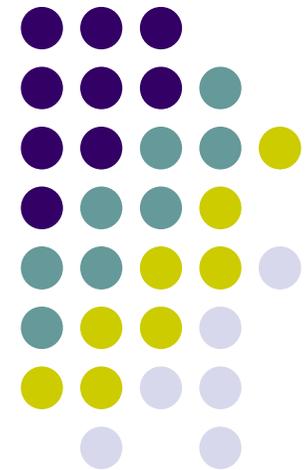


AFPS

GROUPE DE TRAVAIL

Amélioration et Renforcement
de sol sous actions sismiques

CFMS-AFPS Journée technique 24 mars 2010
- LIQUEFACTION -



Patrick BERTHELOT

patrick.berthelot@fr.bureauveritas.com

INTRODUCTION



Nombre de réunions : groupe + sous-groupes

2009 : 10 réunions

2010 : déjà 4 réunions

Prévision initiale de remise du document: fin 2009

Difficultés rencontrées:

- Référentiel initial PS 92/Fascicule 62 maintenant les Eurocodes
- Décalage des autres groupes de travail (Asiri, Eoliennes)
- Traitement par Inclusions



Avancement des Chapitres

CHAPITRE 1 : GENERALITES / INTRODUCTION / OBJET

95 %

CHAPITRE 2 : RETOURS D'EXPERIENCE

95 %

**CHAPITRE 3 : TECHNIQUES D'AMELIORATION ET
RENFORCEMENT DE SOL**

95 %

**CHAPITRE 4 : RECONNAISSANCES ET ÉTUDES DE SOL
ADAPTATION AUX OUVRAGES**

70 %

**CHAPITRE 5 : FONDATIONS SUR SOL RENFORCÉ SOUS
SOLLICITATIONS SISMIQUES**

80 %

CHAPITRE 2 : RETOURS D'EXPERIENCE

Techniques utilisées



- Vibrocompactage
- Compactage dynamique
- Injection de coulis et mortier
- Drains en gravier ou de sable

