

MODELE SIMPLIFIE POUR ESTIMER LA LIQUEFACTION : APPLICATION AU SEISME DE TOHOKU A URAYASU

SIMPLIFIED MODEL TO ASSESS SOIL LIQUEFACTION: APPLICATION TO THE TOHOKU EARTHQUAKE IN THE CITY OF URAYASU

Ziad KTEICH¹, Pierre LABBE², Emmanuel JAVELAUD³, Jean-François SEMBLAT⁴

¹ IRC, ESTP Paris, Cachan, France

² IRC, ESTP Paris, Cachan, France

³ EDF DI-TEGG, Aix-en-Provence, France

⁴ ENSTA Paris Tech, Palaiseau, France

RÉSUMÉ – Cet article propose une approche dédiée à la quantification de la montée de pression interstitielle et à l'estimation des tassements induits par un séisme dans un dépôt de sable stratifié horizontalement. Nous combinons un modèle simplifié de montée de pression interstitielle dans un calcul linéaire équivalent conventionnel en prenant en considération la réponse non linéaire due à la déformation de cisaillement et à l'augmentation de la pression interstitielle.

ABSTRACT – This paper proposes an approach dedicated to the assessment of excess pore pressure and the estimation of earthquake-induced settlements in a horizontally stratified sand deposit. We combine a volumetric strain model in a conventional equivalent linear calculation by considering the nonlinear response due to shear deformation and increased pore pressure.

1. Introduction

Un grand nombre d'ouvrages en terre ont été sévèrement endommagés lors de séismes passés, y compris au Japon lors du tremblement de terre de Tōhoku du 11 mars 2011 (magnitude 9,0). L'un des phénomènes responsables de nombreux dommages est la liquéfaction des sols sous chargement cyclique.

Une nouvelle méthode simplifiée est proposée : elle étudie la réponse dynamique d'un profil de sol 1D sous charge sismique en prenant en considération son comportement non linéaire, combinant une analyse linéaire-équivalente et un modèle empirique développé par Byrne (1991) pour quantifier le risque de liquéfaction et le tassement du sol pré-liquéfaction.

Le séisme de Tōhoku ($M_w = 9,0$) de 2011 a provoqué une forte liquéfaction du sol dans les dépôts anthropiques de la ville d'Urayasu (baie de Tokyo). Dans cet article, nous discutons les principales caractéristiques des différents profils de sols dans des zones non liquéfiées et dans des zones jugées liquéfiées. Leur susceptibilité à la liquéfaction est estimée par notre méthode simplifiée à la fois en termes de montée de pression interstitielle et de tassement de sol. Le concept clé de la méthode est le modèle proposé par Byrne (1991) qui permet d'évaluer les déformations volumiques générées par le mouvement sismique. Les résultats sont comparés aux enregistrements réels à différents endroits de la ville d'Urayasu

2. Approche couplée pour l'évaluation de la montée de pression interstitielle

Cette méthode est basée sur une combinaison d'une analyse dynamique linéaire équivalente, d'une procédure de calcul de la déformation volumique provoquée par le cisaillement cyclique proposée par Byrne (1991) et du modèle de pression interstitielle développé par Martin et al. (1975) et amélioré par Wu (1996).

2.1 Algorithme de la méthode

La méthode proposée consiste à estimer la montée de pression interstitielle et le tassement dans un modèle 1D de profil de sol présenté dans la figure 1. Le modèle est une colonne de sol stratifiée de largeur 1m et avec des conditions de périodicité sur les bords latéraux et un élément de frontière absorbante de type paraxial en bas de la colonne.

