

ANALISI NUMERICHE DI FRONTI DI SCAVO IN MATERIALE COESIVO

Claudio di Prisco
Politecnico di Milano
claudio.diprisco@polimi.it

Luca Flessati
Politecnico di Milano
luca.flessati@polimi.it

Gabriele Frigerio
Politecnico di Milano
gabriele.frigerio@polimi.it

Sommario

In questa nota gli autori mostrano i risultati di una serie di analisi numeriche FEM volta ad analizzare la risposta meccanica di fronti di galleria soggetti a scavo. In particolare è stata considerata una galleria profonda scavata all'interno di uno strato omogeneo di materiale coesivo in condizioni non drenate. I risultati analisi numeriche hanno mostrato che il sistema non raggiunge una condizione di rottura a causa della propagazione spaziale della porzione di dominio plasticizzata. Inoltre, con la definizione di opportune variabili adimensionali per lo sforzo e lo spostamento medio del fronte, è stato possibile ricavare un unico involucro per le curve caratteristiche del fronte ("curva madre"), che può essere utilizzato dai progettisti per la valutazione della risposta meccanica del sistema.

1. Introduzione

Nel caso di gallerie di modesta lunghezza o che presentano un tracciato molto irregolare, lo scavo tradizionale è ad oggi preferito allo scavo meccanizzato per ragioni economiche. Nello scavo in terreni particolarmente scadenti la stabilità del fronte di scavo assume una notevole importanza e i progettisti sono interessati ad una previsione quantitativa sugli spostamenti del fronte causati dalle operazioni di scavo.

La stabilità di fronti di scavo in materiale coesivo è stata studiata da molti autori attraverso studi teorici e campagne sperimentali. Fra gli studi teorici si cita ad esempio il lavoro di Davis *et al.* (1980), nel quale gli autori hanno studiato la stabilità di fronti di scavo mediante il teorema statico ed il teorema cinematico dell'analisi limite. Fra le campagne sperimentali, invece, si ricordano: (i) il lavoro di Broms e Bennermark (1967), i quali hanno definito un rapporto di stabilità a partire da prove di estrusione in laboratorio, e (ii) le prove in centrifuga eseguite da Mair (1979).

In questa nota sono mostrati i risultati di una campagna di analisi FEM, nella quale si è studiato il comportamento di fronti di gallerie, posti all'interno di uno strato omogeneo di argilla in condizioni non drenate, soggetti ad operazioni di scavo. Nel §2 sono discussi i risultati di un'analisi numerica elastica ed un'analisi numerica elastoplastica ed nel §3 sono illustrati i risultati di uno studio parametrico che ha permesso la definizione di un'unica "curva caratteristica madre per il fronte".

2. Analisi numeriche

Gli autori hanno realizzato una campagna di analisi numeriche tridimensionali FEM, utilizzando il codice commerciale Midas GTS NX (<http://en.midasuser.com/>), per valutare la risposta meccanica del sistema rappresentato in Fig. 1a.

Nelle analisi numeriche si è considerato uno strato omogeneo di terreno coesivo all'interno del quale è ipotizzata immersa la galleria, la cui sezione è rappresentata in Fig. 1b.

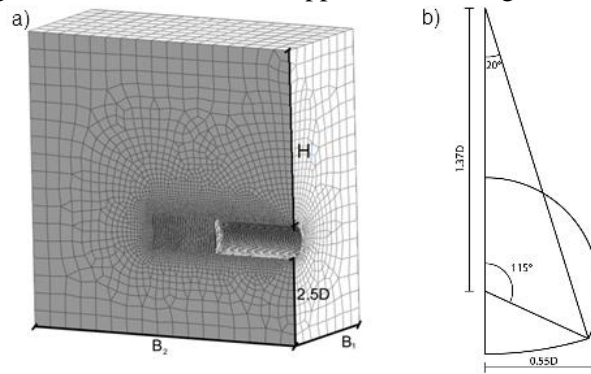


Fig. 1 a) modello numerico b) sezione della galleria

Le operazioni di scavo sono schematizzate mediante una progressiva riduzione dello sforzo orizzontale applicato sul fronte.

