要

自然斜面では樹木根系の斜面安定効果によって、図2-1に示すすべり面A～Cを含む比較的浅いすべり層（塗りつぶし部分）が抑制されている。樹木根系は、その形状・強度が不均一であるため、斜面安定効果に寄与する材料としては不安定な材料であると言え、そのため豪雨時・地震時に過大な崩壊力が生じる場合には、すべり面Dのような、根系より深いか遷移層にあるすべり面に対しては、根系の斜面安定効果が低く、斜面崩壊に繋がるものと考えられる。

したがって自然斜面における比較的浅い崩壊を防止するためには、図2-2に示すように形状・強度が均一な材料を、すべり面Dのような樹木根系より深い層または遷移層にあるすべり面を横切るように設置すればよいことが予想できる。

そこでこのような自然斜面における比較的浅い崩壊を防止するために、鉄筋挿入工法を基本とする工法を提案するにいたった。

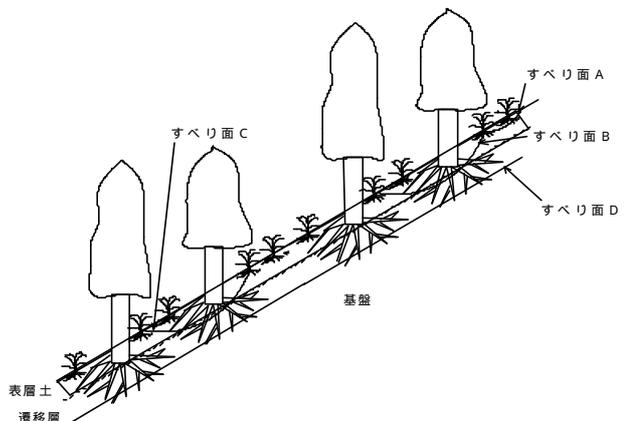


図2-1 樹木根系の斜面安定効果

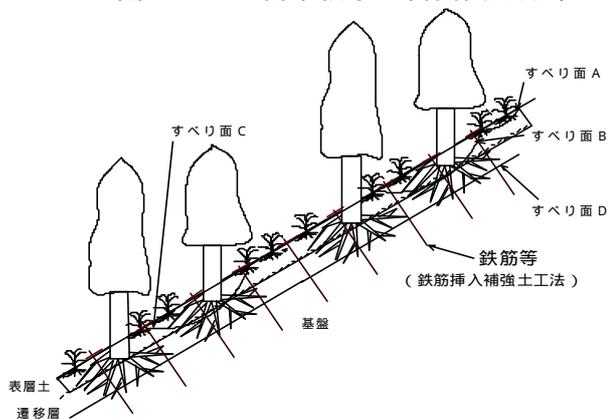


図2-2 自然斜面への鉄筋挿入工法の適用

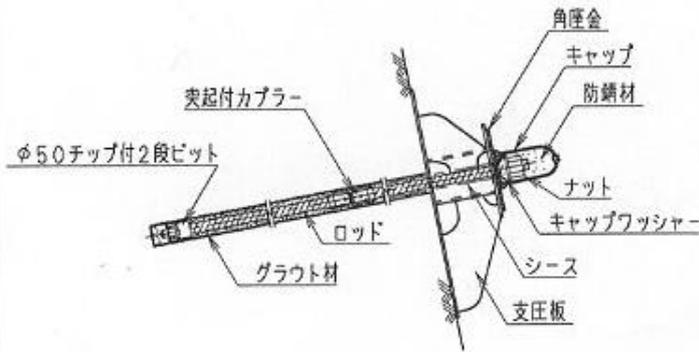


図 2 - 3 提案工法概要図

図 2 - 3 は提案工法の概要図であり、図 2 - 4 は提案工法の配置例を示している。本工法は樹木根系をイメージして開発したもので、中空棒鋼からなる補強材、支圧板、ワイヤーロープからなる頭部連結材から構成されており、ワイヤーロープを三角形に張り巡らすことを特長としている。

