

RESISTENZA A TRAZIONE DI UN TERRENO CON VEGETAZIONE PARZIALMENTE SATURO

Alessandro Fraccica

Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale, ISPRA, Italia

alessandro.fraccica@isprambiente.it

Enrique Romero

Geomechanics Group, International Centre for Numerical Methods in Engineering, CIMNE, Spagna

Universitat Politècnica de Catalunya, Spagna

enrique.romero-morales@upc.edu

Thierry Fourcaud

CIRAD, UMR AMAP, F-34398 Montpellier, Francia

AMAP, Université de Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD, Montpellier, Francia

thierry.fourcaud@cirad.fr

Sommario

Il rinforzo delle radici nel terreno è stato valutato in letteratura, a livello di sperimentazione di laboratorio, principalmente tramite percorsi di sollecitazione di compressione per carico o tramite prove di taglio diretto. Il loro effetto durante altri percorsi di sollecitazione e il comportamento all'interfaccia suolo-radice risultano ancora poco esplorati. A questo proposito, in questo studio viene presentata un'apparato che consente di testare congiuntamente il terreno e le radici in estensione uniassiale. Campioni di terreno, compattati sempre allo stesso stato idro-meccanico, sono stati poi seminati con *Cynodon dactylon* e testati dopo tre mesi di crescita radicale. Dalle prove di trazione realizzate, si è osservata una risposta duttile nei campioni di terreno in prossimità della saturazione ed una fragile in condizioni più secche. In ogni caso, la vegetazione ha contribuito ad aumentare la resistenza dei provini. Le misure del grado di saturazione e di suzione matriciale nonché l'assegnazione delle direzioni principali di sollecitazione hanno permesso di interpretare i risultati tramite un criterio di resistenza al taglio per terreni parzialmente saturi. Le caratteristiche meccaniche e morfologiche delle radici all'interno di ogni provino di terreno sono state caratterizzate dopo le prove, in maniera tale da assicurare la comparabilità dei risultati in termini di rinforzo meccanico delle radici.

1. Introduzione

L'uso della vegetazione nella mitigazione del rischio di fenomeni franosi ed erosivi sta riscuotendo un notevole interesse data la necessità di proporre soluzioni sempre più sostenibili, anche nel campo dell'ingegneria. La gran parte delle prove geotecniche presentate in laboratorio per stimare il rinforzo meccanico delle radici è costituita da prove di taglio diretto di grandi dimensioni, sia in situ che in laboratorio (Yildiz et al., 2018; Gonzalez-Ollauri e Mickovski, 2017; Comino et al., 2010) ed apparecchiature triassiali standard o di grandi dimensioni (Zhang et al., 2010; Li et al., 2017; Karimzadeh et al., 2021; Fraccica, 2019). In questo scenario, la resistenza a trazione dei terreni con vegetazione è tutt'ora poco esplorata. Nel caso di pendii costituiti prevalentemente da materiale a grana fine, questo tipo di percorso tensionale contraddistingue la risposta nelle porzioni superficiali (comprese le potenziali zone di coronamento), che possono essere sottoposte a trazione a causa dei movimenti gravitativi (Chen et al., 2020) o a causa dei cicli di ritiro e rigonfiamento, fino alla fessurazione.

Un'elevata fessurazione del terreno infatti può facilitare l'infiltrazione d'acqua verso le zone interne del pendio,

compromettendone la resistenza e la stabilità (Alonso et al., 2003; Kodikara e Costa, 2013; Yanamandra e Oh, 2021; Zeng et al., 2020; Cotecchia et al., 2015). Nonostante ci siano stati alcuni tentativi di caratterizzare la resistenza a trazione in terreni artificialmente rinforzati con fibre (Divya et al., 2014; Trabelsi et al., 2018; Consoli et al., 2011) gli studi sui terreni con radici sono ancora pochi, vista la complessità ed il tempo richiesto per la crescita delle radici nei provini (Fraccica et al., 2020; 2022).

A tal fine, un apparato di laboratorio è stato progettato e messo in funzione per caratterizzare la resistenza del terreno a trazione monoassiale e con la possibilità di compattare il terreno e di farvi crescere successivamente la vegetazione al suo interno.

