

Numerical study of geogrid-reinforced segmental earth retaining wall

Etude numérique d'un ouvrage de soutènement à parement cellulaire renforcé par géogridle

Ouassim Rahmouni, Abdelhak Mabrouki[✉], Djamel Benmeddour, Mekki Mellas

Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra, BP145 Biskra 07000, Algérie

Received 29 September 2014

Received in revised form 12 February 2015

Accepted 18 February 2015

Published online: 28 February 2015

Keywords

Geogrid
Interface
Reinforcement
Numerical modelling
Segmental retaining wall

Abstract: Geogrid-reinforced soil segmental retaining walls have gained wide popularity because of their ease of installation and quick construction. This paper focuses on the numerical analysis using the FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), the influence of the inclined blocs on the behavior of geogrid-reinforced soil segmental retaining walls. The results show that the inclination of the segmental blocks influences the shear stress transmitted to the blocks, the lateral displacement, the tensile loads and the strains in the geogrid layers.

© 2015 The authors. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

Résumé : Les ouvrages de soutènement à parement cellulaire renforcés par des nappes de géogridle constituent à l'heure actuelle une solution économique. De nombreuses études expérimentales, théoriques et numériques ont été menées pour l'optimisation du dimensionnement de ces ouvrages. La présente étude s'intéresse à l'étude numérique en utilisant le code FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), de l'influence de l'inclinaison des blocs sur le comportement des murs de soutènement à parement cellulaire en sol renforcé par géogridle. Les résultats numériques obtenus montrent que l'inclinaison des blocs influence considérablement la contrainte de cisaillement transmise aux blocs, le déplacement latéral, les forces de traction ainsi que les déformations dans les nappes de géogridles.

Mots clés : Géogridle, interface, renforcement, modélisation numérique, soutènement cellulaires.

1. Introduction

Un massif en sol renforcé par des géogridles se comporte comme un bloc capable de supporter d'importants chargements et déformations grâce à l'interaction entre le matériau de remblai et les éléments de renforcement. Le comportement interne de ce type de structure dépend d'un certain nombre de facteurs incluant le sol, le renforcement et l'interaction sol-renforcement. L'Eurocode 7 ne donne pas de spécifications concernant le calcul de ce type d'ouvrage (Frank 2014).

L'utilisation des ouvrages de soutènement à parement cellulaire renforcés par des nappes géogridles, offre une flexibilité en ce qui concerne la disposition et la possibilité de réaliser des murs à plusieurs niveaux (Koerner et Soong 2001). Cependant, le comportement des sols renforcés par géogridles est complexe en raison de son extensibilité et nécessite donc une bonne compréhension des mécanismes d'interaction sol-renforcement. La rigidité du parement influence de manière significative le comportement des ouvrages de soutènement renforcés (Vieira et al. 2008 ; Bathurst et al. 2006); cette rigidité est considérée comme un paramètre important dans la méthode « K-stiffness », pour estimer les forces de traction maximales (Bathurst et al. 2008). Toutefois, des études très limitées ont été menées concernant la rigidité des ouvrages de soutènement à parement cellulaire. Huang et al. (2007) ont supposé que la rigidité du parement est régie par la résistance au cisaillement entre les blocs.

Généralement, les ouvrages de soutènement à parement cellulaire renforcés par géogridle sont construits en considérant un angle d'inclinaison ω variant entre 1° et 15° par rapport à la verticale (Huang et al. 2010). Le décalage successif des blocs ou l'alignement avec inclinaison par rapport à l'horizontale détermine l'inclinaison du parement. La présente étude traite, à l'aide du code FLAC^{3D}, l'influence de l'inclinaison des blocs sur le comportement des ouvrages de soutènement à parement cellulaire renforcés par géogridle. Cette étude vise l'estimation numérique des contraintes de cisaillement transmises aux blocs, les déplacements latéraux du parement et les forces de traction ainsi que les déformations dans les géogridles.

