

## Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils

## Effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur le compactage et la résistance des sols mous argileux

K. Harichane<sup>1</sup>, M. Ghrici<sup>1</sup>, et S. Kenai<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Chlef, Département de Génie Civil, Chlef, Algérie

<sup>2</sup>Université de Blida, Département de Génie Civil, Blida, Algérie

**Abstract.** Soft soil stabilization has been practiced for quite some time by mixing additives, such as cement, lime and fly ash to the soil to increase its strength. However, there is a lack of investigations on the use of natural pozzolana alone or combined with lime for ground improvement applications. An experimental program was undertaken to study the effect of using lime, natural pozzolana or a combination of both on the geotechnical characteristics of soft soils. Lime or natural pozzolana was added to soft soils at ranges of 0-10% and 0-20%, respectively. In addition, combinations of lime-natural pozzolana were added to soft soils at the same ranges. Test specimens were subjected to compaction tests and unconfined compression tests. Specimens were cured for 1, 7, 28 and 90 days after which they were tested for unconfined compression tests. Based on the favourable results obtained, it can be concluded that the soft soils can be successfully stabilized by the combined action of lime and natural pozzolana. Since natural pozzolana is much cheaper than lime, the addition of natural pozzolana in lime-soil mix may particularly become attractive and can result in cost reduction of construction.

**Résumé.** La stabilisation des sols mous a été pratiquée longtemps en mélangeant des ajouts, tels que le ciment, la chaux et les cendres volantes au sol pour augmenter sa résistance. Cependant, il y a un manque d'investigations sur l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule ou combinée avec la chaux pour les applications d'amélioration des sols. Un programme expérimental a été entrepris pour étudier l'effet de la chaux, la pouzzolane naturelle ou leur combinaison sur les caractéristiques géotechniques des sols mous. La chaux ou la pouzzolane naturelle ont été ajoutées aux sols par des teneurs de 0-10% et 0-20% respectivement. Les échantillons préparés ont été soumis aux essais de compactage et de résistance à la compression non confinée. Les échantillons ont subis des périodes de cure de 1, 7, 28 et 90 jours après quoi ils ont été soumis aux essais de la résistance à la compression non confinée. Basé sur les résultats favorables obtenus, il

peut être conclu que les sols mous argileux peuvent être stabilisés avec succès par l'action combinée de la chaux et de la pouzzolane naturelle. Puisque la pouzzolane naturelle est beaucoup moins chère que la chaux, l'addition de la pouzzolane naturelle dans le mélange chaux-sol peut en particulier devenir attirante et avoir comme conséquence une réduction des coûts de la construction.

## 1 Introduction

Les premiers essais impliquant la stabilisation des sols ont été effectués aux Etats Unis en 1904. Ce processus a été largement utilisé pendant la seconde guerre mondiale pour la construction des routes. A l'époque les ingénieurs pourraient éviter de construire sur des sites inappropriés chaque fois que les conditions requises pour la construction n'étaient pas remplies. Par conséquent, la facilité de construire et d'obtenir les matériaux appropriés étaient les conditions qui régissaient le choix du site plutôt que les facteurs économiques. Il est évident que les projets de construction nécessitent des sols de bonnes propriétés géotechniques. Toutefois il a été difficile de trouver des sites adéquats pour la construction ou encore les matériaux de bonne qualité répondant à une exigence économique acceptable. Les sols mous avec des propriétés géotechniques médiocres sont fréquemment rencontrés et par conséquent il est nécessaire d'améliorer ces propriétés afin de rendre ces sols acceptables pour d'éventuels projets de construction.

L'amélioration des propriétés du sol appelée aussi la stabilisation des sols est une technique introduite depuis de nombreuses années avec le but principal de rendre les sols capables de satisfaire les exigences des projets techniques spécifiques. La stabilisation des sols argileux a été pratiquée longtemps en utilisant des ajouts cimentaires seuls ou combinés à la chaux et/ou le ciment. Plusieurs études ont été effectuées par différents chercheurs sur l'utilisation des ajouts cimentaires tels que le calcaire, les cendres volantes, les cendres des gousses de riz, la fumée de silice et la poussière de ciment. Cependant, il ya un manque d'investigation sur l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule ou combinée avec la chaux pour les applications d'amélioration des sols.

