

Gli effetti della lunghezza del fronte negli scavi con diaframmi liberi in sommità

Andrea Dei Svaldi*

Sommario

Le misure eseguite in corso d'opera mettono in evidenza come l'entità della deformazione delle strutture di sostegno sia influenzata dall'estensione del fronte di scavo. Da quest'osservazione ha preso spunto un'analisi numerica volta a studiare l'effetto dell'estensione finita del fronte di scavo sul comportamento di un diaframma libero in sommità, definito come "effetto tridimensionale".

I risultati ottenuti, riportati in parte nella nota, permettono di valutare l'importanza di tale effetto relativamente alle tradizionali condizioni di calcolo (stato piano di deformazione); inoltre mettono in evidenza il ruolo della trave di coronamento nel comportamento "a piastra" del diaframma e l'influenza dell'estensione del fronte di scavo nei problemi d'interrazione terreno-opera di sostegno.

1. Introduzione

Dati sperimentali, raccolti durante la realizzazione di scavi sostenuti da diaframmi, mostrano sensibili differenze nello stato di deformazione delle sezioni di mezzeria, relative a lati di scavo di diverso sviluppo longitudinale (Fig. 1), con conseguenti variazioni nello stato di sollecitazione.

Quindi in base alle misure, lo sviluppo planimetrico sembra avere un'influenza non indifferente sul comportamento di tali opere [OU C.Y. *et al.*, 1996]. Generalmente, però, il dimensionamento strutturale dei diaframmi viene eseguito considerando uno schema di comportamento assimilabile ad uno stato piano di deformazione. I risultati si riferiscono quindi ad un'opera di estensione infinita, quando in effetti, nella maggior parte dei casi, le paratie sono strutture adibite al sostegno di scavi di forma, in pianta, quadrilatera. In tali situazioni non sempre è soddisfatta la condizione di stato piano di deformazione e quindi non sempre i risultati del calcolo corrispondono alle misure eseguite in fase d'esercizio.

Infatti, trattare il problema allo stato piano di deformazione, significa considerare la paratia priva di vicoli in direzione longitudinale, impostazione che, seppur a favore della sicurezza, molte volte può presentarsi onerosa per la progettazione e non completamente aderente alla realtà.

Un'analisi del problema attraverso una modellazione tridimensionale mette in evidenza i limiti della rappresentazione bidimensionale in determinati campi di applicazione, nei quali, per tipologia strutturale e per tecniche esecutive, risulta opportuno tenere in considerazione l'estensione limitata

delle opere ed i vincoli al contorno, adottando per il calcolo condizioni di simmetria assiale [BURLAND *et alii*, 1979] oppure schematizzazioni strutturali simili a quelle utilizzate da OU *et al.* [1996].

Il problema della tridimensionalità dell'opera è spesso affrontato con modelli che prevedono la schematizzazione della trave di coronamento con molle equivalenti, sia traslazionali che torsionali, tanto più influenti sul comportamento della struttura quanto più ci si trova in prossimità delle zone d'intersezione tra pannelli (p. es. zone d'angolo); nelle zone di mezzeria invece la rigidità delle molle diminuisce fino a poter essere ritenuta trascurabile [FENELLI *et al.*, 1997]; resta però da stabilire per quali estensioni del fronte di scavo sia lecito trascurare l'influenza della trave di coronamento nelle zone di mezzeria.

Nella nota si è cercato di fornire una parziale risposta, presentando alcuni risultati ottenuti da uno studio parametrico dell'effetto tridimensionale nei problemi di progetto delle paratie libere in sommità, che si è sviluppato con l'analisi di situazioni diverse per geometria, schema strutturale e deformabilità del terreno.

2. Impostazione del problema e modello di calcolo

Lo scavo ipotizzato ha pianta rettangolare, lunghezza B pari a 20 m costante e lunghezza L variabile tra 10 m e 80 m (Fig. 2). Il caso limite di lunghezza L infinita è stato ricondotto alla condizione di stato piano di deformazione.

La tipologia strutturale considerata è costituita da un diaframma in calcestruzzo armato, di spessore pari a 30 cm, 60 cm ed 80 cm. La profondità di

* Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica, Università degli Studi di Padova.

