

LA RISALITA DI TUBAZIONI INTERRATE IN DEPOSITI LIQUEFACIBILI E POSSIBILI SISTEMI DI MITIGAZIONE

Massimina Castiglia
Università degli Studi del Molise
massimina.castiglia@unimol.it

Filippo Santucci de Magistris
Università degli Studi del Molise
filippo.santucci@unimol.it

Filippo Onori
Saipem S.p.A
filippo.onori@saipem.com

Junichi Koseki
Università di Tokyo
koseki@civil.t.u-tokyo.ac.jp

Sommario

Il sollevamento delle condotte interrate che attraversano depositi di terreno sabbiosi soggetti a liquefazione in caso di sisma è un fenomeno noto nella letteratura scientifica. La profondità di interrimento delle condotte, generalmente esigua, e il peso altrettanto modesto, soprattutto per le tubazioni del gas, contribuiscono a far sì che al verificarsi del fenomeno di liquefazione, all'azione di galleggiamento del tubo nel terreno ormai fluido, si aggiunga un'ulteriore forza di risalita legata alle sovrappressioni neutre che si sviluppano al di sotto della condotta. Avere una visione completa del modo in cui i diversi fattori influenzano la risposta dell'opera interrata in un fenomeno così delicato e di ampio riscontro nelle manifestazioni nel mondo e la possibilità di disporre di soluzioni di mitigazioni ottimali sono tra gli obiettivi auspicabili. Nonostante gli studi scientifici fino ad ora condotti chiariscano molteplici aspetti per la comprensione del fenomeno, si è ancora ben lontani dall'avere una visione esaustiva. La modellazione numerica di quanto ottenuto per via sperimentale sta fornendo un grande contributo in questa direzione grazie alla possibilità di svolgere delle analisi di tipo parametrico. Tuttavia, manca ancora una riproduzione sufficientemente completa della casistica che possa rafforzare i modelli numerici. Dal canto delle metodologie di mitigazione, il ricorso a sistemi di protezione spesso massivi e/o costosi vuole essere superato per lasciare spazio a delle soluzioni meno invasive, ottimizzando gli spazi, i costi e l'impatto ambientale. In questo lavoro, attraverso prove su modello in scala realizzate con tavola vibrante 1g presso l'Università di Tokyo, si vogliono illustrare alcuni risultati che forniscono un contributo aggiuntivo allo scenario di conoscenza disponibile in letteratura: 1. L'effetto di una sequenza sismica sulla risposta a liquefazione del deposito di terreno e sul relativo comportamento dell'opera; 2. Le prestazioni del tubo per tutta la sequenza sismica, quando un sacco di ghiaia oppure delle geogriglie posizionate al di sopra dello stesso vengono utilizzati come metodologie di mitigazione. La ricerca è volta a valutare il comportamento relativamente alla sezione trasversale della condotta, riferendosi pertanto a modelli bidimensionali.

1. Introduzione

Il fenomeno di risalita di una condotta interrata in un terreno liquefacibile è descritto da un processo bidimensionale caratterizzato dallo sviluppo di un flusso di terreno intorno all'opera interrata, che si innesca con l'aumento della pressione interstiziale e la perdita di resistenza a taglio del terreno circostante. La perdita di resistenza consente alle particelle di sabbia di subire degli scorrimenti