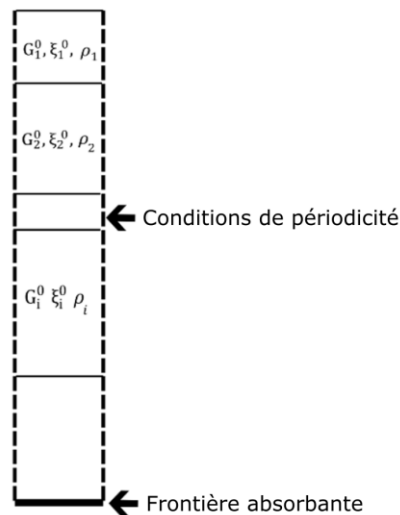


Figure 1. Modèle de colonne et conditions aux limites.

Les étapes successives de la méthode proposée pour évaluer le potentiel de liquéfaction d'une couche de sable à une profondeur z sont les suivantes:

Étape 1. Détermination de l'historique de déformation de cisaillement $\gamma(z, t)$ par un calcul élastique linéaire.

Étape 2. Calcul de la déformation volumique cumulée à l'aide de l'équation du modèle de Byrne (§ 2.2)

Étape 3. Calcul de la montée de pression interstitielle à l'aide de l'équation 2 (§ 2.3)

Étape 4. Evaluation du module de cisaillement et de l'amortissement correspondant à une distorsion effective sur les courbes de dégradation et en prenant en compte la montée de pression interstitielle.(§ 2.4)

Étape 5. Test de convergence et itération éventuelle.

Les analyses ont été réalisées grâce à la méthode des éléments finis (Code Aster).

2.2 Calcul des déformations volumiques/ Modèle de Byrne (1991)

Pendant un chargement cyclique uniforme ($\pm \gamma_0$), la déformation volumique plastique est accumulée à chaque cycle ou à chaque demi-cycle, ainsi que la montée de pression interstitielle. Sous excitation sismique, considérée comme une charge de cisaillement cyclique non uniforme, nous évaluons la déformation volumique plastique entre deux passages par zéro. Pour calculer cet incrément, Martin et al. (1975) ont suggéré une équation à quatre paramètres qui a été simplifiée par Byrne (1991) sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta \varepsilon_v^p}{\gamma_0} = C_1 e^{-C_2 \frac{\varepsilon_v}{\gamma_0}} \quad (1)$$

Où C_1 et C_2 sont les paramètres du modèle. Ces deux paramètres dépendent de la densité relative D_r ou du nombre de coups SPT corrigé $(N_1)_{60}$ du sable. Byrne (1991) a suggéré des relations empiriques pour identifier C_1 à partir de $(N_1)_{60}$ et $C_2 = 0,4/C_1$.

2.3 Evaluation de la montée de pression interstitielle

Martin et al. (1975) considèrent que le changement de volume dans les essais cycliques drainés est lié à l'augmentation de la pression interstitielle sous charge cyclique en conditions non drainées, seulement dans les conditions d'un essai de cisaillement simple, qui simule le mieux les déformations induites par les séismes. Par conséquent, en supposant que l'eau soit effectivement incompressible par rapport au squelette de sable, Martin a proposé la relation suivante pour calculer l'augmentation de la pression interstitielle :

$$\Delta u = E_r \Delta \varepsilon_v^p \quad (2)$$

Où E_r est le module de décharge élastique du sable. Martin et al. (1975) ont proposé une équation pour calculer le module E_r à partir d'essais monotones. Bhatia (1980) a montré dans ses travaux, qui suggéraient de calculer E_r dans des conditions de chargement cyclique, que la formule de E_r proposée par Martin et al. (1975) surestime l'augmentation de la pression interstitielle.

Sous l'hypothèse que la déformation volumique requise pour déclencher une liquéfaction ne dépend que de la densité relative du sable et en considérant que les deux formulations suggérées respectivement par Martin et al. (1975) et Bhatia (1980) ont besoin de données expérimentales, Wu (2001) a proposé une équation pour calculer $E_r = K \sigma'$, où K est une fonction de D_r ou $(N_1)_{60}$. La validation de cette suggestion a été effectuée d'après des données expérimentales et in situ (Wu 1996, 2001).