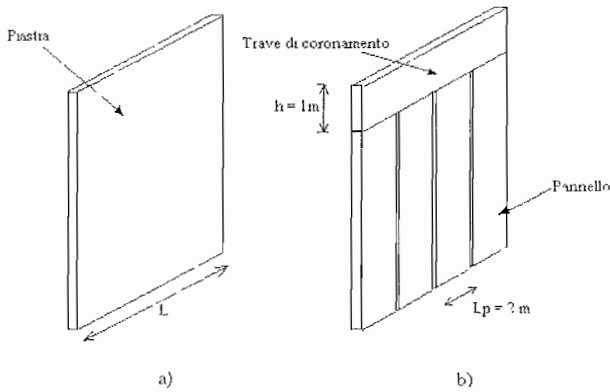


Fig. 4 - Diaframma come piastra a) ed insieme di pannelli collegati da una trave b).
 Fig. 4 - Diaphragm as a 2-way slab a) and panels connected by a capping beam b).

3. Il comportamento a piastra e l'apporto della trave di coronamento

In generale le paratie vengono eseguite in opera, diaframmi in calcestruzzo armato, berlinesi ecc., oppure sono realizzate attraverso l'infissione di elementi prefabbricati in calcestruzzo armato o in acciaio. In ogni caso, fatta eccezione per le palancolate in acciaio, per le quali il mutuo collegamento dovrebbe essere assicurato dalla conformazione della singola palancola, gli elementi costituenti la paratia vengono resi solidali mediante dei giunti strutturali di varia forma ed una trave di coronamento.

Per evidenziare il contributo della trave sul comportamento d'insieme, è stata condotta un'analisi di confronto tra la modellazione della paratia come

piastra (Fig. 4a) e come struttura costituita da pannelli svincolati, della larghezza di 2 m, collegati da una trave in spessore di altezza pari ad 1 m (Fig. 4b).

Osservando le deformati ed i grafici delle sollecitazioni flettenti, di cui un esempio nelle Figg. 5 e 6, si riscontra un'equivalenza di comportamento delle due configurazioni.

Nei grafici successivi, Figg. 7 e 8, è riportato l'andamento del rapporto tra lo spostamento in sommità (δ) calcolato, al variare della lunghezza L, nella sezione di mezzeria del modello tridimensionale e quello calcolato in condizioni di stato piano di deformazione ($\delta_{\text{plane strain}}$), sia per la tipologia di Fig. 4a che per quella di Fig. 4b. I grafici hanno un andamento sostanzialmente analogo, a parità di spessore, per le due configurazioni e tendono all'eguaglianza al diminuire della rigidità flessionale del diaframma ed all'aumentare del modulo del terreno.

Tali osservazioni portano a concludere che lo stato deformativo e tensionale della sezione di mezzeria di un diaframma costituito da un insieme di pannelli collegati da una trave di sommità, almeno per caratteristiche flessionali e torsionali analoghe a quelle utilizzate per il calcolo, è sostanzialmente paragonabile a quello di una piastra continua dello stesso spessore.

La trave di coronamento, purché dotata di adeguata rigidità flessionale e torsionale, si rivela quindi un elemento indispensabile per il funzionamento "a piastra" del diaframma.

Di conseguenza diventa necessario un corretto dimensionamento della stessa, che tenga conto delle sollecitazioni flessionali, torsionali e di taglio prevedibili in fase d'esercizio.