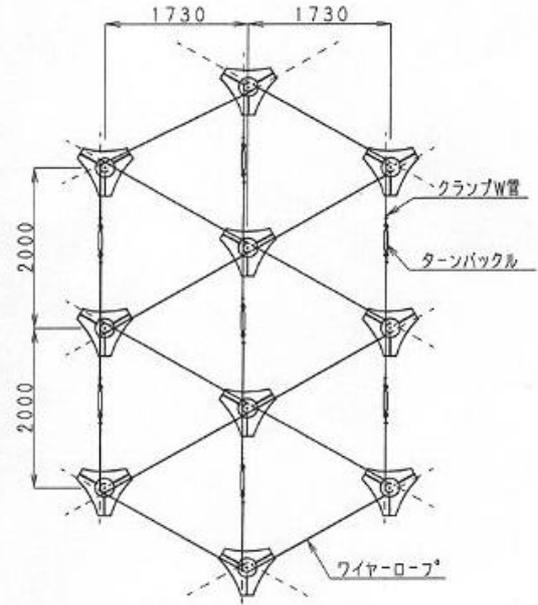


図 2 - 4 提案工法配置例

写真 1 及び写真 2 に、本工法を施工した斜面で同一場所にて撮影した「施工直後」「施工 1 年後」の斜面内の状況を示す。現場は平均勾配約 45° の北向き斜面であり、平均樹間距離 2 m 程度で広葉樹が生育している。樹木が伐採されずにほとんど残った状態で、本工法の構成部材が設置されており、施工後 1 年で下草が徐々に広がっている状況がわかる。



写真 1 施工直後の状況



写真 2 施工 1 年後の状況

3、実験の概要

自然斜面上で基盤上を土砂が滑落する場合の本工法の効果を確認するために、本工法を施工した斜面の一部が崩落する箇所（図 3 - 1 の四角で囲った範囲）を取り上げ、図 3 - 2 に示す実験装置を用いて模型斜面実験を行った。

実験装置は上下 2 段に分かれており下段土槽は 2 m × 0.5 m × 0.5 m でソイルセメントを中詰めした。さらに 0.8 m × 0.5 m × 0.4 m の上部土槽（固定土槽と可動土槽の二つの

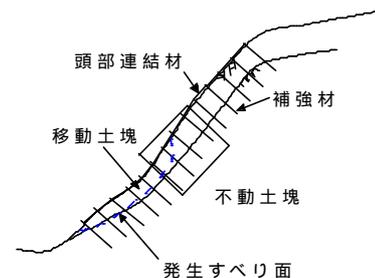


図 3 - 1 想定した斜面崩壊

土槽から構成されている)には、成田砂を厚さ20cmで中詰めした後(目標単位質量 15 kN/m^3)、土槽全体を徐々に吊り上げ、可動土槽の移動に伴う補強材の挙動及び頭部連結材の張力を計測するとともに斜面表面の状況を観察した。

なお可動土槽と固定土槽の境において、固定土槽側には側壁を設けていないが、可動土槽側には高さ20cmの仕切り板を設けてあり、可動土槽内の土砂が土槽と一体となった移動が容易になるようにしてある。

表1に土砂、補強材等の諸元を示すが、実験で使用した補強材及び支圧板は、強度面での相似則は考慮せず実際に使用している材料寸法のみを1/10スケールとしている。

また頭部連結材には、径0.81mmのステンレス製のミニチュアワイヤロープ(SUS304

表1 土砂及び補強材の諸元

上部土槽	成田砂	$\gamma = 1.5\text{ kN/m}^3$
下部土槽	ソイルセメント	配合比 20%
補強材	3mm りん青銅	(周囲に接着剤で砂付着)
支圧板	2mm×5cm×5cm	正方形のアルミ板

表2 実験条件

NO.	条件
case1	無補強
case2	支圧板のみ
case3	三角形連結
case4	直線連結

破断力0.63kN)を使用している。表2に実験条件を、図3-3と図3-4に実験条件のうちcase3とcase4の頭部連結材の配置パターンを示しており、図中の番号は、頭部連結材の張力を計測する張力計の番号を表している。