68 sites **TRAITEMENT DANS LA MASSE**

- Colonnes ballastées
- Plots ballastés

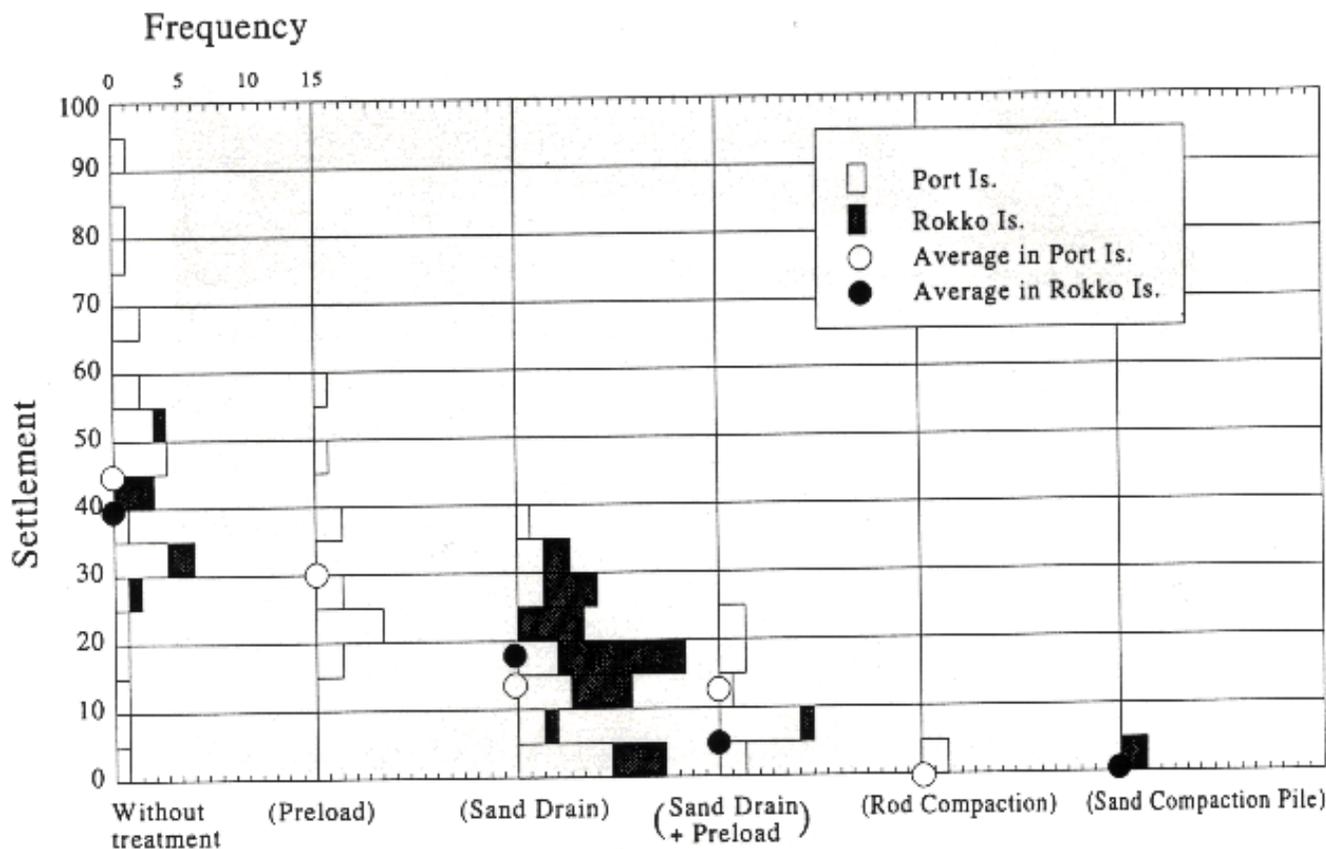
25 sites **INCLUSIONS SOUPLES**

- Colonnes ou paroi continue de sol malaxé et traité au ciment
- Jet Grouting

7 sites **INCLUSIONS RIGIDES**



Enseignements tirés des Retours d'expérience

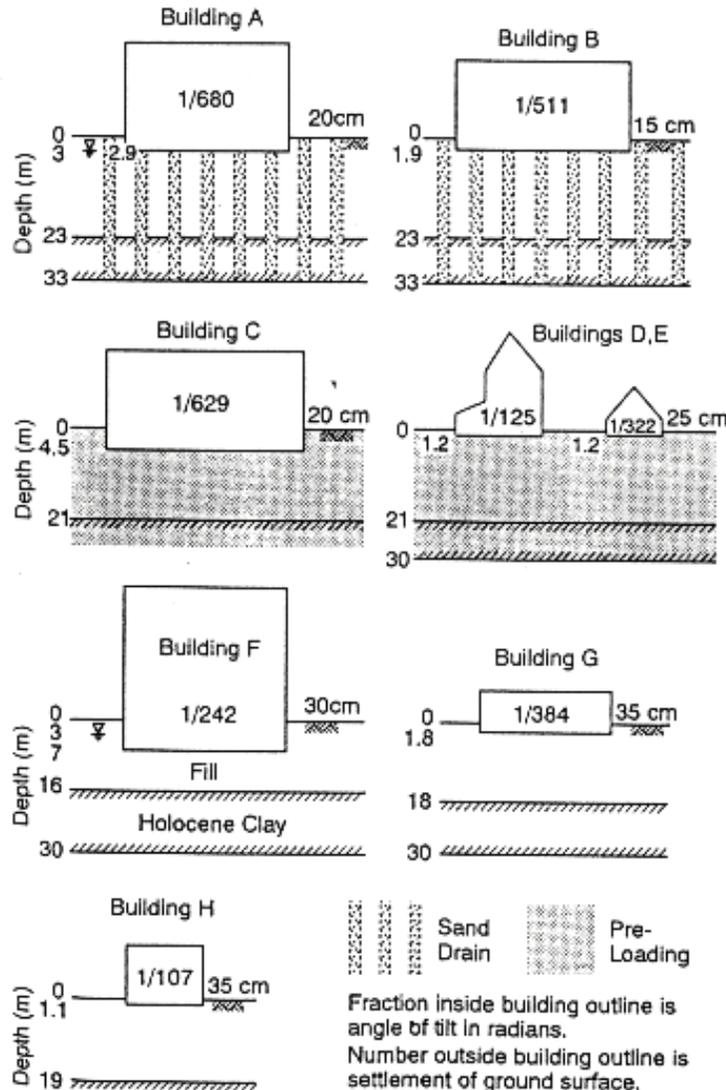
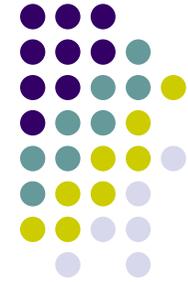


