

Risultati di prove in sito mediante dilatometro sismico (SDMT)

Marchetti D.

Studio Prof. Marchetti, Roma

Marchetti S., Monaco P., Totani G.

Università dell'Aquila – Dipartimento Ingegneria Strutture Acque e Terreno

SOMMARIO

Il dilatometro sismico (SDMT) è una combinazione del dilatometro standard (DMT) con un modulo sismico per la misura della velocità delle onde di taglio V_S . Questo articolo riassume l'esperienza acquisita negli ultimi anni con l'esecuzione di una grande quantità di prove SDMT in numerosi siti ed illustra le principali lezioni imparate dall'uso dello strumento. In particolare, l'articolo presenta una breve descrizione dell'attrezzatura e della procedura di prova SDMT, confronti tra misure di V_S ottenute da SDMT e da altre prove ed una selezione di risultati SDMT significativi e relativi commenti. Sono inoltre brevemente illustrati i temi di ricerca più attuali su uso ed applicazioni di SDMT, focalizzati principalmente sullo sviluppo di metodi per la determinazione in sito di curve di decadimento del modulo all'aumentare della deformazione e per la valutazione della resistenza alla liquefazione di sabbie a partire da risultati SDMT.

Parole chiave: dilatometro sismico SDMT, dilatometro piatto DMT, velocità onde di taglio V_S , curve $G-\gamma$, liquefazione

1 INTRODUZIONE

Il dilatometro sismico (SDMT) combina le tradizionali caratteristiche del dilatometro piatto DMT (Marchetti, 1980) con la capacità di misurare la velocità delle onde di taglio V_S . Inizialmente concepito per ricerca, negli ultimi anni SDMT è gradualmente entrato nell'uso comune nelle indagini geotecniche. Le principali motivazioni alla base dello sviluppo e della diffusione di SDMT sono:

- Richiesta crescente per analisi sismiche, per le quali V_S è un dato di input indispensabile e "multiuso". Un impulso in tale direzione è fornito anche dalle recenti normative (OPCM 3274/2003, D.M. 14.9.2005) che, in linea con l'Eurocodice 8, prescrivono la determinazione di V_S nei primi 30 m nei siti ricadenti in zona sismica (la maggior parte del territorio nazionale).
- Riconoscimento da parte di ricercatori e progettisti dell'importanza di indagare il comportamento dei terreni a piccole deformazioni (V_S fornisce il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0) e la non linearità della rigidità al variare della deformazione (curve $G-\gamma$).
- Richiesta crescente per analisi di liquefazione.
- Disponibilità dei risultati DMT usuali (ad es. modulo di deformazione M_{DMT}) per applicazioni di progetto correnti (ad es. previsione di cedimenti, probabilmente la migliore applicazione della prova DMT).

Questo articolo presenta i risultati più significativi

accumulati nel periodo 2004-2006 in oltre 30 siti indagati con SDMT, in Italia e nel mondo. Sono inoltre mostrati confronti tra misure di V_S ottenute da SDMT e da altre prove in diversi siti ed illustrati in breve i temi di ricerca più attuali su uso ed applicazioni di SDMT. Per quanto riguarda esecuzione, interpretazione ed applicazioni della prova DMT tradizionale (non sismica) si rimanda alla letteratura disponibile. Il riferimento più completo è il rapporto del Comitato Tecnico TC16 ISSMGE (2001), anche in versione italiana (Marchetti et al., 2001).

2 IL DILATOMETRO SISMICO (SDMT)

Il dilatometro sismico (SDMT) è una combinazione della lama DMT standard con un modulo sismico per la misura della velocità di propagazione delle onde di taglio V_S . La prova è concettualmente simile alla prova con cono sismico SCPT. Introdotto da Hepton (1988), il dilatometro sismico è stato successivamente messo a punto presso Georgia Tech, Atlanta, USA (Martin e Mayne, 1997, 1998; Mayne et al., 1999). Un nuovo sistema SDMT (Figure 1 e 2) è stato recentemente sviluppato in Italia. Il modulo sismico (Figura 1a) è costituito da un corpo cilindrico posto sopra la lama DMT, munito di due ricevitori distanti 0.5 m. Il segnale è amplificato e digitalizzato in profondità. La configurazione *true-interval* a due ricevitori evita possibili inesattezze nella

determinazione dello zero dei tempi dall'impatto, talora riscontrate nella configurazione *pseudo-interval* con un solo ricevitore. Inoltre la coppia di sismogrammi registrata

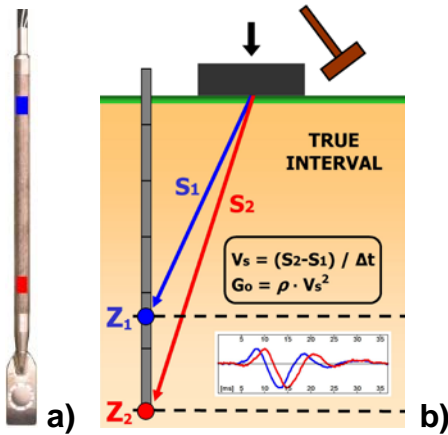


Figura 1. (a) Lama DMT e modulo sismico. (b) Schema della prova con dilatometro sismico SDMT.



Figura 2. Attrezzatura SDMT



Figura 3. Sorgente di energizzazione in superficie

dai due ricevitori ad una data profondità di prova corrisponde allo stesso colpo, anziché a colpi successivi non necessariamente identici, con sensibile miglioramento della ripetibilità delle misure di V_S (ripetibilità osservata ≈ 1 m/s). V_S è ottenuta (Figura 1b) come rapporto tra la differenza di distanza tra la sorgente e i due ricevitori ($S_2 - S_1$) e il ritardo dell'arrivo dell'impulso dal primo al secondo ricevitore (Δt). Le misure di V_S sono effettuate ogni 0.5 m di profondità. L'energizzazione avviene in superficie (Figura 3) mediante un martello a pendolo (≈ 10 kg) che percuote orizzontalmente una base di ferro parallelepipedica pressata verticalmente contro il terreno (grazie al peso del camion) ed orientata con asse longitudinale parallelo all'asse dei ricevitori, in modo che essi offrano la massima sensibilità all'onda di taglio generata. La Figura 4 mostra un esempio di sismogrammi ottenuti da SDMT a varie profondità di prova nel sito del Fucino (è buona pratica riportare affiancati i sismogrammi registrati e rifasati secondo il ritardo calcolato). La

determinazione del ritardo dai sismogrammi SDMT è generalmente ben condizionata, anche in casi in cui i sismogrammi sono meno regolari, come ad esempio nel sito di Avezzano (Figura 5).