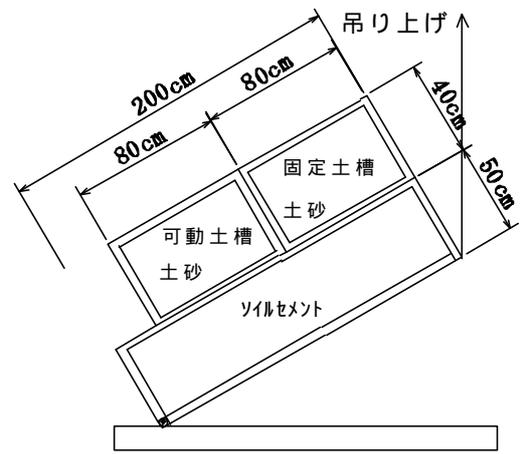


図3-2 実験装置概要

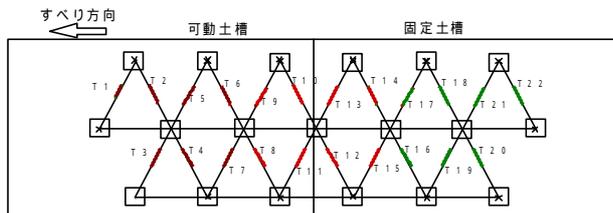


図3-3 三角形連結

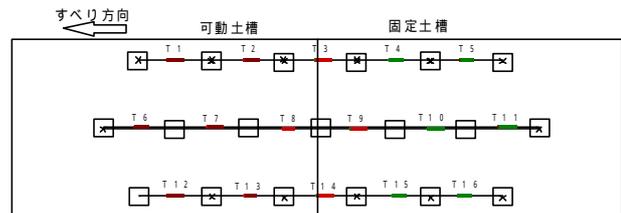


図3-4 直線連結

4、実験結果

(1) 吊り上げ角度と移動量の関係

図4-1は、土槽吊り上げ角度と可動土槽の移動量との関係を表したものである。

斜面に何も設置しない状態(無補強斜面)では、移動量1~2mm程度までは、土塊のせん断抵抗で移動が抑制されているが、その後徐々に移動し始め、移動量が3mm程度に達した段階で一気に滑る。

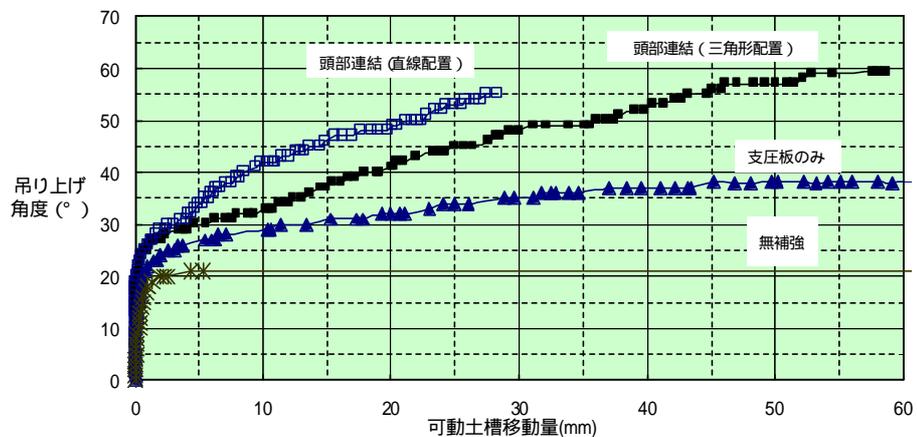


図4-1 吊り上げ角度と移動量の関係

一方、支圧板と補強材を配置した支圧板のみのケースでは、無補強時と比較して土槽の移動が抑制されており、補強材と支圧板の効果によって、一気にすべり出す現象は見られない。しかし移動量が30mm以上では、吊り上げ角度の増加に対する移動量が徐々に大きくなっており、補強材と支圧板の効果が徐々に小さくなっている。特に移動量40mm以上では土槽が一気にすべる現象はないものの土槽の動きを止めることができない状態にある。これは補強材と可動土槽内の土砂との摩擦抵抗が切れ、かつ支圧板下の地盤が降伏し十分な支圧反力が得られなくなったためと考えられる。

補強材頭部を頭部連結材で三角形に連結したケースでは、移動量10mm（斜面ひずみ5%、斜面ひずみ：移動量を移動層厚で除した値）程度までは、支圧板のみのケースと比較して移動量が若干抑制されているが、角度-移動量曲線の勾配がほぼ同じであることから、この段階では頭部連結効果はほとんど発揮していないと考えられる。しかし移動量が10mmより大きくなると、その勾配が支圧板のみのケースと比較して大きくなり、この段階より頭部連結材の効果が発揮されて、移動が抑制されてくると考えられる。

補強材頭部を頭部連結材で直線に連結したケースでは、移動量3mm程度まで角度-移動量曲線の勾配が支圧板のみのケース及び三角形に連結したケースと同様であるが、その後の勾配は他の条件と比較して大きく、頭部連結による移動量抑制効果が最も発揮されていることがわかる。なおこの条件では、移動量35mm付近で計測器にトラブルが生じたため試験を終了した。