Great Hanshin
Earthquake
D'après UNCRD 1995

*Sites Port Island
et Rokko Island
Sols sensibles à
la liquéfaction*

+ de traitement de sol et + de compacité ► moins de tassement

Enseignements tirés des Retours d'expérience



Site de Kobé : immeubles d'habitation 5,14 et 21 étages

Les sols traités (A,B,C,D et E) ont présentés des tassements absolus et différentiels plus faibles que les sols non traités (F,G et H)

$1/107 = \text{angle d'inclinaison en radians}$

$35 \text{ cm} = \text{tassement observé en surface}$

● CHAPITRE 3 : TECHNIQUES D'AMÉLIORATION ET RENFORCEMENT DE SOL



3.1 Amélioration de sol dans la masse

- 3.1.1 Préchargement et drainage
- 3.1.2 Vibrocompactage
- 3.1.3 Compactage dynamique
- 3.1.4 Injection solide

<u>a.</u>	<u>Description</u>
<u>b.</u>	<u>Fonctionnement et</u> <u>champs d'application</u>
<u>c.</u>	<u>Reconnaitances</u> <u>spécifiques</u>
<u>d.</u>	<u>Contrôles</u>

3.2. Amélioration et renforcement de sol par inclusions souples

- 3.2.1 Colonnes ballastées
- 3.2.2 Substitution dynamique

3.3. Renforcement de sol par inclusions rigides

3.4. Autres techniques

- 3.4.1 Inclusions de type colonne malaxée et traitée (Deep Soil Mixing)
- 3.4.2 Jet grouting



- **CHAPITRE 4 : RECONNAISSANCES ET ETUDES DE SOL**

- 4.1 Introduction

- 4.1.1 Généralités

- 4.1.2 la Liquéfaction

- 4.2 La mesure des paramètres « in situ »

- 4.3. La mesure des paramètres en laboratoire

- 4.4. Corrélations

- 4.5. Moyens de reconnaissance (tableau de synthèse)

- 4.6 Adaptation de la Reconnaissance aux types d'ouvrage

- 4.7. *Liquéfaction*

- * *utilisation de la V_s*

- * *utilisation des essais de laboratoire*

- * *utilisation du SPT*

- * *utilisation du CPT*

- * *utilisation du piézocône*

- 4.8. Evaluation des caractéristiques après amélioration et renforcement des sols

Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1 Préambule

**Objectif de l'amélioration et du renforcement de sol:
fonder l'ouvrage sur des fondations superficielles**

Selon l'Eurocode 8, à partir des descentes de charges sismiques communiquées, il est nécessaire de vérifier les points suivants aux ELU :

5.1.1 Non rupture par glissement

5.1.2 Non rupture par perte de capacité portante

Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3 Traitement contre la liquéfaction

Selon le procédé retenu, le potentiel de liquéfaction peut être réduit :

- ✓ en augmentant la compacité du sol – augmentation de CRR (cf. § 4.7.1.1.1.1) [préchargement avec ou sans drains, vibrocompactage, compactage dynamique, injection solide,...] ;
- ✓ en drainant (mise en place de drains) ;
- ✓ en confinant le sol liquéfiable (surcharge permanente sur le sol, avec ou sans substitution de surface, avec ou sans caissonnage...)
- ✓ en diminuant la contrainte de cisaillement dans le sol - diminution de CSR (cf. § 4.7.1.1.1.1)

On cherche à augmenter le rapport CRR/CSR jusqu'à une valeur supérieure à 1,25 (Eurocode 8- partie 5 ; NA 1998-5).