Si sono effettuate le seguenti ipotesi semplificative:

- il comportamento meccanico del materiale è isotropo elastico (E è il modulo di Young e ν è il coefficiente di Poisson) o elastico-perfettamente plastico;
- il terreno è in condizioni non drenate e, nel caso di legame costitutivo elastoplastico, l'unico parametro costitutivo legato alla resistenza del materiale è la coesione non drenata C_u ;
- il rapporto geometrico H/D (con H la copertura del tunnel e D il diametro equivalente del tunnel) è sufficientemente grande da garantire che il contorno superiore del dominio non influenzi la geometria del meccanismo di rottura;
- il rivestimento è rigido e si è trascurata l'influenza della sua rigidità sulla risposta meccanica del sistema. Per semplicità si è assunto che il rivestimento termini esattamente a ridosso del fronte.

La distanza dell'arco rovescio dal contorno inferiore del dominio è pari a $2.5D$ e le dimensioni orizzontali del modello B_1 e B_2 sono pari a $3.75D$ e $8.33D$ (Fig. 1a).

Le analisi numeriche sono suddivise nelle seguenti fasi:

- Lo stato iniziale di sforzo è ottenuto applicando la forza di gravità in un mezzo inizialmente supposto elastico o assegnando un valore iniziale di K_0 ($K_0 = \sigma_{x0}/\sigma_{z0}$, dove σ_{x0} e σ_{z0} sono rispettivamente lo sforzo totale iniziale orizzontale e verticale).
- La distribuzione iniziale di sforzi orizzontale del fronte è progressivamente ridotta (Fig. 2).

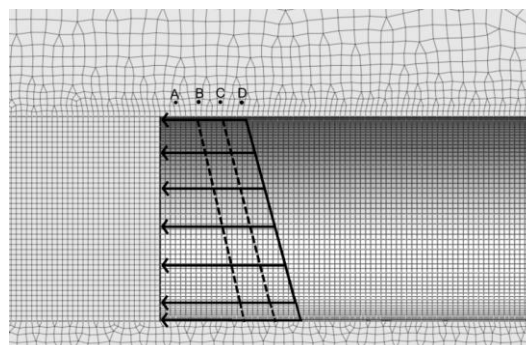


Fig. 2 Progressiva riduzione degli sforzi al fronte

Sul contorno inferiore del dominio gli spostamenti verticali sono impediti, sui contorni laterali del dominio si sono impediti gli spostamenti orizzontali, mentre sono permessi gli spostamenti verticali e sul contorno superiore si è imposto uno stato di sforzo nullo oppure un sovraccarico verticale uniforme (q). Sulla superficie interna del rivestimento rigido si è imposto uno stato di sforzo nullo.

I risultati numerici riportati in seguito sono analizzati considerando in particolare: (i) la curva caratteristica del fronte definita come relazione fra gli spostamenti medi del fronte (u_f) al variare dello sforzo orizzontale medio applicato al fronte (σ_f), (ii) l'evoluzione degli sforzi orizzontali e verticali in prossimità del rivestimento, (iii) l'evoluzione del meccanismo plastico nel nucleo di avanzamento.

A seguire si riportano le curve caratteristiche di due analisi, una elastica e una elastoplastica: in Fig. 4a sono rappresentate nel piano dimensionale σ_f - u_f , mentre in Fig. 4b le stesse curve sono rappresentate in un piano normalizzato $RLSR$ - u_σ (di Prisco *et al.*, 2015) con:

$$RLSR = \left(1 - \frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right) \quad (1)$$

e

$$u_\sigma = \frac{u_f}{u_{r,el}}. \quad (2)$$

σ_0 è lo sforzo medio iniziale sul fronte e $u_{r,el}$ è lo spostamento del fronte ottenuto dall'analisi elastica per fronte scarico, definito spostamento residuo elastico.

Da Fig. 4 si nota che, nel caso delle analisi elastiche (linea tratteggiata), la risposta del sistema è lineare, mentre nel caso delle analisi elastoplastiche (linea continua) si nota una risposta non lineare in cui inizialmente la risposta è elastica, poi si nota un "ginocchio" ed infine la risposta si attesta su un andamento pseudo-lineare.

L'assenza di un asintoto orizzontale nella curva caratteristica elastoplastica mostra che il sistema ha un comportamento "pseudo-hardening", non derivante dal legame costitutivo considerato, bensì dalla variazione degli sforzi nel terreno circostante al rivestimento della galleria.