(2) 抑止力と土槽移動量との関係

図4-2は各吊り上げ時の土槽勾配における釣り合い状態より求めた抑止力と可動土槽移動量との関係を示している。（なおすべり面における摩擦係数は無補強時の土塊がすべり始めた平均角度 12° より、 $\mu = \tan 12^\circ = 0.213$ とした。）

また図4-3に頭部連結材が負担する抑止力の全抑止力に対する割合（以下、負担率と記す。）と土槽移動量との関係を示した。頭部連結材が負担する抑止力（支圧板のみの値との差）は、三角形連結の場合、移動量5mm

（斜面ひずみ2.5%）程度では約0.07kN程度であり、全抑止力の約17%の負担率である。移動量20mm（斜面ひずみ10%）における値は約0.19kN（負担率30%）である。一方直線連結では移動量5mmの

段階で0.16kN程度（負担率30%）、移動量20mmの段階では0.34kN（負担率44%）

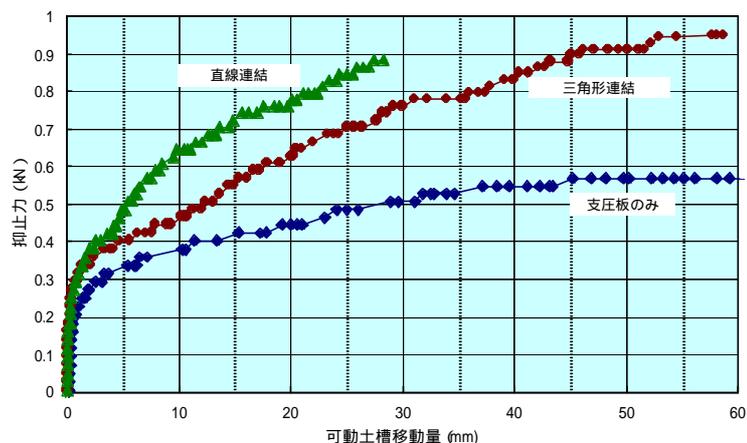


図4-2 抑止力と土槽移動量との関係

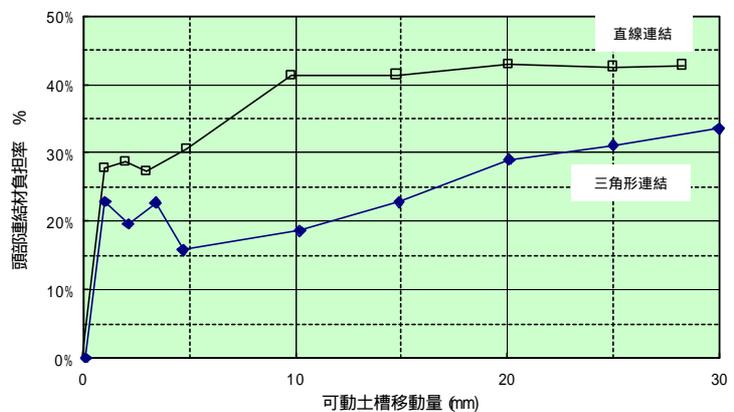


図4-3 連結材負担率と土槽移動量との関係

程度である。このように直線連結の場合、移動量が小さい段階から頭部連結による効果が高く発揮している。

また移動量 10 mm の段階より、三角連結の場合は移動量の増加に対する抑止力の増加量が大きくなるが、直線連結の場合は逆に移動量の増加量が大きくなる傾向が見受けられる。すなわち移動量 10 mm 以上における直線連結時の連結材負担率が一定の値である。これは後述するように、各連結形式の荷重伝達と関係しているものと考えられる。

以下に、頭部連結材の張力に着目して各連結形式における抑止力との関係について考察する。

(3) 張力と土槽移動量との関係

図 4 - 4 は、直線連結の場合で、中央の頭部連結材 T 6 ~ T 11 (図 3 - 4 参照) の張力と可動土槽移動量との関係を示している。

いずれの頭部連結材も移動量 10 mm 付近が最大となる張力が生じており、その後移動量が大きくなるにしたがって低下し、T 8 以外の頭部連結材は、移動量 25 mm 以降は一定の張力 (0.02 kN) に収束する傾向にある。

