

OTTIMIZZAZIONE DELLE PROCEDURE DI CONSOLIDAZIONE DI SEDIMENTI DRAGATI IN VASCHE DI COLMATA

Federica Pasqualini, Mirko Felici, Ivo Bellezza, Evelina Fratolocchi

Università Politecnica delle Marche

f.pasqualini@pm.univpm.it, m.felici@pm.univpm.it, i.bellezza@univpm.it, e.fratolocchi@univpm.it

Sommario

La nota illustra un approccio progettuale per l'ottimizzazione delle fasi di conferimento e di consolidazione di sedimenti dragati in vasche di colmata, consistente nella realizzazione di settori mediante geotubi che minimizzano le perdite di volumetria, e nell'applicazione di una duna mobile abbinata a dreni verticali prefabbricati in ciascun settore. L'approccio consente di consolidare i sedimenti in un settore mentre è in corso il riempimento di un settore adiacente, e quindi di anticipare la fruizione finale dell'area. Viene inoltre proposta una procedura di progettazione degli interventi di consolidamento nei singoli settori, che consente di ottimizzare l'intervento in termini economici ed in funzione delle quantità e delle tempistiche di conferimento dei sedimenti.

1. Introduzione

La consistenza tipicamente fluida di sedimenti dragati conferiti in vasca di colmata (VdC) richiede interventi di miglioramento delle caratteristiche meccaniche per poter riutilizzare l'area al termine del conferimento (*land reclamation*). Come nel caso dei terreni, per i sedimenti a grana fine si può ricorrere a rilevati di precarico abbinati a dreni verticali, solitamente prefabbricati (PVD, *prefabricated vertical drain*) in virtù della loro elevata velocità di installazione. Se è disponibile materiale di grossa pezzatura in prossimità del sito, il rilevato di precarico rappresenta l'opzione più economica e più semplice dal punto di vista operativo.

Quando applicati in VdC molto estese, i rilevati di precarico richiedono ingenti quantità di materiale non sempre disponibili. Per superare tali limitazioni, la VdC può essere progettata e riempita in settori e il rilevato applicato come una "duna mobile" (Felici et al., 2018): terminata l'installazione dei dreni in un dato settore, si costruisce il rilevato che rimane nell'area per il tempo necessario a raggiungere il grado di consolidazione prefissato, per poi essere smantellato; la procedura viene ripetuta in un settore contiguo, fino al completamento dell'intera area. Il metodo della duna mobile permette così di consolidare i sedimenti in un settore mentre è in corso il riempimento di un settore adiacente. Tale strategia associata alla settorizzazione della vasca consente quindi di ottimizzare risorse e costi, ridurre i tempi complessivi di trattamento, nonché garantire una certa flessibilità nella gestione dei sedimenti dragati, dal momento che può essere adattata a differenti programmi ed esigenze di conferimento.

In questa nota si propone un metodo di progettazione del precarico abbinato a PVD per ottimizzare le procedure di consolidamento di sedimenti fini dragati in una VdC suddivisa in settori. Il metodo, che correla i tre parametri di progetto (*i.e.* precarico, tempo di permanenza del rilevato e spaziatura dei dreni) è stato applicato alla VdC nel porto di Ancona, attualmente in fase di riempimento con sedimenti marini dragati, da consolidare in vista del riutilizzo dell'area per lo stoccaggio di container.

2. Realizzazione dei settori in vasca di colmata

La suddivisione in settori di una VdC è stata adottata per la prima volta nella struttura realizzata nel porto di Ancona per contenere sedimenti marini contaminati, cogliendo così l'occasione per una *land reclamation* come alternativa virtuosa al conferimento in discarica. La VdC ha capacità di circa

180 000 m³ e superficie di 9.5 ha (Figura 1-A). Il confinamento lato terra e lato mare è assicurato da un palancoato profondo 22 m, infisso attraverso uno strato sabbioso nel substrato argilloso naturale impermeabile. Attualmente la vasca è in fase di riempimento con sedimenti marini dragati provenienti anche da porti vicini.

Un primo lotto di sedimenti è stato conferito subito dopo il collaudo della vasca, prima del progetto di riempimento. Tali sedimenti occupano uno spessore di 2-4 m su tutto il fondo, al di sopra dei quali il livello d'acqua è di 3-4 m, ed emergono in due aree (lato est e lato nord della vasca, Figura 1-A).