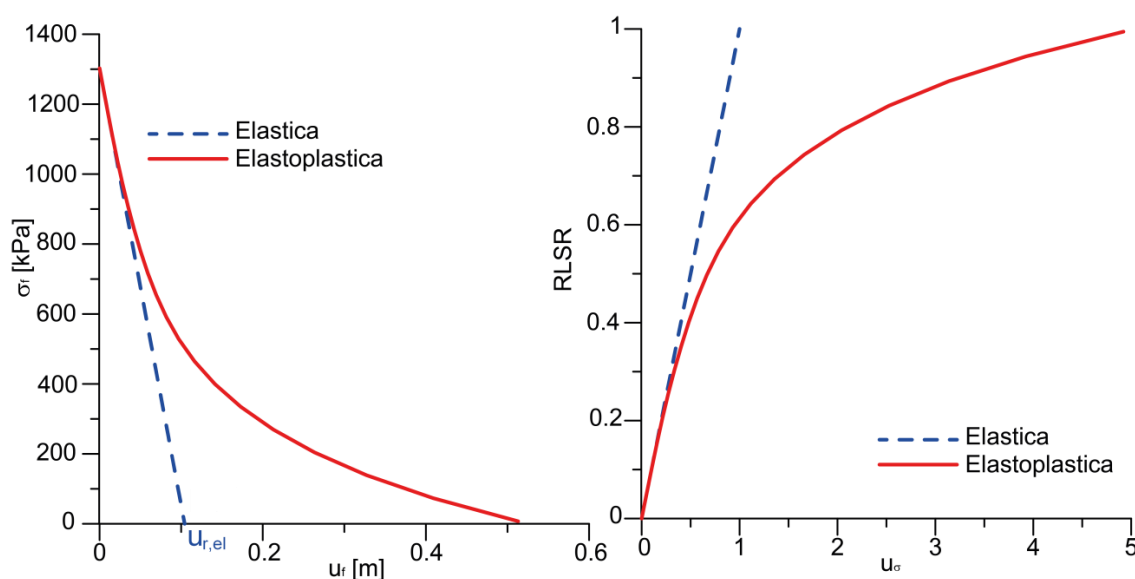


Fig. 3 Risultati analisi numeriche con $D=12$ m, $H=60$ m, $\nu=0.5$, $\gamma_{sat}=20$ kN/m³, $E=50$ MPa e $C_u=200$ kPa (solo per l'analisi elastoplastica) a) nel piano dimensionale, b) nel piano adimensionale $RLSR$ - u_σ

In Fig. 5 è rappresentato l'andamento degli sforzi verticali ed orizzontali nei punti A, B, C e D di Fig. 2 durante lo scarico del fronte. Nel caso elastico (linee tratteggiate) si nota un incremento lineare sia degli sforzi orizzontali sia degli sforzi verticali, con incrementi maggiori nei punti più prossimi al fronte. Nel caso elastoplastico (linee continue) si nota, invece, che la risposta è solo inizialmente elastica. Successivamente si abbandona l'andamento lineare e la curvatura delle linee è positiva. Nei punti A, B e C si nota un andamento globale non monotono con un picco, che si manifesta per diversi valori di $RLSR$ al variare della posizione del punto considerato. Il picco è causato dalla plasticizzazione del terreno che circonda il rivestimento della galleria e lo spostamento del picco mostra che la porzione plasticizzata di terreno si espande progressivamente, conferendo al sistema il comportamento "pseudo-hardening".