Des chercheurs ont utilisé la cendre volcanique des ressources naturelles de Papua en nouvelle Guinée [1]. Des essais de compactage et de la résistance à la compression non confinée ont été effectués dans le but d'élucider l'influence de l'addition de la cendre volcanique, la chaux naturelle, le ciment ainsi que leur combinaisons sur la stabilisation de deux sols argileux. En terme de compactage, les résultats montrent que la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente lorsque la teneur en cendre volcanique augmente, ceci est valable pour les deux sols étudiés. La combinaison de la cendre volcanique, la chaux et le ciment montrent le même comportement. Par ailleurs, la résistance à la compression non confinée augmente avec l'augmentation de la période de cure et la teneur de la cendre volcanique pour les deux sols étudiés. En mode mixte de stabilisation, la combinaison des différents ajouts (cendre volcanique, chaux, ciment) produit de grandes résistances pour des teneurs plus grandes. La pouzzolane naturelle se trouve en abondance dans des zones étendues de Béni Saf qui est une carrière située dans l'Ouest de l'Algérie [2]. L'utilisation de la pouzzolane naturelle seule ou combinée à la chaux doit faire l'objet d'investigation expérimentale approfondie. Comme le sol est une bonne source d'alumine alors les effets de traitement par la chaux peuvent être améliorés dans une large mesure si le manque apparent en silice peut être adéquatement complété par l'ajout de la pouzzolane naturelle qui contient une teneur élevée en silice réactive.

Ce travail présente les résultats de l'effet de l'utilisation de la chaux, de la pouzzolane naturelle ainsi que leurs combinaisons sur les caractéristiques du compactage et la résistance à la compression non confinée.

## 2 Investigation expérimentale

### 2.1 Matériaux utilisés

Le premier sol utilisé dans cette étude a été obtenu à partir d'un site (projet de remblai) situé approximativement à 18 km au Nord-Est de la ville de Chlef. Le deuxième sol a été obtenu à partir d'un site (projet de l'Autoroute Est-Ouest) situé approximativement à 25 km à l'Est de la ville de Chlef. Les deux sols ont été extraits à une profondeur d'environ 4 à 5m. Après leur extraction, les sols ont été placés dans des sachets en plastique et transportés au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation. Les différentes caractéristiques physiques et mécaniques des sols fins utilisés ainsi que leur classification (Tableau 1) ont été déterminées suivant les normes américaines [3].

**Tableau 1.** Caractéristiques physiques des sols.

Caractéristiques de base	Sol 1	Sol 2
Couleur	gris	rouge
Profondeur	4m	5m
Teneur en eau naturelle (%)	32.87	13.77
Densité spécifique	2.71	2.84
Eléments passant au tamis 80 $\mu\text{m}$ (%)	85	97.5
Limite de liquidité (%)	84.8	47.79
Limite de plasticité (%)	32.78	23.23
Indice de plasticité (%)	52.02	24.56
Classification (USCS)	CH	CL
Teneur en eau optimale (%)	28.3	15.3
Densité sèche maximale ( $\text{kN/m}^3$ )	13.8	16.9
Resistance à la compression non confinée (kPa)	55.6	222.5

La pouzzolane naturelle utilisée dans cette étude est une roche d'origine volcanique. Elle a été procurée de la carrière de Béni-Saf située dans l'Ouest du territoire national. La roche a été broyée au laboratoire jusqu'à une surface spécifique de  $420 \text{ m}^2/\text{kg}$ . Sa composition chimique est présentée dans le Tableau 2. La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda (Sud-Ouest du territoire national). Les propriétés physiques et chimiques de cette chaux sont présentées dans le Tableau 2.