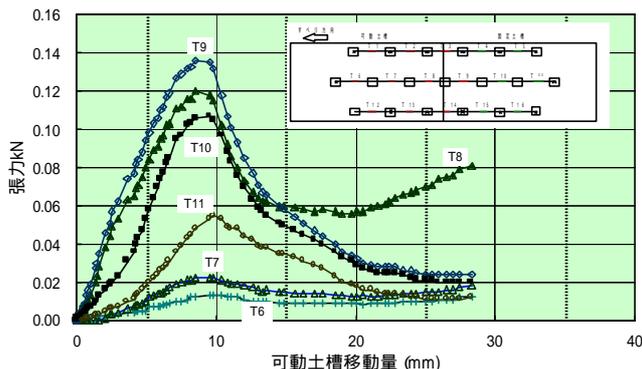


図 4 - 4 張力と土槽移動量の関係 (直線連結)

特に可動土槽と固定土槽の境界付近にある T 8、T 9、T 10 の頭部連結材の張力が最も大きく、逆に斜面下端の頭部連結材 T 6、T 7 については、最大でも 0.02 kN 程度であり、かつ移動量に伴う値の変動幅が小さい。なお土槽側面側の頭部連結材も同様の傾向を示している。

図 4 - 6 ~ 図 4 - 8 は、図 4 - 5 で示す各ブロック毎の、三角形連結時の頭部連結材の張力と可動土槽移動量との関係を表している。

これらの図より、直線連結と比較して三角形連結の場合は、頭部連結材の位置により張力の発生段階が異なり、発生している張力が直線連結の張力よりかなり小さいことがわかる。

B ブロック (可動土槽と固定土槽の境界付近の頭部連結材) では、移動量 2 mm ~ 8 mm 付近において、最大 0.01 kN 程度の張力が発生する。その後張力が低下した後、移動量の増加とともに徐々に大きくなる。その傾向は T 9、T 10、T 11、T 12 において顕著に現れている。T 8 と T 9、T 12 と T 13 は斜面の同一高さにあるが、張力は T 8、

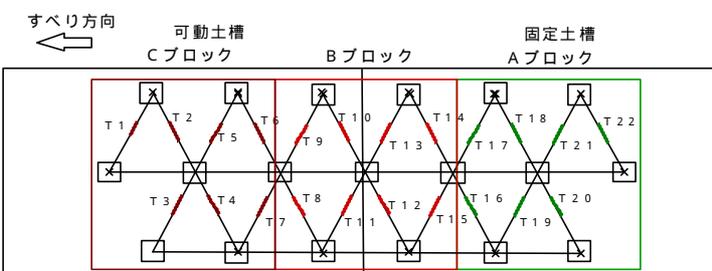


図 4 - 5 連結材配置 (三角形連結)

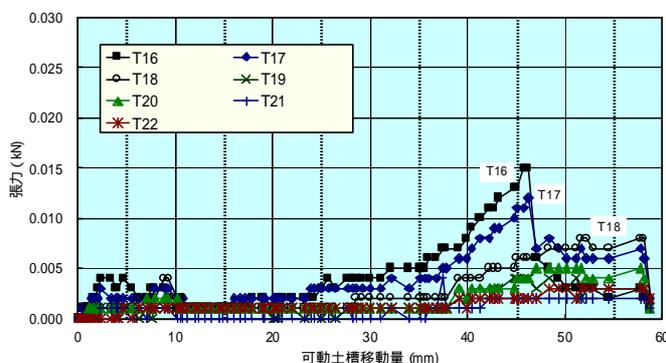


図 4 - 6 張力と土槽移動量の関係 (三角形連結 A ブロック)

T13が小さい値を示し、左右同一ではないことがわかる。これは三角形配置の場合、左右対称に配置されていないためと考えられる。

Aブロック(固定土槽内の頭部連結材)では、T16、T17において移動量2mm~5mm付近で0.04kN程度の張力が生じた後低下し、その後移動量の増加とともに大きくなる。特に、移動量

20mm付近からの張力の増加が顕著である。なお発生している張力はBブロックの約1/2である。このようなAブロックにおける張力の発生・変動傾向はBブロックの頭部連結材の張力の発生変動傾向に関係していると考えられる。

一方Cブロック(斜面下端の頭部連結材)では、移動量25mm付近までは、張力がほとんど生じていないが、その後移動量の増加とともに張力が増加しており、前述のA及びBブロックの頭部連結材の張力の発生傾向が異なる。