2.4 Dégradation des caractéristiques du sol

2.4.1 Influence de la distorsion

Les déformations des sols sous chargement cyclique impliquent des distorsions qui présentent un comportement non linéaire. La variation de la rigidité des sols due au niveau de déformation de cisaillement est obtenue à partir du rapport G/G_{max} correspondant à une valeur effective du maximum de distorsion induit. Un facteur de pondération de 0,65 de la valeur maximale est suggéré par Schnabel et al. (1972).

2.4.2 Influence de la montée de pression interstitielle

La pression excessive de l'eau interstitielle dans le sable saturé sous des conditions non drainées a une grande influence sur la résistance et la rigidité du squelette de sable. Par conséquent, les modules de cisaillement maximaux G_{max} dépendent de la contrainte effective actuelle dans le sol (Seed et Idriss, 1970). Un facteur de pondération de la contribution de la montée de pression interstitielle maximale calculée à la fin du mouvement sismique a été calé par une étude paramétrique. La valeur de 2/3 est retenue pour ce facteur.

3. Application à la ville d'Urayasu au Japon

La ville d'Urayasu a été construite en trois parties : la partie la plus ancienne Moto-Machi est une terre naturelle, les deux autres terres Naka-Machi et Shin-Machi sont successivement rapportées après 1964 et jusqu'en 1980. Konagai et al. (2012), Tokimatsu et al. (2011) et Ishihara et al. (2011) ont mené plusieurs enquêtes pour évaluer les dommages ainsi que pour réaliser des cartographies de zones liquéfiées et de zones non-liquéfiées. Sur la base de ces observations, aucune liquéfaction n'a été détectée dans la vieille partie de la ville, y compris au voisinage de la station accélérométrique K-NET Urayasu. Des éjecta de sable et des effondrements de sol ont été largement observés dans les zones anthropisées.

3.1 Mouvement sismique

Dans la ville d'Urayasu, des mouvements forts du sol ont été enregistrés à la station K-NET CBH008, représentée sur la figure 2 (a). Les observations ont confirmé qu'aucune liquéfaction ne s'est produite à la station K-NET. Nous avons effectué une analyse dynamique linéaire équivalente pour déterminer par déconvolution le mouvement au rocher affleurant à une profondeur d'environ 70 m à la station KNET (cf Figure 2 (b)). Deuxièmement, nous avons choisi ce mouvement au rocher affleurant comme signal d'entrée au rocher pour les deux profils de sol étudiés.