relativi permettendo al terreno di deformarsi a taglio. Il flusso di terreno è altresì generato dall'esistenza di un gradiente idraulico orizzontale esistente nel deposito di terreno per la differenza di tensione verticale al di sotto della tubazione e alla stessa profondità lateralmente all'opera, che induce un movimento del terreno fluidificato verso la base della tubazione. In questo processo, il tubo si solleva e la sabbia va ad occupare lo spazio immediatamente al di sotto dell'opera lasciato libero dal tubo nello spostamento verso l'alto, impedendo così alla struttura di tornare nella sua posizione originale (e.g., Koseki et al., 1997; Chian et al., 2015). Tra i vari aspetti che sono stati indirizzati grazie alla ricerca fino ad ora svolta dalla comunità scientifica, l'influenza della sequenza sismica sulle prestazioni del tubo e i relativi effetti di liquefazione e liquefazione ripetuta del banco di terreno non sono stati ancora chiariti data la complessità del fenomeno e la difficoltà di interpretare i risultati delle prove sperimentali. Questo rappresenta un primo punto che verrà discusso nella presente nota, insieme alla valutazione delle prestazioni di alcuni sistemi di mitigazione sperimentati per prevenire la risalita delle tubazioni e il relativo danneggiamento. In questa direzione, si vogliono superare le limitazioni cui fanno capo le metodologie convenzionali e anche quelle più recenti. Le prime sono principalmente costituite da tecniche di miglioramento del terreno nell'intorno del tubo, sistemi massivi di contrappeso e pali drenanti, caratterizzati da eccessivi costi di intervento e difficoltà tecniche di realizzazione; tra quelle più recenti si riscontrano problemi nell'efficacia spaziale e temporale dell'intervento, nella necessità di un progetto specifico legato alle particolari condizioni di sito e alle caratteristiche del tubo, nella disponibilità dei materiali. Queste limitazioni rendono tali sistemi non comunemente utilizzati nella pratica ingegneristica. Per ovviare a questi problemi, in questa ricerca sono stati studiati dei sistemi alternativi che possano soddisfare esigenze di carattere ambientale, economico e di fattibilità. In particolare, le metodologie qui illustrate, che consistono in un sacco di ghiaia oppure in geogriglie disposti al di sopra dell'opera interrata, sono state selezionate perché possono essere utilizzate in terreni con caratteristiche diverse, sono facilmente installabili in una tipica sezione di scavo, interessano la parte immediatamente al di sopra del tubo che può essere più facilmente ispezionata in caso di problemi, non hanno alcun impatto negativo per l'ambiente e sono durevoli. L'influenza della sequenza verrà valutata anche sulle prestazioni di detti sistemi, potendone confrontare i risultati ottenuti.

2. Presentazione delle prove sperimentali

Per studiare gli effetti del fenomeno di liquefazione sulla tubazione interrata e l'efficacia dei sistemi di mitigazione proposti, è stata svolta una campagna sperimentale su tavola vibrante 1g adottando dei modelli in scala 1:10. Il deposito di terreno è costituito da una sabbia silicea satura con densità relativa del 50%, la tubazione DN100 ha un peso apparente nell'unità di volume di 6.8 kN/m^3 ed è installata ad una profondità dal piano campagna di 25 cm. In questa nota vengono considerate tre prove di una campagna sperimentale più ampia: la prova TP in cui non è previsto alcun sistema di mitigazione (Castiglia et al., 2021a); la prova TP_GB in cui un sacco di ghiaia, di media granulometria e peso specifico pressoché simile a quello della sabbia, di larghezza pari a circa $2D$ con D diametro esterno del tubo e altezza pari a $0.5 D$ viene posto al di sopra del tubo; la prova TP_G, in cui tre geogriglie di dimensioni in larghezza pari a $3D$, con maglia di apertura di 0.084 cm, dotate di resistenza a trazione di 11.6 kN/m e poste ad un interasse di 3.5 cm, vengono posizionate nel deposito di terreno sovrastante la tubazione (Castiglia et al., 2021b). I dettagli dello schema di prova per TP_GB e TP_G sono in Fig. 1. Accelerometri, trasduttori di pressione neutra e sensori laser sono stati utilizzati per registrare il comportamento del modello, monitorando la verticale in cui è stata installata la tubazione e una verticale di terreno sufficientemente lontana dal tubo e dalle pareti del modello. Le dimensioni indicate si riferiscono al modello 2D che è quello di interesse per lo studio specifico, la profondità del modello e le relative dimensioni degli elementi utilizzati è di 40 cm. Il moto sismico alla base è costituito da una sequenza sismica di 12 fasi, accomunate da una frequenza di 5 Hz e una durata di 4s, la forma d'onda è sinusoidale e le ampiezze sono così distinte: fase 1, 0.1 g; fase 2, 0.2 g; fase 3, 0.3 g;

fase 4, 0.4 g; fase 5, 0.5 g; fase 6, 0.6 g; fase 7, 0.5 g; fase 8, 0.4 g; fase 9, 0.3 g; fase 10, 0.2 g; fase 11, 0.1 g; fase 12, 0.8 g. Le fasi sono applicate in successione attendendo tra una fase e l'altra il tempo necessario per la dissipazione delle sovrappressioni neutre.