I risultati SDMT sono generalmente elaborati in forma grafica come mostrato nell'esempio in Figura 6 (Fucino). Il profilo di V_S è riportato a fianco di quattro profili DMT base – indice di materiale I_D (tipo di terreno), modulo di deformazione confinato M , resistenza al taglio non drenata c_u e indice di spinta orizzontale K_D (correlato a OCR) – ottenuti da correlazioni DMT usuali.

La Tabella 1 riporta un esempio di ripetibilità delle misure di V_S ottenute da SDMT (prove eseguite nel sito della discarica mineraria di Zelazny Most, Polonia). Ogni valore di V_S ad una data profondità di prova corrisponde a colpi di martello differenti. Lo stato dell'arte attuale nella ripetibilità di V_S è uno scarto dell'ordine di pochi m/s.

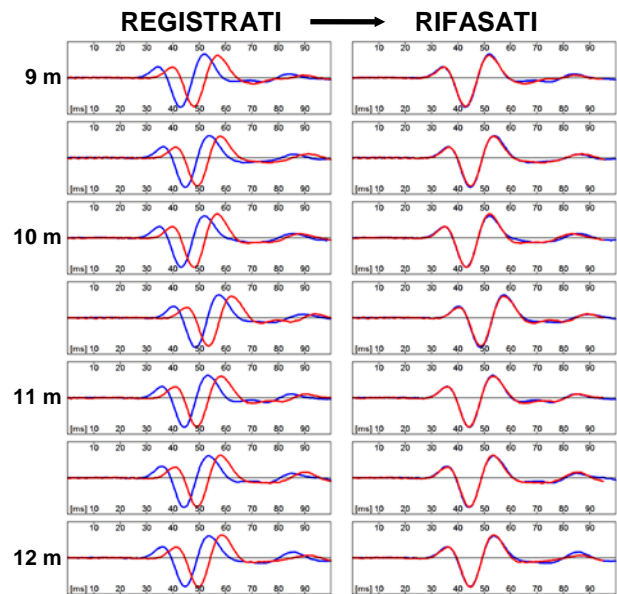


Figura 4. Esempio di sismogrammi ottenuti da SDMT a varie profondità di prova nel sito del Fucino (Telespazio) – registrati e rifasati secondo il ritardo calcolato

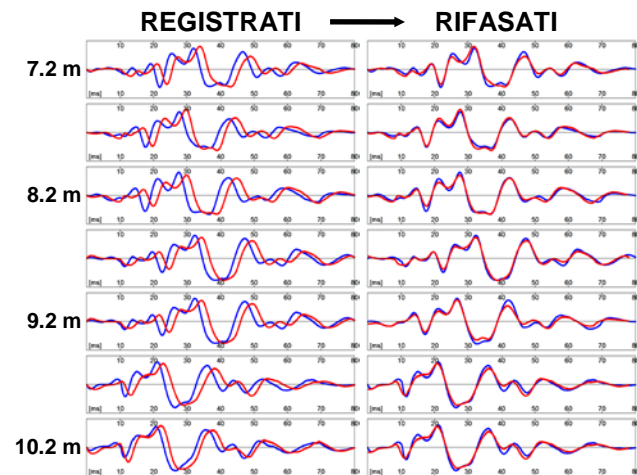


Figura 5. Esempio di accurata identificazione del ritardo anche in caso di sismogrammi irregolari a causa di riflessioni contro ostacoli, mura, fossati (Avezzano, Castello Orsini)

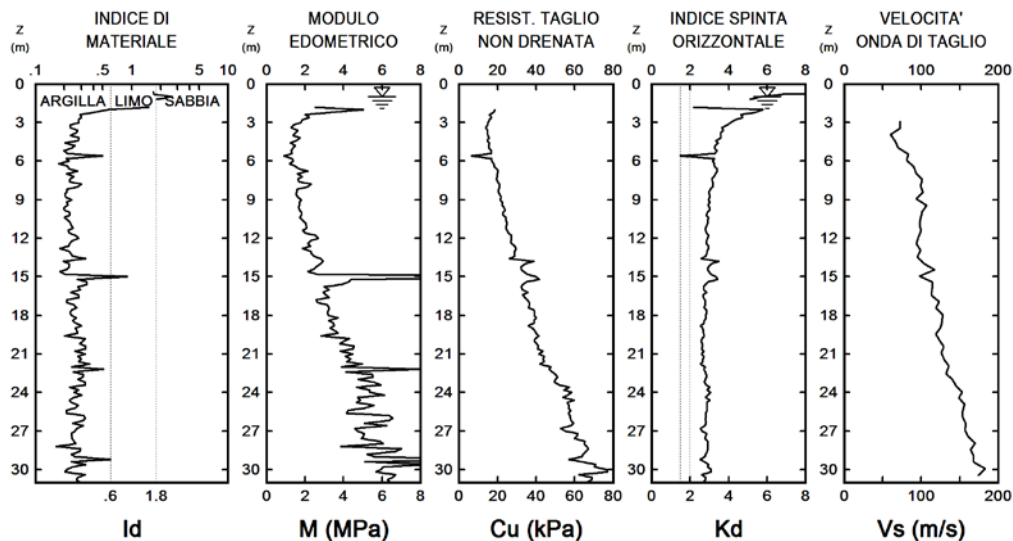


Figura 6. Profili SDMT nel sito del Fucino (Telespazio)

Tabella 1. Esempio di ripetibilità delle misure di V_S con SDMT (Zelazny Most, Polonia)

