

樹冠による降雨遮断効果の 斜面崩壊抑制効果に関する一考察

今井 久^{*1}・中島 聡^{*2}・池田 穰^{*3}

樹冠による降雨遮断効果の斜面崩壊抑制効果を把握するために、樹木周辺での降水量を計測した。この結果、樹冠遮断率は15%、70%は樹冠を通過し、15%は樹幹に集中して浸透することがわかった。計測された樹幹遮断効果を仮想盛土斜面に適用し降雨に伴う斜面の安定性を評価し、樹幹遮断が斜面の安定に寄与することを定量的に示した。

キーワード：斜面安定、樹木緑化、降雨、樹冠遮断

1. はじめに

斜面工では、環境的配慮からモルタル吹きつけなど人工材料による斜面工に代わり、樹木による緑化工に移行する傾向にある。樹木による斜面緑化は景観保全など従来からの環境側面のほか、新たな炭素吸収源として地球温暖化対策や生物多様性の維持という観点からも必要とされる。樹木による緑化工の効果を土木構造物の一部として工学的に評価することは樹木による緑化工の普及促進に有効である。上記認識の下、著者らは樹木の降雨遮断効果に着目し、この効果が盛土のり面の安定性に与える影響について現地計測を実施し、得られた結果を用いて盛土斜面の安定性に与える影響を計算しその効果を確認した。

2. 降雨遮断効果の計測

2.1 計測概要

計測はハザマ技術研究所（茨城県つくば市）構内の植樹帯にあるシラカシ（樹高 6m、胸高直径 30cm）を対象に実施した。シラカシは常緑広葉樹で、日本国内に広く分布する樹木で道路斜面などにも多く植えられ、その特性を把握することは適用範囲が広く有意義と考え選定した。樹木は約 4m 間隔に植えられ、樹冠の広がりや樹幹から約 2m で、これは現地で樹冠縁の広がりや観察や、写真-3 に示す降雪時の積雪分布からも確認できる。降水量計測は、既設の自記式転倒ます型雨量計 4 器（R1～R4）に加え、樹幹近傍から樹冠外縁に向けて 3 側縁（A1～A5, B1～B5, C1～C5、図-1 および写真-1 参照）を設定し、それぞれ約 50cm 間隔で小型のプラスチック製バケツ（直径 14cm、容量 1.6ℓ）5 個を設置した。また既設雨量計（R1～R3）に隣接して同様のバケツをそれ

ぞれ設置した。自記式転倒ます型雨量計 R4 はこの計測箇所から約 100m 離れた樹木の影響のない場所で樹木の影響のない降水量を計測するために適用した。また、R4 欠測時は気象庁アメダスデータ（茨城県つくば市館野、北緯：36° 3.4′，東経：140° 7.5′，標高：25 m）を利用し、R4 とアメダスデータとのデータ間補正を実施して補完した。



写真-1 降水量計測現地状況

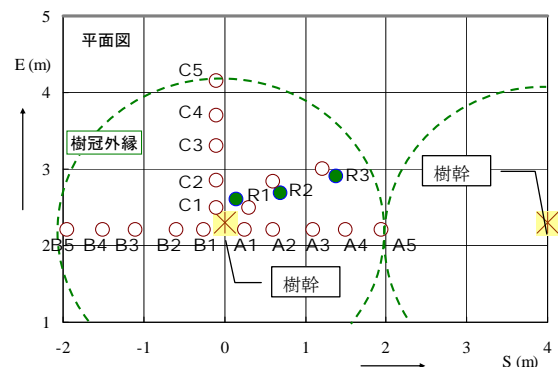


図-1 計測地点位置図（単位：m）

*1 原子力部 *2 技術第二部 *3 環境部

バケツでの降水量計測は降雨イベント終了後にその質量を測定、降雨に伴い溜まった水の質量とバケツの開口面積よりイベント当たりの降水量 (mm) を算定した。樹幹流は樹幹にホースを巻きつけ (写真-2) 水路とし、タンクへ流下させた流量を計測した。

本計測に先立ち、事前調査として2008年12月～2009年3月の約4ヶ月間、前述の自記式転倒ます型雨量計 (R1～R4) にて計測を実施し、樹冠遮断効果を確認した。この結果に関しては別途取りまとめ報告¹⁾²⁾³⁾している。