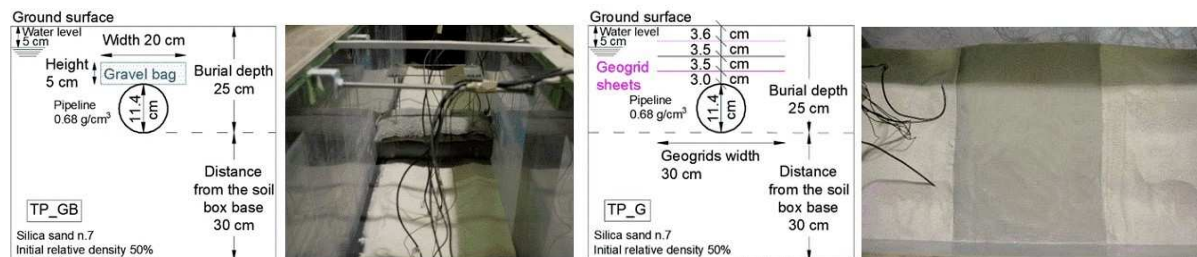


Fig 1. Schema di prova con le metodologie di mitigazione

3. Risultati

3.1. Risposta della condotta interrata alla sequenza sismica

La risposta del tubo in termini di risalita alla sequenza sismica per TP è in Fig. 2. La tubazione registra un sollevamento massimo cumulativo di circa 47 mm, il contributo inizia ad essere significativo con la fase 3 per cui il fenomeno di liquefazione interessa in maniera più estesa il deposito di terreno; a questo step corrisponde il contributo maggiore di risalita rispetto a tutta la sequenza sismica, come ci si può aspettare dall'ampiezza di scuotimento sufficientemente significativa e dalla densità relativa del deposito ancora in uno stato mediamente addensato. Lo spostamento verso l'alto, sebbene con un'entità più piccola, continua fino alla fase 9, continuando a mostrare una propensione del tubo al sollevamento anche per ampiezze minori del moto alla base e per una densità relativa, D_r , maggiore del banco di sabbia.

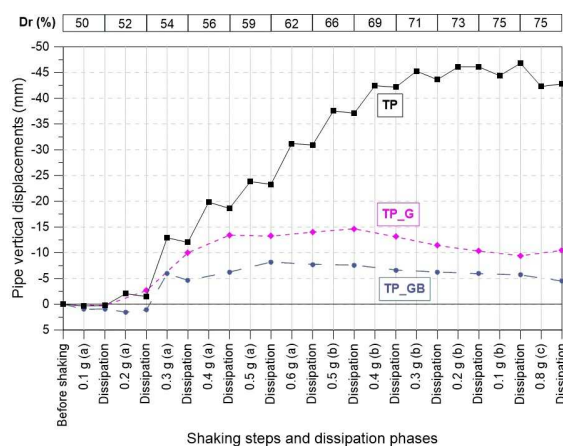


Fig 2. Spostamento verticale del tubo con la sequenza sismica

Un altro aspetto importante osservato nella risposta della condotta è lo spostamento orizzontale. Nel caso specifico di una sequenza sismica di tipo sinusoidale lo spostamento residuo orizzontale è pressoché nullo, tuttavia, durante lo scuotimento la tubazione subisce anche degli spostamenti orizzontali e la loro entità può essere significativa. Dai risultati delle prove è stato osservato che gli spostamenti orizzontali massimi del tubo rappresentano mediamente il 77% di quelli verticali. Inoltre, è emerso che un ciclo di carico può essere scomposto in diverse fasi cui corrispondono diversi movimenti della condotta. In particolare, in Fig. 3 è diagrammato lo spostamento verticale del tubo rispetto a quello orizzontale per la fase 3 presa ad esempio. Ciascun mezzo ciclo è caratterizzato da una prima fase di spostamento verticale e orizzontale combinati (da 0 a 1 o da 2 a 3), seguita da una seconda fase di prevalente spostamento orizzontale (da 1 a 2 o da 3 a 4). Per i primi cicli di carico, questa fase di spostamento orizzontale può anche registrare uno spostamento verso il basso al termine