Z [m]	V_S [m/s]	Valori di V_S [m/s] corrispondenti a colpi di martello differenti a ciascuna profondità Z	Coeff. di variazione [%]
7.00	179	178,178,180,180,180,179,179,180,180,180	0.50
7.50	231	234,232,232,230,229,231,232,229,230	0.68
8.00	225	227,225,224,225,225,225,226,226,225,224,224	0.40
8.50	276	276,276,280,273,275,273,271,273,287,281	1.68
9.00	296	291,286,301,292,296,288,301,300,304,303	2.09
9.50	248	244,251,250,247,250,249,250,249,242,248	1.11
10.00	292	292,289,290,293,289,292,289,292,296,295,293	0.79
10.50	320	321,323,320,325,323,325,316,314,308,321	1.61
11.00	291	293,291,293,291,291,290,290,291,290,290	0.38
11.50	321	324,320,320,322,320,322,319,319,320,320	0.48
12.00	309	311,307,311,309,309,311,309,309,307,311	0.50
12.50	286	287,285,285,285,287,285,285,287,287,287	0.35
13.00	265	264,265,265,265,264,265,265,265,266,265,266,264	0.24
13.50	280	287,276,279,276,276,276,294,275,278,279	2.08
14.00	312	313,312,312,322,310,312,310,310,310,312	1.10
14.50	298	301,298,299,299,298,296,299,298,299,298	0.44
15.00	309	307,309,307,309,309,309,309,309,309,309	0.29

3 CONFRONTI V_S DA SDMT E DA ALTRE PROVE

Le misure di V_S ottenute da SDMT sono state validate in base a confronti con misure di V_S ottenute da altre prove sismiche in sito in diversi siti di ricerca.

Il primo confronto (Figura 7) fu mostrato da Hepton (1988), che osservò un buon accordo tra i profili di V_S ottenuti da SDMT, SCPT e prove sismiche di rifrazione nel noto sito di ricerca in argilla di Bothkennar (UK).

La Figura 8 mostra un buon accordo tra i profili di V_S ottenuti da prove SDMT (*true-interval* e *pseudo-interval*) e prove con piezocono sismico SCPTU eseguite nel 2002 da ricercatori Georgia Tech (McGillivray e Mayne, 2004) nel sito di ricerca di Treporti (Venezia).

Prove SDMT sono state eseguite nel 2004 nel sito di ricerca del Fucino (L'Aquila), in argille NC cementate, estesamente indagato alla fine degli anni '80. Il profilo di V_S da SDMT (Figura 9) è risultato in ottimo accordo con i profili di V_S ottenuti in precedenza da SCPT, Cross-Hole e SASW (AGI, 1991).

La Figura 10 (Mlynarek et al., 2006) mostra un buon accordo tra profili di G_0 ottenuti da misure di V_S da SDMT e da SCPTU nel sito di Zelazny Most (Polonia).

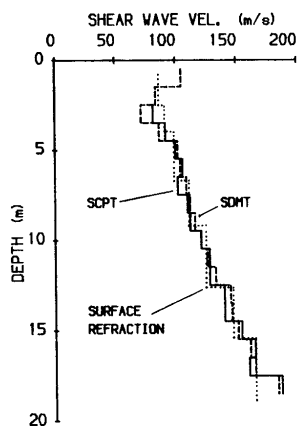


Figura 7. Confronto profili di V_S da SDMT, SCPT e prove sismiche di rifrazione nel sito di ricerca di Bothkennar, UK (Hepton, 1988)

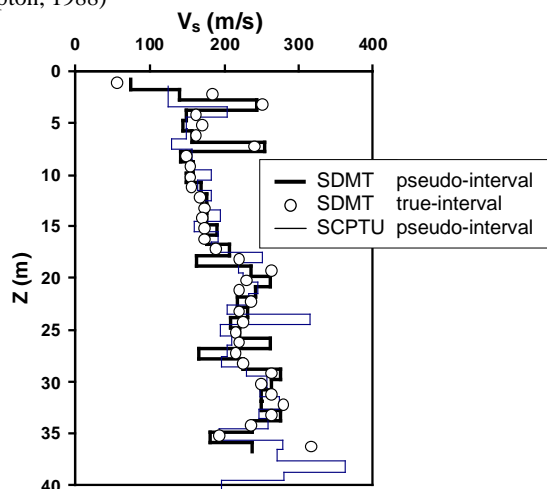


Figura 8. Confronto profili di V_S da SDMT e da SCPTU nel sito di ricerca di Treporti, Venezia (McGillivray e Mayne, 2004)

4 CURVE $G-\gamma$ IN SITO DA SDMT

Una importante peculiarità di SDMT è la sua capacità di determinare, oltre ad un modulo a piccole deformazioni (G_0 da V_S), anche un modulo a "deformazioni operative". Numerosi confronti tra cedimenti osservati in casi reali e previsti da DMT (vedi Monaco et al., 2006) documentano che il modulo di deformazione confinato M_{DMT} può

essere

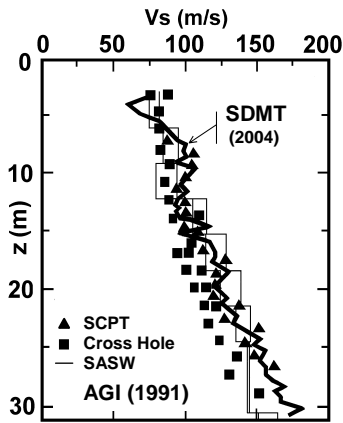


Figura 9. Confronto profili di V_S da SDMT e da SCPT, Cross-Hole e SASW (AGI, 1991) nel sito di ricerca del Fucino

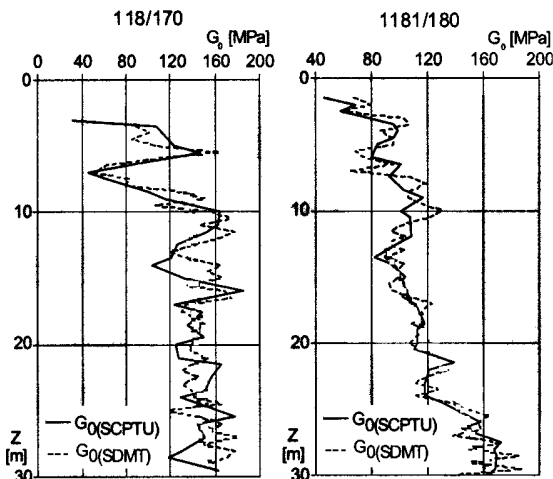


Figura 10. Confronto profili di G_0 da V_S misurata da SDMT e da SCPTU nel sito di Zelazny Most, Polonia (Mlynarek et al., 2006)