2.2 計測結果

計測は2009年6月～12月の半年間 (23回の降雨イベント) に対して実施した。計測結果として、図-2に各降雨イベント (月/日) と降水量、図-3に各降雨イベント (月/日) と樹冠通過率を示す。図-2、図-3の凡例において、A1～A5, B1～B5, C1～C5は図-1に示す各計測点に該当し、降水量はR4で計測される樹木の影響のない降水量 (以後、降水量とする) を示す。この図から降雨イベントごとの降水量の違いと場所的な降水



写真-2 樹幹流計測



写真-3 降雪時に確認される樹冠遮断

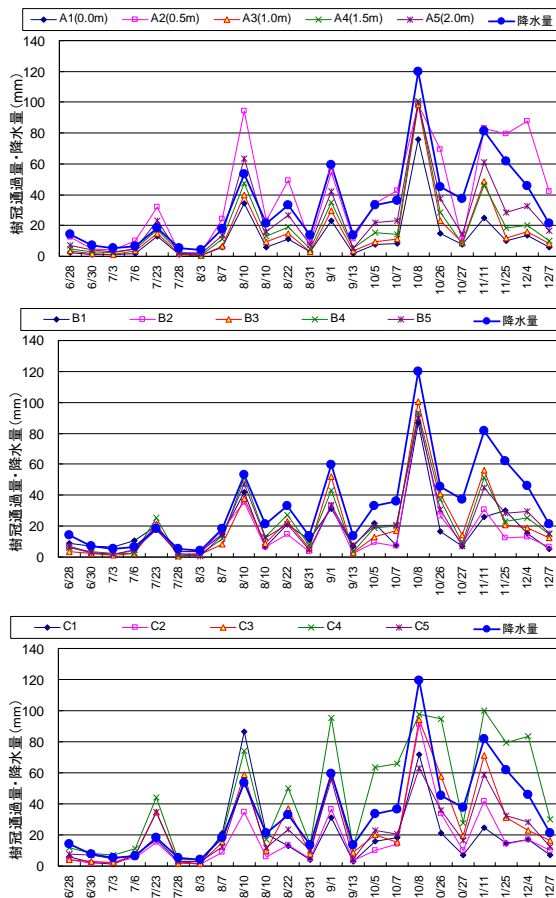


図-2 各降雨イベント (月/日) と降水量

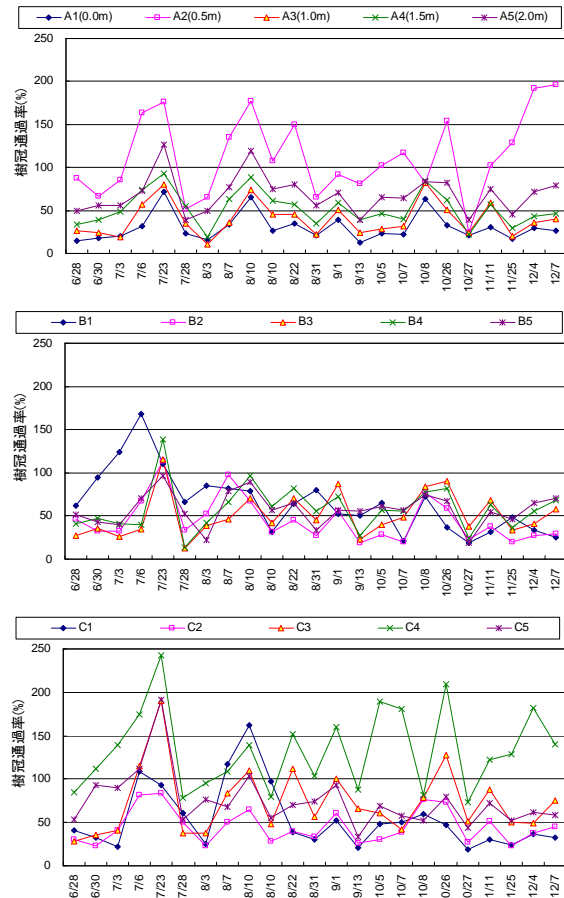


図-3 各降雨イベント (月/日) と樹冠通過率

量（樹冠通過量）がわかる。最大の降水量は10月8日に120mmと記録されている。得られた降水量は、各降水イベントにおいて樹冠通過率（降水量に対する樹冠通過降水量の比率）として整理した。この樹冠通過率の各計測点における平均値を樹幹に対する位置とともに図-4に示す、樹冠通過率100%は樹冠上にもたらされた降水量と樹冠下にて計測された降水量が同じことを意味し、100%以上の数値は枝葉を伝い流下する降水が集まって流下している箇所を示している。降水量と樹冠通過率の相関性は認められず、全計測値の樹冠通過率の平均値は64%であった。図-5には各計測点の樹冠通過率の平均値を樹幹からの距離との関係で整理した。樹幹から離れるほど樹冠通過率がわずかながら大きくなる傾向が伺われる。