di ciascun mezzo ciclo (punti 2 o 4). L'inversione della sinusoide di input alla base genera un'inversione dello spostamento orizzontale del tubo (punti 1 e 3). La risposta in termini di spostamento del tubo può essere compresa meglio facendo qualche osservazione aggiuntiva sulla dilatanza e le registrazioni di sovrappressione neutra. Infatti, le fasi del ciclo di carico che non sono caratterizzate da una risalita del tubo sono le stesse che registrano delle cadute nella storia temporale delle sovrappressioni neutre. Questa è riportata insieme alla risposta in accelerazione in Fig. 3, per la stessa fase di carico, considerando i sensori installati immediatamente al di sotto del tubo. Picchi di accelerazione crescenti associati a delle cadute nella storia temporale delle sovrappressioni neutre indicano un incremento di rigidità del terreno associato al fenomeno di dilatanza. Questo significa che il terreno sta conservando la sua resistenza a taglio in alcune fasi del ciclo di carico, offrendo resistenza nei confronti della risalita del tubo e la sovrappressione neutra è sufficientemente bassa da non indurre uno spostamento verticale verso l'alto del tubo.

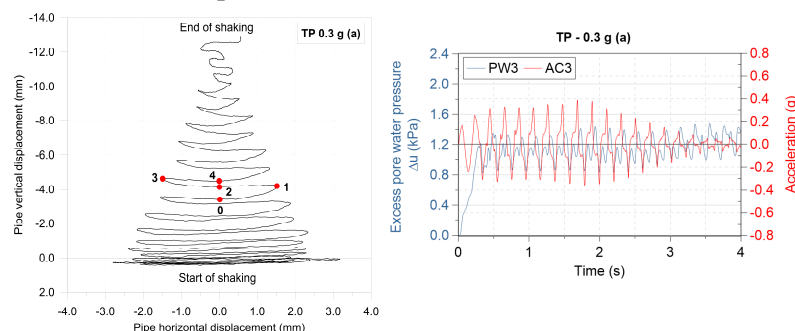


Fig 3. Esempio di storia temporale degli spostamenti orizzontali e verticali del tubo ed evidenze di dilatanza

3.2. Prestazioni della condotta interrata con l'adozione dei sistemi di mitigazione

Questo studio propone soluzioni di mitigazione che possano essere un'alternativa ai sistemi già esistenti, tenendo conto di una serie di requisiti che non possono essere tralasciati quando si ha a che fare con lunghi tracciati e condizioni variabili del sottosuolo, considerando anche il rapporto costi-benefici. Il principio di funzionamento di questi sistemi è quello di contrastare lo sviluppo del meccanismo responsabile del sollevamento del tubo interrato e le loro prestazioni sono verificate non per un singolo evento sismico, bensì per una sequenza sismica che potrebbe verificarsi nell'arco temporale della vita di progetto dell'opera. I risultati delle prove mostrano che sia il sacco di ghiaia che le geogriglie sono efficaci nella mitigazione degli effetti del fenomeno.

Il sacco di ghiaia è stato utilizzato per creare uno strato di materiale non liquefacibile al di sopra del tubo che ostacolasse il flusso di terreno responsabile del fenomeno di risalita. Questo effetto è stato verificato con la prova su modello, infatti, quando il terreno circostante inizia a deformarsi e a fluire intorno al tubo, la ghiaia non partecipa a questo processo interrompendo il flusso stesso, il cui percorso diventa più lungo dovendo aggirare la ghiaia e più dispendioso in termini energetici. Inoltre, trattandosi di un problema di equilibrio delle forze verticali agenti al tempo t sul sistema, nell'equilibrio compare un peso del terreno al di sopra della ghiaia con componente stabilizzante maggiore rispetto a quello che si avrebbe nel caso di solo tubo, perché essendo il sacco di ghiaia di larghezza pari a due volte il diametro del tubo, nell'azione di risalita coinvolge una colonna di terreno della stessa larghezza e non più pari al solo diametro del tubo come avveniva in assenza di mitigazione. Nella prova non è stato valutato il contributo di dissipazione delle sovrappressioni neutre che il sacco di ghiaia con la sua permeabilità avrebbe potuto offrire al sistema qualora fosse stato collegato ad un sistema per la fuoriuscita dell'acqua. Quest'operazione non è stata possibile perché la permeabilità del modello in scala non è rappresentativa di quella del deposito in condizioni reali, non avendo adottato un fluido viscoso che potesse garantirne il rispetto dei tempi di flusso. Il massimo spostamento cumulato verso l'alto del tubo con l'adozione del sacco di ghiaia è risultato pari a circa 8 mm (Fig. 2), beneficiando di una riduzione del sollevamento di circa 39 mm e mostrando, quindi, una