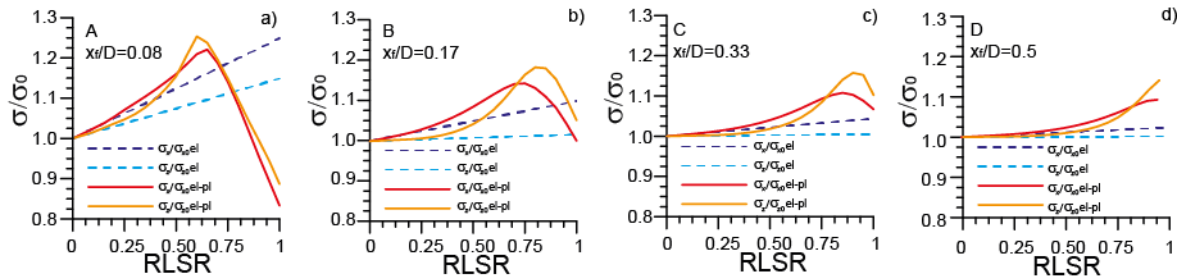


Fig. 4 Evoluzione degli sforzi verticali (σ_v) e orizzontali (σ_h) per i punti A (Fig. 4a), B (Fig. 4b), C (Fig. 4c) e D (Fig. 4d) di Fig. 2 per $D=12m$, $E=50 MPa$, $\nu=0.5$ $C_u=200 kPa$ e $\gamma_{sat}=20 kN/m^3$

L'evoluzione del meccanismo plastico è mostrata in Fig. 6 dove i punti colorati rappresentano le porzioni di dominio plasticizzate. All'aumentare di $RLSR$ il volume plasticizzato si espande sia verso il nucleo d'avanzamento sia nelle porzioni di terreno poste intorno al rivestimento.

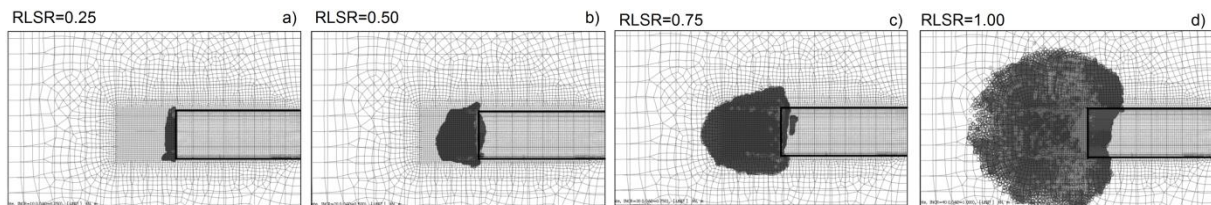


Fig. 5 Evoluzione delle porzioni di dominio plasticizzate al variare dello scarico del fronte per $D=12m$, $E=50 MPa$, $\nu=0.5$ $C_u=200 kPa$ e $\gamma_{sat}=20 kN/m^3$

3. Studio parametrico

Gli autori hanno eseguito una campagna di analisi parametriche variando i parametri meccanici (C_u ed E), la geometria del sistema (H e D) e le condizioni iniziali di sforzo. Le condizioni iniziali di sforzo sono state variate considerando diversi valori di H , q e K_0 .

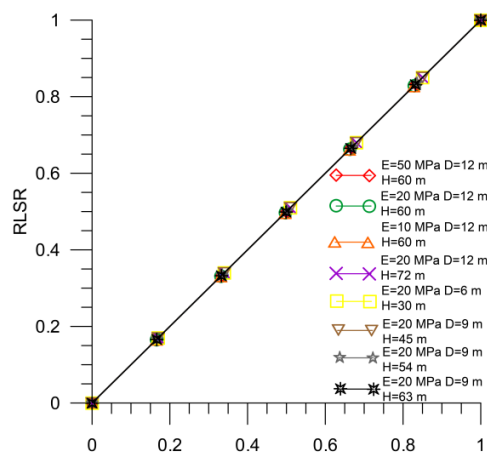


Fig. 6 Risultati di analisi elastiche nel piano $RLSR-u_0$

In Fig. 7 sono rappresentati nel piano $RLSR-u_\sigma$ i risultati di analisi elastiche in cui è stata variata la geometria (H e D) ed il modulo di Young. Si può notare che tutte le linee sono sovrapposte ed inclinate di 45° .

In Fig. 8 sono rappresentati nel piano $RLSR-u_\sigma$ i risultati di analisi elastoplastiche corrispondenti a diversi valori di C_u , H/D e q . Ogni curva è caratterizzata da un valore del rapporto di stabilità N differente (Broms e Bennermark, 1967):