2. Materiali e metodologia

2.1 Apparato di laboratorio

Il contenitore dell'apparato in cui si inserisce e compatta staticamente il terreno è costituito da materiale polimerico termoplastico (ABS) stampato in 3D. Consta di due contenitori cilindrici di 100 mm di diametro e 60 di altezza, tenuti insieme da un ponte (larghezza 50 mm) dello stesso materiale, rimovibile dopo la compattazione (Fig. 1). I contenitori sono fissati su binari e messi in contatto con una cella di carico (risoluzione 0.2 N), con un sensore LVDT (precisione 50 μm) e con il motore che applica un controllo di spostamento. Maggiori informazioni sui dettagli costruttivi dell'apparato sono forniti da Fraccica et al. (2022).

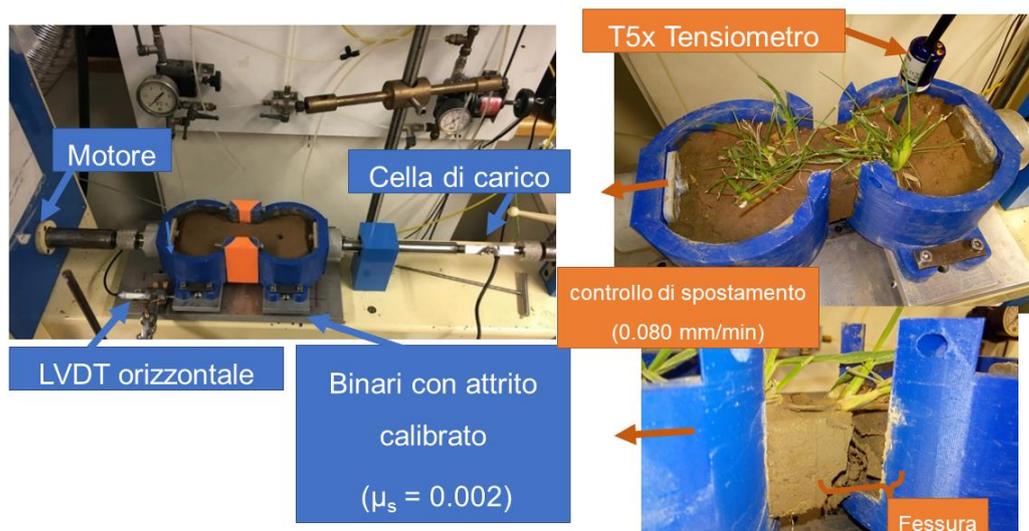


Fig 1. Apparato e provino di terreno prima, durante e dopo la prova di trazione. Indicati i vari componenti che lo caratterizzano. Raffigurato il ponte (di materiale arancione) da rimuovere prima dell'inizio della prova di trazione.

2.2 Compattazione e prova di trazione

Il terreno utilizzato è definito come sabbia limosa secondo la classificazione USCS e le sue proprietà sono dettagliate da Fraccica et al. (2022). Tutti i provini sono stati compattati staticamente ad un contenuto d'acqua $w = 15\%$ ed una densità secca $\rho_d = 1.6 \text{ Mg/m}^3$. Alcuni provini sono stati seminati con semi di *Cynodon dactylon* in quattro punti specifici della superficie del terreno e poi portati ad un contenuto d'acqua $w = 21\%$ per facilitare la crescita delle piante. I provini non seminati sono stati soggetti alla stessa saturazione per motivi di comparabilità. Prima di iniziare la prova di trazione, alcuni provini sono stati lasciati seccare fino a raggiungere una determinata suzione, monitorata da un tensiometro a punta ceramica (T5x, UMS, Germania). La prova è stata condotta imponendo ai provini un tasso di spostamento pari a 0.080 mm/min. Successivamente alla fine della prova, l'indice dei vuoti è stato calcolato tramite prova di paraffina e secondo lo schema presentato in Fig. 2 per escludere il volume di radici presenti nel terreno e per calcolare il grado di saturazione che sarà utilizzato

successivamente nel criterio di rottura per terreni non saturi.

