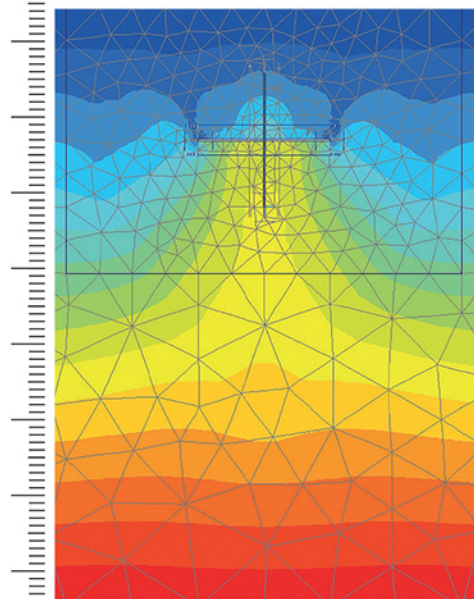


Andrea Dominijanni
Mario Manassero

AMÉLIORATION DES SOLS PAR INJECTIONS DE RÉSINE EXPANSIVE

Guide de conception

EYROLLES



AMÉLIORATION DES SOLS PAR INJECTIONS DE RÉSINE EXPANSIVE

Guide de conception

Andrea Dominijanni & Mario Manassero

Traduit et adapté de l'italien sous la direction de Nicolas Faure

La **reprise d'un ouvrage en sous-œuvre** imposait souvent des travaux lourds et coûteux. Parmi les techniques moins invasives mises au point par les spécialistes du secteur, l'amélioration des sols par injections de résine expansive se révèle particulièrement efficace.

Employée pour consolider les sols des fondations d'un ouvrage, l'injection de résine expansive est une technique désormais bien connue de l'ensemble des professionnels de la construction intervenant dans les travaux de **préservation**, de **restauration** ou de **réhabilitation**.

Néanmoins — afin de mieux appréhender tout le potentiel de cette technique inventée voici près d'une vingtaine d'années — les **mécanismes de diffusion et d'interaction avec le sol** de la résine qui y est injectée (résine polyuréthane) restaient encore à préciser.

À cette fin, deux chercheurs de l'École polytechnique de Turin, Mario Manassero et Andrea Dominijanni, ont conduit

une **étude théorique et expérimentale** dont les résultats sont publiés ici ; financée par la société Uretek, cette étude porte sur les effets de l'injection de résine expansive, dans les sols fins comme dans les sols grossiers.

À la suite des récents progrès réalisés dans la **modélisation théorique et expérimentale des milieux poreux et particuliers**, les auteurs proposent notamment dans ce livre un premier cadre théorique général pour la modélisation analytique et numérique de ce type d'injections ; dans leurs recherches ils se sont par ailleurs appuyés sur le procédé Uretek Deep Injections®, seul procédé d'amélioration des sols faisant l'objet d'un **avis technique du CSTB** (avis technique 3/15-796). C'est ainsi qu'après avoir étudié différentes configurations d'injection, les auteurs montrent comment réaliser une opération de consolidation à l'aide de la technologie Uretek Deep Injections® dans le but d'**atténuer les effets induits par une activité sismique**.

Andrea Dominijanni, chargé de recherche en géotechnique environnementale et enseignant, exerce à l'École polytechnique de Turin. Spécialiste des phénomènes de transport et du comportement mécanique des sols fins, il est l'auteur de nombreuses publications scientifiques. Il a notamment travaillé sur la **modélisation numérique des travaux géotechniques** et sur les **mesures de protection de l'environnement**.

Mario Manassero est professeur de mécanique des sols à l'École polytechnique de Turin. Ses principaux thèmes de recherche sont liés à l'étude théorique et expérimentale de la mécanique des milieux poreux, la caractérisation géotechnique des sols in situ, la consolidation et le renforcement des sols, le contrôle et l'extraction des contaminants du sol et, en particulier, les processus d'interactions physico-chimiques entre le squelette solide du sol et les fluides interstitiels. Il **préside depuis 2001 le Comité technique de la Société internationale de mécanique des sols et de géotechnique** (ISSMGE) dédié à la géotechnique environnementale.