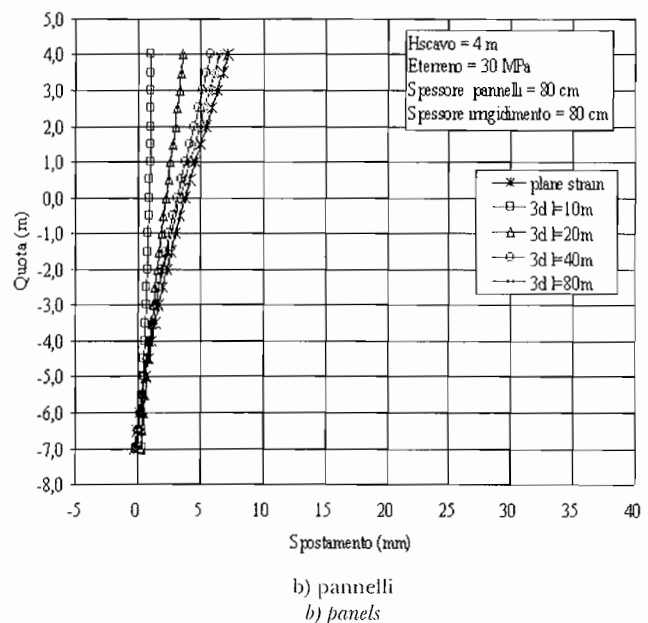
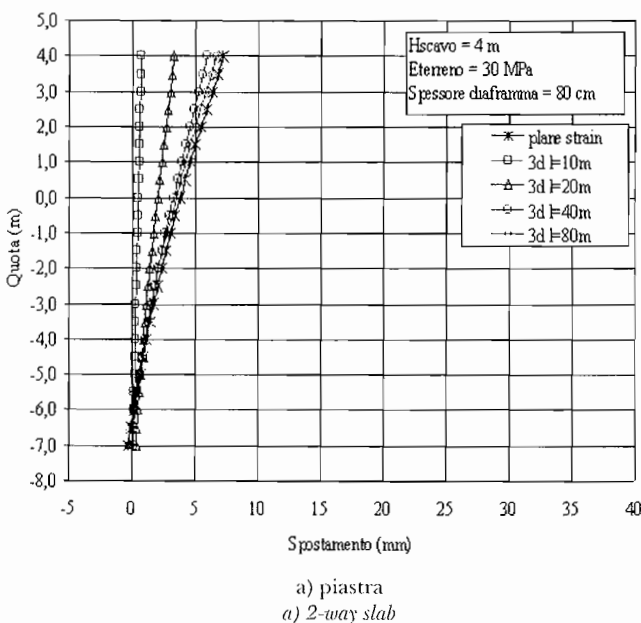


Fig. 5 - Deformate relative alla sezione di mezzeria.
 Fig. 5 - Displacements calculated at the main excavation section.

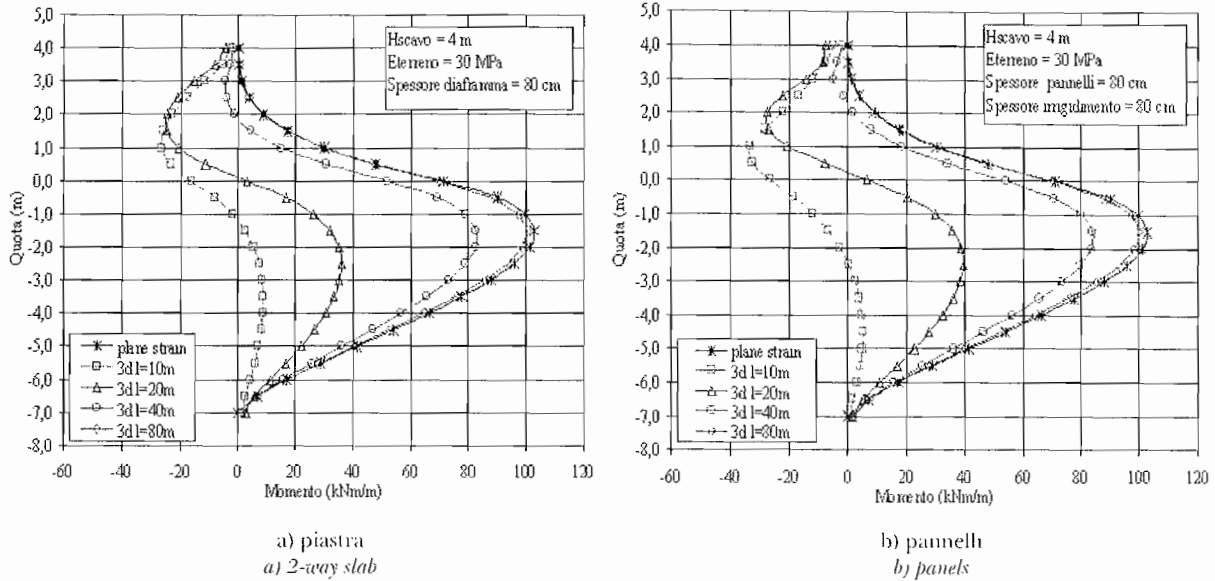


Fig. 6 – Diagrammi del momento flettente relativi alla sezione di mezzeria.
 Fig. 6 – Bending moments calculated at the main excavation section.