2.3 樹冠による降雨遮断効果

樹冠による降雨遮断効果を定量化する目的で各イベントにおける全計測点の平均を算出、この平均樹冠通過降水量と降水量の関係を図-6に整理した。また、樹幹流下量を樹冠面積（半径2mの円）で除して、他の観測点と同様な単位面積当たりの降水量とし、樹木の影響を受けない降水量の関係を図-7に整理した。いずれも降水

量と良好な相関性を示し、図中に示す関係式の係数が示すように、樹冠通過降水量は降水量の0.7倍、樹幹流は降水量の0.15倍となる。

したがって、1本の樹木における樹幹通過降水量と樹幹流は降水量に比例し、降水量に対して、樹冠通過降水量は0.7倍、樹幹流は0.15倍となり、樹冠遮断率としては15%となる。これらの関係を図-8に図示した。得られた樹冠遮断率15%はクヌギ林にて計測された竹之内ら⁴⁾の値と一致し、今回1本の樹木を対象に得られた樹冠遮断率は林内の値と同様に扱えると考えられる。

3. 降雨遮断効果の斜面安定への影響

樹木による降雨遮断効果を仮想盛土斜面（図-9、盛土地盤はローム質土を想定、高さ5m、法面勾配1:1.5、間隙率0.6、土粒子密度2.65、透水係数 1×10^{-4} cm/s、鉛直2次元断面で検討）への影響として浸透流解析と円弧すべり解析により評価した。樹冠による降雨遮断率は事前調査¹⁾²⁾³⁾で得られた降雨遮断率40%を適用した。今回の計測結果からは降雨遮断率15%に対する斜面の安定性評価は、降雨遮断率0%の場合の安全率と40%の場合の安全率から、線形補間により算定した。