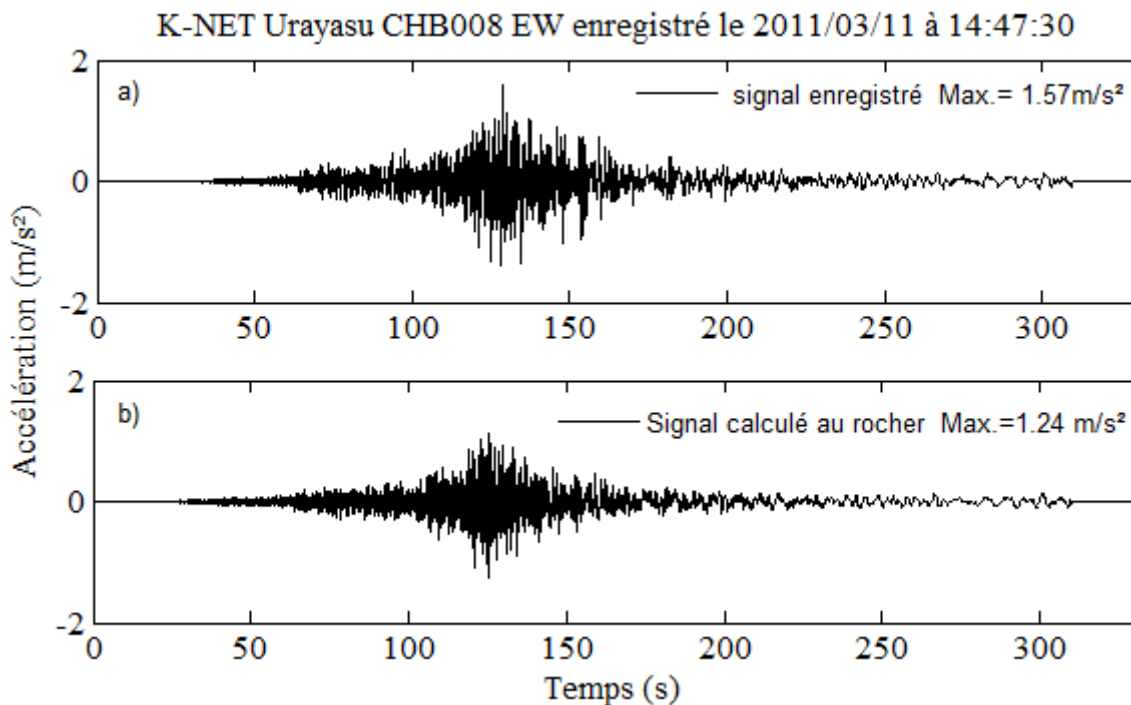


Figure 2. a) Mouvement sismique enregistré à la station KNET
b) Mouvement sismique calculé au rocher affleurant.

3.2 Données mécaniques et dynamiques

Le Système d'Information Géographique de la préfecture de Chiba (*Chiba Geoenvironmental Information Bank*) comprend des données géotechniques. Il fournit une vaste base de données de nombreux forages situés dans différentes zones de la ville d'Urayasu. Notre étude comprend douze profils de sols sélectionnés de manière à couvrir les différentes parties de la ville (vieille ville et remblais anthropiques), les zones liquéfiées et non-liquéfiées et les endroits où des observations réelles sont fournies par Ishihara et al. (2012, 2014). Deux modèles représentatifs sont produits et seront présentés dans cet article. L'emplacement 1, où il n'y a pas eu de liquéfaction, et l'emplacement 2, où il y a eu liquéfaction. L'emplacement 1 est choisi au droit d'un sondage pénétrométrique au carotté SPT réalisé dans le quartier de Kitzakae (enquête n° 25405 Chiba Geolnf. Bank), dans la vieille ville, au nord-ouest. L'emplacement 2 correspond à un sondage SPT réalisé dans le quartier Irifune 6 qui se trouve de la zone anthropisée de la ville (enquête n° 25894 Chiba Geolnf. Bank). Les figures 4 et 5 représentent la stratification, le profil de célérité V_s (a) respectivement aux emplacements 1 et 2.

Les courbes de dégradation présentés en Figure 3, utilisées pour cette étude sont construits par Konagai, 2012 sur des échantillons de sol pris d'un site près de Urayasu. Les matériaux constituant les profils d'Urayasu sont répartis en 8 types de matériaux entre sable, limon et argile.

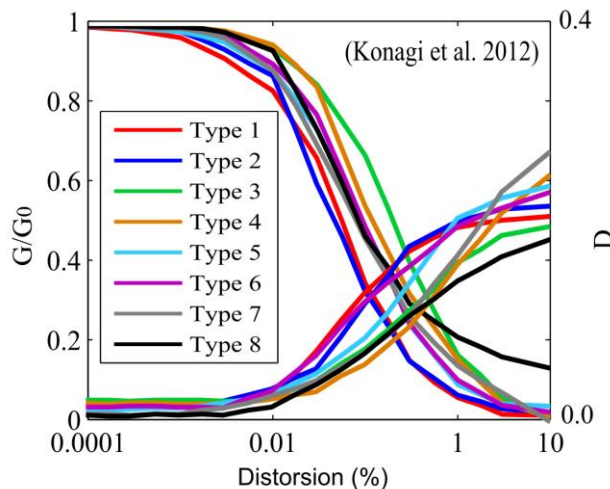


Figure 3. Les courbes de dégradations. (D'après Konagai, 2012)