$$N = \frac{\gamma_{sat}(H + D/2) + q}{C_u} \quad (3)$$

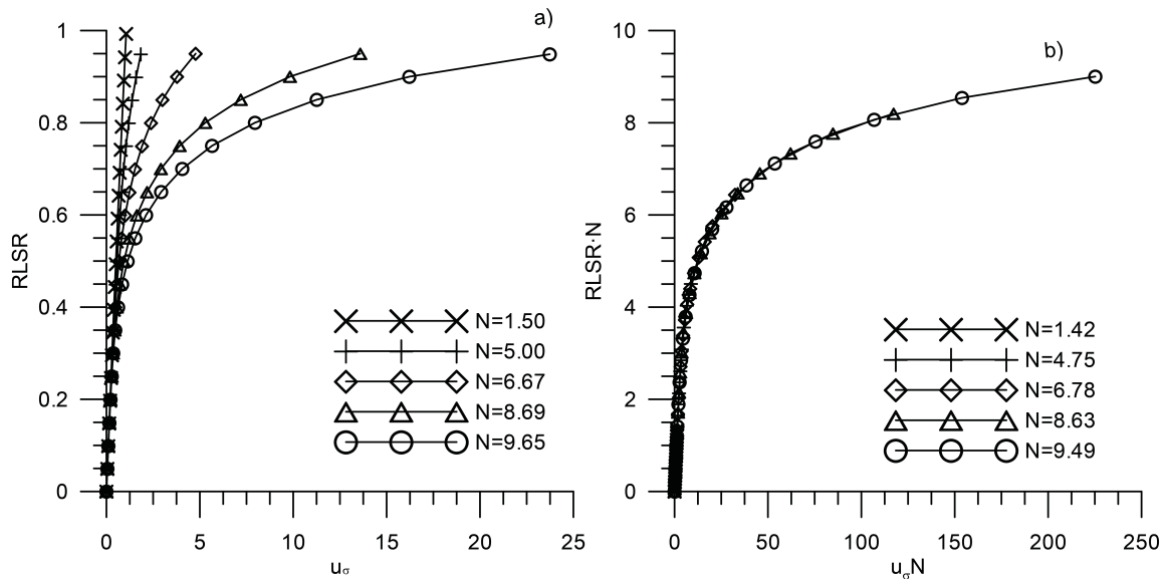


Fig. 7 Risultati di analisi elastiche al variare di N : a) nel piano $RLSR-u_\sigma$, b) nel piano $RLSR \cdot N - u_\sigma \cdot N$

Tutte le curve sono caratterizzate dalla stessa pendenza iniziale (pari a 1), ma al crescere di N le curve si allontanano prima dal regime elastico e mostrano spostamenti maggiori. Moltiplicando sia l'asse orizzontale, che l'asse verticale per N si ottengono le curve rappresentate in Fig. 8 che risultano essere sovrapposte. L'introduzione di N nelle variabili adimensionali non modifica la forma delle curve caratteristiche ma ne altera la lunghezza: curve caratterizzate da bassi valori di N terminano nel tratto elastico dell'involuppo, mentre curve con elevati valori di N terminano nel tratto plastico.

Si sono anche eseguite analisi numeriche al variare di K_0 , i cui risultati sono rappresentati in Fig. 9. Le curve collassano su un'unica curva (*FMC* "Front Mother Characteristic envelope") rappresentandole sul piano adimensionale $ALSR-s$ con:

$$ALSR = RLSR \cdot N^* \quad (4)$$

e

$$s = u_\sigma \cdot N^* \quad (5)$$

Il rapporto d'instabilità N^* è definito nel modo seguente:

$$N^* = N \cdot K_0^a, \quad (6)$$

ove a è un coefficiente adimensionale assunto pari a 0.82 per ottenere l'involuppo di Fig. 9.

Ogni punto della curva madre può essere interpretato come il punto finale di una curva corrispondente a $ALSR=N^*$ ($RLSR=1$ e $\sigma_f=0$). Per tale motivo, noti N^* , $u_{r,el}$ e la curva madre è possibile fornire una stima quantitativa dello spostamento del fronte senza eseguire analisi numeriche elastiche-perfettamente plastiche.