2. Étude numérique

2.1. Présentation du cas étudié

Le code FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) a été utilisé. FLAC^{3D} est un code en différences finies explicites, développé par la société ITASCA Consulting Group. FLAC^{3D} a été utilisé à la place de FLAC^{2D}, car la présente étude fait

[✉] Corresponding author. E-mail address: a.mabrouki@yahoo.fr

partie d'une étude plus large comprenant, notamment, des ouvrages de soutènement à parement cellulaire tridimensionnel et il était souhaitable de garder le même code et maillage générique.

L'ouvrage de soutènement est dimensionné en utilisant le code de conception AASHTO (2002), le sol est renforcé par six nappes de géogrilles ; pour satisfaire les conditions imposées par l'AASHTO, l'espacement vertical des géogrilles S_v ne doit pas dépasser deux fois la largeur d'un bloc, soit $S_v < 0,6 m$. Egalement, la longueur minimale des géogrilles est environ $0,7H$, où H est la hauteur de l'ouvrage de soutènement. La géométrie du modèle est présentée sur la Figure 1.

Les conditions aux limites sont prises en compte en bloquant le déplacement horizontal pour la limite qui correspond au plan $y = 0$, pour $z = 0$ les déplacements sont bloqués dans les directions y et z . Le déplacement dans la troisième dimension est bloqué pour traiter le problème en déformation plane (figure 2).

2.2. Propriétés des matériaux

Le comportement du sol est régi par une loi élastique-parfaitement plastique et le critère de Mohr-Coulomb a été adopté. Hatami et Bathurst (2006) et Huang et al. (2009), ont montré que le critère de Mohr Coulomb donne une bonne prédiction du comportement de l'ouvrage de soutènement à parement cellulaire renforcé par des nappes de géogrille. On note que dans la présente étude, le sol a été compacté par l'application d'une contrainte verticale uniforme de $8 kPa$ pour chaque couche de $15 cm$.

Pour assurer la stabilité externe de l'ouvrage, le sol de fondation a été modélisé comme un matériau élastique. D'après Ling et Leshchinsky (2003) un ouvrage de soutènement posé sur une fondation en béton, présente un comportement similaire à celui d'un ouvrage de soutènement sur un sol ferme. Aussi, les blocs en béton ont été modélisés comme un matériau élastique, les dimensions d'un bloc sont $0,3 m$ de largeur, $0,15 m$ de hauteur et $0,5 m$ de longueur.

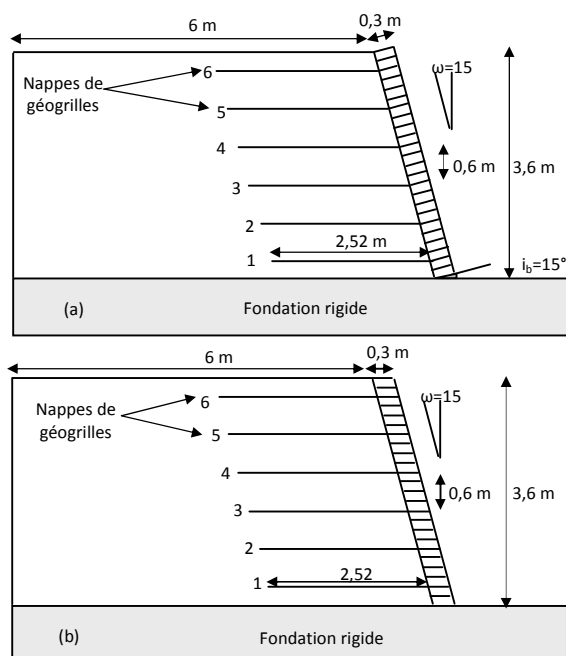


Fig. 1. Géométrie de l'ouvrage de soutènement à parement cellulaire renforcé par des nappes de géogrilles. (a) blocs inclinés. (b) blocs horizontaux.

