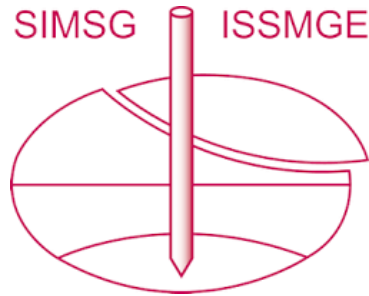


# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Propriétés d'injectabilité de sables par des coulis de ciment fin

## Injectability properties of sands by fine cement grouts

J.-C. Dupla & J. Canou

*CERMES (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées/Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), Paris, France*

D. Gouvenot

*Solétanche Bachy, France*

### RÉSUMÉ

On présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'influence de paramètres significatifs sur l'injectabilité de coulis de ciment dans des matrices sableuses. On s'intéresse en particulier à l'influence de la concentration du coulis en ciment et de la distribution granulométrique des ciments et des sables utilisés sur l'injectabilité. On donne finalement des éléments relatifs aux caractéristiques mécaniques des matériaux injectés après prise, évaluées à partir d'essais de compression simple, et on relie l'hétérogénéité des propriétés mécaniques mises en évidence au phénomène de filtration ayant lieu lors de la phase d'injection.

### ABSTRACT

We present the results of an experimental study on the influence of significant parameters on the injectability of cement grouts in sand matrices. We focus on the influence of the cement concentration of the grout and on the grain size distribution curves of cement and sands used in terms of injectability. Finally, some results are given concerning the mechanical properties of grouted sands, estimated from unconfined compression tests, and the heterogeneity of the mechanical properties related to the filtration phenomenon taking place during the injection phase.

## 1 INTRODUCTION

La technique de traitement par injection de coulis est largement utilisée dans le domaine du génie civil pour améliorer les caractéristiques mécaniques ou diminuer la perméabilité des sols traités (Cambefort, 1967 ; Jessberger, 1983 ; Welsh et Burke, 1991). On dispose de différents types de coulis, selon la nature du terrain à traiter, à savoir les coulis chimiques pour les sols fins et les coulis à base de ciment pour les sols granulaires. Cependant, les coulis chimiques sont de moins en moins utilisés en raison des problèmes de pérennité dans le temps et de toxicité (Gouvenot, 1998). Ils sont remplacés progressivement par des coulis de ciment « surmoulus », afin d'améliorer les caractéristiques de pénétrabilité dans des matrices fines. Mais le coût relativement important de ces ciments, par rapport aux ciments « classiques », nécessite une optimisation des paramètres d'injection, en particulier la granulométrie du ciment et la concentration du coulis en ciment (Shimoda et Ohmori, 1982 ; Arenzana et al., 1989 ; Zebovitz et al., 1989 ; Bouchelaghem, 2001), en fonction des objectifs (résistance minimale, rayon d'influence, etc.).

On présente dans cette communication une étude expérimentale réalisée en laboratoire sur l'injectabilité de coulis de ciment dans des matrices granulaires, à partir d'un dispositif d'injection original (Dupla et al., 2004). Celui-ci présente plusieurs originalités, par rapport aux travaux antérieurs (Zebovitz et al., 1989 ; Christopher et al., 1989 ; Arenzana et al., 1989 ; Schwarz et Kriizek, 1994 ; Biarez et al., 1998 ; Dano, 2001 ; Delfosse-Ribay et al., 2002), à savoir l'utilisation de la technique de pluviation, pour la reconstitution des colonnes de sables, et la mesure des pressions de fluide (eau et coulis) le long de la colonne lors des essais. La technique de pluviation permet de reconstituer des colonnes de sable homogènes avec une très bonne répétabilité (Dupla et al., 2004). En ce qui concerne la mesure des pressions de fluide, elle permet notamment de localiser les niveaux de filtration en fonction des taux d'augmentation de pression.

Après une période de cure du matériau injecté, on évalue les caractéristiques mécaniques de celui-ci à partir d'essais de compression simple. Ces caractéristiques sont reliées aux observa-

tions faites pendant la phase d'injection (filtration).

Finalement, on présente une première étude de l'influence de la concentration en ciment du coulis, de la granulométrie du sable et du type de coulis sur les observations expérimentales réalisées en termes d'injectabilité et de caractéristiques mécaniques des matériaux injectés après prise.