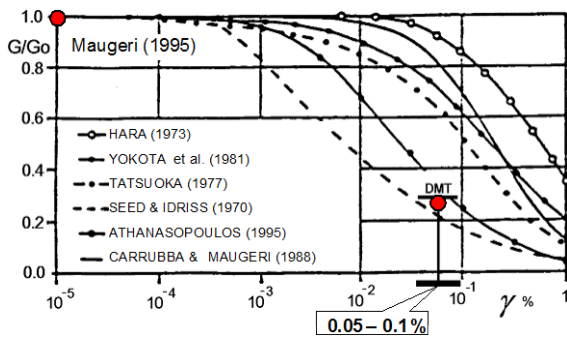


Figura 11. Metodo di tentativo per ricavare curve $G-\gamma$ da SDMT

considerato un ragionevole modulo a "deformazioni operative" (quel modulo che, introdotto nelle formule dell'elasticità lineare, fornisce previsioni generalmente attendibili dei cedimenti sotto i carichi di esercizio). Ricerche attualmente in corso indagano il possibile uso di SDMT per la determinazione "in sito" di curve di decadimento del modulo all'aumentare della deformazione (curve $G-\gamma$ o simili). Curve di tentativo possono essere ricostruite mediante *fitting* di "curve tipiche di riferimento" di laboratorio attraverso due punti, entrambi ottenuti da SDMT (Figura 11): (1) il modulo iniziale G_0 da V_S , e (2) un modulo a "deformazioni operative" corrispondente a M_{DMT} . Per poter localizzare il secondo punto è necessario conoscere, almeno in prima

approssimazione, la deformazione di taglio corrispondente a M_{DMT} . Indicazioni fornite da Mayne (2001) collocano i moduli DMT in un campo di deformazioni intermedio ($\gamma \approx 0.05-0.1\%$) lungo la curva $G-\gamma$. In modo simile Ishihara (2001) classifica la prova DMT tra i metodi per la misura di parametri di rigidezza dei terreni associati ad un livello di deformazione intermedio (0.01-1%). Tali indicazioni, da verificare con ulteriori indagini, sono alla base del possibile sviluppo di metodi per ricavare curve $G-\gamma$ da SDMT.

5 RELAZIONI G_0/E_D

Sono state proposte numerose correlazioni tra G_0 e il modulo dilatometrico E_D (ad es. Hryciw, 1990 e molti altri), generalmente finalizzate ad ottenere stime di G_0 da E_D , evitando la misura diretta di G_0 . Questa finalità appare oggi di minore interesse, poiché SDMT fornisce allo stesso tempo misure sia di E_D che di V_S (e quindi G_0). Può comunque in retrospettiva osservarsi la razionalità della scelta di indagare correlazioni G_0-E_D anziché ad esempio G_0-M_{DMT} . Infatti, mentre G_0 ed E_D sono poco sensibili a OCR, M_{DMT} invece, per via del coefficiente correttivo funzione di K_D , incorpora gli effetti di OCR. E' quindi logico aspettarsi un collegamento G_0-E_D più stretto del collegamento G_0-M_{DMT} . Attualmente, comunque, per quanto riguarda i moduli, l'interesse maggiore quando si eseguono prove SDMT è il simultaneo ottenimento del "low strain modulus G_0 " e del "working strain modulus M ". Il working strain modulus M è ovviamente di interesse per i calcoli di previsione dei cedimenti, il rapporto G_0/M è di interesse poiché è un indicatore del decadimento del modulo all'aumentare delle deformazioni. Ad esempio i risultati SDMT nel sito Barcellona Aeroporto descritti nel seguito (Figura 19) mettono in rilievo con molta evidenza l'enorme differenza del rapporto di decadimento del modulo tra la formazione superiore e quella inferiore.

Per quanto riguarda il rapporto G_0/E_D , che comunque viene ottenuto in ciascuna misura SDMT, è attualmente in fase di studio la possibilità di utilizzarne il valore, dal momento che esso rappresenta una ulteriore informazione indipendente. Per il momento si osserva quanto segue.

La Figura 12 mostra la variazione del rapporto G_0/E_D in funzione dell'indice di materiale I_D (tipo di terreno) per diversi valori dell'indice di spinta orizzontale K_D (OCR). La Figura 12 indica grande dispersione dei punti G_0/E_D in

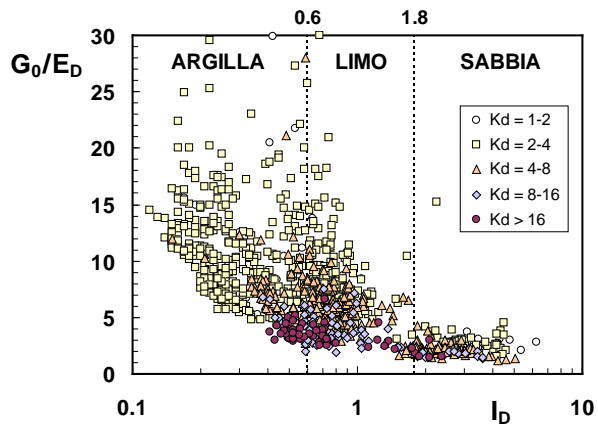


Figura 12. Rapporto G_0/E_D in funzione di I_D (tipo di terreno) per diversi campi di valori di K_D (OCR)

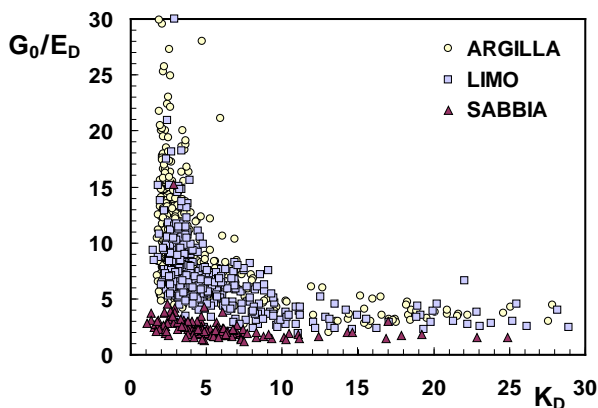


Figura 13. Rapporto G_0/E_D in funzione di K_D (OCR) per vari tipi di terreno

argilla, mentre in sabbia il rapporto G_0/E_D ($\approx 2-3$) è quasi costante, minore che in argilla e indipendente da K_D (OCR). Anche la Figura 13, che mostra la variazione di G_0/E_D in funzione di K_D per diversi tipi di terreno, indica che il rapporto G_0/E_D in sabbia non è influenzato da OCR, mentre in argilla G_0/E_D diminuisce all'aumentare di OCR.