しかし移動量25mm付近からの張力の増加傾向は、A及びBブロックと同一の傾向を示している。以上より、直線連結の場合、可動土槽

と固定土槽の境界付近に亀裂が発生した段階で、境界付近の頭部連結材に張力が発生し、土槽の移動とともに増加する。その張力の大きさが、ほぼそのままの大きさに周辺の頭部連結材に伝達される。

しかし三角形連結の場合、境界付近に亀裂が発生した段階で境界付近の頭部連結材に発生した張力は、斜面上部の頭部連結材に分散して伝達される。その後

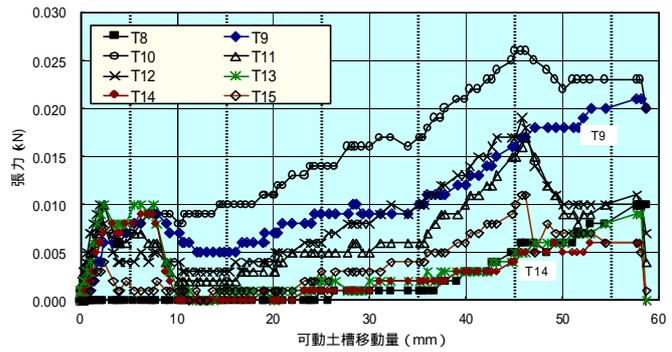


図4-7 張力と土槽移動量の関係 (三角形連結 Bブロック)

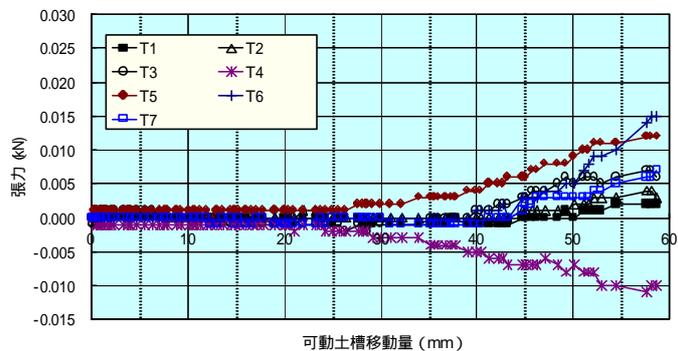


図4-8 張力と土槽移動量の関係 (三角形連結 Cブロック)

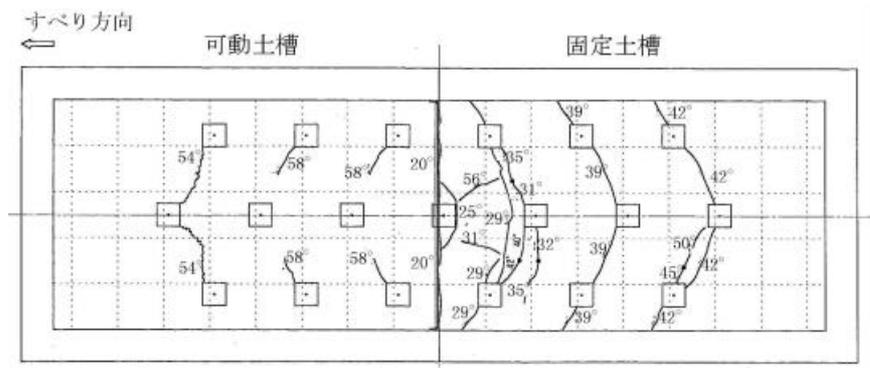


図4-9 斜面表面の亀裂発生状況(直線連結)

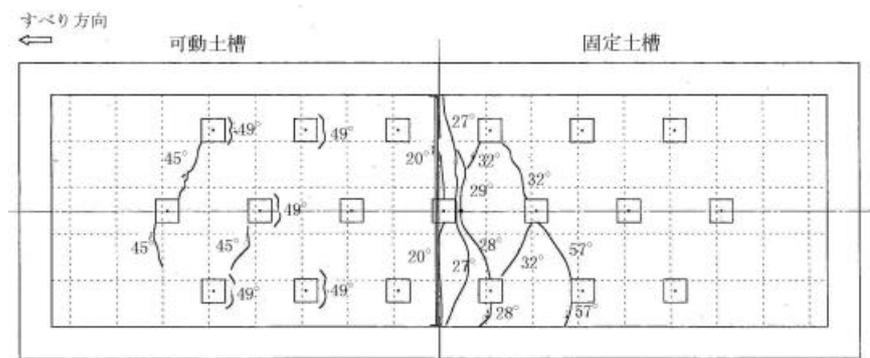


図4-10 斜面表面の亀裂発生状況(三角形連結)