## 2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif d'injection, développé par Dupla et al. (2004), permet de préparer des colonnes de sable par pluviation, de les saturer et de les injecter sur le même dispositif, sans avoir à déplacer la colonne. Un schéma de principe du dispositif d'injection est présenté sur la figure 1. Il se décompose en trois parties, le matériel pour reconstituer les colonnes de sable, le matériel pour fabriquer et caractériser le coulis et le matériel pour les essais mécaniques de compression simple.

Le dispositif d'injection est composé d'un bâti de deux colonnes, équipé d'une traverse support réglable en hauteur. La balance placée sous la colonne permet de mesurer les variations de masse de celle-ci lors des différentes phases de l'essai (pluviation, saturation et injection) (Figure 1).

La colonne de sable contenue dans le tube en Plexiglas a un diamètre de 80 mm et une hauteur de 1040 mm. Le tube est percé de cinq trous équidistants, qui permettent de mesurer les pressions de fluide avec des anneaux spécifiques (Figure 1).

Pour la préparation du coulis, on utilise un malaxeur (type Turbotest) pour la préparation du coulis, une pompe à membrane (type DOSAPRO) pour l'injection (eau ou coulis), et un agitateur aimanté afin de maintenir le coulis en agitation pour éviter la sédimentation.

Le coulis est caractérisé par sa viscosité mesurée à l'aide d'un cône de March et d'un viscosimètre FAN. Sa densité est mesurée avec un densimètre Baroïd et sa ressuée avec un bécher normalisé (59,5 mm de diamètre et 360 mm de hauteur). La courbe granulométrique du coulis est déterminée à l'aide d'un granulomètre laser.

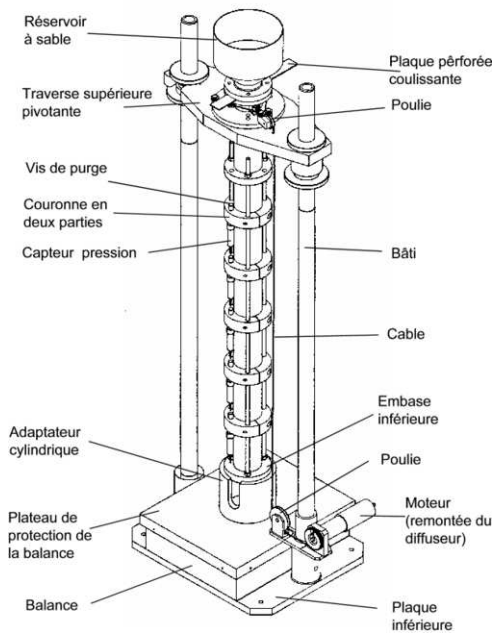


Figure 1. Schéma du dispositif d'injection de colonne

On dispose également de deux balances de précision. La première, d'une capacité de 32 kg (précision de 1 g), placée sous le réservoir contenant le fluide pour l'injection (eau ou coulis), permet de suivre la quantité de fluide injectée par la pompe. La seconde, d'une capacité de 8 kg (précision de 0,01 g) placée sous le réservoir de sortie, permet de suivre la variation de débit en sortie.

Pour l'étude des propriétés mécaniques du sol injecté, on utilise un dispositif d'essai de compression simple (Dupla et al., 2004). Celui-ci se compose d'une presse de 25 t. Le déplacement axial est mesuré à l'aide de trois capteurs de déplacement Mitutoyo (précision 0,003 mm) à 120 degrés. La force est mesurée avec un capteur de 250 kN.

### 3 PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

La procédure d'injection se décompose en quatre phases : reconstitution de la colonne par pluviation, saturation à l'eau désaérée, préparation et caractérisation du coulis et injection.

On étalonne tout d'abord le système de pluviation pour les différents sables utilisés. On obtient ainsi une courbe qui donne la compacité du sable en fonction des paramètres de pluviation (hauteur de pluviation et intensité de déposition).

La phase de saturation est réalisée à l'eau désaérée avec la pompe d'injection (débit contrôlé), et est poursuivie jusqu'à atteindre un volume total d'eau injectée égal à deux fois le volume des vides estimé de la colonne. On doit s'assurer, en particulier, au cours de cette phase, que l'on atteint un régime d'écoulement permanent, ce qui doit se traduire par une stabilisation des pressions interstitielles lues sur les capteurs. On peut alors considérer que la colonne est correctement saturée et l'on évalue alors la perméabilité moyenne de la colonne à partir de la loi de Darcy.

