

Etude en laboratoire du comportement mécanique des sols granulaires renforcés par des fibres de polypropylène

Krim Abdallah^{1,2}

¹ University of Tiaret, Algeria (abdellah_krim@yahoo.fr)

² Laboratoire des Sciences des Matériaux et Environnement, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie

RESUME Le nord Algérien est fortement exposé aux séismes, en effet des villes importantes ont été touchées au cours du dernier siècle. Plusieurs sols et de grandes masses de sols sableux ont été éjectés en surface et de graves dommages à certaines structures civiles et hydrauliques ont été causés par ce séisme. Ce travail présente les résultats d'une série d'essais de cisaillement direct réalisés sur le sable de Chlef renforcé par des fibres de polypropylène variant de 0 à 0.8%. Les essais ont été réalisés sur des échantillons de sable lâches ($D_r = 15\%$), moyens ($D_r = 50\%$) et denses ($D_r = 85\%$) sous des contraintes normales de 50, 100 et 200 kPa. Les résultats des essais montrent que l'ajout des fibres influe d'une manière considérable sur la résistance au cisaillement du mélange sable-fibres, en effet, cette résistance augmente avec l'augmentation du pourcentage de fibres, la contrainte normale appliquée et la densité relative. L'angle de frottement interne mobilisé et la cohésion augmentent d'une manière significative avec l'augmentation du pourcentage de fibres. Ces deux paramètres sont plus importants pour la densité moyenne et dense que la densité lâche.

Mots-clés sol, cisaillement, essai, fibres de polypropylène, résistance, frottement.

I. INTRODUCTION

Le 10 octobre 1980 à 13: 25: 23.7 heure locale (12: 25: 23.7GMT), la ville de Chlef (Ex El Asnam, Algérie) a été touchée par un fort et un destructeur séisme d'une magnitude de 7,3 degrés à l'échelle de Richter. L'épicentre du séisme était situé à 12 km dans la région de la ville de Chlef (210 km à l'ouest d'Alger) à $36,143^\circ$ de latitude Nord et $1,413^\circ$ de longitude Est avec une profondeur focale d'environ 10 km. La durée approximative du séisme était entre 35 et 40 s. Le séisme a dévasté la ville de Chlef, dont la population est estimée à 125 000 habitants, ainsi que les villes et villages voisins. Des pertes importantes en vies humaines (de 5 000 à 20 000 victimes) et en biens ont été attribuées à l'effondrement de bâtiments.

Le renforcement des sols par des fibres constitue une technique intéressante et innovante aux problèmes d'ingénierie géotechnique. Le comportement des sols renforcés par des fibres a été largement étudié dans la littérature. De nombreuses recherches menées sur du sable renforcé par des fibres ont montré que la résistance au cisaillement augmente avec l'ajout des fibres au sol (Gray et Ohashi 1983, Gray et Al-Refeai 1986, Consoli et al. 2009, Chen et Loehr 2008, Diambra et al. 2010, Eldesouky et al. 2016). D'autres études ont étudié l'influence de l'ajout de fibres artificielles ou naturelles (Ibraim et al. 2010, Harikumar et al. 2015). Les résultats des essais

(cisaillement direct et compression triaxiale) ont montré que la résistance au cisaillement augmente tandis que la perte de résistance après pic est réduite avec la présence des fibres. Ces résultats sont en accord avec ceux de Al-Refeai (1991), Diambra et al. (2010), Ibraim et al. (2010). Le rôle des renforts dans la matrice de sol est d'augmenter la résistance au cisaillement et de réduire la déformation. Ibraim et al. (2010) et Liu et al. (2011) ont montré que les inclusions de renforcement réduisaient le risque de liquéfaction. L'efficacité du renforcement dépend des propriétés des fibres, du type d'inclusion, de la fraction des fibres, de la longueur, du module d'élasticité et de l'orientation, ainsi que de la taille du grain, de la forme, des caractéristiques de gradation ainsi que des contraintes et de la densité initiale. Ranjan et al. (1994) et Liu et al. (2011) ont également constaté que la résistance maximale d'un sol renforcé par des fibres augmentait avec la teneur en fibres et limitait la réduction de la résistance au cisaillement après pic. De plus, plusieurs chercheurs ont signalé que l'inclusion des fibres dans le sable pouvait réduire la fragilité des sols et en améliorer la ductilité afin de limiter la perte de résistance maximale (Babu et Chouksey 2011). Les échantillons renforcés par des fibres sont capables de maintenir la contrainte de cisaillement tout en continuant à se déformer, même pour les grandes déformations, ce qui suggère que ces matériaux sont très ductiles. Le sable de Chlef a été largement utilisé dans le domaine des travaux publics et constitue un matériau de référence dans cette région, son renforcement par des fibres permet de réduire les risques de liquéfaction. Le présent travail consiste à évaluer l'influence de l'ajout des fibres de polypropylène sur le comportement mécanique du sable de Chlef. Des échantillons de sable ont été préparés à des pourcentages de fibres variant de 0 à 0.8% pour une densité lâche ($D_r = 15\%$), moyenne ($D_r = 50\%$) et dense ($D_r = 85\%$) sous des contraintes normales de 50, 100 et 200 kPa.