土槽の移動に伴って、斜面下端の頭部連結材にも張力が伝達し、頭部連結材全体として効果が発揮されていくものと考えられる。

(4) 斜面表面の変状

図4-9と図4-10は、直線連結と三角形連結におけるそれぞれの斜面表面に生じた亀裂とその発生時期(吊り上げ角度)について示したものである。

直線連結の場合は、吊り上げ角度 20° で、固定土槽と可動土槽層の境界に亀裂が生じはじめ、角度が大きくなるとともに固定土槽内(斜面上部)に広がり、角度 40° 付近で最上部の補強材付近で亀裂が生じている。

一方三角形連結の場合、境界付近に亀裂が生じる角度は直線連結の場合と同一であるが、その後亀裂の発生は、境界より固定土槽内 20 cm 以内であり、 20 cm 以上の範囲では亀裂は生じていない。このような亀裂の発生の違いについては、前述した頭部連結材の張力の発生時期と密接な関係があると考えられる。

また亀裂が、支圧板の端部隅より生じていること及び亀裂の形態がアーチ状に生じていることは興味深い現象であり、これは支圧板の拘束効果によるものと考えられる。この亀裂の形態は土砂の物性、補強材間隔とも関係していると考えられ、今後、支圧板付き補強材の間隔を整理するうえで参考になると思われる。

(5) 総合評価

図4-1を参考に移動量との関係に着目して、各連結形態の効果を総合的に整理する。

移動量 1 mm 程度(斜面ひずみ 0.5%)

- ・吊り上げ角度がいずれも 20° の段階である。
- ・いずれの場合も可動土槽と固定土槽の境界で亀裂が発生する。
- ・境界付近及び境界付近よりやや上部の頭部連結材に張力が発生しはじめ、三角形連結ではT9～T15で約 0.005 kN の張力が、直線連結ではT8～T10(中央部で表示するが、両側も同一)で約 0.005 kN の張力が発生する。
- ・補強材、支圧板及び頭部連結材による全抑止力はいずれも約 0.3 kN であり、頭部連結材の全抑止力に対する負担率は、三角形連結で 20% 程度、直線連結で 28% 程度である。

移動量 5 mm 程度(斜面ひずみ 2.5% :吊り上げ角度約 30° の段階)

- ・三角形連結の吊り上げ角度が約 30° 、直線連結の角度は約 35° である
- ・三角形連結では境界より固定土槽内 10 cm の範囲で亀裂が発生するが、直線連結では、境界より 20 cm 範囲内で生じており、また亀裂の発生量が三角形連結と比較して多い。
- ・直線連結時の頭部連結材全てで張力が生じており、境界付近の連結材には $0.05\sim 0.1\text{ kN}$ の張力が生じている。一方三角形連結ではT9、T10、T11、T13、T14の連結材において 0.01 kN 程度の張力が生じており、その他の連結材にはほとんど張力が生じていない。
- ・直線連結における全抑止力は 0.5 kN であり、頭部連結材の負担率が 33% 程度に対し、三角形連結での全抑止力は 0.4 kN で、負担率 17% 程度である。

移動量 10 mm 程度(斜面ひずみ 5%)

- ・三角形連結の吊り上げ角度が約 32° 、直線連結の角度は約 42° である。
- ・三角形連結では境界より固定土槽内 20 cm の範囲で亀裂が発生しているが、直線連結時には境

界より60cm範囲内で生じており、また亀裂の発生量も多い。

- ・直線連結時の頭部連結材全てで最大の張力が生じた段階であり、境界付近の連結材には0.1～0.14kNの張力が生じている。一方三角形連結ではT9、T10の連結材において0.08kN程度の張力が生じており、その他の連結材にはほとんど張力が生じていない。
- ・直線連結における全抑止力は0.65kNであり、頭部連結材の負担率が42%程度に対し、三角形連結での全抑止力は0.47kNで、負担率19%程度である。

移動量20mm程度（斜面ひずみ10%）

- ・三角形連結の吊り上げ角度が約40°、直線連結の角度は約50°である。
- ・三角形連結では移動量10mmの段階と同じ亀裂状態であるが、直線連結時には若干の亀裂が発生している。
- ・直線連結時の頭部連結材全てで張力が生じているものの値が小さくなっている段階であり、境界付近の連結材には0.03kNの張力が生じている。一方三角形連結では境界付近のと固定土槽内の連結材において張力が生じ増加しつつある。また可動土槽内の頭部連結材にも張力が生じ始めている。T9、T10の張力が0.08kN～0.1kN程度である。
- ・直線連結における全抑止力は0.78kNであり、頭部連結材の負担率が44%程度に対し、三角形連結での全抑止力は0.63kNで、負担率30%程度である。