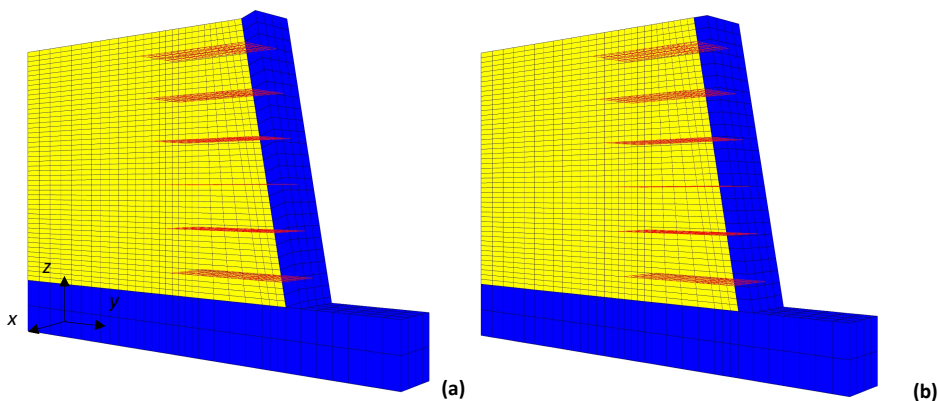


Fig. 2. Modèle numérique utilisé. (a) blocs inclinés (b) blocs horizontaux.

Les géogrilles peuvent être modélisées sous FLAC^{3D} à l'aide d'élément de structure de type « geogrid ». L'utilisation de l'élément géogrid nécessite de spécifier les caractéristiques mécaniques et géométriques, telles que le module d'élasticité, la rigidité, la contrainte de traction ultime et la longueur. L'élément géogrid intègre ou est associé à des interfaces qui permettent de prendre en compte les caractéristiques aux interfaces sol-renforcement. Dans la présente étude, les nappes de géogrilles ont une longueur de 2,52 m et sont connectées de manière rigide aux blocs. Les caractéristiques utilisées pour les matériaux sont présentées dans le tableau 1.

La résistance au cisaillement à l'interface sol-géogrid est caractérisée par une loi de frottement de type Mohr-Coulomb. D'après Yoo et Kim (2008), le glissement se produit dans le sol et non à l'interface sol-renforcement ; ainsi, une grande valeur de la rigidité au cisaillement le long de l'interface sol-géogrid a été choisie, afin d'éviter le glissement entre le sol et le renforcement. Les blocs sont connectés au sol via des éléments d'interface ; le comportement de l'interface sol-bloc est régi par le critère de Coulomb qui limite la force de cisaillement agissante à un nœud d'interface. L'interface entre les blocs est caractérisée par un angle de frottement, la cohésion, la rigidité normale (K_n) et tangentielle (K_s) déterminées en utilisant les essais de cisaillement direct (Chen et Bathurst 2013). Les propriétés des interfaces adoptées dans la présente étude sont données dans le tableau 2.

3. Résultats et discussion

3.1. Contraintes normale et de cisaillement entre les blocs

D'après Hatami et Bathurst (2001), la poussée des terres appliquée sur le parement est équilibrée par les composantes normales et tangentielles du poids des blocs et les forces de traction dans les géogrilles comme indiqué sur la Figure 3.

Dans le cas des blocs inclinés, les résultats de la présente étude, montrent que les composantes normales à la surface de contact entre les blocs due au poids des blocs et aux forces de poussée augmentent la contrainte normale sur le parement comme indiqué sur la Figure 4 (a). Les équations (1) et (2), expriment respectivement l'équilibre des forces appliquées sur les blocs horizontaux et inclinés (Hatami et Bathurst 2001).

$$P_a \sin \zeta + W = R_v \quad (1)$$

$$P_a \sin(\zeta + i_b) + W \cos i_b - \sum T_i \sin i_b = R \quad (2)$$

Tableau 1. Propriétés des matériaux.

Remblai	Modèle élasto-plastique (Critère Mohr-Coulomb)	
	E : Module de young (MPa)	40,00
	u : Coefficient de Poisson	0,30
	ϕ_{ps} : Angle de frottement (degrés)	44,00
	c : Cohésion (kPa)	0,30
	ψ : Angle de dilatance (degrés)	11,00
	γ : Densité (kN/m ³)	16,80
Blocs	Modèle élastique	
	E : Module de Young (GPa)	23,00
	u : Coefficient de Poisson	0,15
	γ : Densité (kN/m ³)	23,00
Géogrilles		
	T_f : Tension de rupture (kN/m) à $\epsilon_f = 30\%$	25,00
	J : Rigidité (kN/m)	95,00
	e : Épaisseur (mm)	5,00
	u : Coefficient de Poisson	0,40

Tableau 2. Propriétés des interfaces (Chen et Bathurst 2013).