6 USO DI SDMT PER ANALISI DI LIQUEFAZIONE

SDMT fornisce, tra le varie misure, coppie di profili di K_D e V_S – due parametri entrambi correlati con la resistenza alla liquefazione di sabbie. SDMT permette quindi di ottenere due valutazioni parallele indipendenti della resistenza alla liquefazione CRR, una da K_D e l'altra da V_S , per mezzo di correlazioni $CRR-K_D$ e $CRR-V_S$, dove CRR è il rapporto di resistenza ciclica, parametro di input fondamentale nella "procedura semplificata" di Seed e Idriss (1971) comunemente utilizzata.

L'uso di V_S per la valutazione di CRR è ben noto. La correlazione più utilizzata (Figura 14) è quella proposta da Andrus e Stokoe (2000), modificata da Andrus et al. (2004). CRR è valutata in base a $V_{SI} = V_S (p_a/\sigma'_{vo})^{0.25}$, dove V_S è corretta per la tensione geostatica σ'_{vo} (p_a = pressione atmosferica). Le curve $CRR-V_{SI}$ in Figura 14 sono valide per terremoti di magnitudo $M_w = 7.5$ (per magnitudo diverse vanno applicati fattori di scala).

Correlazioni $CRR-K_D$ sono state sviluppate negli ultimi 20 anni, stimulate dal riconoscimento della "sensibilità" di K_D a diversi fattori che aumentano la resistenza alla liquefazione (non rilevati con altrettanta sensibilità da altre prove), quali storia tensionale, *prestraining*, cementazione, struttura, e della relazione di K_D con densità relativa e parametro di stato. Un elemento chiave della correlazione $CRR-K_D$ (Monaco e Schmertmann, 2007, Monaco e Marchetti, 2007) è la capacità di K_D di riflettere l'*aging* in sabbie, fattore che ha un'influenza primaria sulla resistenza alla liquefazione, come evidenziato ad es. da Leon et al. (2006). La Figura 15 riassume le varie correlazioni proposte per valutare CRR da K_D , da utilizzare secondo la "procedura semplificata" (per magnitudo $M = 7.5$ e sabbia pulita), inclusa la correlazione $CRR-K_D$ più recente (Monaco et al., 2005), basata su tutti i dati precedenti. Confronti basati su misure parallele di K_D e V_S con SDMT in diversi siti sabbiosi

(Maugeri e Monaco, 2006) hanno indicato che metodi basati su K_D e V_S possono fornire, nello stesso sito, stime di CRR sostanzialmente diverse (in generale sono "più ottimistiche" le previsioni basate su V_S). Si pone quindi la domanda "a quale metodo dare maggior peso". Tale aspetto è ulteriormente discusso nel seguito.

7 RISULTATI SDMT IN DIVERSI SITI

In questa sezione viene presentata una selezione di "esempi commentati" di risultati SDMT ottenuti in diversi siti.

– OCR e croste K_D in sabbie

"Croste K_D " superficiali, molto simili ai profili di K_D tipici di croste essiccate OC in argilla, sono state osservate in molti dei depositi sabbiosi indagati. Varie indicazioni (Maugeri e Monaco, 2006) suggeriscono che tali "croste K_D " in sabbia riflettono effetti di *stress history* (OCR, cementazione, *aging* e/o altro), più che la densità relativa. Nel caso mostrato in Figura 16 (Catania), ed in molti altri siti indagati, risulta estremamente evidente nel profilo di K_D una "crosta di *stress history*" (a basso rischio di liquefazione), mentre tale crosta è praticamente "non vista" dal profilo di V_S . Tale evidenza suggerisce una minore capacità di V_S nel "profilare" la liquefacibilità.

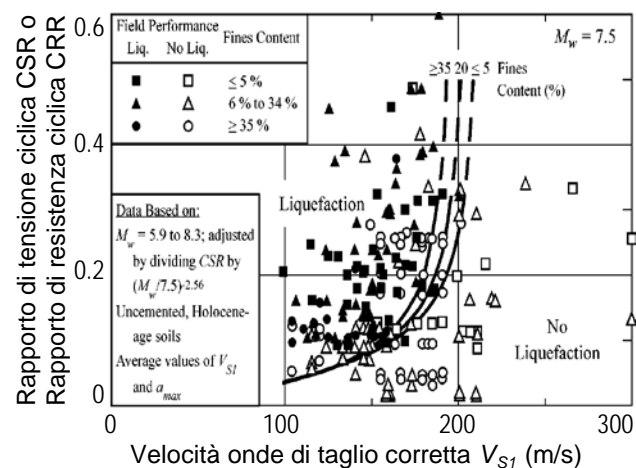


Figura 14. Curve per valutare CRR da V_S per sabbie pulite non cementate (Andrus e Stokoe, 2000)

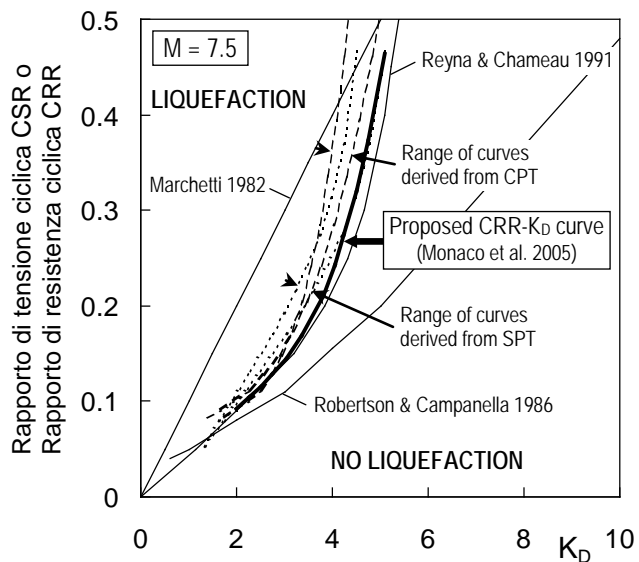


Figura 15. Curve per valutare CRR da K_D (Monaco et al., 2005)

– Ruolo dei legami interparticellari

I profili SDMT in Figura 17 (Cassino) mostrano valori relativamente alti di V_S che coesistono con valori molto bassi di K_D e moduli M . Possibile spiegazione: l'onda di taglio viaggia velocemente grazie ai legami interparticellari (tipici di molte sabbie di origine vulcanica in quest'area), preservati a piccole deformazioni, mentre K_D è "basso" perché riflette un materiale diverso, in cui i legami sono stati, almeno in parte, distrutti dalla penetrazione della lama DMT. Come segnalato da Andrus e Stokoe (2000), i legami interparticellari possono causare un aumento di V_S (misurata a piccole deformazioni), cui non corrisponde necessariamente un aumento di resistenza alla liquefazione, fenomeno che interessa deformazioni medio-alte (campo di misura di K_D). In definitiva, quindi, le stime di CRR fornite da K_D dovrebbero essere più realistiche in caso di eventi sismici significativi. D'altra parte in caso di sismi molto leggeri, in cui i legami potrebbero essere preservati, potrebbe essere appropriata la stima di CRR da V_S .