Chez le même éditeur :

Daniel Faisantieu, *Prévention des désordres liés au sol dans la construction*, coédition Eyrolles/Ginger CATED

Victor Davidovici & Serge Lambert, *Fondations et procédés d'amélioration du sol. Guide d'application de l'Eurocode 8*, coédition Eyrolles/Afnor

Olivier Celnik & Éric Lebègue, *BIM et maquette numérique d'architecture*, coédition Eyrolles/CSTB

PUBLICS

Professionnels et futurs professionnels de la construction (bâtiment, génie civil, travaux publics) dont :

Ingénieurs et techniciens des bureaux d'études géotechniques • Experts judiciaires • Architectes
• Maîtres d'œuvre • Entrepreneurs

www.editions-eyrolles.com

Andrea Dominijanni
Mario Manassero

Amélioration des sols par injections de résine expansive

Guide de conception

EYROLLES



Table des matières

Chapitre 1. Propriétés physiques et mécaniques des résines polyuréthanes	1
1. Résines polyuréthanes expansives	1
2. Propriétés mécaniques et hydrauliques des résines polyuréthanes..	5
3. Injection de résines Uretek dans les sols.....	6
Chapitre 2. Critères de conception	9
1. Introduction.....	9
2. Remplissage des cavités.....	10
3. Réduction de la conductivité hydraulique.....	11
4. Allègement	13
5. Amélioration des propriétés mécaniques.....	14
6. Relevage.....	19
Chapitre 3. Autres typologies d'injections et comparaisons	23
1. Introduction.....	23
2. Injections par imprégnation.....	24
3. Injections solides (injections de compactage).....	24
4. Injections pour le contrôle et la compensation des affaissements....	27
Chapitre 4. Modèles théoriques	31
1. Introduction.....	31
2. Comportement de la résine dans le sol.....	32
3. Modèles théoriques pour les sols à grains grossiers	38
3.1. Effet de pénétration initial	38
3.2. Détermination de la pression d'équilibre	46

3.3. Variation de l'état de contraintes dans le sol.....	51
3.4. Variation de l'état de déformation du sol.....	52
4. Modèles théoriques pour sols à grains fins.....	53
4.1. Critères d'apparition du phénomène de fracturation.....	53
4.2. Critères de propagation des fractures.....	56
4.3. Soulèvements induits par des injections de résine.....	59
5. Conclusion.....	60

Chapitre 5. Modèles numériques 61

1. Introduction.....	61
2. Interventions par injection solide.....	62
2.1. Expansion de la cavité sphérique.....	62
2.2. Expansion de la cavité cylindrique.....	70
2.3. Effets induits dans le sol par des injections rapprochées.....	76
3. Intervention de récupération des affaissements.....	82
4. Conclusion.....	97

Chapitre 6. Risque de liquéfaction 99

1. Introduction.....	99
2. Évaluation du risque de liquéfaction.....	99
2.1. Évaluation du taux de contrainte cyclique (CSR).....	101
2.2. Évaluation du taux de résistance cyclique (CRR).....	103
2.3. Indice du potentiel de liquéfaction.....	109
3. Exclusion de la vérification du risque de liquéfaction.....	110
4. Mesures d'atténuation du risque de liquéfaction.....	112

Chapitre 7. Exemples de calcul 119

1. Introduction.....	119
2. Injections de résines expansives dans les sols à grains grossiers.....	119
2.1. Injections de résines fortement expansives.....	119
2.2. Injections de résines moins expansives.....	124
3. Injections de résines expansives dans les sols à grains fins.....	128

