Aperçu des paramètres influençant la résistance mécanique des bétons de sol

EL ASRI Yousef[1], BEN AICHA Mouhcine[2], ZAHER Mounir[1], HAFIDI ALAOUI Adil[1]

[1] *Laboratoire Mécanique et Génie civil, FST de Tanger, Université Abdelmalek Essaâdi, Maroc*

[2] *Laboratoire structure et Matériaux, Ecole Nationale d'Architecture de Rabat, Maroc*

RESUME Vu son faible impact environnemental et son attrait économique, l'amélioration des propriétés mécaniques d'un sol en le traitant en place avec un liant hydraulique (soil- mixing) a pris une place considérable dans le domaine de renforcement des sols. Ainsi, le béton de sol a fait l'objet de plusieurs études et discussions afin de déterminer les avantages de son utilisation sur chantier. À ce propos, ce présent travail analyse les paramètres influençant les propriétés physico-mécaniques du béton de sol. Il traitera par la suite les approches prédictives empiriques de la résistance mécanique en fonction des propriétés du sol. Enfin, des approches prédictives utilisant les techniques de l'intelligence artificielle seront abordées afin de mieux comprendre l'évolution de la résistance en fonction du type de sol rencontré.

Mots-clefs soil-mixing, béton de sol, résistance mécanique, propriétés physico-mécanique, intelligence artificielle.

I. INTRODUCTION

Le Soil-Mixing consiste à mélanger in situ et d'une façon mécanique le sol rencontré avec un matériau d'apport (liant hydraulique) dont le choix et le dosage permettent d'obtenir la résistance mécanique requise par le projet (Porbaha, 2000). La méthode de soil-mixing est actuellement adoptée pour améliorer la stabilité des fondations (Topolnicki and Soltys, 2012), réduire les tassements des sols compressibles (Abdo and Serfass, 2009), renforcer les écrans d'étanchéité (Arnold et al., 2011) et les caissons contre la liquéfaction des sols (Mathieu and Benhamou, 2012), et confiner les sols pollués (Brûle, 2014). Le Soil-Mixing peut être considéré comme un béton composé d'un mélange de particules solides du sol (granulats), de l'eau et d'un liant (chaux ou ciment). La résistance mécanique de ce type de matériau, appelé le béton de sol (Szymkiewicz, 2011), est nettement supérieure à celle d'un sol non traité et inférieure à celle d'un béton ordinaire.

II. PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES DU BETON SE SOL

La résistance d'un béton de sol dépend des caractéristiques du sol rencontré et du liant utilisé :

- Type de sol : (Akin, 2016) a montré que la résistance en compression des mélanges sol-ciment augmente en fonction de la granulométrie du sol (plus les grains sont gros plus la résistance augmente). Ainsi, (Reiffsteck et al., 2007) a prouvé que la meilleure compacité du mélange est celle d'un sol dont la courbe granulométrique du mélange sol-ciment est très proche de la courbe de Füller (Fuller and Thompson, 1907).

- Quantité et type de liant : Pour un dosage minimal en ciment de 50 kg/m^3 de sol, la résistance mécanique du mélange augmente en fonction du dosage en ciment (Terashi and Kitazume, 2013). (Porbaha, 2000) ont montré également que pour un dosage important en ciment, le mélange avec un ciment aux laitiers présentent une résistance mécanique, à 28 jours, deux fois supérieure que celle d'un mélange avec un ciment Portland.
- Rôle de l'eau : Le rôle de l'eau dans le béton de sol est double, il améliore l'efficacité du malaxage et participe à l'hydratation du ciment. Plusieurs auteurs (Kouby et al., 2016) ont montré que la résistance en compression du béton de sol diminue lorsque l'indice de plasticité ou l'indice de liquidité du mélange augmente.
- Influence du PH : La présence d'une grande quantité de matière organique dans le sol signifiée que la valeur du PH sera faible. Ainsi, l'augmentation de la teneur en matière organique entraine une diminution de la résistance à la compression (Saride et al., 2013).
- Méthode de confection des échantillons : Pour une résistance en compression optimale, (Terashi and Kitazume, 2013) recommande le remplissage des moules dans une période inférieure à 40 minutes suivant le malaxage. En autre, le même auteur a montré qu'au-delà de 10 minutes de malaxage, le temps n'a plus vraiment d'effet sur la résistance en compression. (Terashi and Kitazume, 2013) a montré aussi que les techniques de moulage les plus utilisés sont le compactage dynamique ou statique, le tapping et le rodding. D'une manière générale, ces techniques affectent la masse volumique, ainsi que la résistance mécanique des mélanges. Pour les mélanges fluides, l'influence de ces quatre techniques de remplissages sur les propriétés mécaniques des bétons de sol est négligeable (Marzano et al., 2012).
- Inclusions de sol : D'une manière générale, le sol naturel présente des inclusions (parties de sol qui sont mal mélangées avec le liant hydraulique in-situ (Consoli et al., 2010)) qui affectent les propriétés mécaniques des bétons de sol et qui dépendent de la nature du sol rencontré. Les paramètres mécaniques (résistance à la compression et module d'Young) diminuent en fonction du pourcentage d'inclusion.
- Conditions de cure : (Kitazume and Terashi, 2013) ont montré qu'à court terme l'augmentation de la température améliore les propriétés mécaniques des mélanges sol-ciment, car les faibles températures de cure peuvent retarder le processus d'hydratation. D'autres auteurs (AJORLOO, 2010) ont montré que la résistance d'un mélange sable-ciment augmente en fonction d'une surcharge et de la pression de confinement pendant la cure.