Data la disponibilità di materiale granulare presso il sito (derivanti da frantumazione materiali di demolizione di strutture portuali, scogliere, ecc.), la scelta della tecnica di consolidazione dei sedimenti è ricaduta sul rilevato di precarico abbinato a PVD. La suddivisione in settori è stata adottata come strategia di ottimizzazione delle attività di conferimento e consolidamento.

In generale, la settorizzazione richiede pareti interne per ottenere un efficace confinamento dei sedimenti durante le attività di conferimento e consolidamento. I setti devono altresì essere di agevole realizzazione e tali da minimizzare la perdita di volumetria della vasca. A tale scopo, per la VdC di Ancona, Felici et al. (in stampa) hanno sperimentato l'impiego di tubolari in geotessile (geotubi) riempiti con i sedimenti stessi. Per realizzare il primo settore è stato adottato uno speciale MacTube® lungo 50 m con altezza finale di circa 3 m (Figura 1-B). La posa in opera del geotubo (descritta in dettaglio in Felici et al., in stampa) è stata completata in una settimana. La soluzione proposta può essere adattata alla profondità di una VdC sovrapponendo più geotubi. Con questa tecnologia è già stato realizzato e poi colmato un primo settore, di area approssimativamente rettangolare di 50 m × 80 m (Figura 1). Il settore è delimitato su due lati dal palancoato della VdC; un terzo lato è costituito dal sedimento già presente all'interno della vasca ed il quarto lato è il geotubo.

La Figura 2 riporta un esempio di sequenza di riempimento e consolidamento di una VdC divisa in settori, con riferimento al caso di Ancona. Per il consolidamento delle zone adiacenti al geotubo sono necessarie analisi di stabilità per valutare la distanza minima tra geotubo e duna mobile. Il volume di sedimento adiacente e contenuto nel geotubo può essere consolidato insieme al settore adiacente (Figura 2-D) o successivamente (Figure 2E-2F), a seconda della dimensione del settore.

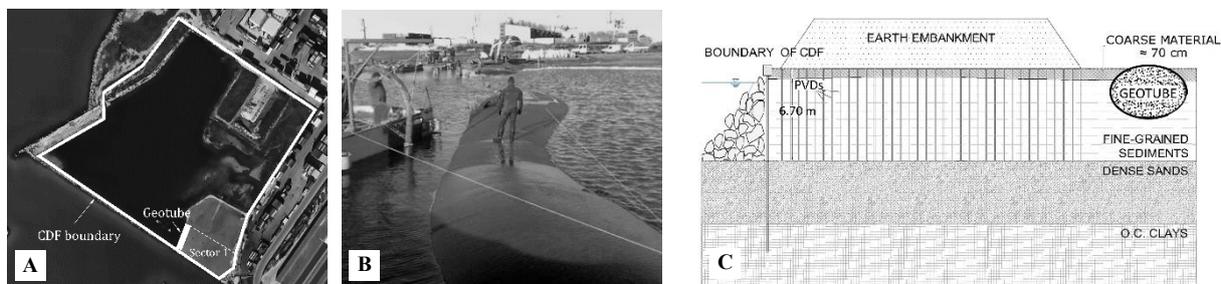


Fig 1. VdC nel porto di Ancona: A) planimetria; B) riempimento del geotubo; C) stratigrafia settore 1.