Annexe A. Théorie de l'expansion d'une cavité dans le sol 131

1. Introduction et définition du problème	131
2. État de contraintes et de déformations dans des conditions purement élastiques.....	133
2.1. Cavité cylindrique	133
2.2. Cavité cylindrique ou sphérique	135
3. État de contraintes et de déformations dans des conditions élasto-plastiques.....	135
3.1. Estimation de la pression d'avant la plastification.....	137
3.2. Approche par « analyse du sol aux petites déformations »	137
3.3. Approche par « analyse du sol aux grandes déformations ».....	143

Annexe B. Les mécanismes de fracturation dans le sol 147

1. Introduction et définition du problème	147
2. Fracturation du sol en condition non drainée.....	147
3. Fracturation du sol en condition drainée.....	152

Bibliographie 155

Propriétés physiques et mécaniques des résines polyuréthanes

1. Résines polyuréthanes expansives

Les polymères d'uréthane, ou polyuréthanes, forment une grande famille de polymères qui se caractérisent par diverses propriétés physiques, notamment leur capacité d'expansion (gonflement).

La réaction chimique pour la synthèse des polyuréthanes a été découverte en 1947 par Bayer. Les résines polyuréthanes expansives sont produites lors d'une réaction exothermique entre un polyol et un isocyanate, mélangés dans des proportions volumiques établies en fonction de caractéristiques de production spécifiques. Au cours de la réaction, une grande quantité de dioxyde de carbone est générée, ce qui provoque l'expansion volumétrique du mélange et la formation d'une structure spongieuse, dans laquelle les bulles de gaz sont piégées. La production de dioxyde de carbone implique nécessairement la présence d'eau, laquelle réagit avec le groupe isocyanate; sans eau, il est nécessaire de recourir à un agent d'expansion liquide, chimiquement inerte et avec un faible point d'ébullition, qui se vaporise en exploitant une partie de la chaleur de polymérisation.

Dans un laps de temps très restreint (de quelques secondes à quelques minutes), le mélange durcit passant de l'état liquide à l'état solide. Le temps de réaction, qui dépend des caractéristiques de la résine et de l'utilisation, entre autres, de catalyseurs, est influencé par la température des composants mélangés. En conséquence, le contrôle de la température des composants permet d'accélérer ou de retarder le temps de réaction.

La pression exercée pendant le gonflement et la densité finale de la résine dépendent de la capacité d'expansion que possède le gaz contenu dans les bulles, avant le durcissement. La structure à «cellules fermées» de la résine expansive est représentée sur la **figure 1.1**, qui regroupe les images obtenues au microscope électronique par Buzzi *et al.* (2008). Les images reproduisent la structure microscopique de la résine utilisée par Uretek (Canteri, 1998) dans le domaine géotechnique, dans des conditions de gonflement libre, auxquelles correspond une densité égale à 37 kg/m^3 . Dans ces conditions, le volume expansé est égal à trente fois le volume initial du mélange (Dei Svaldi *et al.*, 2005; Buzzi *et al.*, 2008; Buzzi *et al.*, 2010).

La densité du mélange à l'état liquide est égale à $1\,070 \text{ kg/m}^3$ et est très proche de celle de l'eau ($= 1\,000 \text{ kg/m}^3$). La résine expansée est, au contraire, caractérisée par une densité sensiblement plus faible, qui dépend de la pression de gonflement.

1. Introduction

Au cours des dernières années, les techniques d'injection à l'aide de résines polyuréthanes se sont perfectionnées (Foti & Manassero, 2009); et aujourd'hui, elles sont employées dans de nombreuses applications (**figure 2.1**), notamment :

- le comblement et la stabilisation de cavités souterraines;
- le déplacement d'eau et la réduction de la conductivité hydraulique;
- l'allègement des charges pour des couches de terrain situées sous le volume de sols traités, afin d'en limiter l'affaissement;
- la consolidation des sols, pour augmenter la rigidité et la résistance au cisaillement;
- le relevage des fondations et des dallages, pour la reprise des affaissements.