**Tableau 2.** Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés.

Nom	Chaux (%)	Pouzzolane
Apparence	Poudre	Poudre
CaO	> 83.3	9.90
MgO	< 0.5	2.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2	9.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1.5	17.5
SiO <sub>2</sub>	< 2.5	46.4
SO <sub>3</sub>	< 0.5	0.83
Na <sub>2</sub> O	0.4 - 0.5	3.30
K <sub>2</sub> O	-	1.51
CO <sub>2</sub>	< 5	-
TiO <sub>2</sub>	-	2.10
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.80
CaCO <sub>3</sub>	< 10	-
Densité	2	-
Plus de 90	< 10	-

Plus de 630	0	-
Matériau	< 1	-
Densité	600-900	-
Perte au feu	-	5.34

## 2.2 Déroulement des essais

Des essais au laboratoire concernant le compactage et la résistance à la compression non confinée ont été effectués sur les deux sols argileux choisis. Plusieurs combinaisons de la pouzzolane naturelle et la chaux ont été utilisées pour la stabilisation des deux sols. Les teneurs de la pouzzolane naturelle sont de 0, 10 et 20% tandis que celles de la chaux sont de 0, 4, 8 et 10%. Un total de 24 combinaisons ont été étudiées (Tableau 3).

**Tableau 3.** Combinaisons des échantillons des sols stabilisés.

Designation	Echantillon mélange (%)		
	Sol	Pouzzolane	Chaux
P0L0	100	0	0
P0L4	96	0	4
P0L8	92	0	8
P0L10	90	0	10
P10L0	90	10	0
P20L0	80	20	0
P10L4	86	10	4
P20L4	76	20	4
P10L8	82	10	8
P20L8	72	20	8
P10L10	80	10	10
P20L10	70	20	10

### 2.2.1 Compactage

Les essais de compactage sont réalisés conformément à la norme ASTM D698. Les échantillons préparés avec et sans ajouts sont introduits dans des boîtes étanches en les conservant 01 heure avant l'exécution de l'essai de compactage.

### 2.2.2 Résistance à la compression non confinée

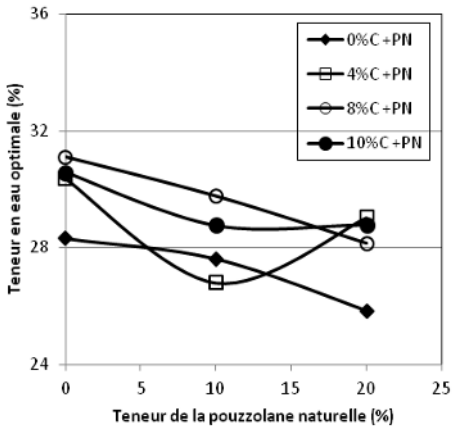
Afin d'évaluer l'effet des ajouts (pouzzolane naturelle et la chaux) ainsi que leur combinaison sur la capacité de portance des sols fins argileux, des essais en compression non confinée ont été effectués sur les échantillons des sols conformément à la norme ASTM D2166. Chaque échantillon est compacté dans un moule cylindrique à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale déduites des essais de compactage. Après démoulage, les échantillons sont stockés dans des boîtes en plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité. De plus, les échantillons sont confectionnés pour différentes périodes de cure (1, 7, 28 et 90 jours). Après chaque période de cure, des essais de résistance à la compression non confinée sont effectués. La valeur de la résistance à la compression est la moyenne de deux essais effectués sur chaque type d'échantillon.

## 3 Résultats et discussions

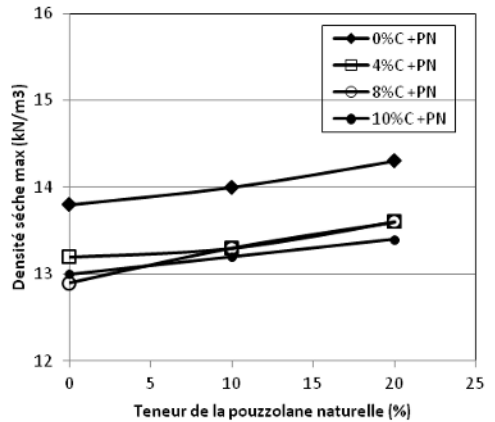
### 3.1 Caractéristiques du compactage

L'essai de compactage a été effectué pour déterminer l'effet des ajouts sur la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale. Les Figures 1 et 2 montrent l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur les caractéristiques de compactage des deux sols argileux traités. Les Figures 1 et 2 montrent que la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau