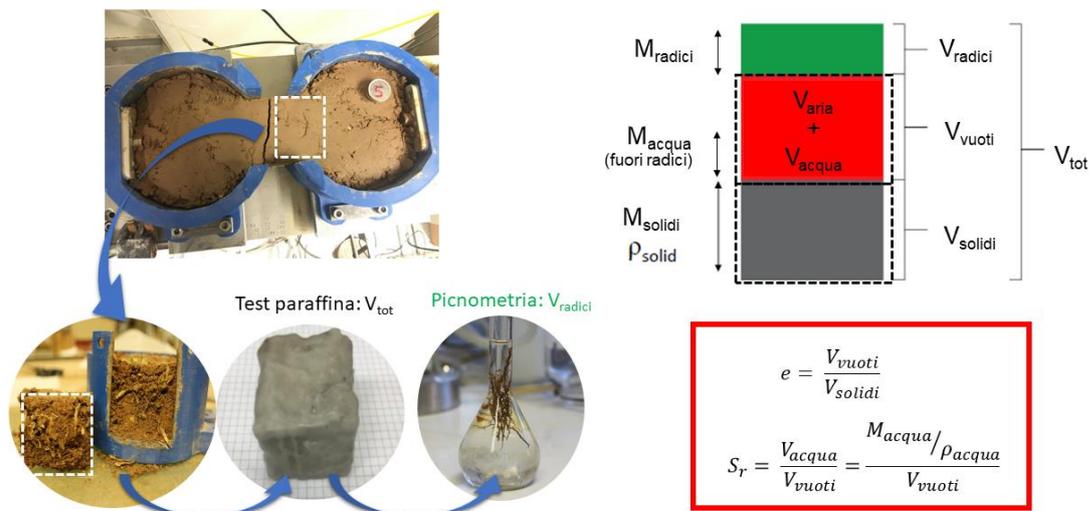


Fig 2. Stima dell'indice dei vuoti nei terreni vegetati.

2.3 Stima delle caratteristiche morfologico-meccaniche delle radici

Le lunghezze, i diametri ed i volumi delle radici sono stati misurati con tecniche d'immagine (WinRhizo) con pycnometria e con misurazione diretta (dopo la distruzione dei provini) con un calibro (risoluzione 0.02 mm). La resistenza a trazione delle singole radici è stata misurata in una pressa Instron (risoluzione 0.003 N). La Fig.3 rappresenta le suddette tecniche. In questo studio si utilizza il $RAR = \Sigma A_{radici} / A_{fessura}$ per comparare le prove di trazione. Maggiori dettagli sono dati da Fraccica et al. (2022).

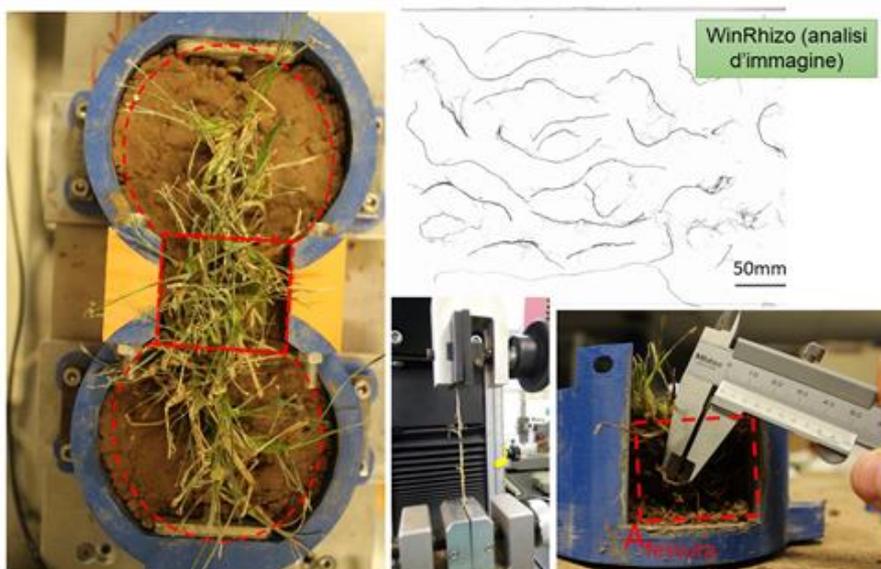


Fig 3. Suddivisione del provino in tre partizioni per la stima delle caratteristiche delle radici separatamente. Immagine delle radici con WinRhizo, prova di trazione sulle singole radici, misurazione dei diametri delle radici con calibro.