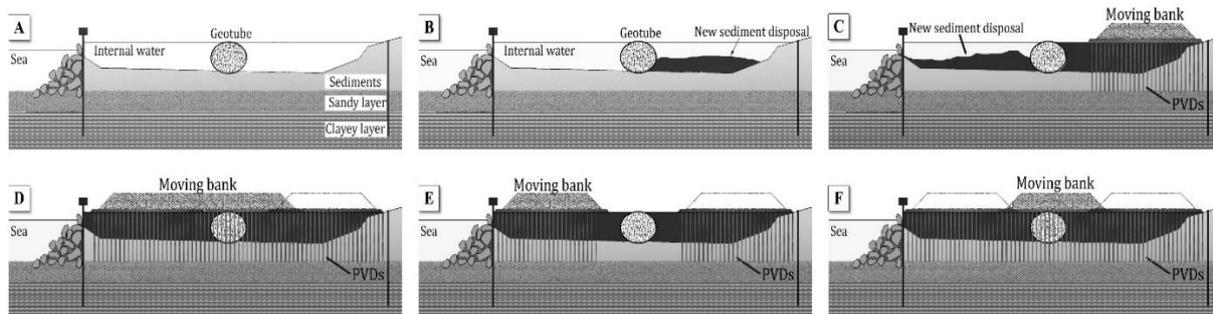


Fig 2. Sequenza di riempimento e consolidamento nella VdC di Ancona: A) posizionamento del geotubo; B) conferimento dei sedimenti nel primo settore; C) consolidamento dei sedimenti nel primo settore e simultaneo riempimento del secondo settore; D) consolidamento del secondo settore e dei sedimenti attorno al geotubo; E) consolidamento del secondo settore; F) consolidamento dei sedimenti attorno al geotubo.

3. Progetto della suddivisione in settori

Nel caso del consolidamento mediante precarico con duna mobile associato a PVD, le variabili di progetto sono la pressione verticale che deve essere applicata dal rilevato (q_R), il suo tempo di permanenza (t_R) e la spaziatura dei dreni (S). Posto che la larghezza del rilevato sia superiore al doppio dello spessore dello strato compressibile (H_0) il cedimento finale dovuto a q_R può essere valutato assumendo una deformazione monodimensionale:

$$\delta_R = \frac{H_0}{1+e_0} c_c \log \left(\frac{\sigma'_{v0} + q_R}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (1)$$

dove e_0 è l'indice dei vuoti iniziale e σ'_{v0} è la tensione verticale efficace, al centro dello strato da consolidare. In un dato settore, il carico della duna mobile deve essere mantenuto per un tempo t_R tale che il cedimento δ_R (per $t = t_R$) sia pari a δ_E , cioè il cedimento indotto dal carico di servizio (q_E). Tale carico di servizio è noto sulla base della destinazione d'uso dell'area e il relativo cedimento δ_E può essere calcolato tramite la (1) sostituendo q_R con q_E .

Il processo di consolidazione in presenza di dreni verticali è stato studiato da molti autori e in letteratura sono state proposte diverse soluzioni con diversi livelli di complessità (Barron, 1948; Carrillo, 1942; Yoshikuni & Nakanodo, 1974; Olson, 1977; Hansbo, 1981; Onoue, 1988; Tang & Onitsuka, 2000; Leo, 2004; Zhu & Yin, 2004; Bellezza & Fentini, 2008; tra gli altri). In questo lavoro, con l'obiettivo di ricercare una correlazione generale e relativamente semplice tra le variabili coinvolte nel progetto (q_R , t_R e S), la consolidazione dovuta al flusso radiale viene analizzata attraverso la teoria di Hansbo che, nonostante alcune ipotesi semplificative, fornisce risultati in buon accordo con soluzioni più rigorose (Onoue, 1988).

Si considera un dreno verticale cilindrico equivalente, di raggio r_w , lunghezza L , capacità di scarico q_w e rigidità trascurabile, attorno al quale si ipotizza una zona di influenza di raggio R e permeabilità orizzontale k_h . In prossimità del dreno si sviluppa una zona di *smear* di raggio r_s e permeabilità $k_s < k_h$. Il grado di consolidazione medio al tempo t , U_h , dovuto al solo flusso radiale, si può calcolare come:

$$U_h = 1 - \exp \left(- \frac{2c_h t}{R^2 F} \right) \quad (2)$$

dove c_h è coefficiente di consolidazione orizzontale e F è un coefficiente numerico dato da:

$$F \cong \ln \frac{R}{r_s} - 0.75 + \left(\frac{k_h}{k_s} \right) \ln \frac{r_s}{r_w} + \frac{2}{3} \frac{\pi k_h L^2}{q_w} \quad (3)$$

Il raggio R in (2) e (3) può essere espresso in funzione di S ; in particolare, $R \approx 0.564S$ e $R \approx 0.525S$ rispettivamente per maglia quadrata e triangolare. Per i dreni prefabbricati verticali a nastro si può considerare il raggio equivalente di un dreno a sezione circolare, r_w eguagliando il perimetro del dreno con la circonferenza del dreno cilindrico equivalente (Rixner et al., 1986):

$$r_w = \frac{a+b}{\pi} \quad (4)$$

dove a e b sono rispettivamente la larghezza e lo spessore del dreno reale.