	K_n (MN/m ²)	K_s (MN/m ²)	Angle de frottement (°)	Cohésion (kPa)	Angle de dilatance (°)
Bloc/bloc	1000	40	57	46	-
Sol/bloc	100	1	44	-	11
Sol/géogrilles	1	-	44	1000	-
Pied du parement	1000	40	27	7	-

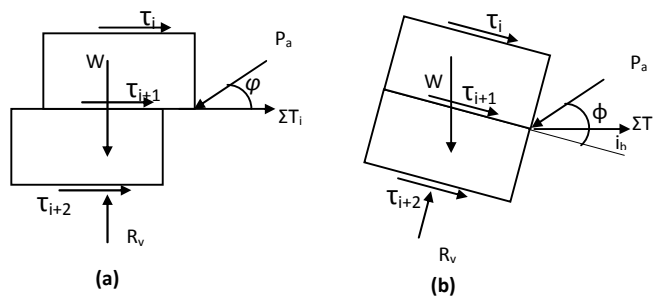


Fig. 3. Présentation des forces appliquées sur les blocs. (a) blocs horizontaux. (b) blocs inclinés.

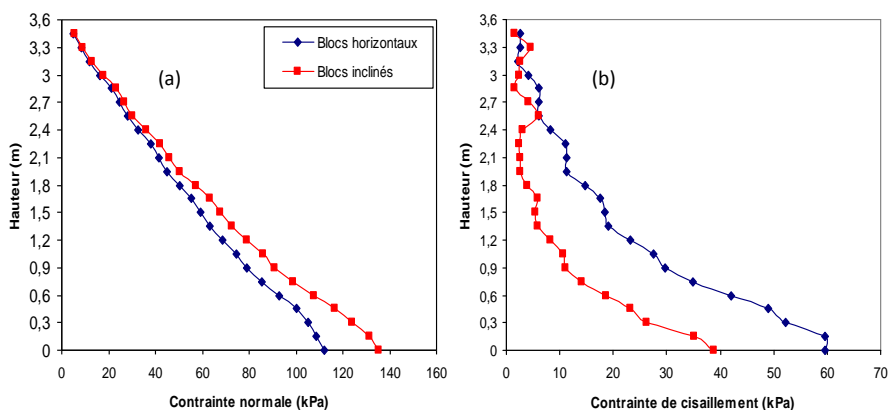


Fig. 4. Contraintes entre les blocs. (a) Contraintes normales (b) Contraintes de cisaillement.

Avec :

P_a , W , T_i , R_v , φ , i_b sont respectivement, la force de poussée du sol, le poids des blocs, les forces de traction dans les géogrilles, la réaction du pied de parement, l'angle de frottement interne du sol et l'angle d'inclinaison des blocs. L'angle d'inclinaison des blocs i_b est égal à l'angle d'inclinaison du parement ω .

Par ailleurs, la composante tangentielle due au poids des blocs inclinés, réduit la contrainte de cisaillement entre les blocs. Les équations (3) et (4), expriment l'équilibre des forces tangentielles à la surface de contact entre deux blocs. Dans le cas des blocs inclinés, la Figure 4(b) permet de constater une diminution d'environ 35% de la contrainte de cisaillement au niveau de la surface de contact entre les blocs.

$$P_a \cos \{ - \sum T_i = \sum \tau_i A \tag{3}$$

$$P_a \cos(\{ + i_b) - W \sin i_b - \sum T_i \cos i_b = \sum \tau_i A \tag{4}$$

Avec : τ_i et A sont respectivement, la contrainte de cisaillement entre les blocs et la surface de contact entre les blocs.