Le présent chapitre décrit brièvement les critères de conception des interventions de consolidation effectuées à l'aide d'injections de résine polyuréthane expansive, en fonction de leur finalité.

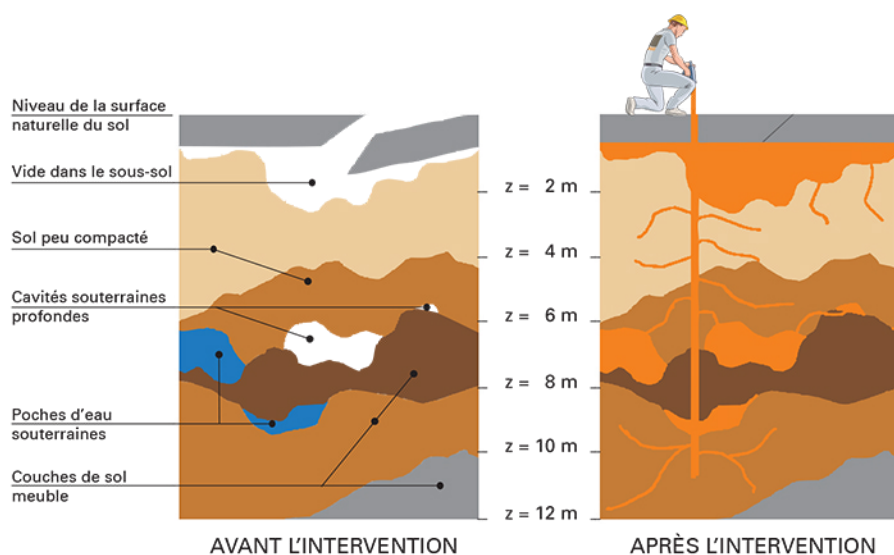


Figure 2.1 Application d'injections de résine polyuréthane (adaptation d'après www.uretekusa.com).

Autres typologies d'injections et comparaisons

1. Introduction

Le présent chapitre prend en compte les possibilités d'utilisation des techniques d'injection de résines polyuréthanes expansives en faisant, en outre, quelques comparaisons avec les techniques d'injection traditionnelles les plus courantes actuellement.

En général, les traitements des terrains par des techniques d'injection peuvent être classés de manière synthétique en :

- injections par imprégnation (ou *permeation grouting*) pour la réduction de la conductivité hydraulique et le renforcement des terres ;
- injections de compactage (ou *compaction grouting*) pour la consolidation des sols ;
- injections de compensation (ou *compensation grouting*) pour le contrôle et la récupération des affaissements de bâtiments et d'autres structures.

Les finalités et les objectifs des traitements, en plus des caractéristiques hydrogéologiques et géotechniques du sous-sol, constituent les éléments fondamentaux pour faire les choix les plus opportuns et les plus judicieux au regard du type de système et des composés d'injection à utiliser.

Les techniques traditionnelles d'injection font généralement appel à un mélange d'eau et de ciment (avec des additifs fluidifiants), à des composés de silicate ou à des résines (non expansives).

En présence des mêmes caractéristiques rhéologiques des mélanges, les techniques traditionnelles d'injection permettent le contrôle opérationnel du traitement uniquement à travers le réglage de la pression et des débits à la sortie du système de pompage.

Par contre, comme cela a déjà été montré dans le chapitre 1, les résines polyuréthanes se caractérisent par de remarquables propriétés de gonflement qui se développent durant le processus de solidification. Par conséquent, à la suite de la phase d'injection et de propagation dans le sol en conditions fluides, l'expansion de la résine continue jusqu'à atteindre l'équilibre des contraintes avec le sol environnant au moment où la pression de gonflement de la résine, dérivant de la réaction de synthèse, coïncide avec la pression moyenne de confinement du matériau environnant.