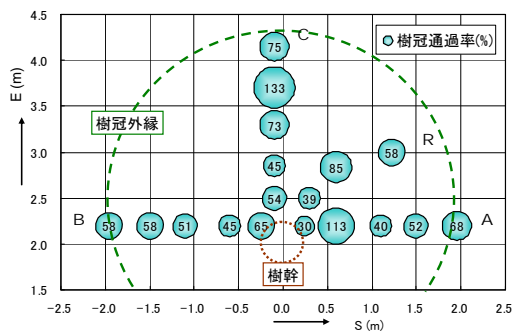


図-4 各計測点での平均樹冠通過率

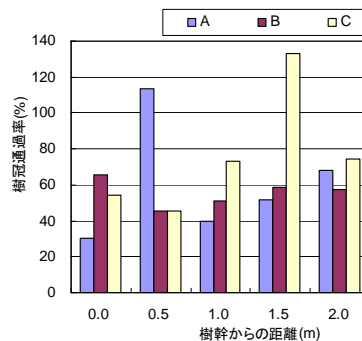


図-5 樹幹からの距離と平均樹冠遮断率

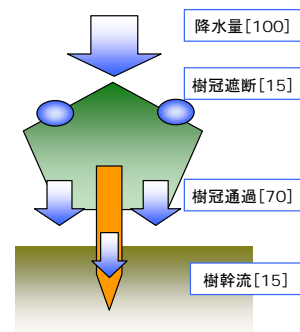


図-8 降水量の内訳

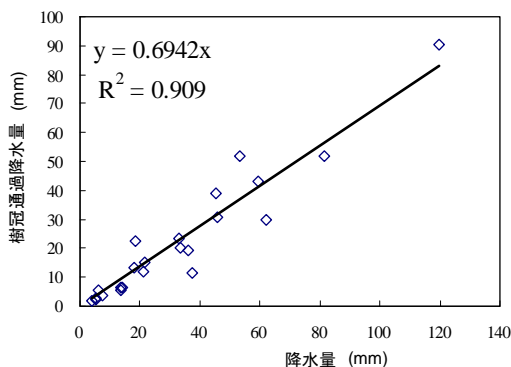


図-6 各計測点での平均樹冠通過率

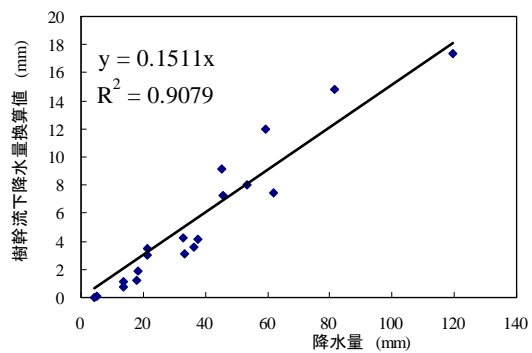


図-7 樹幹からの距離と平均樹冠遮断率

3.1 浸透流解析における地盤内の地下水位や地盤

平均的な状態における樹木の地盤内の水頭分布への影響を定常解析により評価した。また、降雨時の樹木の影響は、定常解析結果を初期値とした非定常解析により100年確率降雨(20mm/hr, 関東での平均的値⁵⁾)が12時間継続する場合の地盤内の地下水、水分分布・密度分布への影響として評価した。

(1) 定常解析

設定した境界条件の概要を図-10に示す。日中の樹液流速が $2.5 \times 10^{-5} \text{m/s}$ で、一日8時間流れるとし、幹の径が30cm, 心材部(この部分は樹液が流れない)15cm, 樹木が約4m間隔で植えられる際の平均蒸散量を根系該当部に設定した。また、樹木がある場合は樹冠通過率を考慮して樹木のない場合よりもかん養量が60%の設定(かん養-1=1.2mm/d)とした¹⁾²⁾³⁾。盛土頂部では降雨遮断はなく、かん養量(かん養-2=2mm/d)をそのまま設定した。透水係数は均一とし、 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ の間で1オーダーずつ異なる条件で計算した。計算結果として盛土下水平部より0.48m下方面上での全水頭分布を図-11に示す。

透水係数が小さいと水頭が大きくなる。 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ の間ではさほど水頭差はないが、 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ で顕著な水頭の上昇が生じる。また、 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ で根系による吸水の影響と見られる水頭の低い部分が認められる。このことは、一般的な樹木では、地盤の透水係数が $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ より小さい場合に、樹木の吸水作用により周辺地盤の間隙水圧を低下させ、斜面の安定性に寄与する可能性があるが、 $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ より大きい場合では吸水の効果は期待できないことを示唆している。

(2) 非定常解析

非定常解析は透水係数 $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ として、樹木の有無による斜面部のかん養量と初期水位分布の違いの影響を比較した。この解析では樹木の効果として初期条件設定時の樹冠遮断, 蒸散効果, 非定常過程では樹冠遮断効果だけを考慮した。降雨継続2時間, 12時間時点の地下水水面を図-12に示す。距離5m付近の盛り上がりは盛土斜面法尻での水位上昇を示している。時間の経過と共に地下水位は上昇している。樹木有無の違いによる水位差は2時間経過時, 12時間経過時ともに同じような差であり, 初期の差が時間経過に伴っても保持されている。図-13には降雨が8時間継続した時点での密度分布(飽和度分布より算定)を示す。樹木有りのほうが樹木無しの場合より盛土底部に飽和度が低く密度が小さい部分が広がっている。したがって, 樹木のあるほうが密度の小さい領域が広くなり, 盛土斜面の安定性が高くなる