Per tenere conto del drenaggio verticale e radiale, similmente ad altri studi (e.g. Zhou et al., 1999; Chai et al., 2001), è stata utilizzata la soluzione teorica di Carrillo (1942):

$$U = 1 - (1 - U_h)(1 - U_v) \quad (5)$$

dove U_v è il grado di consolidazione medio per il solo flusso verticale, che può essere calcolato dalla

teoria della consolidazione monodimensionale di Terzaghi sulla base del coefficiente di consolidazione verticale c_v e del percorso di drenaggio verticale massimo. Va precisato che, a rigore, la (5) è valida solo per dreni ideali e carico istantaneo; tuttavia, l'errore associato all'uso della (5) è generalmente modesto anche in presenza di *ramp-loading* (Tang & Onitsuka, 2000). Pertanto, l'uso della (5) può essere considerato una approssimazione ragionevole se confrontato con le incertezze connesse con la determinazione di alcuni parametri (*smear, well resistance*, raggio equivalente del dreno).

Imponendo che il grado di consolidazione totale al tempo t_R sia uguale al rapporto δ_E/δ_R e combinando la (1) e la (5), si ottiene la seguente equazione:

$$q_R = \sigma'_{v0} \left\{ 10^{\left[\frac{\delta_E(1+e_0)}{H_0 c_v \{1 - (1-U_h)(1-U_v)\}} \right]} - 1 \right\} \quad (6)$$

L'equazione (6) può essere utilizzata per una rapida valutazione dell'influenza della spaziatura dei dreni, del tempo di permanenza e del sovraccarico nella progettazione di un trattamento di precarico abbinato a dreni prefabbricati verticali. Si noti che la (6) assume implicitamente un carico istantaneo. In effetti, la costruzione della duna mobile richiede un tempo finito che ragionevolmente può essere considerato proporzionale a q_R . Questo aspetto deve essere preso in considerazione quando si utilizza la (6) a scopo progettuale. In assenza di dati più dettagliati sulla velocità di carico per raggiungere q_R , si può ipotizzare un semplice schema di carico graduale e il tempo effettivamente richiesto per il trattamento di precarico può essere ottenuto approssimativamente come somma del t_R ottenuto dalla (6) e di una frazione (0.5-1) del tempo di costruzione t_c .

Si riporta di seguito una applicazione della predetta procedura con riferimento alla vasca di colmata di Ancona.

4. Esempio di applicazione

Per la caratterizzazione fisica, idraulica e meccanica dei sedimenti nel primo settore della vasca di colmata di Ancona sono state eseguite indagini di laboratorio e in sito (CPT e CPTU con dissipazione). La Tabella 1 elenca i valori assunti per i parametri coinvolti nell'analisi. I dettagli sulle indagini possono essere trovati in Felici et al. (2018; 2021). Sulla base delle prove CPT è risultato uno spessore dello strato di sedimento mediamente pari a 6.7 m.

Sono stati scelti PVD a nastro (Colbondrains®) costituiti da un'anima in polietilene rivestita da un filtro geotessile in polipropilene agugliato (Tabella 2). Sulla base di una prova di infissione, è stato considerato un rapporto di smear $s = r_s/r_w$ pari a 6. La permeabilità orizzontale nella zona di *smear* è stata assunta pari alla metà della permeabilità del terreno indisturbato ($k_h/k_s = 2$; Terzaghi et al., 1996). È stato realizzato uno strato di sottofondo in materiale granulare, di spessore 0.7 m, sulla superficie dei sedimenti per creare uno strato drenante superiore e migliorare la stabilità, oltre che per ottenere un piano transitabile. Il drenaggio alla base dello strato dei sedimenti è garantito dallo strato naturale sabbioso (Figura 1-C).

Il valore del carico di servizio (fornito dall'Autorità Portuale) è pari a $q_E = 47$ kPa. Il cedimento atteso al termine della consolidazione primaria (δ_E) è stato calcolato mediante la (1) in 0.53 m.

Sulla base dei dati delle Tabelle 1 e 2, mediante la (6) sono stati ottenuti gli abachi di progetto riportati in Figura 3. È stato considerato l'effetto del tempo di costruzione assumendo una costruzione graduale del rilevato di 1.5 m/settimana (corrispondente a 3.5 kPa/giorno) e supponendo che l'effetto di un carico con incremento lineare nel tempo sia equivalente a un carico istantaneo applicato a $t_c/2$. Come previsto, la spaziatura dei dreni richiesta S aumenta all'aumentare del tempo di permanenza t_R e della pressione di precarico, q_R . Assegnata la spaziatura, la pressione di precarico diminuisce all'aumentare del tempo di permanenza del sovraccarico.