以上より各連結形態の連結効果に対する評価は、下記の通りである。

a、直線連結

移動量初期より土塊抑止効果が発揮され、かつその抑止効果が高い。また全抑止力の頭部連結による効果の割合が30%～40%もあり、本連結方式は頭部連結材に依存する構造であると考えられる。

しかし、張力をそのまま上部連結材に伝達する構造であることから、補強材頭部に過大なモーメントが作用するため、補強材の変形を介して地盤の横方向反力では地盤を保持しにくくなりやすく斜面上部に変状が生じやすい。特に自然斜面のような移動層が軟弱な地盤ではその傾向が高いと考えられる。

したがって直線連結は、土塊移動に伴って安定している斜面に影響を及ぼす可能性が高く、補強材と支圧板を主体とした斜面安定効果を阻害する可能性があり、本工法の材料で直線連結にすることは適切でないと考えられる。

b、三角形連結

土塊抑止効果が直線連結と比較して小さいものの、支圧板のみと比較して土塊抑止効果が高い。移動量初期で若干の土塊抑止効果が見られる（負担率20%弱）が、すべり頂部境界付近の頭部連結材による効果によるものであり、この段階では頭部連結材全体には張力が生じていない。また頭部連結材の負担率が低下するなど不安定な状況にある。

頭部連結材の負担率が安定した状態で増加するのは、非崩壊部の頭部連結材に張力が生じ始める段階であり、この段階で斜面全体に設置した頭部連結材によって斜面移動が拘束されると考えられる。本実験結果によれば頭部連結材の効果が安定して現れるのは斜面ひずみ10%の段階であり、その段階での頭部連結による効果は全抑止力の30%程度である。

また荷重分散効果によって、移動量が大きい場合でも、崩壊部より外の安定している斜面内への影響は小さく、補強材の補強効果と支圧板の支圧効果を効率的に発揮させる頭部連結形態は三角形連結であると考えられる。

5、まとめ

頭部連結材の定量的効果を確認することを目的にして、寸法のみを1/10スケールとした模型斜面実験を行った。その結果下記の内容が明確になった。今後は得られた成果を、より詳細に分析し、設計に取り入れるべく、頭部連結材の定量的な効果を明らかにすることにしている。

- (1) 斜面に補強材を挿入することにより斜面の移動が抑止できる。しかし補強材頭部に支圧板を設置しただけでは移動量が大きくなった場合やすべり力が大きい場合には抑止機能が低下する。
- (2) 補強材頭部を連結することで斜面の移動をさらに抑止できる。
- (3) 頭部連結材を直線に連結すると、斜面移動の早い時期より引き留め効果が発揮され、高い抑止効果が得られるが、補強材周囲の地盤が降伏すると急激にその効果が低下するとともに、直接的な荷重伝達機構により周辺地盤へ影響が生じる。
- (4) 頭部連結材を三角形に連結すると、斜面の移動とともに引き留め効果が発揮され、また荷重分散効果により周辺地盤への影響が小さい。したがって補強材の補強効果と支圧板の支圧効果を効率的に発揮させる頭部連結形態は三角形連結である。
- (5) 三角形に連結した時の頭部連結材による効果は、斜面ひずみが10%以上になってから生じ、本工法の設計ひずみ1.5%段階と大きく異なることから、設計に取り入れる場合は、斜面ひずみ10%以上となるような大変位を問題する場合や地震時等の場合と思われる。
- (6) 本実験結果では、三角形連結における頭部連結効果は、全抑止力の約30%である。

<参考文献>

補強土工法 : 地盤工学会発行

中村浩之、笹原道之、市村正彦、岩佐直人

樹木を保全した斜面安定工法に関する実験的検討

1996、第36回治山研究発表会概要集

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

1998、平成10年度砂防学会研究発表会概要集

中村浩之、井上孝人、古藤秀明、岩佐直人

樹木を保全した斜面安定工法に関する頭部載荷試験

1998、第38回治山研究発表会概要集

中村浩之、井上孝人、岩佐直人、山田正雄

樹木を保全した斜面安定工法の設計法に関する検討

1999、第39回治山研究発表会概要集