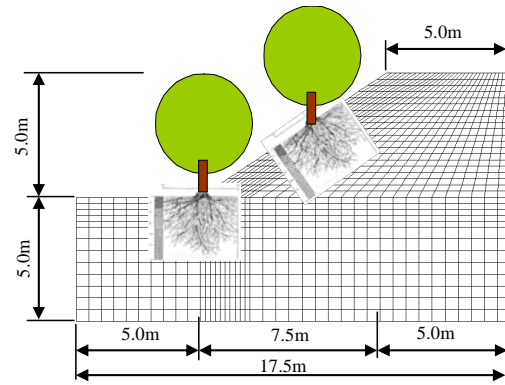


図-9 仮想盛土斜面の形状

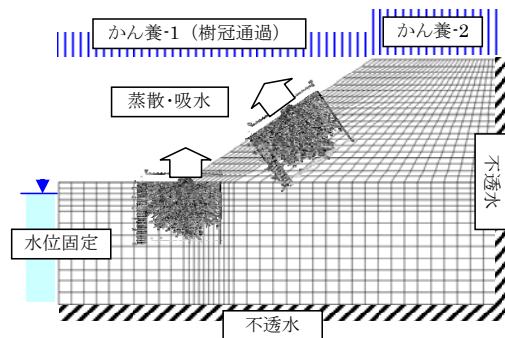


図-10 浸透流解析における境界条件

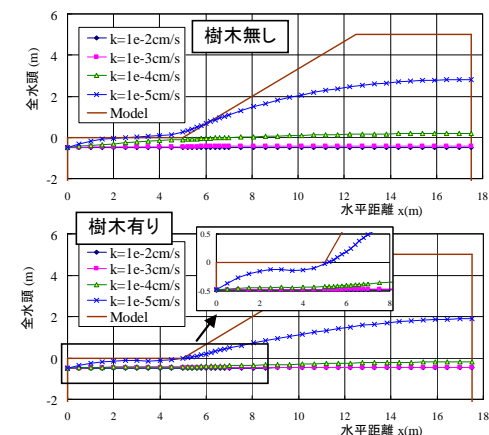


図-11 定常解析における水頭分布

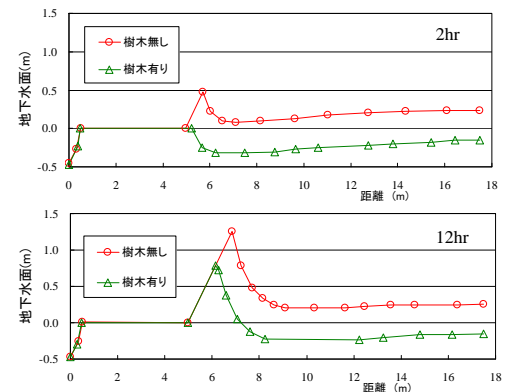


図-12 非定常解析における地下水水面の比較

と考えられる。

3.2 斜面安定解析

先の浸透流解析で得られた密度分布をもとに、盛土斜面の円弧すべりによる最小安全率を算定し、降雨遮断効果の影響を評価した。土の密度は図-13をもとに1.45Mg/m³、1.55Mg/m³、1.65Mg/m³の3段階に区分した。粘着力、内部摩擦角は鉄道構造物等設計標準・同解説

土構造物⁶⁾を参考に設定(表-1)した。解析は常時、地震時(震度0.15)で実施した。

円弧すべりの解析例を図-14に示す。図中の区分は表-1に示すパラメータ区分に該当する。

解析結果として降雨継続時間に対する最小安全率を図-15に示す。安全率は降雨継続に伴い非線形に低下する。常時の降雨継続4-6時間において降雨遮断率15%の場合、樹木の無い降雨遮断率0%に比べ10%安全率が向

表-1 円弧すべり解析のパラメータ

パラメータ	単位	盛土表層			盛土内部			基礎地盤
密度	[Mg/m ³]	1.45	1.55	1.65	1.45	1.55	1.65	1.8
粘着力	[kN/m ²]	10	5	5	20	10	10	40
内部摩擦角	[DEG]	20	20	20	25	25	25	30