II. MATERIAUX UTILISES ET PROCEDURES D'ESSAI

2.1. Sable utilisé

Les essais ont été réalisés sur des échantillons de sable provenant d'Oued Chlef (Algérie), contenant 0.8% de fines (limons) non plastiques ($I_p = 5.81\%$) (Fig. 2a). Ce sable a été utilisé par de nombreux chercheurs (Bouri et al. 2019, Brahim et al. 2018). La courbe granulométrique de ce sable est représentée sur la Fig. 1. Le Tableau 1 résume les caractéristiques physiques du sable utilisé.

2.2. Fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres de polypropylène monofilament blanc de section transversale circulaire, d'une longueur moyenne de 12 mm et d'un diamètre de 32 μm (Fig. 2). Les propriétés physiques et mécaniques des fibres sont présentées dans le Tableau 2 (fourni par la société SIKA). Les teneurs en fibres de 0 à 0.8% ont été utilisées. Le choix de cette gamme de teneur en fibres repose sur des études antérieures (Consoli et al. 2009, Hamidi et Hooresfand 2013, Eldesouky et al. 2016, Eskisar et al. 2016), qui ont montré que la résistance optimale des sables renforcés par des fibres de polypropylène ont été obtenus pour des teneurs en fibres comprises entre 0.5 et 1%.

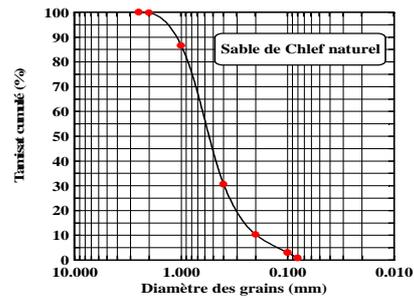


FIGURE 1. Courbe granulométrique du sable utilisé.

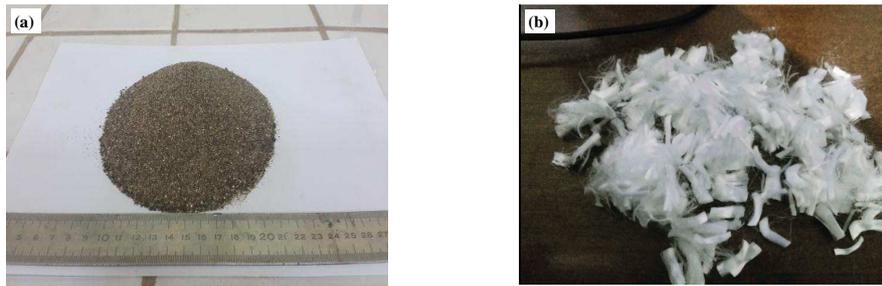


FIGURE 2. Photographie du sable de Chlef et des fibres de polypropylène:
a. Sable de Chlef, b. Fibres de polypropylène

TABLEAU 1. Propriétés physiques du sable de Chlef

e_{min}	e_{max}	γ_s (g/cm ³)	C_u	C_c	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	Forme des particules
0.66	0.81	2.66	3.25	1.23	0.20	0.55	0.65	Arrondie

TABLEAU 2. Propriétés physiques des fibres de polypropylène utilisées (Sika)

Densité spécifique	Longueur (mm)	Diamètre (μ m)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'Young (MPa)
0.91	12	32	400	6000

2.3. Préparation des échantillons

Les essais ont été menés sur des échantillons renforcés par fibres de polypropylène. L'étude expérimentale consiste à la réalisation des essais à l'aide d'une boîte de cisaillement sur des échantillons de sable-fibres. Les essais ont été conduits sous des contraintes normales de 50, 100 et 200 kPa) avec quatre teneurs en fibres de 0, 0.2, 0.4 et 0.8%. Ces essais sont comparés avec ceux des échantillons de sables non renforcés ($F_p = 0$). La procédure expérimentale comporte deux phases. La première phase concerne la préparation des échantillons de sable renforcés, cependant la deuxième phase consiste à la réalisation des essais à la boîte de cisaillement. La préparation des échantillons a été effectuée en déterminant d'abord le poids du sable et des fibres pour le

mélange. La fraction en fibres de polypropylène (F_p) ajoutée est définie en pourcentage de poids sec de sable:

$$F_p(\%) = (W_{fp} / W_s) \times 100 \quad (1)$$

où W_{fp} et W_s sont respectivement le poids des fibres de polypropylène et du sable sec.