Cette caractéristique particulière des résines polyuréthanes offre des possibilités opérationnelles intéressantes de réglage et de contrôle du traitement, mais nécessite, pour sa mise au point et son calibrage, des connaissances et des expériences approfondies en ce qui concerne les caractéristiques rhéologiques du mélange d'injection et celles géotechniques du terrain environnant.

Modèles théoriques

1. Introduction

Les injections de résines polyuréthanes expansives s'utilisent majoritairement dans la plupart des interventions visant à améliorer les propriétés mécaniques des sols et à remédier aux affaissements, complets et/ou différentiels, des fondations superficielles.

L'approche théorique adoptée dans la conception de ces interventions dépend de la granulométrie du sol dans lequel est réalisé le traitement de consolidation.

Dans le cas des sols à grains grossiers (sable moyen/grossier et graviers), la conductivité hydraulique est suffisamment élevée pour permettre à la résine de pénétrer dans les pores et d'entraîner la formation d'un bulbe constitué d'un mélange sol-résine. L'expansion de ce bulbe se poursuit jusqu'à atteindre des conditions d'équilibre avec les contraintes de confinement générées dans le sol environnant.

Dans le cas des sols à grains fins (sable fin, limon et argile), la résine ne réussit pas à pénétrer dans les pores et, par conséquent, son expansion provoque la formation de fractures, dont la direction dépend principalement de l'homogénéité et de l'isotropie du sol ainsi que de l'état de contraintes initial. La résine se propage dans les fractures, ce qui entraîne des variations de l'état de compaction et des déplacements significatifs dans le sol environnant.

Pour l'analyse des effets produits par les injections de résines polyuréthanes, les conditions de drainage sont d'une importance capitale, et sont elles aussi fonction de la granulométrie du sol traité.

Les sols à grains grossiers sont supposés être en condition drainée, puisque la dissipation des surpressions interstitielles générées par l'expansion du bulbe injecté se révèle très rapide.

Dans les sols à grains fins, en revanche, l'expansion de la résine se produit en condition non drainée, avec formation de surpressions interstitielles, dont la dissipation s'effectue dans un laps de temps appréciable. Il s'ensuit, dans ce cas, des variations de l'état de contraintes qui se produisent au fil du temps, et peuvent nécessiter l'exécution d'injections différées dans le temps afin d'atteindre les objectifs de consolidation prédéfinis. Comme l'évaluation des surpressions interstitielles générées dans le sol par l'expansion de la résine s'avère très difficile, on a généralement recours à une analyse en termes de contraintes totales, dans laquelle le sol est assimilé à un milieu à phase unique, caractérisé par un critère de rupture de Tresca (matériau purement cohésif). De cette façon, il est possible d'estimer les effets à court terme produits par les injections, à la fois en termes de variation de l'état de contraintes et en termes de déplacements induits dans le sol.



Modèles numériques

1. Introduction

Ce chapitre décrit certaines analyses effectuées au moyen du logiciel Plaxis 2D afin de simuler les effets induits dans le sol par des injections localisées de résines expansives.

Les analyses effectuées peuvent être considérées comme des références, par exemple, pour la modélisation aux éléments finis des interventions effectuées au moyen d'injections de résines polyuréthanes afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol (*compaction grouting*, ou injection solide) ou de reprendre en sous-œuvre des tassements excessifs de fondations superficielles (*compensation grouting*, ou injection de compensation).

Le logiciel Plaxis 2D est un logiciel de calcul aux éléments finis à deux dimensions, permettant de simuler le comportement du sol en fonction des variations de l'état de contraintes et de déformations en différents points du sol et dans les éventuels éléments de structure avec lesquels il interagit. Il s'utilise habituellement pour effectuer des analyses de déformation et de stabilité dans le cadre de multiples applications géotechniques et permet de simuler des situations réelles se rapportant à des déformations planes (*plane strain*) ou à des déformations axisymétriques (*axisymmetric*).