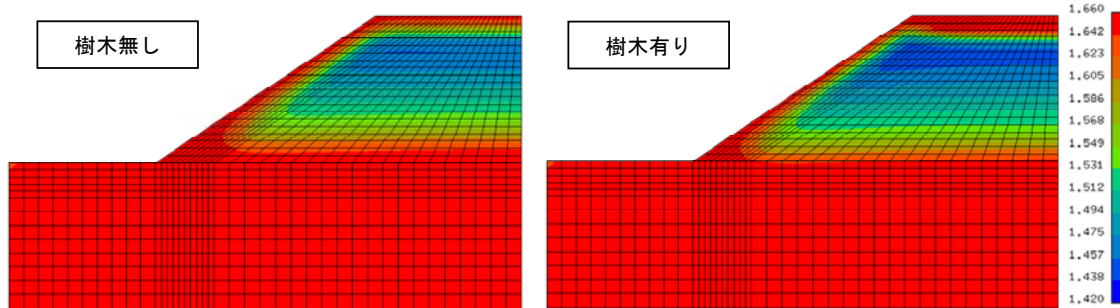


図-13 降雨が8時間継続した時点での密度分布(凡例単位 Mg/m³)

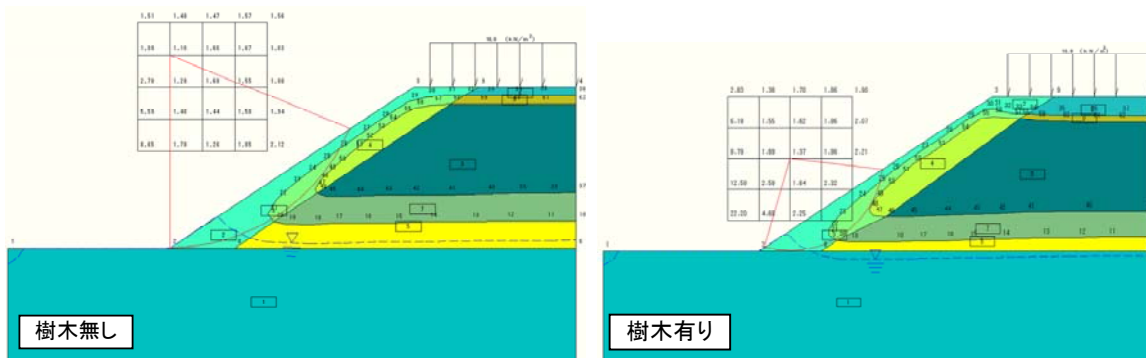


図-14 円弧すべり解析のモデルと結果

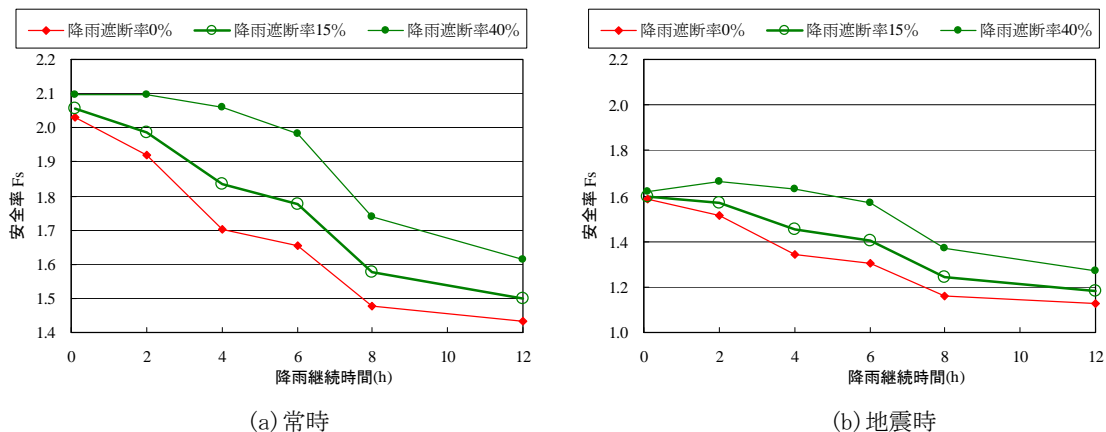


図-15 降雨経過に伴う最小安全率の変化

上する。また、基準の安全率を1.7とすると降雨遮断率15%の場合は樹木の無い場合に比べ約3時間長い降雨に対応する。

4. おわりに

樹木の効果として、防風、遮光、防火（延焼対策）などの効果⁷⁾はすでに認められている。樹木の斜面崩壊抑制効果についても評価が必要と考え、樹冠の降雨遮断と光合成に伴う蒸発散作用がもたらす効果とその盛土斜面安定性への影響について、現地計測と解析により、従来実施されることの少なかった植生工の効果を工学的に評価することを試みた。