III. APPROCHES PREDICTIVES EMPIRIQUE

Des équations empiriques basées sur plusieurs indices ont été proposées pour prédire la résistance mécanique des bétons de sol. Ainsi :

- (Mitchell et al., 1972) a proposé une relation linéaire entre la résistance à la compression non confinée des sols traités au ciment, le temps de cure et le rapport massique du ciment au sol sec. Cette résistance augmente en fonction de l'augmentation de ce rapport.
- (Tang et al., 2001) a effectué une série de tests de résistance pour 28 échantillons d'argile marine traités au ciment et a proposé une équation en tenant compte de la teneur en eau et en ciment. L'auteur a montré que la résistance augmente avec la teneur en ciment et diminue avec l'augmentation de la teneur en eau.

- (Miura et al., 2001) (Horpibulsk et al., 2011) ont constatés que le développement de la résistance des argiles traitées au ciment ne dépend que du rapport eau/ciment. Ils ont déduit une corrélation entre ces paramètres, où la résistance augmente si le rapport wc/C diminue.
- (Consoli et al., 2010) a montré que la réduction de la porosité ou de l'indice de vides du mélange augmente sa résistance à la traction et à la compression.
- (Sasanian and Newson, 2014) ont déduit que la résistance du sol argileux traité au ciment n'est pas liée seulement à son rapport ciment-eau. Plus l'indice d'activité de ce sol (qui représente sa minéralogie et sa capacité à être impliqué dans des réactions chimiques) est élevé, plus la résistance du sol argileux est élevée.

IV. APPROCHES PREDICTIVES BASÉES SUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les techniques de l'intelligence artificielle permettent de trouver, par apprentissage automatique des données d'entrée (paramètres physico-mécaniques) et des données de sortie (résistance mécanique), des modèles mathématiques approximatives pour résoudre des problèmes complexes non linéaires. Dans ce contexte, dans le domaine de soil mixing, des auteurs (Narendra et al., 2006),(Das et al., 2011) et (Ghorbani and Hasanzadehshooiili, 2018) ont utilisé ces techniques pour prévoir la résistance à la compression non confinée des bétons de sol. Ces auteurs ont confirmé que la prédiction de la résistance utilisant des techniques d'intelligence artificielle est plus précise que les modèles empiriques conventionnels. En revanche, bien que cette technique soit un puissant outil de modélisation, mais on ne peut pas évaluer le rôle joué par les différents paramètres d'entrée dans le développement de la résistance. Ceci ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des mécanismes contrôlant la fiabilité de la cette technique.

V. CONCLUSION:

Dans la littérature, plusieurs études ont été proposées pour prédire la résistance des sols traités au ciment en fonction des propriétés intrinsèque de sol traité, des propriétés et de la quantité de liant hydraulique, et des conditions de cure. Vu que ces équations empiriques dépendent que de 2 ou 3 paramètres, elles sont estimées « insuffisantes » pour une prédiction précise. Actuellement, ce manque de compréhension physique est complété par l'intégration de plusieurs hypothèses dans les modèles générés par la technique de l'intelligence artificielle. Cette méthode présente l'avantage d'une mise à niveau continue lorsque les nouvelles données sur le sol sont disponibles, ce qui améliore la fiabilité du modèle.

REFERENCES:

Abdo, J., Serfass, J.-P., 2009. Terrassements et assises de chaussées : Traitement des sols aux liants hydrauliques (No. T70). Collection Technique Cimbéton.