– Valori limite "non liquefazione" di V_{SI} e K_D

Gli asintoti delle curve CRR- V_{SI} (Figura 14) e CRR- K_D (Figura 15) individuano valori limite di V_{SI} e K_D (rispettivamente $V_{SI}^* = 215$ m/s e $K_D^* = 5.5$, per sabbie pulite e $M_w = 7.5$), per i quali valori tali figure escludono il

rischio di liquefazione per qualunque intensità di sisma. Nel sito di Zelazny Most (Figura 18), mentre i valori di $V_{SI} > 215$ m/s indicano "non liquefazione" anche per forti terremoti, i valori di $K_D \approx 1.5-2$ indicano, molto meno ottimisticamente, che potrebbe verificarsi liquefazione oltre un certo livello di sollecitazione sismica (alti valori del rapporto di tensione ciclica CSR).

– Variabilità del rapporto G_0/M_{DMT}

La Figura 19 (Barcellona) mostra che, mentre il modulo M_{DMT} presenta una forte riduzione a ≈ 12 m di profondità, al passaggio da uno strato sabbioso rigido ad uno strato inferiore di argilla molto tenera, V_S mostra solo una lieve riduzione. Quindi G_0 ricavato da V_S è ben lungi dall'essere proporzionale al "modulo operativo" M_{DMT} . Tali risultati gettano dubbi sulla validità di "regole pratiche" in base alle quali il "modulo operativo" da introdurre nelle formule dell'elasticità lineare per il calcolo dei cedimenti può essere determinato riducendo il modulo a piccole deformazioni di un fattore prefissato (ad es. il 50 %, Simpson, 1999).

– Prove SDMT offshore

Prove SMDT sono state eseguite anche offshore, con risultati di qualità simile a quella a terra (vedi esempio in Figura 20, Vado Ligure), con la sorgente di energizzazione collocata sul fondale marino.

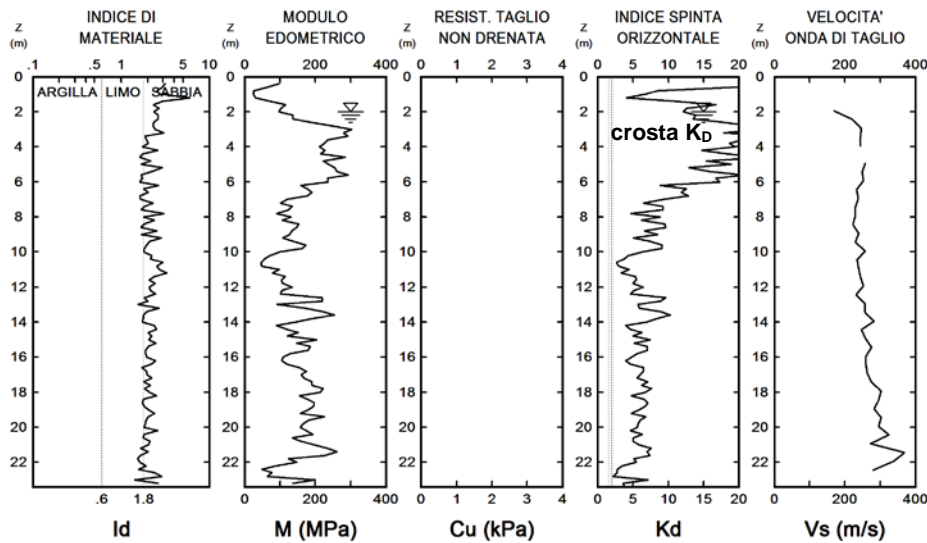


Figura 16. Profili SDMT nel sito di Catania (San Giuseppe La Rena)