3.3 Résultats

3.3.1 Emplacement non liquéfié

La figure 4 (b) montre la distorsion maximale et le taux de montée de la pression interstitielle (c) à l'emplacement 1. La liquéfaction n'a pas eu lieu à cet endroit (Ishihara 2011). La déformation de cisaillement atteint environ 0.2%, avec un maximum de 52% de taux de montée de pression interstitielle, une valeur inférieure au seuil de déclenchement de la liquéfaction. Ces résultats assurent la pertinence de la méthode pour détecter l'absence de liquéfaction dans la partie ancienne de la ville. Quant aux tassements à l'emplacement 1, le tableau 1 présente la valeur estimée par l'approche, soit environ 1cm,

ce qui est en bonne corrélation avec la valeur mesurée à cet endroit. Dans les profils non-liquéfiés, les conditions de drainage ont une faible influence sur les tassements induits, d'où la qualité de l'estimation du tassement induit par le séisme vis-à-vis de la valeur mesurée in situ.

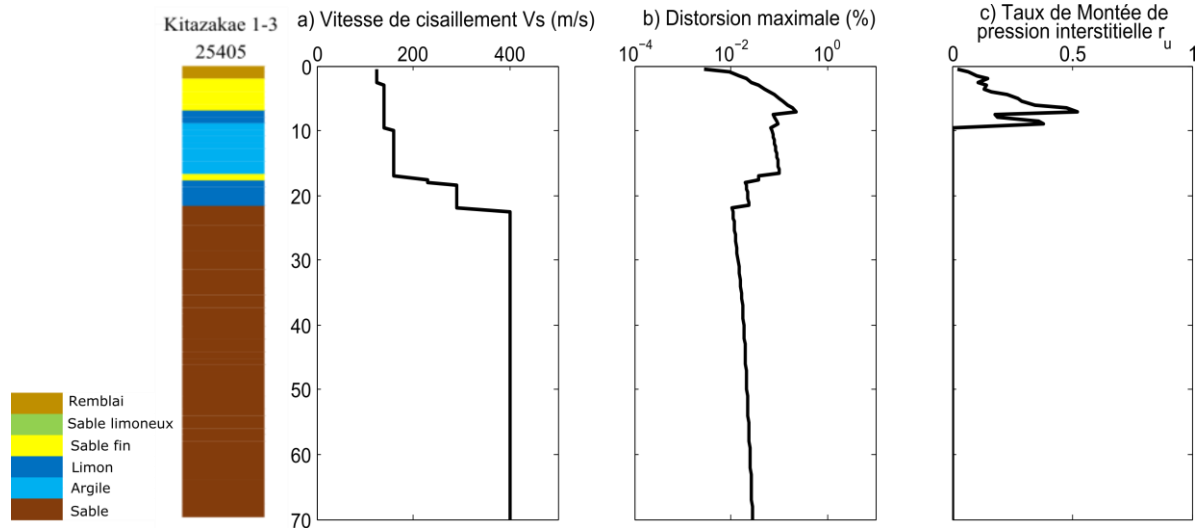


Figure 4. Stratigraphie, a) profil de V_s , b) profil de distorsion maximale et c) profil de montée de pression interstitielle à l'emplacement 1.