Après cette phase de saturation, on prépare (malaxeur) et on caractérise (densité, ressuée, viscosité) le coulis. Il est ensuite injecté dans la colonne selon la même procédure que celle utilisée lors de la phase de saturation (débit constant).

À la fin de l'injection, la colonne est stockée horizontalement et maintenue dans un bac rempli d'eau pendant une période de cure de 28 jours. La colonne est alors tronçonnée en cinq éprouvettes et la caractérisation physique et mécanique peut être réalisée. Les essais mécaniques en compression simple sont réalisés à déplacement contrôlé (0,2 mm/min).

### 4 PRÉSENTATION DU PROGRAMME D'ESSAIS

Le tableau 1 présente l'ensemble des essais réalisés à débit contrôlé ( $3 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) dans le cadre de ces travaux.

Les sables étudiés dans ce programme sont le sable de Fontainebleau (FB) et le sable S31. Le tableau 2 récapitule les principales caractéristiques de ces sables à savoir le coefficient de Hazen ( $d_{60}/d_{10}$ ), qui donne une information sur l'uniformité de la courbe granulométrique, et le diamètre moyen ( $d_{50}$ ). Le tableau 2 récapitule également les caractéristiques des deux ciments utilisés (Spinor A12 et A6).

Tableau 1 : Caractéristiques générales des essais d'injection sur grande colonne

Essai	Sable <sup>(1)</sup>	Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Coulis <sup>(2)</sup>	C/E
1	FB	1,71	C2F	0,2
2	FB	1,65	C3F	0,2
3	FB	1,70	C2F	0,1
4	S31	1,54	C3F	0,2
5	S31	1,54	C3F	0,1

(1) FB : Sable de Fontainebleau

(2) C2F : Ciment Spinor A12 avec fluidifiant

C3F : Ciment Spinor A6 avec fluidifiant

Tableau 2 : Principales caractéristiques des matériaux utilisés

Matériau	$D_{60}/D_{10}$	$D_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )
Fontainebleau (FB)	1,91	0,19
S31	1,79	0,10
Spinor A12	4,3	4,6
Spinor A6	5	1,3

### 5 RÉSULTATS TYPIQUES

On présente ci-dessous les résultats d'un essai typique avec, tout d'abord, la phase d'injection, puis l'évaluation des caractéristiques mécaniques du matériau injecté.

#### 5.1 L'essai d'injection

Après la mise en place du matériau par pluviation, on procède aux phases successives de saturation et d'injection. Les résultats sont présentés en termes de pressions de fluide mesurées le long de la colonne (six capteurs) (Figure 2) en fonction du temps normalisé ( $t_n$ ). Ce dernier correspond au rapport entre le temps actuel et le temps nécessaire pour saturer la colonne en eau ou en coulis. Quand  $t_n$  est égale à 1, l'eau ou le coulis commence à sortir par le haut de la colonne.

Lors de la phase de saturation (Figure 2a), on observe tout d'abord une augmentation linéaire des pressions qui correspond au remplissage des vides par l'eau jusqu'à  $t_n=1$ . Puis les pressions mesurées sur les six capteurs se stabilisent, ce qui indique qu'on a atteint un régime stationnaire. Par contre, lors de la phase d'injection de coulis (Figure 2b), on n'observe plus cette phase de stabilisation pour la pression mesurée sur le capteur de pompe après le premier passage du coulis. La pression de pompe augmente de façon continue pour atteindre environ 350 kPa à  $t_n=2$  (70 kPa lors de la phase de saturation). Ce phénomène rend compte de la filtration du coulis de ciment par la matrice sableuse. Ceci a pour conséquence de réduire la perméabilité du sable (diminution de la porosité du sable) et d'induire l'augmentation des pressions de fluide le long de la colonne. On remarque également que la filtration a lieu essentiellement dans la partie inférieure de la colonne (sous le capteur n°1).