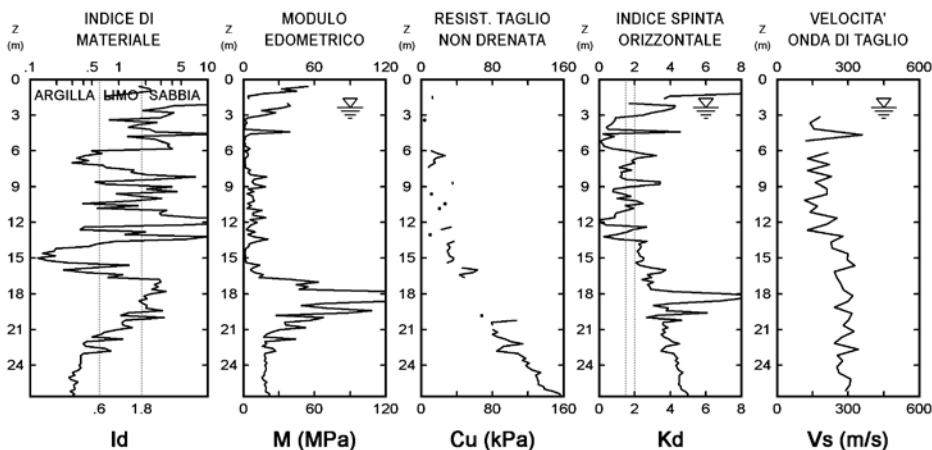


Figura 17. Profili SDMT nel sito di Cassino

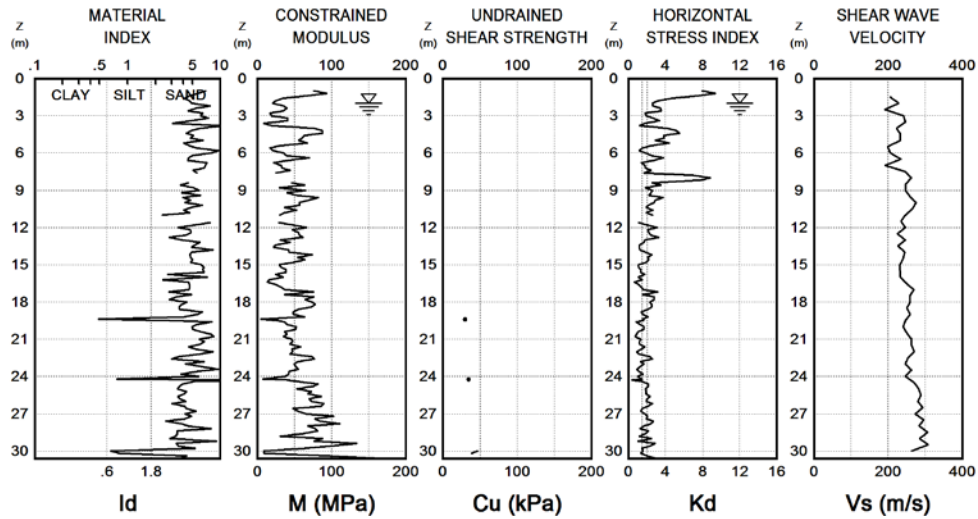


Figura 18. Profili SDMT nel sito di Zelazny Most (Polonia)

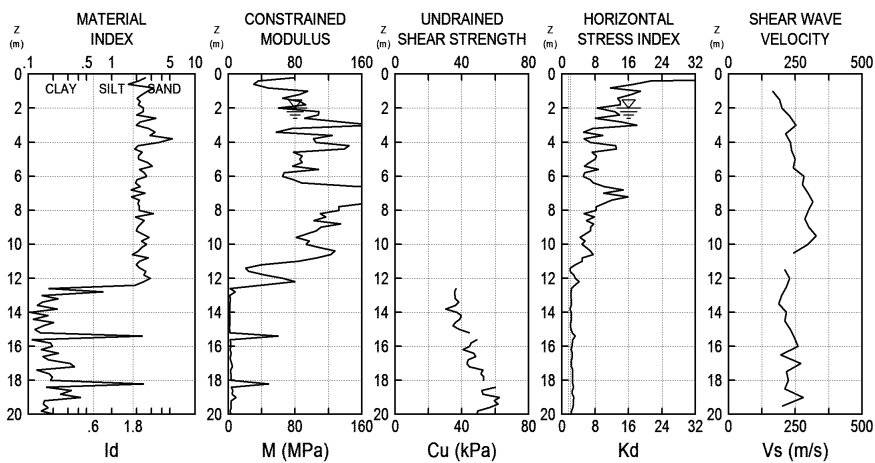


Figura 19. Profili SDMT nel sito di Barcellona - Aeroporto El Prat (Spagna)

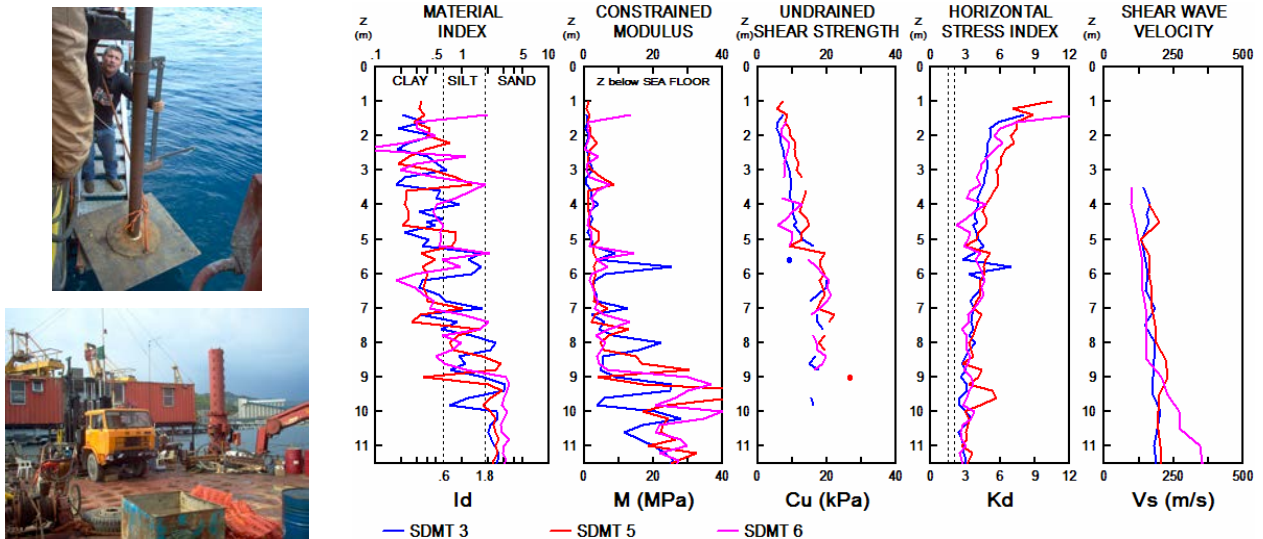


Figura 20. Dettagli delle indagini e profili di prove SDMT offshore nel sito di Vado Ligure, Savona

– SDMT in fori riempiti di sabbia

In casi in cui il terreno è troppo duro per essere penetrato (o in roccia) è possibile eseguire la prova SDMT (solo misure di V_S , senza DMT) all'interno di un foro di sondaggio preventivamente riempito di sabbia. L'ottimo

accordo osservato tra i profili di V_S ottenuti da prove SDMT parallele eseguite, nello stesso sito, nel terreno naturale e in un foro riempito di sabbia (Figura 21) indica l'affidabilità delle misure di V_S ottenute in questo modo.

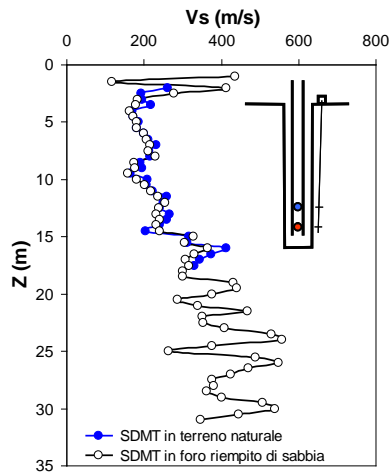


Figura 21. Confronto tra profili di V_S ottenuti da SDMT nel terreno naturale e in un foro riempito di sabbia nel sito di Montescaglioso – Ginosa, Matera

8 CONCLUSIONI

Il dilatometro sismico (SDMT) fornisce misure accurate e altamente riproducibili della velocità delle onde di taglio V_S – parametro di input fondamentale per analisi sismiche. In aggiunta, SDMT fornisce i risultati DMT usuali (ad es. modulo di deformazione confinato M_{DMT}) per applicazioni di progetto correnti.