Soit on cherche à augmenter CRR, soit on cherche à diminuer CSR, ou les deux.

Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3.2 Augmentation de CRR [augmentation de la compacité du sol]

L'augmentation de la compacité du sol permet d'augmenter sa résistance au cisaillement et de ce fait entraîne une réduction du risque de liquéfaction.

La vérification de l'efficacité du traitement nécessite les étapes suivantes :

- identifier la couche liquéfiable et évaluer le risque de liquéfaction
- choisir la méthode d'amélioration la plus appropriée et définir les objectifs à atteindre c-à-d $F_s > 1.25$:
 - * plus grande densification des matériaux : augmentation de D_r , de q_c et de N
- réaliser une campagne de reconnaissance du sol traité avec des moyens de contrôle identiques à ceux ayant permis de caractériser l'état initial
- vérifier les résultats obtenus / aux objectifs fixés

Dans un sol composite on ne doit pas calculer la résistance au cisaillement du sol par la somme de la résistance au cisaillement de ses composants

Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3.3 Drainage

Afin d'éviter la liquéfaction, un système de drainage n'est efficace que si sa capacité de dissipation est plus importante que la génération des pressions interstitielles.

On ne traite que les drains de sable ou de gravier ou tubulaires. On exclut les drains plats préfabriqués.

Si les propriétés du drainage sont utilisés pendant le séisme, il faut vérifier leur pérennité au cours de la vie de l'ouvrage.

Il existe 3 approches pour dimensionner de tels dispositifs :

- Les méthodes couplées sol = milieu diphasique et prise en compte des interactions « squelette solide eau »

- les méthodes découplées qui négligent ces interactions et résolvent le problème pour chaque composante séparément. Equations de Seed et Booker (1977) et abaques de Booker et al (1976) et de A. Onoue (1988).

- les méthodes semi-couplées qui calculent les pressions interstitielles pour chaque cycle

Le drainage n'améliore pas les paramètres mécaniques des sols en place.

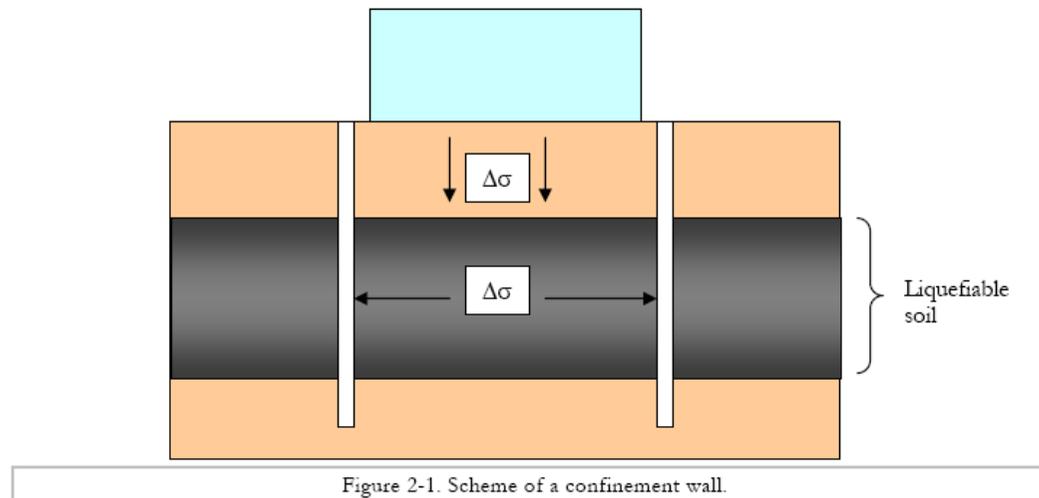
Les eaux évacuées par le tapis drainant peuvent engendrer des sous-pressions sous la structure.

Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3.4 Confinement

Ce principe consiste à confiner le sol entre des parois rigides; ce qui permet de réduire les efforts transmis au sol confiné et de limiter l'écoulement latéral. Réduction du risque de liquéfaction.