## 5.2 Les essais de compression simple

Les essais de compression simple réalisés sur les éprouvettes injectées après prise confirment les résultats précédents. La Figure 3 présente les résultats typiques des essais mécaniques obtenus pour l'essai n°1. Les courbes de résistance à la compression simple (Figure 3a) présentent une forme caractéristique que l'on retrouve dans les matériaux rocheux tels que les grès : augmentation rapide de la résistance, passage par un maximum puis chute brutale. Le comportement du sable injecté est intermédiaire entre les comportements fragile et ductile. On observe expérimentalement une fissuration subverticale et un effritement des éprouvettes après le pic de résistance.

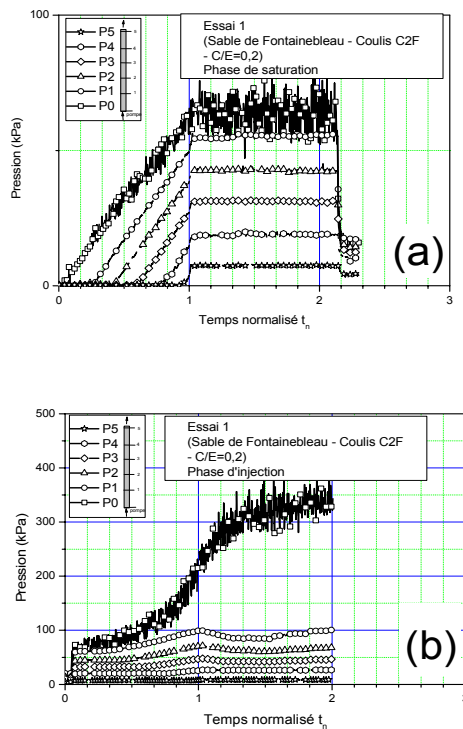


Figure 2. Résultats typiques obtenus pour l'essai N°1 en termes de pressions de fluide : (a) phase de saturation ; (b) phase d'injection

En termes de résistance maximale (Figure 3b), on observe une résistance qui diminue fortement entre le bas et la haut de la colonne (8,7 MPa à 3 MPa). Cette évolution rend compte d'un matériau plus chargé en ciment en partie basse de la colonne, ce qui est en parfait accord avec les observations faites lors de la phase d'injection.

## 6 SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

On présente dans cette partie la synthèse des essais réalisés en termes de pressions mesurées sur le capteur de pompe et de résistance à la compression simple maximale.

### 6.1 Influence de la concentration du coulis en ciment

Ce paramètre joue un rôle important à la fois en termes d'injectabilité du coulis et de résistance mécanique.

Comme on peut le voir sur la Figure 4 (sable de Fontainebleau : essais 2 et 3 ; sable S31 : essais 4 et 5), plus la concentration de ciment est faible et plus la pression d'injection est faible, c'est-à-dire que le coulis passe plus facilement au sein de la matrice. La filtration est donc d'autant plus réduite que le rapport C/E est faible. Par contre, dans le cas du coulis C3F et du sable S31 (Essais 4 et 5), on n'a pas pu injecter la colonne complète pour les deux concentrations testées. En effet, on atteint le critère d'arrêt d'injection (pression de fluide proche de 1

MPa) qui correspond à la limite des capteurs utilisés, avant la saturation complète de la colonne en coulis. En effet, dans le cas de l'essai 4, le coulis s'est arrêté au niveau du capteur 2, et pour l'essai 5 au niveau du capteur 4.

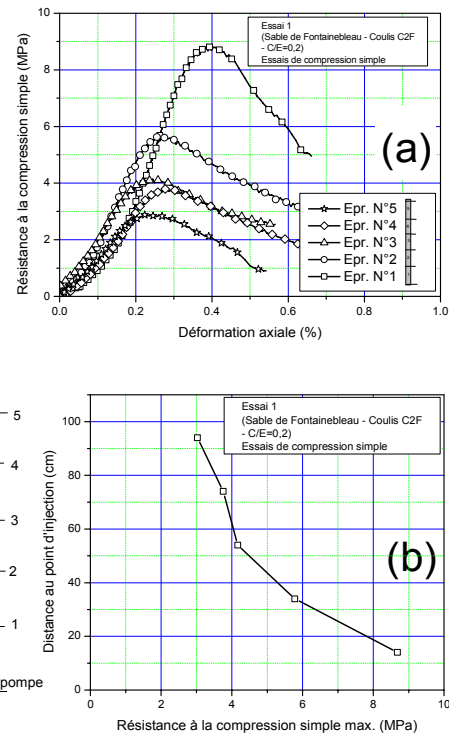


Figure 3. Résultats typiques d'essais de compression simple obtenus pour l'essai N°1 : (a) courbes contrainte-déformation ; (b) résistances maximales en fonction de la distance au point d'injection