Per il primo settore della vasca di colmata di Ancona si è ipotizzato che la spaziatura possa variare da 0.8 m (il doppio del diametro della zona di smear) e 2.4 m (significativamente inferiore al percorso di

drenaggio verticale). La pressione di precarico è stata considerata nell'intervallo 47-100 kPa (valore massimo determinato da analisi di stabilità).

Tab 1. Dati di input per lo strato di sedimenti.

Parametro	Valore
Spessore dello strato superficiale, H_{cm} (m)	0.7
Spessore dello strato di sedimenti, H_0 (m)	6.7
Peso di volume dello strato superficiale, γ_{cm} (kN/m ³)	17.0
Peso di volume dei sedimenti, γ_{sed} (kN/m ³)	16.5
Peso di volume dell'acqua di mare, γ_w (kN/m ³)	10.1
Tensione verticale efficace media, σ'_{v0} (kPa)	21.6
Indice dei vuoti iniziale, e_0 (-)	1.65
Indice di compressione, c_c (-)	0.42
Coeff. di consolidazione orizzontale, c_h (m ² /day)	$1.6 \cdot 10^{-2}$
Conducibilità idraulica orizzontale, k_h (m/day)	$2.2 \cdot 10^{-4}$
Coeff. di consolidazione verticale, c_v (m ² /day)	$1.2 \cdot 10^{-2}$

Tab 2. Caratteristiche e parametri di progetto dei PVD.

Parametro	Valore
Larghezza, a (m)	0.100
Spessore, b (m)	0.005
Raggio equivalente, r_w (m)	0.033
Capacità di scarico, q_w (m ³ /day)	12.1
Permeabilità del dreno, k_w (m/day)	$2.4 \cdot 10^4$
Rapporto di smear, $s = r_s/r_w$ (-)	6
Raggio della zona di smear, r_s (m)	0.2

A titolo di esempio, considerando un tempo massimo di permanenza del rilevato $t_R = 6$ mesi (tempo necessario per riempire il settore adiacente) le curve della Figura 3 consentono di ottenere diverse combinazioni di spaziatura e pressione di precarico da utilizzare nella progettazione. Per una maglia triangolare si ottengono due soluzioni legate (Figura 3-B): la prima prevede una spaziatura $S = 1.4$ m e pressione di precarico $q_R = 50$ kPa, che implica circa 18 900 m di PVD (di lunghezza 8 m) e circa 11 000 m³ di materiale per il rilevato (sponde del rilevato con pendenza di 45°); la seconda soluzione prevede una spaziatura di 2.4 m abbinata a un precarico pari a $q_R = 78$ kPa, che implica circa 6 400 m di PVD e circa 16 000 m³ per il rilevato. La soluzione ottimale verrà scelta considerando i costi dei PVD che del materiale utilizzato per il rilevato (quantità disponibile in sito e in prossimità del sito e costi di movimentazione).

Si può osservare che gli abachi di progetto della Figura 3 sono specifici solo per il primo settore della vasca di colmata di Ancona. Per gli altri futuri settori può essere applicata la stessa procedura, a condizione che venga eseguita una nuova caratterizzazione preliminare dei sedimenti. Il processo di consolidazione nei settori sarà monitorato per valutare la validità dell'approccio proposto.