optimale augmente lorsque le dosage de la chaux augmente. Un comportement similaire a été observé par différents chercheurs qui ont effectués des essais sur des sols stabilisés à la chaux [1, 4-9]. L'explication de ce comportement est probablement une conséquence des raisons suivantes : 1) la chaux entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces. 2) la densité spécifique de la chaux est généralement plus faible que celle des sols naturels testés. 3) les réactions pouzzolaniques entre les particules d'argile et la chaux dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau.



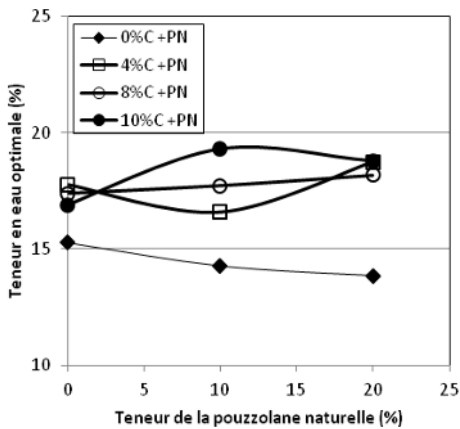
(a)



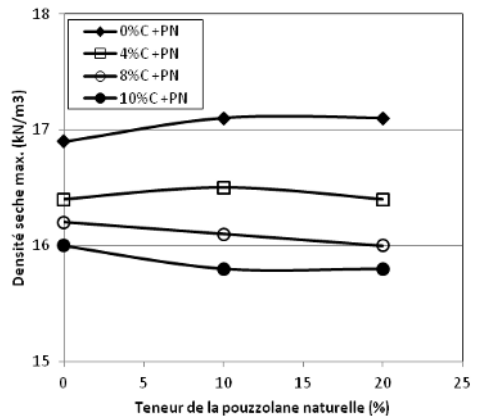
(b)

**Fig. 1.** Variation des caractéristiques de compactage du sol argileux gris.

(a) Teneur en eau optimale, (b) densité sèche maximale



(a)



(b)

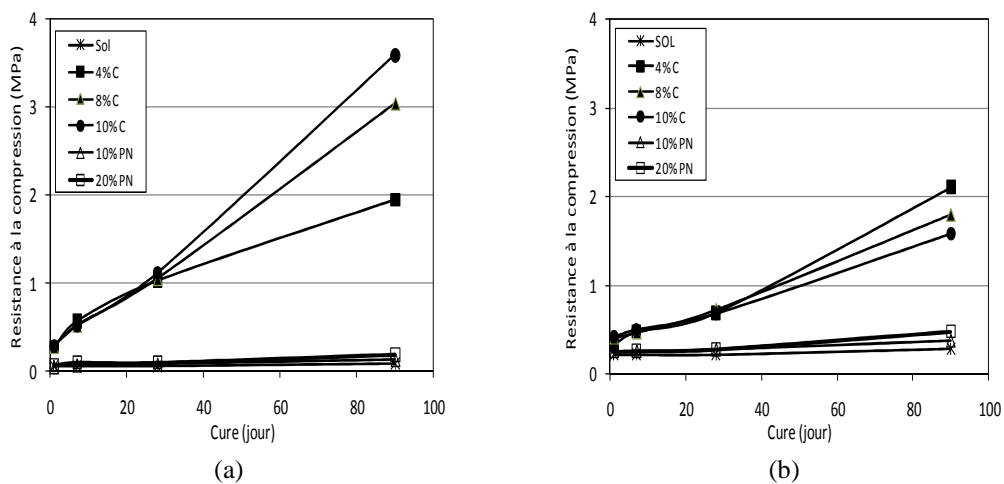
**Fig. 2.** Variation des caractéristiques de compactage du sol argileux rouge.