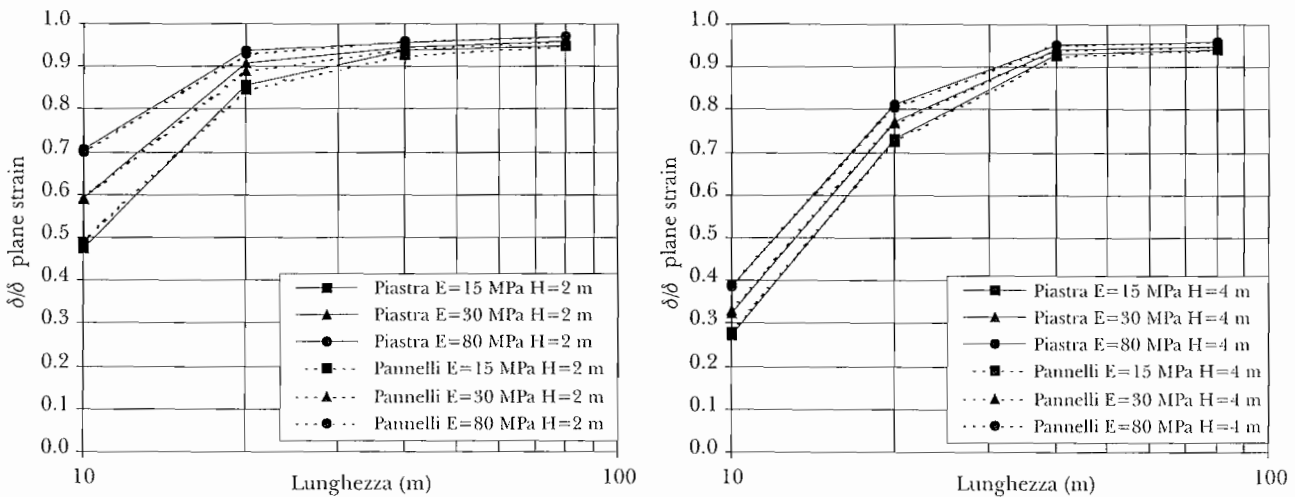


Fig. 7 – Diaframma dello spessore di 30 cm, per profondità di scavo di 2 m e 4 m.
 Fig. 7 – Diaphragm thickness 30 cm, excavation depth 2 m and 4 m.

4. Osservazioni relative all'effetto tridimensionale

Sulla base delle considerazioni svolte nel paragrafo precedente, le osservazioni relative all'effetto tridimensionale vengono di seguito sviluppate con riferimento al comportamento del diaframma modellato come piastra.

Nelle Figg. 9, 10 e 11 si riporta l'andamento del rapporto $\delta/\delta_{\text{plane strain}}$, in corrispondenza della sezione di mezzeria, in funzione della lunghezza di scavo. I calcoli sono stati svolti per diversi valori delle caratteristiche del terreno e della profondità di scavo, al variare dello spessore del diaframma e quindi della rigidità flessionale dello stesso.

Considerando una lunghezza di scavo di 10 m ed uno spessore pari a 30 cm, lo spostamento δ risultante, per una profondità di scavo di 2 m, varia tra il 50% ed il 70% dello spostamento in condizioni di stato piano, mentre per una profondità di 4 m varia tra il 30% ed il 40%. In quest'ultimo caso, lo spostamento risulta inferiore dell'analogo calcolato in stato piano di deformazione, mettendo in evidenza come l'effetto tridimensionale sia tanto più marcato quanto più profondo è lo scavo.