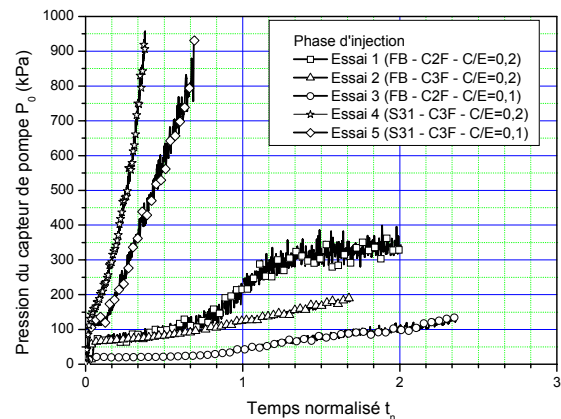


Figure 4. Synthèse des essais réalisés en terme de pression de pompe en fonction du temps normalisé.

En termes de résistance mécanique, on ne présente que les résultats obtenus pour les essais réalisés sur le sable de Fontainebleau (Figure 5), car les colonnes de sable S31 n'ont pas pu être injectées complètement.

Les résultats obtenus en termes de résistances maximales à la compression simple le long de la colonne pour deux concentrations du coulis en ciment retenues (essais 1 et 3) sont en accord avec ceux obtenus en termes de pressions de fluide le long de la colonne. En effet, la résistance le long de la colonne est d'autant plus grande que la concentration du coulis en ciment est impor-

tante. Par contre, on observe une forte diminution de la résistance entre le bas et le haut de la colonne pour la concentration la plus élevée ( $C/E=0,3$  - essai 1) de 8,6 MPa à 3 MPa, alors que dans le cas de l'essai 3 ( $C/E=0,1$ ), on passe de 2,9 MPa à 1,2 MPa. Cette évolution laisse penser que cette différence diminue si on s'éloigne encore plus du point d'injection.

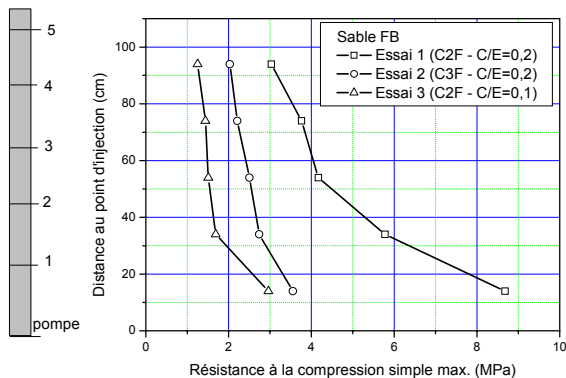


Figure 5. Synthèse des essais réalisés en termes de résistances maximales à la compression simple en fonction de la distance au point d'injection.

Ces évolutions montrent qu'en fonction des objectifs de l'injection (gain de résistance, zone à injecter, etc.), il est possible d'optimiser les paramètres du processus et, plus particulièrement, la concentration du coulis en ciment. Une forte concentration permettra d'obtenir un gain de résistance important près du point d'injection, mais celui-ci diminuera très vite avec la distance. On a également un risque de blocage de l'injection et de claquage du sol (pression d'injection élevée). Dans le cas de concentrations plus faibles, le gain de résistance est plus réduit, mais celui-ci est plus uniforme avec la distance, et on a peu de risque de blocage et de claquage.

## 6.2 Influence du type de ciment

La Figure 4 permet également de comparer l'influence du type de coulis sur l'injectabilité du sable de Fontainebleau (Essais 1 et 2). On observe tout d'abord que les pressions mesurées sur le capteur de pompe pour les deux essais sont très proches jusqu'à  $t_n=0,66$ . Après cette phase, le taux d'accroissement de la pression de pompe augmente rapidement pour l'essai 1 (coulis C2F), alors qu'il reste quasiment constant dans le cas de l'essai 2 (coulis C3F).