3.2. Déplacement latéral du parement

Le déplacement latéral du parement à la fin de la construction et après un chargement vertical a été déterminé et représenté sur la Figure 5 (a) et (b). On peut remarquer que l'inclinaison des blocs par rapport à l'horizontale réduit le déplacement latéral de parement, cette réduction peut être expliquée par l'augmentation de la contrainte normale et la diminution de la contrainte de cisaillement au niveau de la surface de contact entre les blocs. Cependant, l'influence de l'inclinaison des blocs sur le déplacement latéral du parement est relativement faible à la base de l'ouvrage de soutènement, cela est dû à la fondation élastique.

3.3. Forces de traction dans les nappes de géogrilles

La Figure 6 (a) et (b) montre les forces de traction maximales (T_{max}), dans les nappes de géogrilles. Pour le cas d'un ouvrage de soutènement à la fin de construction (sans chargement), la force de traction maximale est obtenue à mi-hauteur de parement; cependant, après un chargement vertical, la force maximale se trouve au sommet du parement. À partir des résultats présentés sur la Figure 6 (a) et (b), on peut remarquer que l'inclinaison des blocs réduit les forces de traction maximales d'environ 19% et 9% en fin de construction et après chargement respectivement.

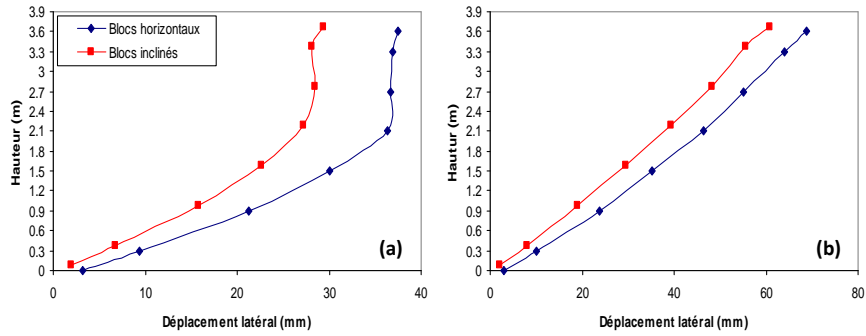


Fig. 5. Déplacement latéral de parement. (a) en fin de construction (b) après un chargement vertical de 80 kPa.

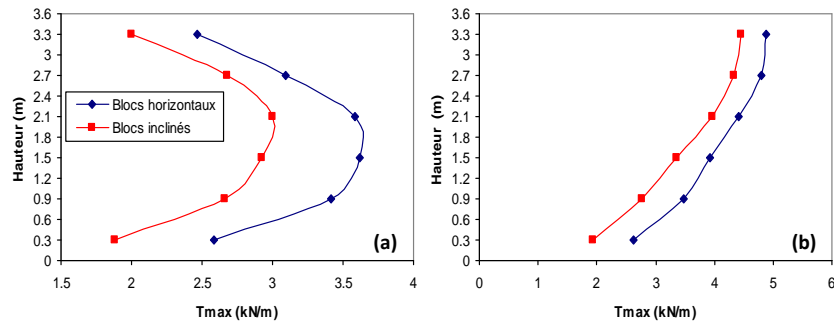


Fig. 6. Forces de traction maximales dans les nappes de géogrilles. (a) en fin de construction (b) après un chargement vertical de 80 kPa.

3.4. Surface critique de rupture

La surface critique de rupture est considérée comme un paramètre important pour déterminer la longueur d’ancrage des géogrilles (Yang et al. 2011). Belabed et al. (2011) et AASHTO (2002), considèrent que la surface critique de rupture est formée en fonction des forces de traction maximales dans les nappes de géogrilles. La figure 7 montre que les blocs inclinés n’affectent pas la surface critique de rupture, c’est-à-dire que l’inclinaison des blocs ne change pas la position de la force de traction maximale dans les nappes de géogrilles.