All'aumentare dello spessore del diaframma i due campi di variabilità tendono all'intersezione, spostandosi verso valori inferiori del rapporto $\delta/\delta_{\text{plane strain}}$, indicando come l'aumento di rigidità del diaframma tenda ad amplificare l'effetto tridimensionale e ad equalizzare l'influenza dell'altezza

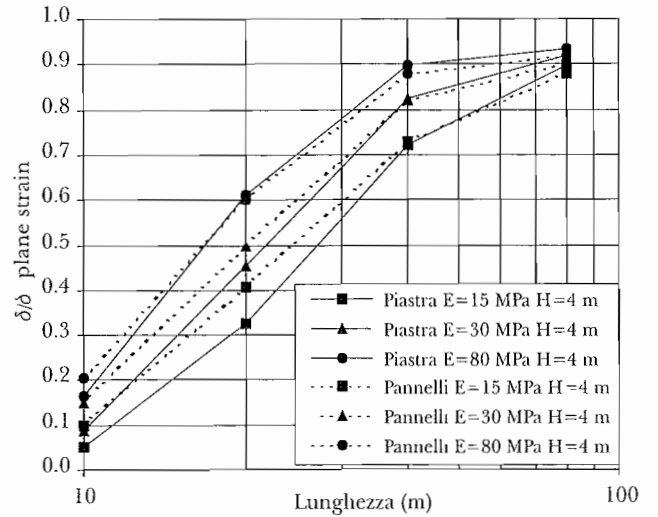
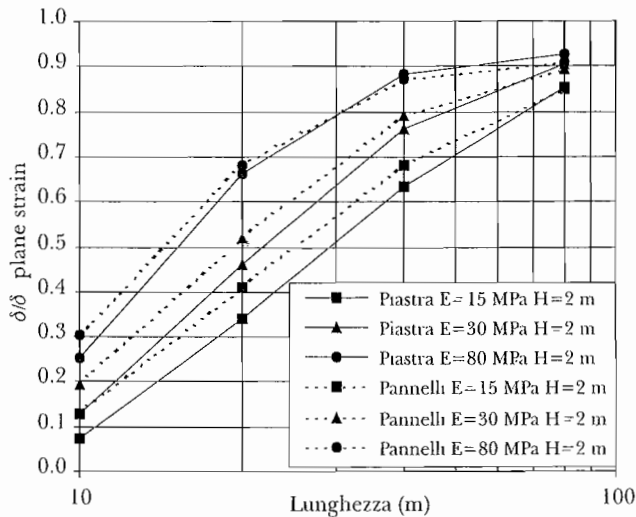


Fig. 8 – Diaframma dello spessore di 80 cm, per profondità di scavo di 2 m e 4 m.
 Fig. 8 – Diaphragm thickness 80 cm, excavation depth 2 m and 4 m.

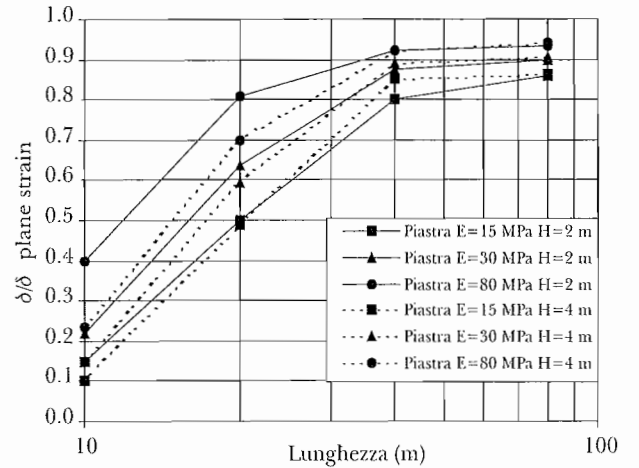
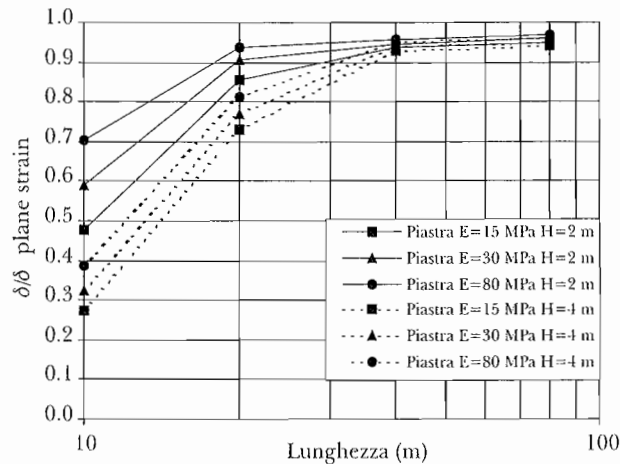


Fig. 9 – Spessore diaframma 30 cm.
 Fig. 9 – Diaphragm thickness 30 cm.