Essais à la table vibrante de Yasuda et al (1992)

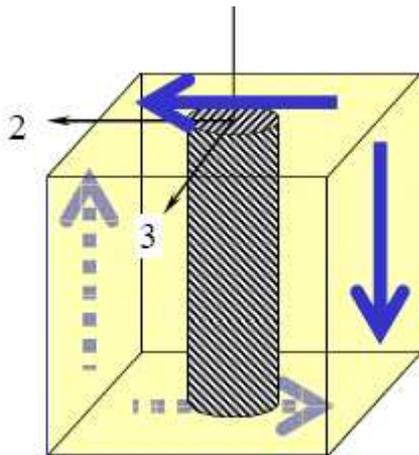
Méthodes de calcul développées par R. V. Siddharthan et A. Porbaha

Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3.5 Diminution de CSR - diminution de la contrainte de cisaillement dans le sol

« amélioration » de G



G_L : module de cisaillement longitudinal homogénéisé (plan 2 ou 3) du composite sol renforcé par inclusions avec

η facteur de substitution

G_s module de cisaillement du sol

G_c module de cisaillement de l'inclusion

La valeur de G_L est encadrée par les bornes de Voigt et Reuss soit :

$$\left(\frac{1-\eta}{G_s} + \frac{\eta}{G_c} \right)^{-1} = \langle 1/G \rangle^{-1} \leq G_L \leq \langle G \rangle = (1-\eta)G_s + \eta G_c$$

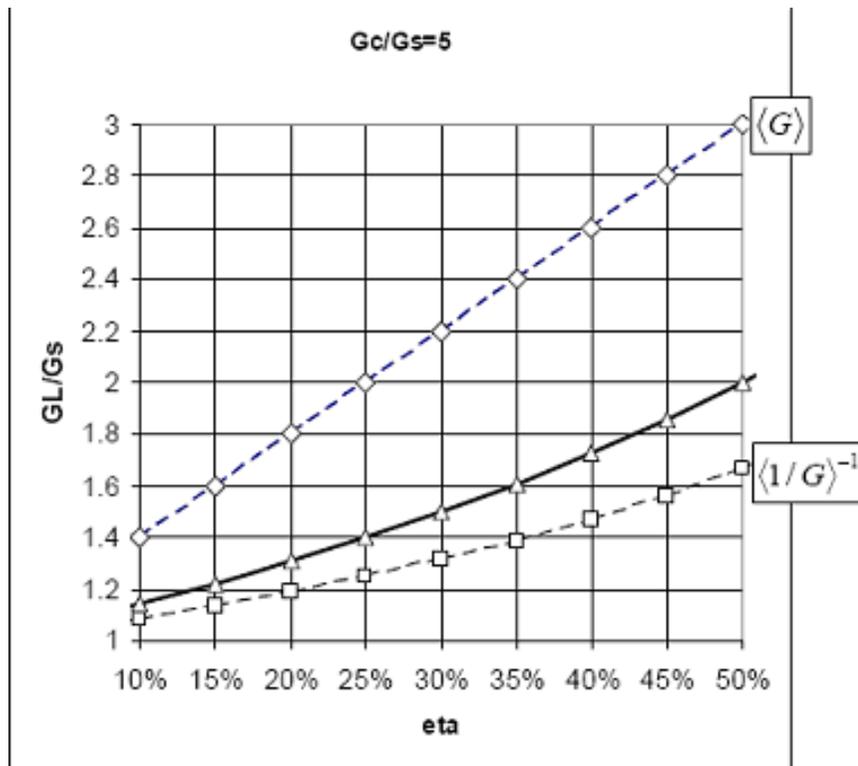
Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3.5 Diminution de CSR - diminution de la contrainte de cisaillement dans le sol

« amélioration » de G

L'évaluation (quasi) exacte de G_L est donnée par Z.Hashin (1983)



$$G_L \cong G_s + \frac{\eta}{(1-\eta)/(2G_s) + 1/(G_c - G_s)}$$

L'évaluation de G_L est beaucoup plus proche de la borne inférieure que de la borne supérieure