Le sable est séché puis mélangé manuellement avec des fibres de polypropylène. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une boîte de cisaillement carrée de 60 x 60 mm avec une hauteur égale à 25 mm. Pour fabriquer des échantillons, la méthode de déposition à sec a été utilisée. Pour la densité moyenne et dense, le matériau est déposé en trois couches. Chaque couche est compactée en 25 coups pour avoir une densité forte ou dense ($D_r = 85\%$), cependant, pour la densité moyenne ($D_r = 50\%$), le matériau est légèrement compacté. Pour la densité lâche ($D_r = 15\%$), on utilise un entonnoir pour reconstituer les échantillons sans compactage avec une hauteur de chute quasi nulle seulement la surface de l'échantillon est nivelée. Tous les essais ont été réalisés à une vitesse de déplacement constante de 1.00 mm/min. La contrainte de cisaillement est mesurée en fonction du déplacement horizontal jusqu'à une valeur moyenne de déplacement de 7.5 mm.

III. RESULTATS D'ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT

3.1. Influence de la densité relative

La figure 4 illustre des résultats typiques des essais de cisaillement direct réalisés sur un mélange de sable et une teneur en fibres de 0 et 0.8% sous trois contraintes normales de 50, 100 et 200 kPa pour les trois densités relatives de $D_r = 15, 50$ et 85% . Ces figures montrent la variation de la contrainte de cisaillement (τ) en fonction du déplacement horizontal. Pour l'état lâche ($D_r = 15\%$), on constate que la contrainte de cisaillement mobilisée augmente graduellement jusqu'à une valeur maximale avec l'augmentation du déplacement horizontal (ΔH) pour les trois contraintes normales appliquées (Fig. 4a). Pour l'état moyen ($D_r = 50\%$), on constate que la contrainte de cisaillement augmente aussi avec l'augmentation du déplacement horizontal pour atteindre un léger pic, ensuite une légère diminution de la contrainte de cisaillement pour les trois contraintes normales appliquées (Fig. 4b). Cependant, pour l'état dense ($D_r = 85\%$), la contrainte de cisaillement mobilisée augmente avec l'augmentation du déplacement horizontal (ΔH) pour atteindre un maximum de la contrainte de cisaillement ensuite cette résistance diminue graduellement pour les trois contraintes normales appliquées (Fig. 4c). Il est noté que la contrainte de cisaillement maximale (τ_{max}) est beaucoup plus importante pour les fortes contraintes normales initiales (σ_n) pour la densité relative moyenne et dense.

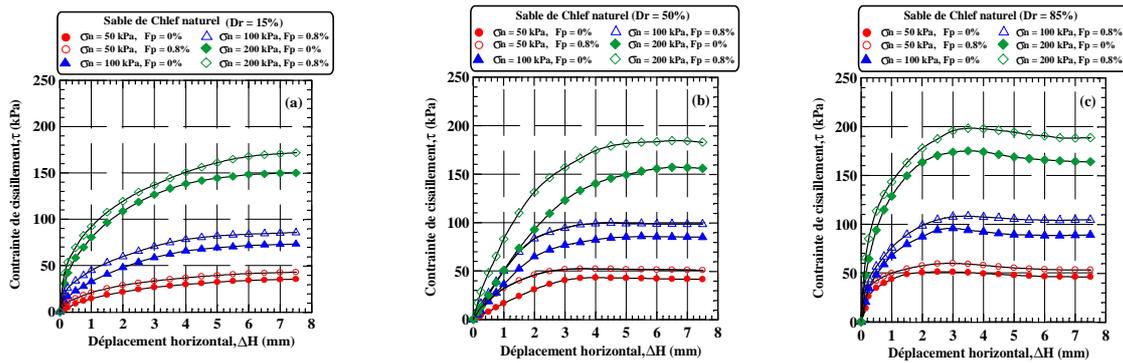


FIGURE 4. Contrainte de cisaillement-déplacement horizontal ($\sigma_n = 50, 100$ et 200 kPa):
 a. Etat lâche ($D_r = 15\%$), b. Etat moyen ($D_r = 50\%$), c. Etat dense ($D_r = 85\%$)