L'esperienza recente documenta la possibilità di eseguire prove SDMT con buoni risultati anche in condizioni non usuali, ad es. *offshore* o in terreni non penetrabili (misure di V_S in fori riempiti di sabbia).

Ricerche in corso indagano il possibile uso di SDMT per la determinazione "in situ" di curve di decadimento del modulo all'aumentare della deformazione, mediante *fitting* di "curve G - γ di riferimento" attraverso due moduli forniti da SDMT a diversi livelli di deformazione: il modulo di taglio a piccole deformazioni G_0 (da V_S) e un modulo a "deformazioni operative" corrispondente a M_{DMT} .

SDMT permette di ottenere due valutazioni parallele indipendenti della resistenza alla liquefazione CRR da V_S e da K_D (indice di spinta orizzontale) per mezzo di correlazioni CRR- V_S (Figura 14) e CRR- K_D (Figura 15) da utilizzare secondo la "procedura semplificata" di Seed e Idriss (1971). Studi preliminari hanno indicato che metodi basati su K_D e V_S possono fornire, nello stesso sito, stime di CRR sostanzialmente diverse. Vari elementi lasciano presumere una maggiore affidabilità di CRR da K_D – in primo luogo la maggiore sensibilità di K_D a *stress history* e *aging*, fattori che aumentano fortemente la resistenza alla liquefazione. Sono ovviamente necessarie ulteriori verifiche, supportate da casi reali di liquefazione.

BIBLIOGRAFIA

- AGI, 1991. *Geotechnical Characterization of Fucino Clay*. Proc. X ECSMFE, Firenze, 1, 27-40.
- Andrus R.D., Stokoe K.H. II, 2000. *Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity*. Jnl GGE, ASCE, 126(11), 1015-1025.
- Andrus R.D., Stokoe K.H. II, Juang C.H., 2004. *Guide for Shear-Wave-Based Liquefaction Potential Evaluation*. Earthquake Spectra, 20(2), 285-305.

- Hepton P., 1988. *Shear wave velocity measurements during penetration testing*. Proc. Penetration Testing in the UK, ICE, 275-278.
- Hryciw R.D., 1990. *Small-Strain-Shear Modulus of Soil by Dilatometer*. Jnl GE, ASCE, 116(11), 1700-1716.
- Ishihara K., 2001. *Estimate of relative density from in-situ penetration tests*. Proc. Int. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, 17-26.
- Leon E., Gassman S.L., Talwani P., 2006. *Accounting for Soil Aging When Assessing Liquefaction Potential*. Jnl GGE, ASCE, 132(3), 363-377.
- Marchetti S., 1980. *In Situ Tests by Flat Dilatometer*. Jnl GED, ASCE, 106(GT3), 299-321.
- Marchetti S., Monaco P., Totani G., Calabrese M., 2001. *Il Dilatometro Piatto*. Atti XVIII Ciclo Conferenze di Geotecnica di Torino, 50 pp. (Versione italiana del Rapporto del TC16 ISSMGE *The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations*, Maggio 2001).
- Martin G.K., Mayne P.W., 1997. *Seismic Flat Dilatometer Tests in Connecticut Valley Varved Clay*. ASTM Geotech. Testing Jnl, 20(3), 357-361.
- Martin G.K., Mayne P.W., 1998. *Seismic flat dilatometer in Piedmont residual soils*. Proc. 1st Int. Conf. on Site Characterization ISC'98, Atlanta, 2, 837-843.
- Maugeri M., Monaco P., 2006. *Liquefaction Potential Evaluation by SDMT*. Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 295-305.
- Mayne P.W., 2001. *Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests*. Proc. Int. Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, 27-47.
- Mayne P.W., Schneider J.A., Martin G.K., 1999. *Small- and large-strain soil properties from seismic flat dilatometer tests*. Proc. 2nd Int. Symp. on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino, 1, 419-427.
- McGillivray A., Mayne P.W., 2004. *Seismic piezocone and seismic flat dilatometer tests at Treport*. Proc. 2nd Int. Conf. on Site Characterization ISC'2, Porto, 2, 1695-1700.
- Mlynarek Z., Gogolik S., Marchetti D., 2006. *Suitability of the SDMT method to assess geotechnical parameters of post-flotation sediments*. Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 148-153.
- Monaco P., Marchetti S., 2007. *Evaluating liquefaction potential by seismic dilatometer (SDMT) accounting for aging/stress history*. Proc. 4th Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engineering, Thessaloniki.
- Monaco P., Marchetti S., Totani G., Calabrese M., 2005. *Sand liquefaction assessment by Flat Dilatometer Test (DMT)*. Proc. XVI ICSMGE, Osaka, 4, 2693-2697.
- Monaco P., Schmertmann J.H., 2007. *Discussion of "Accounting for Soil Aging When Assessing Liquefaction Potential" by Leon et al.* (in Jnl GGE, ASCE, 2006, 132 (3), 363-377). To appear in ASCE Jnl GGE.
- Monaco P., Totani G., Calabrese M., 2006. *DMT-predicted vs observed settlements: a review of the available experience*. Proc. 2nd Int. Conf. on the Flat Dilatometer, Washington D.C., 244-252.
- Seed H.B., Idriss I.M., 1971. *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Jnl GED, ASCE, 97(9), 1249-1273.
- Simpson B., 1999. *Engineering needs*. Proc. 2nd Int. Symp. Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino.

ABSTRACT

RESULTS OF IN SITU TESTS BY SEISMIC DILATOMETER (SDMT)

Keywords: Seismic Dilatometer SDMT, Flat Dilatometer DMT, Shear Wave Velocity V_S , G - γ Curves, Liquefaction

The seismic dilatometer (SDMT) is a combination of the standard DMT with a seismic module for measurement of the shear wave velocity V_S . This paper summarizes the experience gained from a large number of tests performed with the SDMT at several sites in the recent years and illustrates the main lessons learned from the use of the tool. In particular, the paper presents an overview of the SDMT equipment and test layout, comparisons of V_S measured by SDMT and by other methods and a selection of significant SDMT results and related comments. The paper also illustrates the major issues of present

research on use and applications of the SDMT, mostly focused on the development of methods for deriving in situ decay curves of soil stiffness with strain level and for evaluating the liquefaction potential of sands based on SDMT results.