En termes de résistance mécanique (Figure 5), on obtient des résultats comparables à ceux obtenus pour les deux concentrations du coulis en ciment.

## 7 CONCLUSIONS

L'objectif des travaux présentés est de mettre en évidence l'influence de paramètres significatifs, tels que la concentration du coulis en ciment et la granulométrie du ciment utilisé, sur les caractéristiques d'injectabilité et mécaniques de deux sables de référence ainsi que sur les caractéristiques mécaniques des matériaux injectés correspondants.

Le dispositif expérimental utilisé présente deux originalités essentielles à savoir la mise en place du sable par pluviation (obtention de colonne homogène et répétable) et la mesure des pressions de fluide le long de la colonne (suivi du processus de filtration).

Le programme d'essais présenté a permis de mettre en évidence l'influence prédominante de la concentration du coulis en ciment à la fois sur le processus d'injection (filtration) et sur la

résistance à la compression simple des éprouvettes injectées. Ces résultats montrent que l'optimisation dans le choix des paramètres ( $C/E$ , granulométrie du ciment) en fonction des objectifs que l'on souhaite atteindre (résistance minimale, rayon d'influence...) est nécessaire et peut permettre de réduire les coûts. En effet, si on souhaite obtenir un gain de résistance moyen sur une distance importante, il est préférable d'utiliser des coulis faiblement chargés en ciment et vice versa.

## RÉFÉRENCES

- Arenzana L., Krizek R. J. and Pepper S. F. 1989. Injection of dilute microfine cement suspensions into fine sands. *Proceedings of the twelfth international conference on soil mechanics and foundation engineering, Rio de Janeiro*, Vol 2, 1331-1334.
- Bouchelaghem, F. 2001. *Injection d'un coulis de microciment à travers un milieu poreux: modélisation et expérimentation*. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- Biarez, J., David, H., Gouvenot, D., Hicher, P.-Y., Taillez, S. et Varjabedian, M. 1998. Comportement mécanique des sols granulaires traités par injection. *Revue Française de génie civil*, 2, No. 2, 225-295.
- Cambefort H. 1967. *Injection des sols. Tome I. Principes et méthodes*. Editions Eyrolles. 394 p.
- Christopher B. R., Atmatzidis D. K. and Krizek R. J.. 1989. Laboratory testing of chemically grouted sand. *Geotechnical Testing Journal*, 12, No 2, 109-118.
- Dano, C. 2001. *Comportement mécanique des sol injecté*. Thèse de doctorat de l'école centrale de Nantes, France.
- Delfosse-Ribay, E., Djeran-Maigre, I., Cabrillac, R. and Gouvenot, D. 2002. Influence of grouts on unconfined creep behaviour of grouted Fontainebleau sand: experimental study and primary creep modelling. *Ground Improvement*, 6, No. 1, 23-37.
- Dupla, J.C., Canou, J and Gouvenot, D. 2004. An advanced experimental set-up for studying monodirectional grout injection process.. *Ground Improvement*, 8, No 3, 91-100.
- Dupla, J.C., Canou, J., Haddi, A. et Gouvenot, D. 2004. Influence du rapport C/E sur les caractéristiques mécaniques d'un sable injecté par un coulis de ciment. *Symposium Int. sur l'amélioration des sol en place*, Paris, 413-421.
- Gouvenot, D. 1998. State of the art in European grouting. *Ground Improvement*, 2, 51-67.
- Jessberger, H. L. 1983. Soil grouting general report. Improvement of ground. *Proceeding of the 8th European conference on soil mechanics and foundation engineering*. Helsinki, Vol 3, 1069-1078.
- Schwarz, L. G. and Krizek, R. J. 1994. Effect of preparation technique on permeability and strength of cement-grouted sand. *Geotechnical testing journal* 17, No 4, 434-443.
- Shimoda, M. and Ohmori, H. 1982. Ultra fine grouting material. *Grouting in geotechnical engineering*, 77-91. ASCE, New York.
- Welsh, J. P. and Burke, G. K. 1991. Jet grouting: uses for soil improvement. *Proceedings of the Geotechnical Engineering Congress*, pp. 334-345.
- Zebovitz S., Krizek R. J. and Atmatzidis D. K. 1989. Injection of fine sands with very fine cement grout. *Journal of geotechnical engineering* 115, No 12, 1717-1733.