3.2. Influence de l'ajout des fibres sur la résistance au cisaillement

Dans le but d'étudier l'influence de l'ajout des fibres de polypropylène sur la résistance au cisaillement d'un sable, une série d'essais de cisaillement direct a été réalisée sur des mélanges sable-fibres variant de 0, 0.2, 0.4 et 0.8% sous trois contraintes normales de 50, 100 et 200 kPa et pour trois densités relatives différentes de 15, 50 et 85%. La figure 5 présente des résultats typiques pour une contrainte normale de 200 kPa. Pour les échantillons lâches ($D_r = 15\%$), la contrainte de cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres de polypropylène, la contrainte de cisaillement augmente progressivement jusqu'à une valeur maximale (Fig. 5a). Pour les échantillons moyens ($D_r = 50\%$), on constate que la contrainte de cisaillement augmente aussi avec l'augmentation du déplacement horizontal jusqu'à une valeur maximale de la contrainte de cisaillement ensuite on note une légère diminution de cette contrainte de cisaillement (Fig. 5b). Pour les échantillons denses ($D_r = 85\%$), la contrainte de cisaillement mobilisée augmente avec l'augmentation du déplacement horizontal pour atteindre une valeur maximale (située entre 2.5 et 3 mm) puis décroît légèrement (Fig. 5c). La figure 6 illustre la variation du déplacement vertical (ΔV) en fonction du déplacement horizontal (ΔH) et la teneur en fibres. Cette figure montre que l'addition des fibres augmente la phase de contractance pour le sol lâche et beaucoup plus pour les teneurs en fibres de 0.4% et 0.8% (Fig. 6a). Pour la densité moyenne, l'addition des fibres dans le sol conduit à une réduction de la phase de contractance (Fig 6b). La figure 6c montre que les échantillons denses ont initialement une légère phase contractance suivie par une phase de dilatance et spécialement pour les teneurs en fibres de 0.4% et 0.8%. Aussi, on peut constater que les échantillons denses renforcés par des fibres sont plus dilatants que les échantillons denses non renforcés par des fibres.

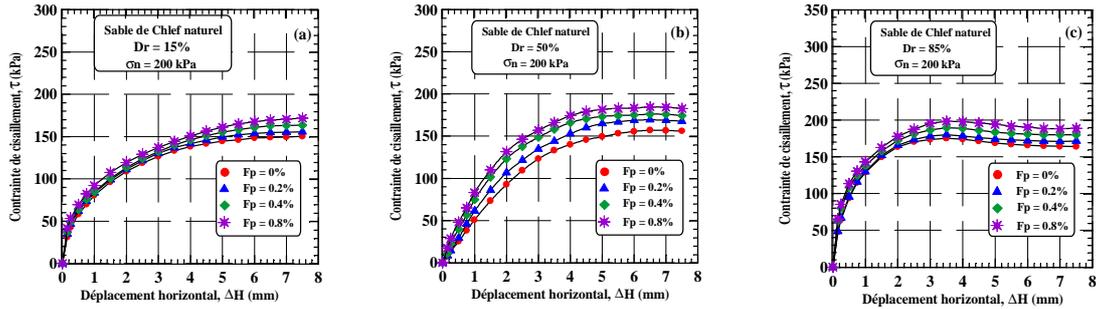


FIGURE 5. Influence de la fraction des fibres sur la résistance au cisaillement ($\sigma_n = 200$ kPa): Contrainte de cisaillement-déplacement horizontal (a. Etat lâche, b. Etat moyen, c. Etat dense)

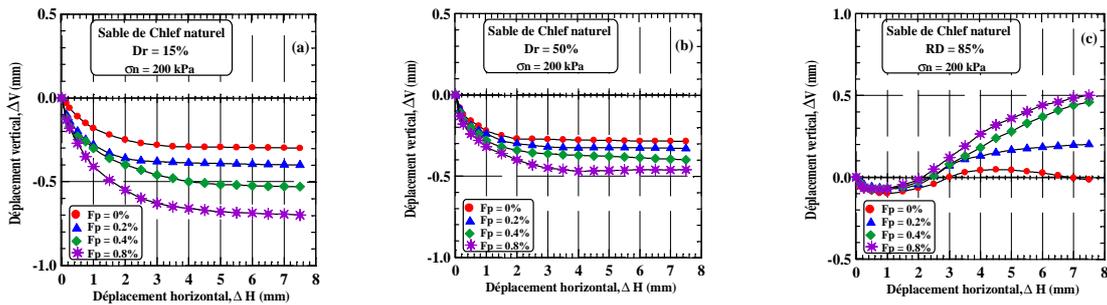


FIGURE 6. Influence de la fraction des fibres sur les déplacements ($\sigma_n = 200$ kPa): Déplacement vertical-Déplacement horizontal (a. Etat lâche, b. Etat moyen, c. Etat dense)