3. Risultati

Si confrontano le prove di trazione con e senza vegetazione eseguite a suzioni di matrice simili. Il comportamento trazione-spostamento dei campioni a bassi valori di suzione è mostrato in Fig. 4a. La vegetazione ha rinforzato il suolo in trazione, anche a saturazione elevata. I terreni vegetati e non vegetati seguono lo stesso comportamento fino ad una soglia di spostamenti (circa 0.15 mm), a causa del fatto che le radici devono essere allungate e allineate prima di generare un

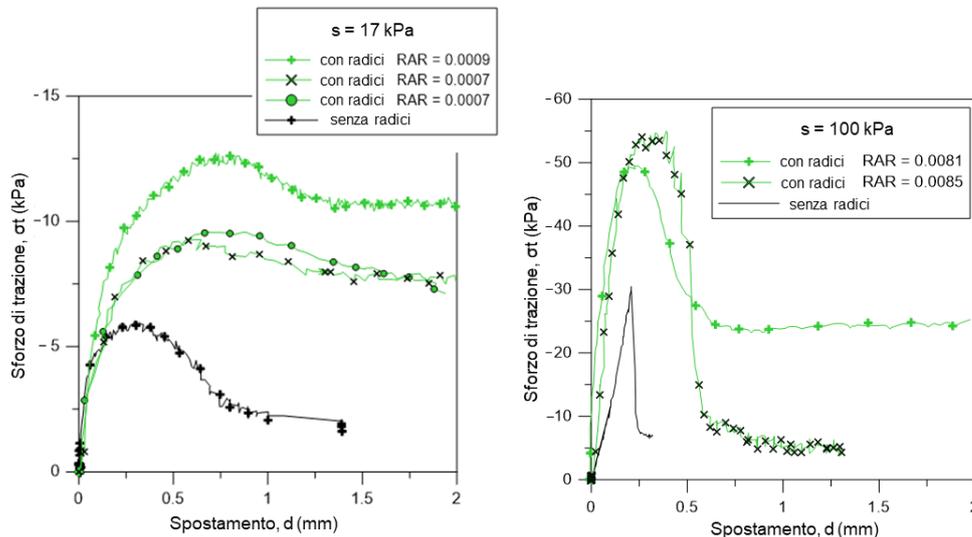


Fig 4. Risultati in termini di sforzo (totale) di trazione – spostamento a bassa suzione ($s = 17$ kPa) ed alta suzione di matrice ($s = 100$ kPa).

rinforzo nel terreno. Tendenze simili sono state osservate da Diambra et al. (2010), Tang et al. (2007) e Heineck et al. (2005) in sabbie fibrorinforzate. Quando la suzione nel terreno aumenta, si ritira ed esercita un maggior confinamento attorno alle radici, anche grazie alle matrici di mucillagine generate dalle piante nel terreno, evitando così il *pull-out* delle radici. Durante le prove ad alta suzione (Fig. 4b), le radici si sono principalmente spezzate, raggiungendo la loro resistenza alla trazione. Il terreno vegetato ha mostrato una risposta più rigida rispetto al terreno non vegetato già dall'inizio delle prove. Alcune radici ancora intatte dopo la fessurazione del terreno hanno generato una resistenza residua del suolo nella fase post-picco.

4. Discussione

Le resistenze ottenute dalle prove di trazione, in termini di sforzo totale massimo, sono state poi tradotte in termini di sforzi efficaci seguendo il criterio definito da Vanapalli et al. (1996), Tarantino e Tombolato (2005) e Alonso et al. (2010) presentato in Fig. 5. Il criterio prende in considerazione il grado di saturazione S_r (stimata tramite prove di paraffina e di contenuto d'acqua), definita effettiva tramite l'uso del coefficiente α (dipendente dal contenuto di materiale a grana fine) e la suzione di matrice s . Il termine u_a è la pressione atmosferica relativa. Come mostrato in figura, è stato definito un sistema di direzioni ritenute principali di sforzo per la quale si è poi riuscito a calcolare gli invarianti di sforzo p' e q e tracciare un involuppo di rottura per estensione, per i due tipi di provini. L'ipotesi sulle direzioni principali è stata poi validata da Fraccica et al. (2022) tramite analisi con tecnica di *particle image velocimetry* eseguita su immagini scattate sugli stessi durante le prove.