Le comportement mécanique du sol peut être simulé au moyen des modèles de comportement suivants :

- Modèle linéaire élastique – Simule le comportement d'un milieu élastique linéaire isotrope. Ce modèle implique de définir deux paramètres de déformabilité dans le domaine élastique : le module d'Young (E) et le coefficient de Poisson (ν).
- Modèle de Mohr-Coulomb – Simule le comportement d'un milieu élastique linéaire isotrope parfaitement plastique. En plus des paramètres de déformabilité dans le domaine élastique, E et ν , il est nécessaire de définir des paramètres de résistance, à savoir : cohésion effective (c'), angle de frottement (φ') et angle de dilataance (ψ).
- Modèle Jointed-Rock – Simule le comportement d'un milieu élasto-plastique anisotrope le long des plans de discontinuité.
- Modèle Hardening-Soil – Modèle hyperbolique de type élasto-plastique permettant d'examiner les variations de la rigidité du sol en fonction de l'état de contraintes et du degré de consolidation.
- Modèle Hardening-Soil Small – Modèle analogue au modèle Hardening-Soil permettant de différencier le comportement du sol en petites déformations de son comportement en grandes déformations.
- Modèle Cam-Clay modifié – Modèle simplifié adopté pour simuler le comportement des sols cohésifs normalement consolidés.

Risque de liquéfaction

1. Introduction

Le succès des interventions de consolidation par le biais d'injections de résine Uretek doit être vérifié *a posteriori* de manière adéquate, grâce à une comparaison entre les paramètres obtenus lors des essais effectués avant et après l'intervention de remise en état. Ces essais peuvent inclure des essais en laboratoire ou, plus fréquemment, des essais *in situ*, tels que par exemple des essais de pénétration statique et dynamique.

À partir de ces essais, il est possible de procéder à une vérification de la sécurité du sol de fondation traité avec des résines expansives, dans l'optique de confirmer son adéquation par rapport aux charges transmises par les fondations dans des conditions sismiques. En particulier, il est possible d'évaluer le risque de liquéfaction du sol sous l'action d'un séisme, conformément aux normes sismiques européennes (norme EN 1998, 2005, Eurocode 8).

Il convient de noter que le phénomène de liquéfaction concerne uniquement certains types de dépôts ou formations géologiques. Nous n'étudions ici que les sols à grains grossiers (sables et graviers), meubles, saturés. En effet, ces sols, même lorsqu'ils sont secs, peuvent subir un compactage lors d'un événement sismique lié à l'action des cycles de charges-décharges. L'ampleur de ce phénomène est liée au degré de compactage initial du sol considéré, aux contraintes de confinement (profondeur), à la magnitude de la secousse sismique et à sa durée (Lai *et al.*, 2009).

Dans le cadre des études d'ingénierie, il est nécessaire d'évaluer la sensibilité à la liquéfaction d'un dépôt de sol et son risque effectif de survenue, par rapport à un mouvement sismique attendu, étant donné que les conséquences de ce phénomène, en termes d'affaissements ou d'éventuels phénomènes d'instabilité, sont particulièrement graves.

2. Évaluation du risque de liquéfaction

Dans un sol à grains grossiers, peu compact, saturé, le phénomène de liquéfaction induit par une secousse sismique implique une perte partielle ou totale de la résistance au cisaillement et de la rigidité, à la suite de l'augmentation de la pression interstitielle qui peut s'accompagner d'une forte réduction, voire même de l'annulation, des efforts effectifs du sol, ce qui entraîne un effondrement ou des déformations permanentes significatives.

Étant donné que l'application d'un effort de cisaillement entraîne, dans des conditions non drainées, le développement de pressions interstitielles positives dans les sols où il se manifeste, et, dans des conditions drainées, une diminution de volume, la sensibilité à la