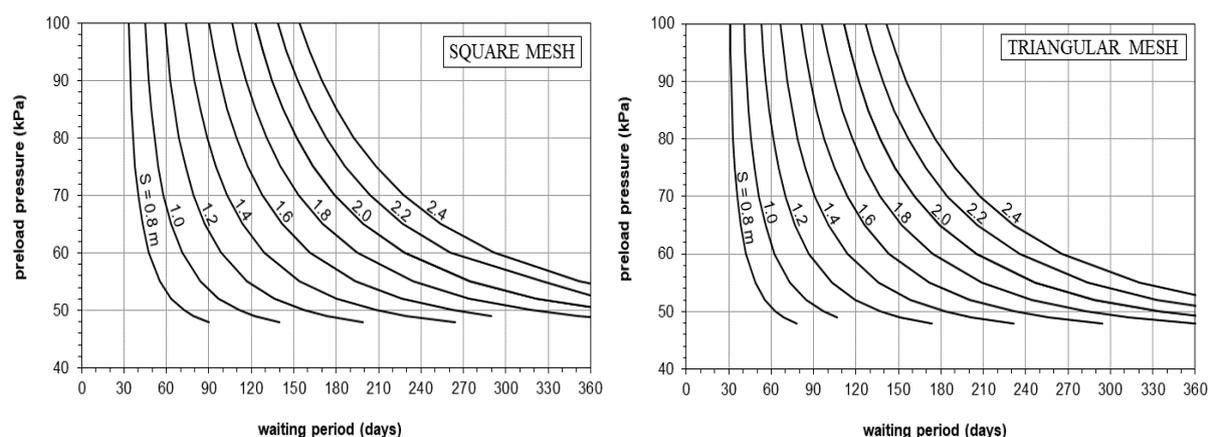


Fig 3. Abachi di progetto per la VdC di Ancona: a destra PVD a maglia quadrata; a sinistra PVD a maglia triangolare.

5. Conclusioni

La nota ha illustrato un approccio progettuale per l'ottimizzazione delle fasi di conferimento e

consolidazione di sedimenti in vasche di colmata *nearshore*, consistente nella realizzazione di settori mediante geotubi che minimizzano le perdite di volumetria, e nell'applicazione di un rilevato di precarico (duna mobile) abbinato a PVD in ciascun settore. L'approccio consente di consolidare i sedimenti in un settore mentre è in corso il riempimento di un settore adiacente, anticipando in tal modo la fruizione finale dell'area.

È stata inoltre proposta una procedura di progettazione degli interventi di consolidamento nei singoli settori (spaziatura dei dreni, pressione e tempo di permanenza della duna mobile), che consente di ottimizzare l'intervento in termini economici ed in funzione delle quantità e delle tempistiche di conferimento dei sedimenti.

Bibliografia

- Barron R. A. (1948). "Consolidation of fine-grained soils by drain wells". *Transactions of ASCE*, 113, 718-754.
- Bellezza I. & Fentini R. (2008). "Prefabricated vertical drains: a simplified design procedure". *Ground Improvement GI4*, 73-79.
- Carrillo N. (1942). "Simple two-and-three-dimensional cases in the theory of consolidation of Soils". *Journal of Mathematics and Physics*, 21, 1-5.
- Chai J. C., Shen S. L., Miura N. and Bergado D. T. (2001). "Simple method of modeling PVD-improved subsoil". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(11), 965-972.
- Felici M., Domizi J. and Fratolocchi E. (2018). "Consolidation of dredged sediments in a confined disposal facility: hydraulic conductivity constitutive relations". Proc. 8th International Congress on Environmental Geotechnics, Hangzhou, 288-294.
- Felici M., Fratolocchi E., Di Sante M., Pasqualini F., Pasqualini E. (2021). "PVD-assisted consolidation of dredged sediments in a CDF: design of the test field". Proc. 3rd International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics, Tokyo.
- Felici M., Pasqualini F., Bellezza I., Pasqualini E., Fratolocchi E. (in stampa). "Optimization of consolidation procedures for dredged sediments in CDFs". Proc. 20th ICSMGE, Sydney 2022.
- Hansbo S. (1981). Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Proc. 10th ICSMFE, Stockholm, Vol. 3, 677-682.
- Leo C. J. (2004). "Equal strain consolidation by vertical drains". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(3), 316-327.
- Olson R. E. (1977). "Consolidation under time dependent loading". *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(1), 55-60.
- Onoue A. (1988). "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration". *Soils and Foundations*, 28(4), 165-174.
- Rixner J. J., Kraemer S. R. and Smith A. D. (1986). "Prefabricated vertical drains". Engineering Guidelines. Federal Highway Adm. Mc Lean, Va. Report No. FHWA/RD-86/168.
- Tang X. W. & Onitsuka K. (2000). "Consolidation by vertical drains under time-dependant loading". *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 24(9), 739-751.
- Terzaghi K., Peck R. B. and Mesri G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Yoshikuni H. & Nakanodo H. (1974). "Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability". *Soils and Foundations*, 14(2), 35-46.
- Zhou W., Hong H.P. and Shang J. (1999). "Probabilistic design method of preloaded vertical drains for soil improvement". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(8), 659-664.
- Zhu G. & Yin J. H. (2004). "Consolidation analysis of soil with vertical and horizontal drainage under ramp loading considering smear effects". *Geotextiles and Geomembranes*, 22(1), 63-74.