3.3. Influence de l'ajout des fibres sur la résistance au cisaillement maximale (τ_{max})

La figure 7 montre l'influence de l'ajout des fibres de polypropylène sur la résistance au cisaillement maximale (τ_{max}) pour les trois densités relatives de 15, 50 et 85% et pour les trois contraintes normales appliquées de 50, 100 et 200 kPa. A partir de cette figure, on constate que la résistance au cisaillement maximale (τ_{max}) du mélange sable-fibres augmente d'une manière continue avec l'augmentation des fibres. On note que la résistance au cisaillement maximale (τ_{max}) est beaucoup plus importante pour les grandes contraintes normales appliquées (σ_n) pour les trois densités relatives.

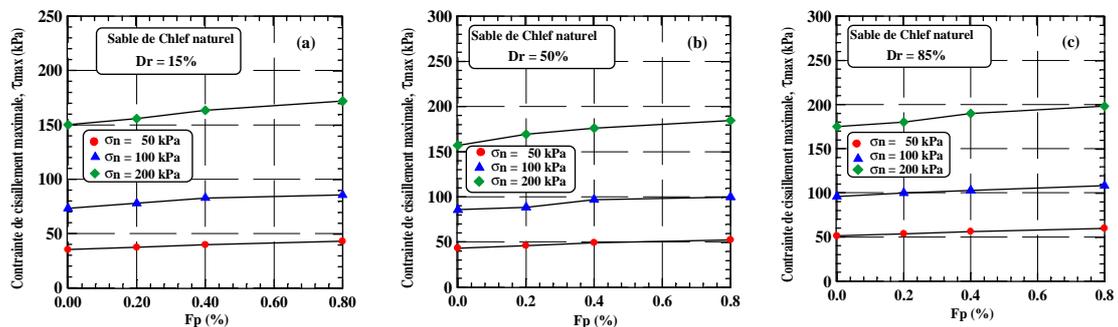


FIGURE 7. Variation de la contrainte de cisaillement maximale (τ_{max}) avec la fraction des fibres de polypropylène (F_p). a. Etat lâche ($D_r = 15\%$), b. Etat moyen ($D_r = 50\%$), c. Etat dense ($D_r = 85\%$)

3.4. Influence de l'ajout des fibres sur l'angle de frottement interne (ϕ) et la cohésion (c)

La figure 8 montre l'influence de l'ajout des fibres de polypropylène sur l'angle de frottement interne (ϕ) et la cohésion (c) des différents mélanges sable-fibres. On constate que l'angle de frottement interne (ϕ) et la cohésion (c) augmentent de manière continue avec l'augmentation de la teneur en fibres. Pour la densité lâche ($D_r = 15\%$), cet angle varie de 32.62° ($F_p = 0\%$) à 38.35° ($F_p = 0.8\%$), pour la densité moyenne ($D_r = 50\%$), cet angle varie de 38.66° ($F_p = 0\%$) à 43.23° ($F_p = 0.8\%$), cependant pour la densité forte ($D_r = 85\%$), cet angle varie de 41.67° ($F_p = 0\%$) à 44.71° ($F_p = 0.8\%$). Pour la cohésion, celle-ci augmente de 3.62 kPa à 10.65 kPa ($D_r = 15\%$), de 8.42 kPa à 18.87 kPa ($D_r = 50\%$) et de 12.36 kPa à 19.74 kPa ($D_r = 85\%$).