(a) Teneur en eau optimale, (b) densité sèche maximale

Concernant l'addition de la pouzzolane naturelle aux sols à traiter, les Figures 1 et 2 montrent que la densité sèche maximale a augmenté et la teneur en eau optimale a diminué lorsque la teneur en pouzzolane naturelle varie de 0 à 20%. L'augmentation de la densité sèche maximale représente un indicateur fiable de l'amélioration des sols. [1] ont observé un comportement inverse c'est-à-dire une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale lorsque la teneur en cendre volcanique augmente de 0 à 20% pour les deux sols testés. L'augmentation de la densité sèche maximale est attribuée principalement au remplissage des vides entre les particules du sol par les particules de la pouzzolane naturelle vu que cette dernière présente une densité spécifique relativement élevée. La diminution de la teneur en eau optimale est due à la faible affinité de la pouzzolane naturelle à l'eau. La stabilisation du sol argileux gris par l'addition de la pouzzolane naturelle combinée à la chaux a montré une diminution de la teneur en eau optimale et une augmentation de la densité sèche maximale. Par ailleurs, pour le sol argileux rouge une augmentation de la teneur en eau optimale et une diminution de la densité sèche maximale ont été observées notamment pour une teneur en pouzzolane naturelle de 20%. Plusieurs chercheurs [4, 5, 10] ont révélé que le changement de la densité sèche maximale se produit en raison de la dimension des particules et des densités spécifiques du sol et des ajouts.

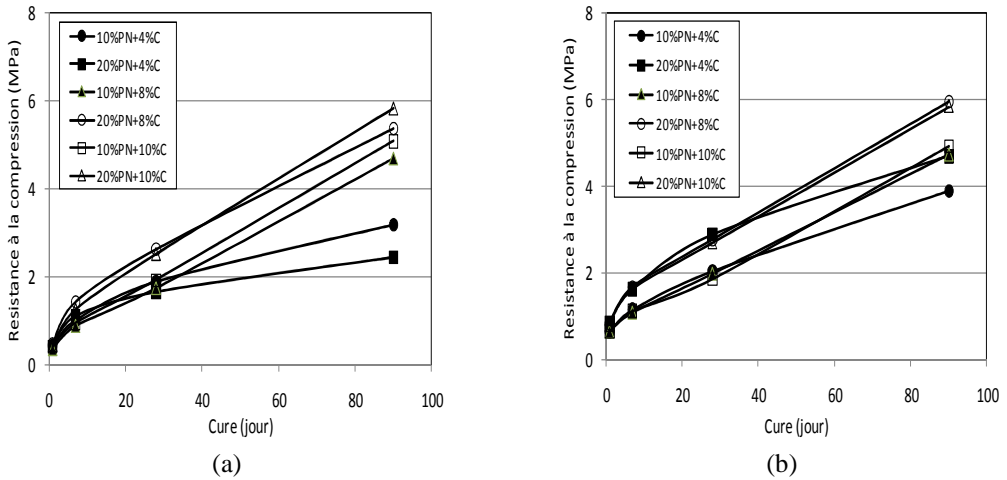
### 3.2 Résistance à la compression non confinée

Les résultats de l'effet de la pouzzolane naturelle, de la chaux et de leurs combinaisons sur la résistance à la compression des sols argileux stabilisés sont présentés sur les Figures 3 et 4. Les résultats de l'effet de l'addition de la chaux ou la pouzzolane naturelle seule au sol à traiter sont présentés sur la Figure 3. L'addition de la chaux fait augmenter la résistance à la compression des échantillons de sols stabilisés. Ceci est en parfaite concordance avec d'autres résultats de travaux de recherche antérieurs [1, 4, 5, 9, 11, 12].