樹冠による降雨遮断効果を計測することで、樹冠通過量の場所的なばらつきや樹幹流量を把握することができた。今回の計測から推定された樹冠通過率70%、樹幹流率15%とすると樹木にもたらされた降水の約15%が樹冠により遮断されていると推定された。これらの値から、樹冠による降雨遮断効果が降水に伴う地表侵食、地下水位上昇、地盤重量の増加を抑制し、斜面安定化に寄与していることが理解された。このことは、盛土などの土構造物の道路や鉄道では豪雨に際してある雨量に達した時点で通行止めとしているが、斜面などへの樹木による緑化工により豪雨への許容量（判定基準値）を緩和できることを示し、樹木が防災対策技術として利用できる可能性も示唆された。

今後の課題としては、樹種の違いへの対応、樹幹流の評価、根系の効果に関する検討が挙げられる。ここで実施した降雨遮断効果の斜面安定への影響評価では、樹幹流による樹幹近傍への集中的な降雨浸透や根系の効果は考慮していない。樹幹流の効果は樹木直下での間隙水圧の上昇や根系のせん断抵抗力の低下を引き起こす可能性があり、斜面安定性に不利な方向に作用すると考えられる。一方、根系効果は土粒子間の結合を高めて粘着力増加に寄与し、さらに、せん断力を下方に伝播するなど杭のような効果を発揮し、斜面安定性に有利な方向に作用

すると考えられる。これらの効果の評価には根系形状の把握や、根系によるせん断抵抗力に与える工学的評価が必要となるが、実用的な評価方法の提案⁸⁾も示され、これらを参考にして実施する可能性も見えてきている。

今回の評価は主に樹木の有効な効果を中心に検討した。樹木の種類、性状、状況により、樹木を植えることが斜面を不安定にする可能性に関しても評価しておく必要があることを付け加えておく。

謝辞

降水量の計測ではハザマ技術研究所技術研究第一部・山本和美さん、西田由紀さんにご協力頂いた。また、斜面安定解析ではハザマ関東土木支店・飯田航次氏にご指導頂いた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 今井久, 中島聡, 池田穰: 樹木による緑化が降雨に対する盛土のり面の安定性に与える影響に関する一考察, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, pp.303-304, 2009.
- 2) 今井久, 中島聡, 池田穰: 降雨遮断と蒸散作用に着目した斜面崩壊抑止効果に関する基礎研究, 第8回環境地盤工学シンポジウム発表論文集 地盤工学会, pp.227-230, 2009.
- 3) 今井久, 池田穰: 樹木の降雨遮断・蒸散作用による斜面安定化効果に関する基礎的研究, 砂防学会研究発表会講演要旨集, pp.34-35, 2009.
- 4) 竹之内大樹, 北原曜, 小野裕, 伊豫田倫啓: クヌギ林における樹冠通過雨の空間分布, 中部森林研究, No.58, pp.219-222, 2010.
- 5) (独)土木研究所: 水工研究グループアメダス降雨確率解析プログラム
<http://www.pwri.go.jp/jpn/seika/amedas/top.htm>
- 6) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 土構造物, 丸善, 2007.
- 7) 今井久: 樹木根系の斜面崩壊抑止効果に関する調査研究, ハザマ研究年報, Vol.40, pp.34-52, 2008.
- 8) 北原曜: 森林根系の崩壊防止機能, 水利科学, Vol.53_6, No.311, 2010.

A Study on Tree Plantation Effect on Bank Slope Stability Against Rainfall

Hisashi IMAI, Satoshi NAKAJIMA and Yutaka IKEDA

In order to confirm the canopy effect of planted trees, the amounts of rainfall were measured around a tree. The measured data showed that the 15 percent of the rainfall was trapped by the canopy and the 15 percent of the rainfall was concentrated to the stem of the tree. The 70 percent of the rainfall passed the canopy and reached the ground surface. Based on the measured results, the effectiveness of the canopy on bank slope stability was quantitatively confirmed by stability analyses of a model bank slope.