3.3.2 Emplacement liquéfié

La figure 5 (b) montre la distorsion maximale et le taux de montée de la pression interstitielle (c) à l'emplacement 2. La liquéfaction s'est effectivement produite à cet endroit (Ishihara 2011). La déformation de cisaillement dépasse les 1%, avec un taux de montée de pression interstitielle égal à 100%. La couche liquéfiée est le sable limoneux rapporté (couche verte sur la figure 5) avec $V_s = 100$ m/s. Ces résultats assurent la pertinence de la méthode pour détecter l'apparition de la liquéfaction dans la nouvelle partie de la ville. Quant aux tassements à l'emplacement 2, le tableau 1 présente la valeur de tassement estimée par l'approche, environ 9 cm, qui sous-estime la valeur mesurée à cet endroit. Dans les sables saturés liquéfiés, le tassement vertical induit apparait après la fin du séisme et l'évacuation de l'eau. En revanche, les conditions non drainés supposées dans notre approche ne permettent pas ce drainage, ce qui explique la sous-estimation des tassements estimés par comparaison avec les tassements générés in situ avant, pendant et après la phase de liquéfaction.

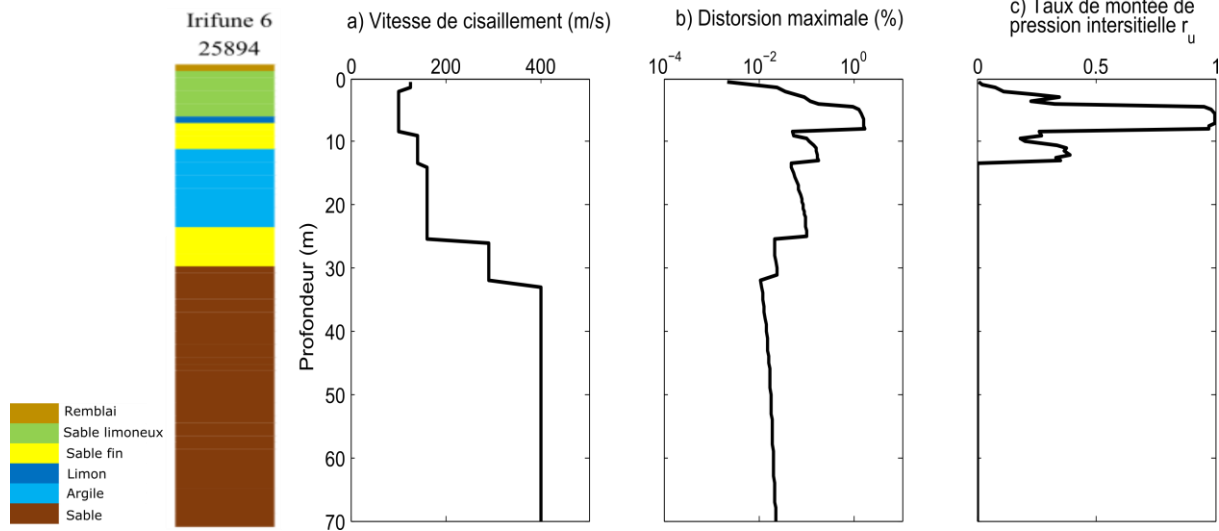


Figure 5. Stratigraphie, a) profil de Vs, b) profil de distorsion maximale et c) profil de montée de pression interstitielle à l'emplacement 2.

Tableau 1. Tassements calculés et mesurés

Profil	Tassement calculé	Tassement mesuré
Emplacement 1	1 cm	[0-5] cm
Emplacement 2	9 cm	[25-35] cm