Fig. 10 – Spessore diaframma 60 cm.
 Fig. 10 – Diaphragm thickness 60 cm.

di scavo e ciò è tanto più evidente quanto minore è la rigidità del terreno.

Se aumenta la lunghezza è evidente la tendenza asintotica delle curve verso la situazione di stato piano. Per lo spessore di 30 cm, si può osservare come già una lunghezza di 40 m sia sufficiente per ottenere una sostanziale indipendenza del rapporto $\delta/\delta_{\text{plane strain}}$ sia dalla profondità di scavo che dal modulo del terreno; naturalmente tale lunghezza è tanto maggiore quanto maggiore è la rigidità della struttura, infatti per uno spessore pari a 80 cm la soluzione tridimensionale è paragonabile a quella di stato piano per lunghezze di circa 90-100 m.

È anche interessante notare che, mentre per lo spessore di 30 cm, le curve relative alla profondità di 4 m si mantengono al di sotto di quelle riferite alla profondità di 2 m per ogni lunghezza considerata, per gli spessori maggiori (60 cm e 80 cm) e

per lunghezze superiori ai 20 m la posizione delle curve, a parità di terreno, si inverte e questo processo è tanto più evidente quanto più rigido è il diaframma e quanto più deformabile il terreno. Inoltre, con riferimento agli spessori maggiori, si osserva che le curve relative alla profondità di scavo minore (H=2 m) e moduli del terreno minimo (E=15 MPa) e massimo (E=80 MPa) considerati costituiscono sostanzialmente i limiti, rispettivamente inferiore e superiore, delle curve ottenute. Tale risultato è attribuibile alla diversa incidenza della rigidità relativa e del carico sulla deformabilità della parte infissa e della parte a sbalzo. In Fig. 12, relativamente allo spessore di 80 cm, sono tracciati a tratto grosso i due estremi del campo di variabilità del rapporto $\delta/\delta_{\text{plane strain}}$, all'interno del quale si trovano le curve calcolate per profondità di scavo maggiori.

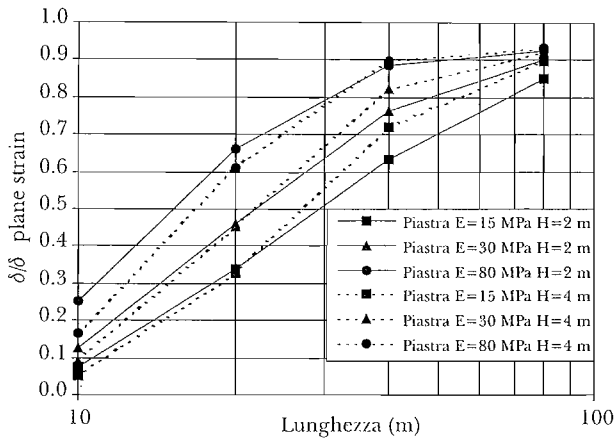
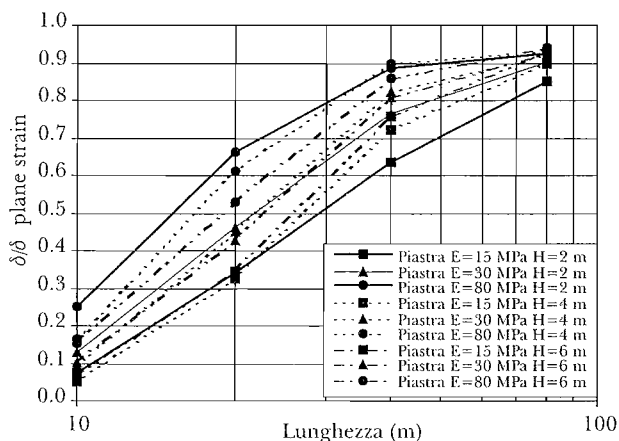


Fig. 11 – Spessore diaframma 80 cm.

Fig. 11 – Diaphragm thickness 80 cm.