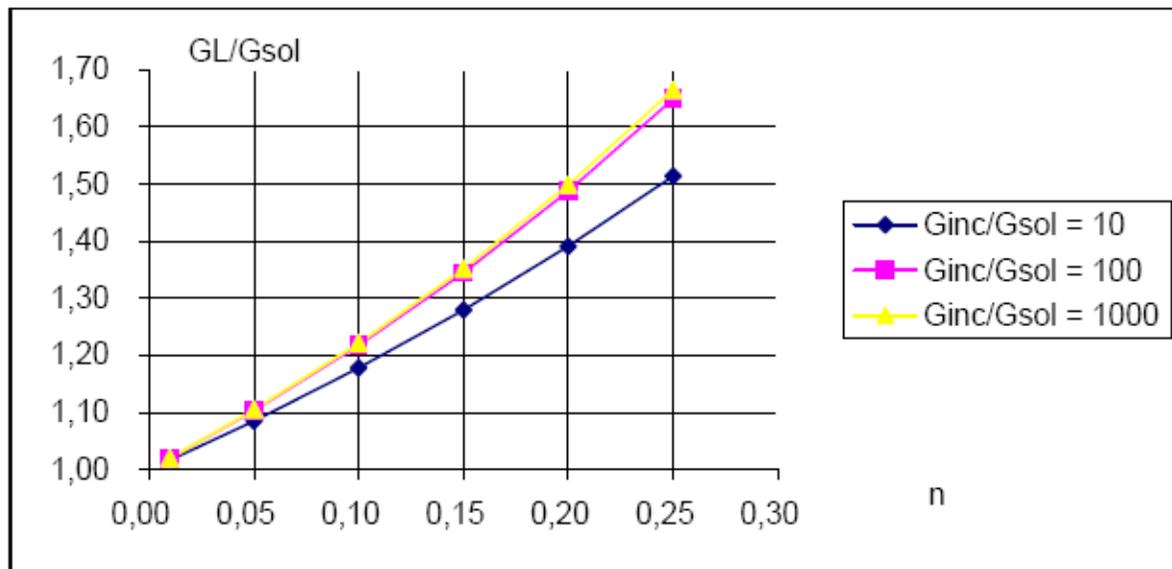
Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3.5 Diminution de CSR - diminution de la contrainte de cisaillement dans le sol

« amélioration » de G

Pour 3 types de renforcement



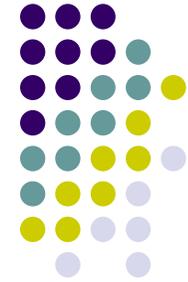
Pour un cisaillement initial τ , il ne passe plus dans le sol que $\tau_L = \tau * G_{sol} / G_L$

CSR devient alors $CSR_{final} = CSR * \tau_L / \tau$

Pour des facteurs de substitution courants de 5 à 10 %, l'augmentation de G_L , module de cisaillement longitudinal, est limitée et donc CSR_{final} faiblement augmenté

Mais

Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3.5 Diminution de CSR - diminution de la contrainte de cisaillement dans le sol

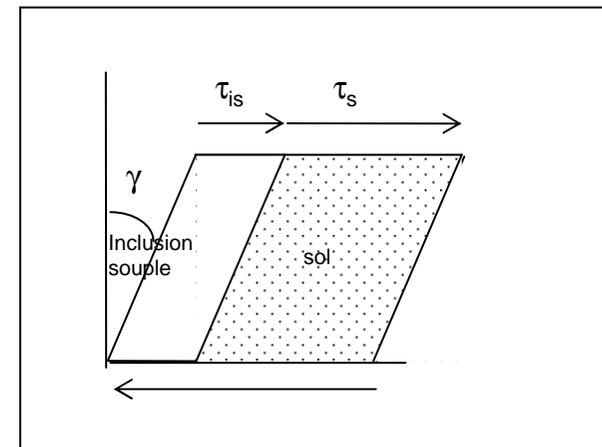
(+ § 5.4 Inclusions souples)