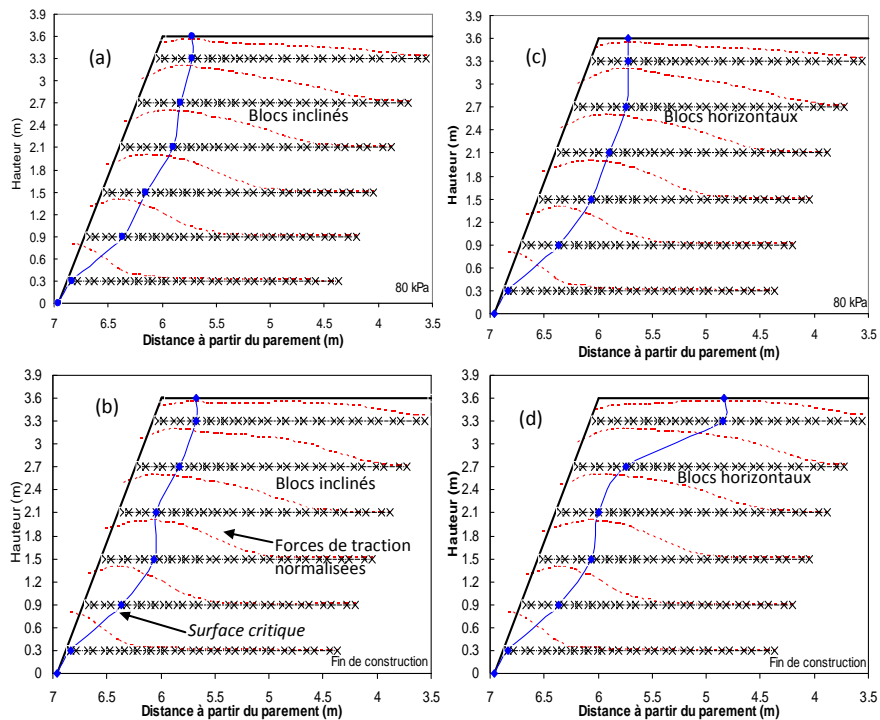


Fig. 7. Surfaces critiques de rupture. (a) et (b) blocs inclinés ; (c) et (d) blocs horizontaux.

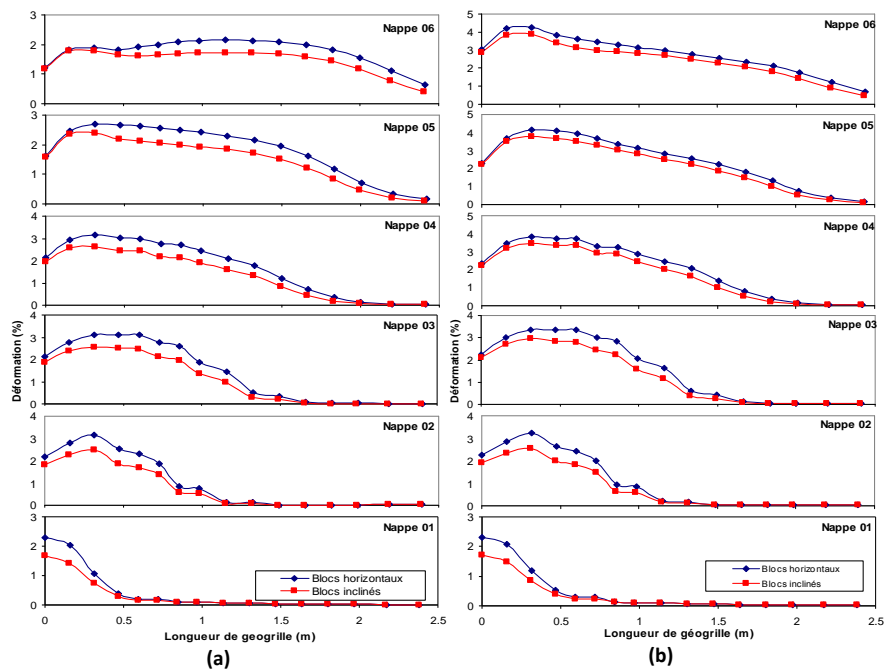


Fig. 8. Déformations des nappes de géogrilles. (a) en fin de construction. (b) après un chargement vertical de 80 kPa.

3.5. Déformation des géogrilles

Yang et al. (2012) ont montré que les déformations maximales apparaissent le long de la surface critique de rupture, c'est-à-dire que les déformations sont maximales où les forces de traction sont maximales. La figure 8 montre que les déformations maximales se trouvent dans la nappe 3 en fin de construction et dans la nappe 6 après le chargement. Les déformations deviennent faibles dans les nappes inférieures, où la contrainte de confinement est considérée élevée. Ainsi, les blocs inclinés contribuent à la réduction des déformations dans les nappes de géogrilles.