**Fig. 3.** Influence de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression.

(a) sol gris, (b) sol rouge



**Fig. 4.** Influence de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression. (a) sol gris, (b) sol rouge

Cette augmentation de la résistance à la compression est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux ce qui se traduit par la formation d'agents de cimentation liant ainsi les particules du sol entre elles. En général la résistance à la compression augmente avec la durée de cure. Cependant, le sol argileux gris présente une augmentation considérable par rapport au sol argileux rouge. Par exemple et pour une teneur en chaux de 10%, le sol argileux gris a développé une résistance à la compression de 3,6 MPa après 90 jours de cure qui représente ainsi 38 fois la résistance à la compression du sol naturel. En revanche, l'addition de la pouzzolane naturelle n'a pas influé notablement sur la résistance à la compression des deux sols étudiés. Par ailleurs, les résultats de l'effet de la combinaison de la pouzzolane naturelle et de la chaux pour différentes teneurs sont montrés sur la Figure 4.

Les combinaisons de la pouzzolane naturelle et la chaux pour des teneurs élevées produisent des résistances à la compression plus élevées. Il peut être observé qu'à 90 jours et avec la combinaison de 10%PN+4%C les sols argileux gris et rouge montrent une augmentation de 34 et 14 fois respectivement par rapport aux sols naturels. [1] ont observé que la combinaison 10%CV+4%C représente une augmentation de 21 et 10 fois respectivement par rapport aux deux sols naturels testés. Finalement, pour les deux sols argileux traités, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la période de cure et la teneur en ajouts additionnés. Le traitement des sols par la combinaison pouzzolane naturelle – chaux produit des résistances à la compression plus élevées que le traitement par la pouzzolane naturelle ou la chaux seule. Par conséquent, la pouzzolane naturelle ne peut être utilisée seule pour la stabilisation des sols mous argileux. Toutefois, la résistance à la compression des sols traités à la chaux peut être améliorée considérablement par l'addition entre 10 et 20% de pouzzolane naturelle. Cette performance est due aux propriétés pouzzolaniques du mélange pouzzolane naturelle – chaux.

## 4 Conclusions

Cette étude présente l'effet de la pouzzolane naturelle, de la chaux et de leurs combinaisons sur le compactage et la résistance à la compression des sols mous argileux. Sur la base des résultats des essais, les conclusions suivantes peuvent être dégagées:

La combinaison pouzzolane naturelle – chaux fait augmenter la densité sèche maximale du sol gris argileux et fait diminuer celle du sol rouge argileux. La même combinaison fait diminuer la teneur en eau optimale du sol gris argileux et fait augmenter celle du sol rouge argileux.

La combinaison pouzzolane naturelle – chaux améliore considérablement la résistance à la compression des sols argileux stabilisés. Pour les deux sols argileux traités, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la période de cure et la teneur en ajouts additionnés.

## Références

1. K.M.A. Hossain, M. Lachemi, S. Easa, *Resour Conserv Recycling J.* **51**, 711-731 (2007)
2. M. Ghrici, S. Kenai, M. Said Mansour, *Cement Concr Compos J.* **29**, 524-549 (2007)
3. American Society for Testing and Materials (ASTM), *annual book of ASTM standards* (USA, 2004)
4. S.A. Ola, *Eng Geol J.* **11**, 305-317 (1977)
5. M.D.A. Rahman, *Build Environ J.* **21**, 57-61 (1986)
6. S.Z. George, D.A. Ponniah, J.A. Little, *Construct Build Mater J.* **6**, 247-252 (1992)
7. G. Gay, H. Schad, *Otto-Graf J.* **11**, 19-31 (2000)
8. A. Kavak, A. Akyarli, *Environ Geol J.* **51**, 987-997 (2007)
9. J. Manasseh, A.I. Olufemi, *Electron J Geot Eng J.* **13**, 1-12 (2008)
10. E.A. Basha, R. Hashim, H.B. Mahmud, A.S. Muntohar, *Construct Build Mater J.* **19**, 448-453 (2005)
11. N.O. Attoh Okine, *Construct Build Mater J.* **9**, 283-287 (1995)
12. D.F. Lin, K.L. Lin, M.J. Hung, H.L. Luo, *Construct Build Mater J.* **145**, 58-64 (2007)