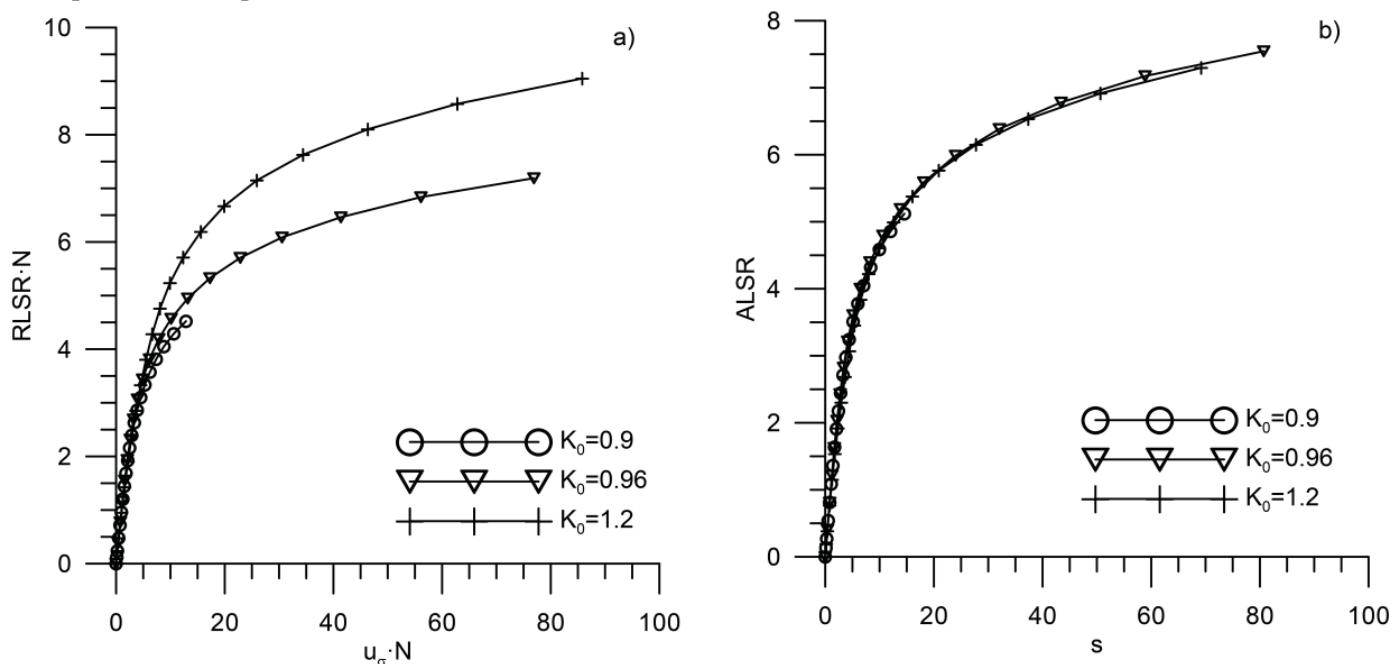


Fig. 8 Risultati di analisi elastiche al variare di K_0 : a) $RLSR \cdot N - u_{\sigma} \cdot N$, b) nel piano $ALSR - s$

4. Conclusioni

In questa nota gli autori hanno mostrato i risultati di una campagna di analisi numeriche FEM in cui si è studiata la risposta meccanica di fronti di gallerie. I risultati delle analisi numeriche hanno permesso di mostrare che la duttilità del legame costitutivo e la propagazione spaziale della porzione di dominio plasticizzata conferiscono al sistema un comportamento “pseudo-hardening”. Inoltre definendo delle opportune variabili adimensionali gli autori hanno definito una curva caratteristica madre per il fronte, che può essere utilizzata per valutare la risposta del sistema note le proprietà meccaniche, la geometria e lo spostamento residuo elastico.

Ringraziamenti

Questa ricerca è stata finanziata dalle società Rocksoil S.p.A. e Maccaferri S.p.A. e si colloca in un più ampio programma di ricerca numerico/sperimentale mirato alla definizione di soluzioni progettuali innovative nel consolidamento di fronti di tunnel mediante elementi strutturali di vetroresina.

Bibliografia

- Broms, B. B., & Bennermark, H. (1967). Stability of clay at vertical openings. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
- Davis, E. H., Gunn, M. J., Mair, R. J., & Seneviratne, H. N. (1980). The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material. *Geotechnique*, 30(4), 397-416.
- di Prisco, C., Flessati, L., Frigerio, G. & Lunardi, P. (2015). Numerical and theoretical analysis of the response of tunnel face under excavation operations. *Geotechnique*, submitted for publication
- Mair, R.J. (1979). Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay. PhD thesis, Cambridge University