4. Conclusions

Afin d'étudier le comportement des ouvrages de soutènement à parement cellulaire renforcés par géogrille la présente étude a déterminé, par des calculs élasto-plastiques, les contraintes normales et de cisaillement entre les blocs, les forces de traction dans les nappes de géogrilles et les surfaces critiques de rupture, en considérant des blocs horizontaux et inclinés en fin de construction et après un chargement vertical. Les résultats de cette étude numérique ont permis de mettre en évidence l'importance de la disposition des blocs. La présente étude a montré que l'inclinaison des blocs réduit le déplacement latéral du parement, les forces de traction et les déformations dans les nappes de géogrilles.

Références

- AASHTO (2002) Standard specifications for highway bridges. 17th ed. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Bathurst, R.J., N. Vlachopoulos, D.L. Walters, P.G. Burgess, T.M. Allen (2006) The influence of facing stiffness on the performance of two geosynthetic reinforced soil retaining walls, *Canadian Geotechnical Journal* 43(12):1225-1237.
- Bathurst, R.J., Y. Miyata, A. Nernheim, T.M. Allen (2008) Refinement of K-stiffness method for geosynthetic reinforced soil walls, *Geosynthetics International* 15(4):269-295.
- Belabed, L., H. Benyaghla, J. Yahiaoui (2011) Internal Stability Analysis of Reinforced Earth Retaining Walls, *Geotechnical and Geological Engineering* 29:443-452
- Chen, J.F., R.J. Bathurst (2013) Investigation of interface toe sliding of reinforced soil block face walls using FLAC. *Proceedings of Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics*, Shanghai, China, Itasca International, 15 p.
- Frank, R. (2014). Eurocode7 on Geotechnical design: a code for soil-structure interaction. *Journal of Applied Engineering Science & Technology*, 1(1), 1-10.
- Hatami, K., R.J. Bathurst (2001) Modeling static response of a segmental geosynthetic reinforced soil retaining wall using FLAC, *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*, Proceedings of the 2nd International FLAC Symposium, Lyon, France, pp. 223-231.
- Hatami, K., R.J. Bathurst (2006) Numerical model for reinforced soil segmental walls under surcharge loading, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(6):673-684.
- Huang, B., R.J. Bathurst, K. Hatami (2007) Numerical study of the influence of block interface stiffness on reinforced soil segmental walls of variable height. *60th Canadian Geotechnical Conference*, Ottawa, Canada, 8 p.

- Huang, B., R.J. Bathurst, K. Hatami (2009) Numerical study of reinforced soil segmental walls using three different constitutive soil models, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(10):1486-1498.
- Huang, B., R.J. Bathurst, K. Hatami, T.M. Allen (2010) Influence of toe restraint on reinforced soil segmental walls, *Canadian Geotechnical Journal* 47(8):885-904.
- Koerner, R.M., T.Y. Soong (2001) Geosynthetic reinforced segmental retaining walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 19(6):359-386.
- Ling, H.I., D. Leshchinsky (2003) Finite element parametric study of the behavior of segmental block reinforced-soil retaining walls. *Geosynthetics International* 10(3):78-94.
- Vieira, CS., M.L. Lopes, L.M Caldeira (2008) Influence of facing panel rigidity on performance of reinforced soil retaining walls: a numerical study. *Proceedings of the 4th european geosynthetics conference*, Edimburg, Scotland, 8 p.
- Yang, K.H., J.G. Zornberg, W.Y. Hung, C.R. Lawson (2011) Location of failure plane and design considerations for narrow geosynthetic reinforced soil wall systems, *Journal of GeoEngineering* 6(1):27-40.
- Yang, K.H., J.G. Zornberg, C.N. Liu, H.D. Lin (2012) Stress distribution and development within geosynthetic-reinforced soil slopes, *Geosynthetics International* 19(1):62-78.
- Yoo, C., S.B. Kim (2008) Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: Full-scale load test and 3D finite element analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 26:460-472.