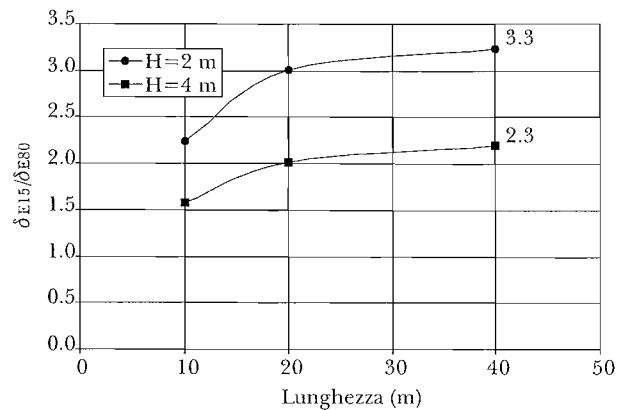
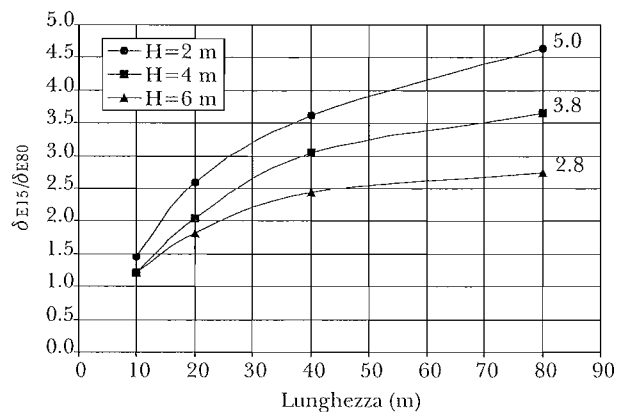
Fig. 12 – Campo di variabilità del rapporto $\delta/\delta_{\text{plane strain}}$ per lo spessore di 80 cm.Fig. 12 – Range of the ratio $\delta/\delta_{\text{plane strain}}$, diaphragm thickness 80 cm.

5. Il ruolo delle caratteristiche di deformabilità del terreno

Con riferimento all'interazione terreno-struttura, nelle Figg. 13 e 14 è riportato l'andamento del rapporto tra gli spostamenti in sommità ottenuti nella sezione di mezzzeria adottando per il terreno un modulo di elasticità pari a 15 MPa (δ_{E15}) ed un modulo pari a 80 MPa (δ_{E80}), considerando una paratia dello spessore di 30 cm e 80 cm.

Per lunghezze rispettivamente di 40 m e di 80 m il rapporto $\delta_{E15}/\delta_{E80}$ risulta molto vicino (92%-99%) al valore limite calcolato per le condizioni di stato piano (riportato alla destra di ogni curva); la tendenza verso tale valore è tanto più rapida quanto maggiore è la profondità di scavo.

Al diminuire della lunghezza di scavo il terreno influenza sempre meno il comportamento della struttura e infatti il rapporto tende ad un valore unitario per tutte le profondità di scavo analizzate; ciò è più evidente per lo spessore di 80 cm, struttura di

Fig. 13 – Andamento del rapporto $\delta_{E15}/\delta_{E80}$ in funzione della lunghezza L e della profondità di scavo H , spessore diaframma 30 cm.Fig. 13 – Ratio $\delta_{E15}/\delta_{E80}$ as function of the length L and the depth of excavation H , diaphragm thickness 30 cm.Fig. 14 – Andamento del rapporto $\delta_{E15}/\delta_{E80}$ in funzione della lunghezza L e della profondità di scavo H , spessore diaframma 80 cm.Fig. 14 – Ratio $\delta_{E15}/\delta_{E80}$ as function of the length L and the depth of excavation H , diaphragm thickness 80 cm.

maggiore rigidità: infatti, per una lunghezza di 10 m, $\delta_{E15}/\delta_{E80}$ assume valori prossimi a 1.2 ($H=4$ m e 6 m) e 1.5 ($H=2$ m), con una variazione di circa il 70% rispetto al valore ottenuto in condizioni di stato piano per la profondità di 2 m e di circa il 43% per la profondità di 6 m.