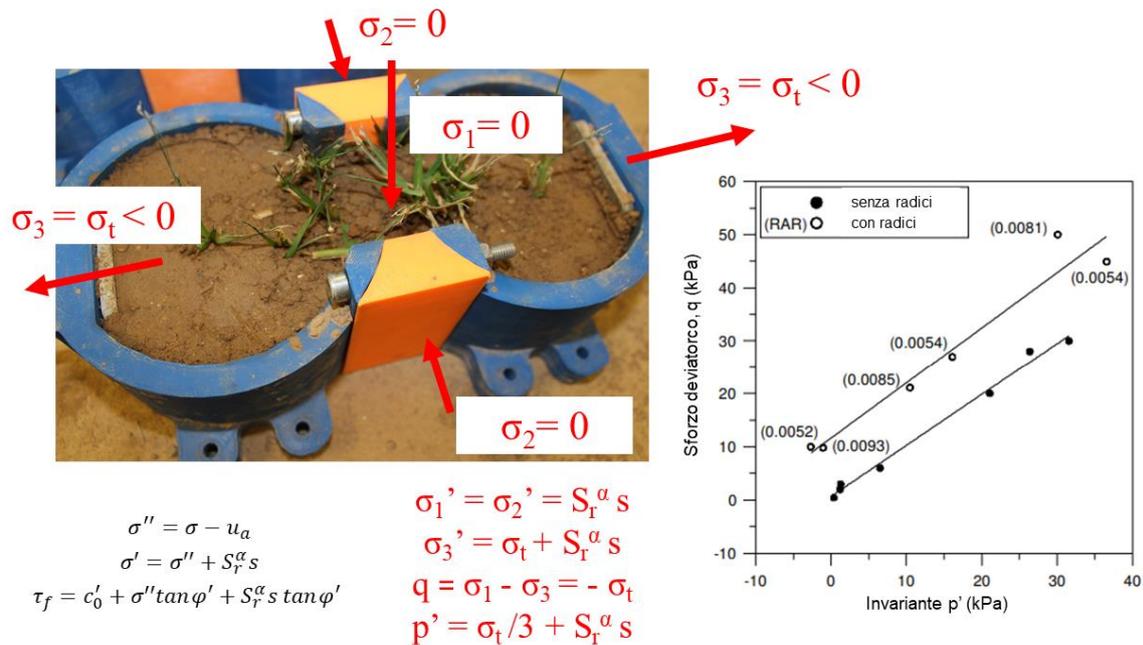


Fig 5 Direzioni principali di sforzo nel provino, criterio di rottura e involucro di rottura per estensione nel piano p' - q

In termini di angolo di resistenza al taglio ϕ' si osservano differenze minime tra i provini con e senza radici (notare che nell'involucro presentato in Fig. 5 sono stati utilizzati provini con RAR comparabili ma non identici) e nel range di $36^\circ \pm 3^\circ$. Le radici hanno generato un aumento di coesione c'_0 di 10 kPa. Questi risultati sono in linea con altre prove svolte sullo stesso terreno con quantità di radici simili, in prove triassiali di compressione (Fraccica, 2019).

5. Conclusioni

Dalle prove di trazione effettuate è emerso che il comportamento del terreno ed il meccanismo di rinforzo delle radici sono profondamente influenzati dallo stato idraulico al quale le prove sono svolte: passando da un terreno prossimo alla saturazione (90-100%) ad uno con un grado di saturazione del 60%-70% il primo cambia da duttile a fragile, mentre il secondo da *pull-out* a rottura per raggiungimento della resistenza a trazione delle radici. In ogni caso, le radici hanno aumentato la resistenza a trazione del terreno in cui sono cresciute. I risultati sono stati interpretati tramite un criterio di resistenza al taglio per terreni parzialmente saturi in modo soddisfacente, indicando che il terreno esplica la sua resistenza agli sforzi di trazione uniassiali tramite delle forze attrittive. Ulteriori studi sono necessari per corroborare questa tesi, soprattutto nel range di elevate suzioni di matrice, non esplorato in questo studio ($s > 200$ kPa).

Bibliografia

- Alonso EE, Gens A, Delahaye CH. (2003) Influence of rainfall on the deformation and stability of a slope in overconsolidated clays: a case study. *Hydrogeol J.*;11:174–192. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-002-0245-1>.
- Alonso EE, Pereira JM, Vaunat J, Olivella S. (2010) A microstructurally based effective stress for unsaturated soils. *Géotechnique*; 60(12):913–925. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.8.P.002>.
- Chen G, Zheng S, Zhu J, Wang W, Feng W. (2020) A quantitative display index that considers tensile failure to predict the full sliding surface of a landslide. *Landslides*; 17:471–482. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-019-01301-9>.
- Comino E, Marengo P, Rolli V. (2010) Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results. *Soil Tillage Res.*; 110(1):60–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.06.006>.