Les colonnes ballastées se sont avérées efficaces comme moyen de traitement vis-à-vis de la liquéfaction en combinant 3 effets favorables non pris en compte précédemment :

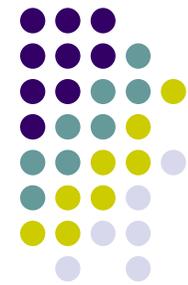
- *Densification du sol entre les colonnes* pendant leur mise en œuvre [surtout pour les sables propres (fines <15%)]
- *Diminution des déformations de cisaillement* sismique dans le sol par confinement du sol entre les colonnes (méthode de Baez et Martin)
- *Capacité de drainage* dans les sables propres

L'avantage commun à toutes les inclusions souples réside dans leur capacité à résister aux efforts de cisaillement et à accepter d'importantes déformations sans entraîner leur ruine.

Absence également de décollement.



Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.1.3.5 Diminution de CSR - diminution de la contrainte de cisaillement dans le sol

(+ § 5.5 Inclusions rigides)

A. Pour les diamètres usuels des inclusions rigides (inférieurs à 400 mm environ) et des mailles habituellement retenues,

la réduction du risque de liquéfaction par augmentation de CRR ne peut se faire que par augmentation des seules caractéristiques du sol (densification se traduisant par des essais in situ meilleurs) en négligeant la présence du matériau constitutif des inclusions. Elle ne peut pas se faire par homogénéisation des caractéristiques mécaniques du sol traité (angles de frottement, cohésions, modules...).

B. Dans le cas d'un renforcement de sol caractérisé par un taux de couverture important supérieur à 15 % et par des inclusions de rigidité à la flexion élevée,

il peut y avoir une réduction du taux de cisaillement appliqué aux sols par modification de la réponse du nouveau profil du sol. Vérification de l'intégrité de l'inclusion (armature ?)

- *La technique d'inclusion rigide n'a que très peu de retours d'expérience et ne concerne que la réalisation de colonnes de jet grouting.*
- *Aucune méthode de dimensionnement n'a fait l'objet d'une étude sérieuse de validation sur la base des quelques retours d'expériences répertoriés.*
- *Toute méthode qui consisterait à augmenter la résistance au cisaillement moyenne de la maille traitée par prise en compte de la résistance de l'inclusion n'est pas valide.*

Chapitre 5 Fondations sur sol renforcé sous actions sismiques



5.5.2. Rôle des Inclusions Rigides en zone sismique

1) Cas où les inclusions rigides ont pour fonction principale la réduction des tassements

Les inclusions rigides ayant ici pour fonction principale la réduction des tassements et n'étant pas nécessaires à la stabilité de l'ouvrage sous actions sismiques, le séisme peut tout au plus entraîner une perte de fonctionnalité des inclusions qui se traduirait par des tassements de l'ouvrage pendant et après séisme.

Commentaire : De ce fait, sous réserve de calculs, on ne devrait les armer que dans les parties partiellement ou complètement tendues.

Commentaire : Hormis les inclusions de très forte inertie (voir l'exemple du Pont de Rion Antirion), elles ne contribuent pas de façon significative à la reprise des efforts horizontaux et à l'amélioration de la résistance.

2) Cas où les inclusions rigides sont nécessaires à la stabilité (et à la portance) de l'ouvrage sous actions sismiques et/ou statiques (vérifications des états limites ultimes GEO)

Dans ce schéma, une ou plusieurs inclusions perdant leur fonctionnalité vis-à-vis de la portance, on peut ne plus obtenir le coefficient de sécurité conforme au référentiel

Vis-à-vis de ce risque, il faut alors garantir pendant le séisme la résistance des inclusions telle qu'elle est prise en compte dans les calculs et donc justifier que ces inclusions restent dans le domaine élastique (justifications comparables aux règles en application pour les pieux).



Travail 2010

- Liquéfaction
- Problématique du matelas
- Dispositions constructives
- Reprise des efforts horizontaux
- Impact du traitement de sol sur le comportement sismique
 - Adaptation de la reconnaissance au type d'ouvrage
 - Inclusions rigides armées / non armées (diamètre minimum ?)



Merci pour votre attention !