Di conseguenza, più deformabile è la struttura minore è la lunghezza di scavo limite, raggiunta la quale il terreno non ha più alcuna influenza sul comportamento del diaframma e quindi non si ha più interazione tra l'opera e il mezzo in cui si trova immersa.

Inoltre, poiché per le condizioni di stato piano si ottengono i valori maggiori del rapporto $\delta_{E15}/\delta_{E80}$, è chiaro che in tali condizioni assume particolare importanza, per il dimensionamento dell'opera, la scelta dei parametri rappresentativi del terreno [SIMPSON B., 1992]; l'analisi eseguita mette però in evidenza che l'importanza della scelta

dei parametri risulta condizionata anche dall'impostazione geometrica dello scavo, dal momento che, al diminuire della lunghezza di scavo, si riduce l'influenza delle caratteristiche del terreno sul comportamento del diaframma.

6. Conclusioni

Le misure eseguite durante la realizzazione di scavi, con particolare riferimento agli spostamenti delle opere di sostegno, mettono in evidenza come l'entità dello spostamento debba essere correlata alle caratteristiche planimetriche dello scavo e più precisamente all'estensione del fronte.

Sulla base di tali osservazioni è stata analizzata, attraverso uno studio parametrico, l'influenza delle dimensioni del fronte di scavo sul comportamento di paratie di sostegno, libere in sommità; l'effetto risultante sullo stato di deformazione e sollecitazione delle opere è stato definito come "effetto tridimensionale".

I risultati ottenuti per mezzo di una modellazione tridimensionale agli elementi finiti, del complesso problema di interazione tra il terreno e la struttura di sostegno, sono stati confrontati con quelli derivanti dalla modellazione in condizioni di stato piano di deformazione, rendendo possibili alcune interessanti osservazioni riguardanti la progettazione di tali opere.

È stato innanzitutto evidenziato come la trave di coronamento assuma un ruolo fondamentale per il funzionamento dell'opera di sostegno, considerata generalmente come una struttura discontinua, tanto da ottenere, per i pannelli di mezzera, stati di deformazione e sollecitazione paragonabili a quelli di una piastra.

Relativamente alle geometrie considerate, si è potuto valutare, al variare dello spessore, il contributo dell'effetto tridimensionale sullo spostamento in sommità del diaframma, con riferimento all'analogo calcolato nelle condizioni di stato piano.

Infine si è potuto osservare come, al diminuire della lunghezza di scavo ovvero al crescere dell'effetto tridimensionale, lo stato deformativo venga influenzato in modo sempre più trascurabile dalle caratteristiche di deformabilità del terreno. Esistono

quindi delle dimensioni limite al di sotto delle quali l'aspetto strutturale diventa preponderante e viene meno il significato del termine "interazione terreno-struttura", per lo meno così come viene generalmente inteso nell'ambito di tali opere.

Bibliografia

- BURLAND J.B., SIMPSON B., ST JOHN H.D. (1979) – *Movements around excavations in London Clay*. Proc. 7th Eur. Conf. Soil Mech., vol. I, Brighton.
- FENELLI G.B., PAGANO L. (1997) – *Modellazione del comportamento di un diaframma realizzato in terreni piroclastici*. IV Convegno Nazionale dei Ricercatori Universitari, Perugia, 16-17 ottobre 1997, vol. I.
- OU C.Y., CHIOU D.C., WU T.S. (1996) – *Three-dimensional finite element analysis of deep excavations*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. CXXII, n. 5, May, ASCE.
- SIMPSON B. (1992) – *Retaining structures: displacement and design*. 32nd Rankine Lecture, Géotechnique, 42, 4.

Some observations on the 3D effect in the behaviour of cantilever diaphragm walls

Summary

The measurements collected during excavation works show that the longitudinal extent of the excavation influences the amount of deformation of the retaining structure. This experimental evidence provided a starting point to study the effect of the finite extension of the excavation on the behaviour of a cantilever diaphragm wall, defined as "3D effect".

The results, obtained with a 3D finite element analysis, allow to evaluate the importance of the 3D effect with regard to the traditional design methods referring to plane strain conditions; moreover the analysis points out the role of the capping beam in the 2-way slab behaviour of the diaphragm wall and the influence of the longitudinal dimension of the diaphragm wall in the interaction between soil and retaining structure.