4. Conclusions

Dans cet article, nous présentons une nouvelle méthode pour étudier le phénomène de liquéfaction dans une colonne de sol 1D sous sollicitation sismique. Elle consiste à combiner un modèle d'augmentation de pression interstitielle et une procédure équivalente linéaire conventionnelle. Cela nous permet d'approcher le comportement non linéaire d'un modèle 1D causé par l'augmentation de la déformation de cisaillement et l'accroissement de pression interstitielle. L'approche couplée consiste à effectuer une analyse dynamique harmonique où le dépôt de sable est modélisé et nous avons calculé la réponse transitoire à chaque profondeur z en termes de déformation de cisaillement $\gamma(z, t)$. D'autres variables peuvent être calculées comme l'historique de l'accélération. La méthode prédit le taux de liquéfaction comme l'augmentation de la pression interstitielle et le tassement induit durant le mouvement sismique avant l'occurrence de la liquéfaction. Cela nécessite la connaissance des propriétés mécaniques de base du sol, les résultats d'un essai SPT et les principales caractéristiques du mouvement sismique. Le modèle de Byrne a été utilisé pour évaluer la déformation volumique et le modèle de Martin amélioré par Wu pour évaluer la montée de pression interstitielle. La méthode donne une bonne estimation de l'occurrence de liquéfaction en quantifiant l'évolution de la pression interstitielle. L'hypothèse des conditions non drainées limite la prédiction des tassements à ceux accumulés durant le mouvement sismique d'où l'écart entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées in situ après la dissipation de l'eau dans les endroits liquéfiés. Notons que l'approche proposée fournissant un profil de tassements et de montée de pression interstitielle pourrait être extrapolée à n'importe quel type de profil avec différentes stratifications et soumis à différents types de mouvements.

De plus, d'autres analyses basées sur différents types de mouvements sismiques ou sur des configurations géométriques différentes, comme un modèle de barrage 2D, mériteraient d'être entreprises.

5. Références bibliographiques

- Bhatia, S.K., (1980). The verification of relationships for effective stress method to evaluate liquefaction potential of saturated sands', Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, B.C.
- Byrne, Peter M., (1991). A Cyclic Shear-Volume Coupling and Pore Pressure Model for Sand. International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 1.
- Chiba Geo-Environmental Data Bank. <http://map.pref.chiba.lg.jp/pref-chiba/Map?mid=6300&mpx=139.9591035471852&mpy=35.636947466210174&bsw=1366&bsh=774>
- Fukutake, K., & Jang, J. (2013). Studies on soil liquefaction and settlement in the Urayasu district using effective stress analyses for the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Journal of JSCE, 1(1), 307-321.
- Ishihara, K., Araki, K., & Bradley, B. A. (2011). Characteristics of liquefaction induced damage in the 2011 great east Japan Earthquake.
- Katsumata, K., & Tokimatsu, K. (2012). Relationship between seismic characteristics and soil liquefaction of Urayasu City induced by the 2011 Great East Japan. Earthquake. In Proc. 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, pp. 601-604.
- Konagai, K., Kiyota, T., Asakura, T., Suyama, S., Kyokawa, H., Shibuya, K., & Eto, C. (2012). Subsidence map of Tokyo bay area liquefied in the March 11th Great East Japan Earthquake. In Proc. of 15th World Conference of Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Martin, G.R, Finn, W.D.L. and Seed, H.B, (1975). Fundamentals of liquefaction under cyclic loading. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101(GT5): 423-438.
- Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and K. Tokimatsu. , (1986). Moduli and Damping Factors for Dynamics Analyses of Cohesionless Soils. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 112(11): 1016-1032.
- Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer, J., (1976). Pore-water pressure changes during soil liquefaction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 102(Proc. Paper# 12074).
- Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed, H.B. (1972). SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered soils. Report No. EERC-72/12, University of California, Berkeley.
- Tokimatsu, K., Tamura, S., Suzuki, H., & Katsumata, K., (2012). Damage to Soils and Foundation. In Preliminary Reconnaissance Report of the 2011 Tohoku-Chiho Taiheiyō-Oki Earthquake. Springer Japan. . pp 385-408
- Vucetic, M. and R. Dobry. (1991). Effect of soils plasticity on cyclic response. Journal of geotechnical Engineering, ASCE 17 (1): 89-107.
- Wu, G. (1996). Volume change and residual pore water pressure of saturated granular soils to blast loads. A research report submitted to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada. AGRA Earth & Environmental Ltd., Burnaby
- Wu, G. (2001). Earthquake induced deformation analyses of the Upper San Fernando dam under the 1971 San Fernando earthquake. Canadian Geotechnical Journal, 38: 1-15.