- Consoli NC, de Moraes RR, Festugato L. (2011) Split tensile strength of monofilament polypropylene fiber-reinforced cemented sandy soils. *Geosynth Int.*; 18(2):57–62. <http://dx.doi.org/10.1680/gein.2011.18.2.57>.
- Cotecchia F, Vitone C, Santaloia F, Pedone G, Bottiglieri O. (2015) Slope instability processes in intensely fissured clays: case histories in the southern Apennines. *Landslides.*; 12(5):877–893. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-014-0516-7>.
- Diambra A, Ibraim E, Wood D Muir, Russell AR. (2010) Fibre reinforced sands: Experiments and modelling. *Geotext Geomembr.*; 28(3):238–250. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.09.010>.
- Divya P V, Viswanadham BVS, Gourc JP. (2014) Evaluation of tensile strength strain characteristics of fiber-reinforced soil through laboratory tests. *J Mater Civ Eng.*; 26(1):14–23. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000772](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000772).
- Fraccica A. Experimental Study and Numerical Modelling of Soil-Roots Hydro-Mechanical Interactions (2019) (Ph.D. thesis). Universitat Politècnica de Catalunya, Université de Montpellier; <https://hal.inrae.fr/tel-03109049>.
- Fraccica A, Romero E, Fourcaud T, Sondon M, Gandarillas L. (2020) Tensile strength of a vegetated and partially saturated soil. In: Cardoso R, Jommi C, Romero E, eds. 4th European Conference on Unsaturated Soils - E-UNSAT2020. E3S Web of Conferences, 195:03001. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/202019503001>.
- Fraccica, A., Romero, E., & Fourcaud, T. (2022). Tensile strength of a compacted vegetated soil: Laboratory results and reinforcement interpretation. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 30, 100303. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100303>
- Gonzalez-Ollauri A, Mickovski S. (2017) Plant-soil reinforcement response under different soil hydrological regimes. *Geoderma*; 285:141–150. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.002>.
- Heineck KS, Coop MR, Consoli NC. (2005) Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains. *J Geotech Geoenviron Eng.*; 131(8):1024–1033. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:8\(1024\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:8(1024)).
- Karimzadeh AA, Leung AK, Hosseinpour S, Wu Z, Amini PF. (2021) Monotonic and cyclic behaviour of root-reinforced sand. *Can Geotech J* <http://dx.doi.org/10.1139/cgj-2020-0626> , Just-IN.
- Kodikara J, Costa S. (2013) Desiccation cracking in clayey soils: Mechanisms and modelling. In: Laloui L, Ferrari A, eds. *Multiphysical Testing of Soils and Shales*. Berlin, Heidelberg: Springer. In: Springer Series in Geomechanics and Geoenvironment; http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-32492-5_2.
- Li Y, Wang Y, Wang Y, Ma C. (2017) Effects of root spatial distribution on the elastic–plastic properties of soil-root blocks. *Sci Rep.*; 7:800. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-00924-z>.
- Yanamandra G, Oh WT. (2021) Influence of excavation time, tension crack, and rainfall on the stability of unsupported vertical cuts in unsaturated soil. *Int J Geomech.*; 21(10):04021199. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002160](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002160).
- Yildiz A, Graf F, Rickli C, Springman SM. (2018) Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus. *Catena*; 166:98–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.022>.
- Tang C, Shi B, Gao W, Chen F, Cai Y. (2007) Strength and mechanical behaviour of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotext Geomembr.*; 25(3):194–202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.11.002>.
- Tarantino A, Tombolato S. (2005) Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clay. *Géotechnique*; 55(4):307–317. <http://dx.doi.org/10.1680/geot.2005.55.4.307>.
- Trabelsi H, Chebbi M, Guiras H, Jamei M, Romero E. (2018) Stabilization of clayey soil using fiber reinforcement. In: The Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), ed. UNSAT2018 - The 7th International Conference on Unsaturated Soils. 545–550. <http://hdl.handle.net/2117/129409>.
- Vanapalli SK, Fredlund DG, Pufahl DE, Clifton AW. (1996) Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Can Geotech J.*; 33(3):379–392. <http://dx.doi.org/10.1139/t96-060>.
- Zeng L, Xiao LY, Zhang JH, Gao QF. (2020) Effect of the characteristics of surface cracks on the transient saturated zones in colluvial soil slopes during rainfall. *Bull Eng Geol Environ.*; 79(2):699–709. <http://dx.doi.org/10.1007/s10064-019-01584-1>.
- Zhang CB, Chen LH, Liu YP, Ji XD, Liu XP. (2010) Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength. *Ecol Eng.*; 36(1):19–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.09.005>.