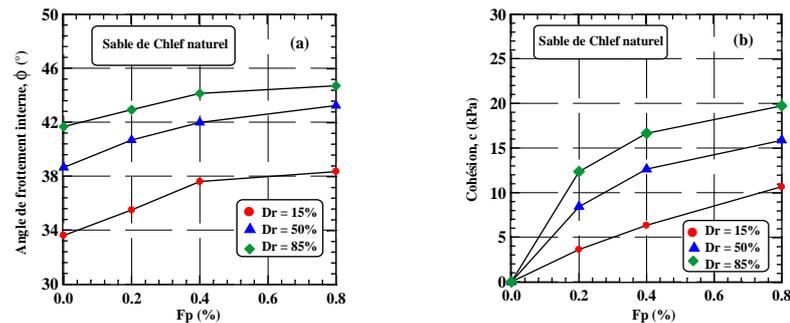


FIGURE 8. Variation de l'angle de frottement interne (ϕ) et la cohésion (c) en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (F_p)

IV. CONCLUSIONS

Ce travail présente une étude en laboratoire de l'influence de l'ajout des fibres de polypropylène, la densité relative et la contrainte normale appliquée sur le comportement mécanique d'un sable d'oued Chlef. Une série d'essais de cisaillement direct a été réalisée sur des échantillons lâches ($D_r = 15\%$), moyens ($D_r = 50\%$) et denses ($D_r = 85\%$) de sables -fibres variant de 0 à 0.8% sous trois contraintes normales appliquées de 50, 100 et 200 kPa. A partir de cette étude, on peut citer les conclusions suivantes:

1. L'inclusion des fibres de polypropylène de 0 à 0.8% conduit à une augmentation de la résistance du sol pour les trois densités relatives;
2. L'augmentation de la densité relative conduit à une augmentation de la résistance du sol. En effet, il a été constaté que les échantillons moyens et denses sont plus résistants que les échantillons lâches;
3. L'accroissement de la contrainte normale appliquée conduit à une amélioration du comportement des échantillons de sol (augmentation de la résistance au cisaillement pour les échantillons renforcés, angle de frottement interne et la cohésion);
4. L'ajout de fibres de polypropylène en pourcentage améliore les caractéristiques mécaniques du sol, en effet, l'angle de frottement mobilisé et la cohésion augmentent d'une manière considérable avec l'augmentation de la teneur en fibres dans le sable;

REFERENCES

- Al-Refeai T. (1991). Behavior of granular soils reinforced with discrete randomly oriented inclusions. *Geotextiles and Geomembranes*, 10, 319-333.
- Babu G.L.S., Chouksey S.K. (2011). Stress-strain response of plastic waste mixed soil. *Waste Management*, 31, 481-488.
- Bouri D., Krim A., Brahim A., Arab A. (2019). Shear strength of compacted Chlef sand: effect of water content, fines content and others parameters. *Studia geotechnica et mechanica*, <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0027>.
- Brahim A., Arab A., Marwan S., Shahrour I. (2018). Laboratory Investigation of the Influence of Geotextile on the Stress-Strain and Volumetric Change Behavior of Sand. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(4), 2077-2085.
- Chen C.W., Loehr J.E. (2008). Undrained and drained triaxial tests of fiber-reinforced sand. *Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai*, 114-120.
- Consoli N.C., Vendruscolo M. A., Fonini A., Rosa F.D. (2009). Fiber reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotextiles and Geomembranes*, 27(3), 196-203.
- Diambra A., Ibrahim E., Muir Wood D., Russell A.R. (2010). Fibre reinforced sands: experiments and modelling. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(3), 238-250.
- Eskisar T., Karakan E., Altun S. (2016). Effects of fibre reinforcement on liquefaction behavior of poorly graded sands. *Procedia Engineering*, 161, 538-542.
- Eldesouky H.M., Morsy M.M., Mansour M.F. (2016). Fiber-reinforced sand strength and dilation characteristics. *Ain Shams Engineering Journal*, 7(2), 517-526.
- Gray D.H., Ohashi H. (1983). Mechanics of fiber reinforcement in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 335-353.
- Gray D.H., Al-Refeai T. (1986). Behavior of fabric versus fiber-reinforced sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(8), 804-820.
- Hamidi A., Hooresfand M. (2013). Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 36, 1-9.
- Harikumar M., Sankar N., Chandrakaran S. (2015). Response of sand reinforced with multi-oriented plastic Hexa-Pods. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 52(4), 211-217.
- Ibraim E., Diambra A., Muir Wood D., Russel A.R. (2010). Static liquefaction of fibre reinforced sand under monotonic loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(4), 374-385.
- Liu J., Wang G., Kamai T., Zhang F., Yang J. (2011). Staic liquefaction behavior of saturated fiber-reinforced sand in undrained ring-shear tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(5), 462-471.
- Ranjan G., Vasan R.M., Charan H.D. (194). Behavior of plastic fiber reinforced sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 13, 555-565.