AJORLOO, M.A., 2010. Characterization of the Mechanical Behavior of Improved Loose Sand for Application in Soil-Cement Deep Mixing (Thèse de doctorat en génie civil). Université de Lille.

Akin, M.K., 2016. Experimental studies on the physico-mechanical properties of jet-grout columns in sandy and silty soils. *JAES 116*, 190–197. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.01.011.

Arnold, M., Beckhaus, K., Wiedenmann, U., 2011. Cut-off wall construction using Cutter Soil Mixing: a case study. *geotechnik* 34, 11–21. https://doi.org/10.1002/gete.201000021

Brûle, S., 2014. LE SOL MIXING DEPOLLUANT 7.

Consoli, N.C., Cruz, R.C., Floss, M.F., Festugato, L., 2010. Parameters Controlling Tensile and Compressive Strength of Artificially Cemented Sand. *J. Geotech. Geoenviron. Eng*. 136, 759–763. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000278

Das, S.K., Samui, P., Sabat, A.K., 2011. Application of Artificial Intelligence to Maximum Dry Density and Unconfined Compressive Strength of Cement Stabilized Soil. *Geotech Geol Eng 29*, 329–342. https://doi.org/10.1007/s10706-010-9379-4

Fuller, W.B., Thompson, S.E., 1907. The Laws of Proportioning Concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* LIX, 67–143.

Ghorbani, A., Hasanzadehshooiili, H., 2018. Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing. *Soils and Foundations* 58, 34–49. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.11.002

Horpibulsk, S., Rachan, R., Suddeepong, A., Chinkulkijniwat, A., 2011. Strength development in cement admixed bangkok clay. S&F 51, 239–251. https://doi.org/10.3208/sandf.51.239

Kouby, A.L., Duc, M., Marino-Paredes, J., Fanelli, S., 2016. APPROCHE MULTI-ECHELLE DU TRAITEMENT DES ARGILES PAR LA METHODE DU DEEP SOIL MIXING. 8.

Marzano, I.P., Leder, E., Grisolia, M., Danisi, C., 2012. Laboratory study on the molding techniques for QC/QA process of a Deep Mixing work 8.

Mathieu, F., Benhamou, L., 2012. Geomix Caissons against liquefaction.

Mitchell, J.K., Ueng, T.S., Monismith, C.L., 1972. Behavior of stabilized soils under repeated loading. Performance evaluation of cement-stabilized soil layers .

Miura, N., Horpibulsuk, S., Nagaraj, T.S., 2001. Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content. *SOILS AND FOUNDATIONS* 41, 33–45. https://doi.org/10.3208/sandf.41.5_33.

Narendra, B.S., Sivapullaiah, P.V., Suresh, S., Omkar, S.N., 2006. Prediction of unconfined compressive strength of soft grounds using computational intelligence techniques: A comparative study. *Computers and Geotechnics* 33, 196–208. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2006.03.006

Porbaha, A., 2000. State of the art in deep mixing technology. Part IV:design considerations. *P I of Civil Engineers - Ground Improvement 4*, 111–125. https://doi.org/10.1680/grim.2000.4.3.111

Reiffsteck, P., PHAM, P.-T., ARBAUT, J., 2007. Influence de la répartition granulométrique sur le comportement mécanique d'un sol. *Bulletin des Laboratories des Ponts et Chaussees 268–269*, 83–104.

Saride, S., Puppala, A.J., Chikyala, S.R., 2013. Swell-shrink and strength behaviors of lime and cement stabilized expansive organic clays. https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.09.008

Sasanian, S., Newson, T.A., 2014. Basic parameters governing the behaviour of cement-treated clays. *Soils and Foundations* 54, 209–224. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.02.011

Szymkiewicz, F., 2011. Évaluation des propriétés mécaniques d'un sol traité au ciment (Thèse de doctorat en géotechnique). Université Paris-Est, france.

Tang, Y.X., Miyazaki, Y., Tsuchida, T., 2001. Practices of reused dredgings by cement treatment. *Soils and Foundations* 41, 129–143. https://doi.org/10.3208/sandf.41.5_129

Terashi, M., Kitazume, M., 2013. The Deep Mixing Method. CRC Press.

Topolnicki, M., Soltys, G., 2012. Novel Application of Wet Deep Soil Mixing for Foundation of Modern Wind Turbines, in: Grouting and Deep Mixing 2012. American Society of Civil Engineers, New Orleans, Louisiana, United States, pp. 533–542. https://doi.org/10.1061/9780784412350.0039.