prestazione ottimale. La riduzione di spostamento si verifica sin dalle prime fasi della sequenza e, dopo il massimo spostamento verticale associato alla fase 3, aspetto che accomuna tutte le prove, la struttura non subisce spostamenti consistenti con gli input successivi della sequenza. I cedimenti di piccola entità che si registrano all’inizio della sequenza sono legati ad un assestamento del tubo e del sacco di ghiaia con l’impatto dello scuotimento.

Le geogriglie sono state utilizzate per incrementare la resistenza a taglio del terreno al di sopra della condotta, limitando le deformazioni del terreno così da ostacolarne il flusso responsabile del fenomeno. Con il sistema di geogriglie, la risalita si riduce di circa 32 mm rispetto al caso in assenza di mitigazione (Fig. 2), mostrando anche questo sistema una buona efficacia nel contenimento degli effetti del fenomeno, con un sollevamento massimo cumulativo del tubo di 15 mm circa. Anche per questa prova, il contributo maggiore in termini di risalita lo si ha per la fase 3. Al contrario del sacco di ghiaia, le geogriglie iniziano a mostrare la loro efficacia non nelle prime fasi della sequenza sismica, bensì con la fase 4, il che significa a densità relative maggiori. Raggiunta questa fase, però, la tubazione non continua a salire con l’applicazione della restante sequenza sismica, registrando uno spostamento verticale invariato e un cedimento nella fase decrementale in linea con i cedimenti del deposito di terreno per effetto dell’addensamento.

Gli spostamenti cumulati del terreno nell’intorno della condotta, fino alla fase 6, sono graficati in Fig. 4 in modo da cogliere la deformazione del terreno per i diversi schemi di prova.

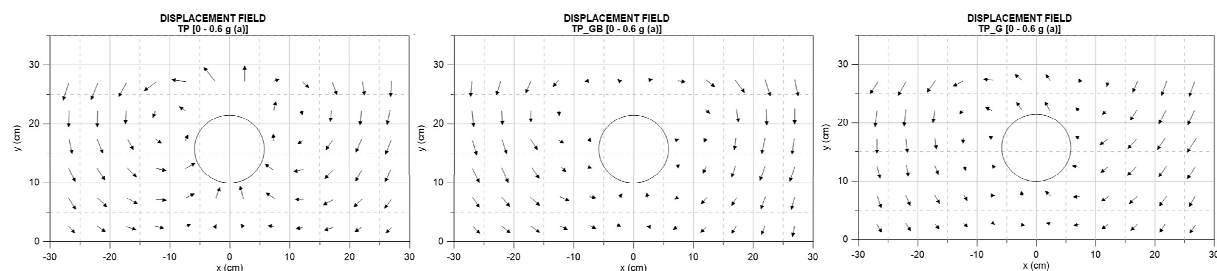


Fig 4. Spostamenti cumulati del terreno nell’intorno della condotta

Relativamente alle sovrappressioni neutre che si sviluppano nel modello, va sicuramente segnalata l’aliquota più bassa riscontrata nella zona in cui sono installate le geogriglie, in particolare per la fase di carico cui è associato il maggiore contributo alla risalita, che trova riscontro nella riduzione nel massimo rapporto di sovrappressione neutra osservato da altri autori in sabbia rinforzate con le geogriglie (e.g., Saran et al., 2010) e che può essere attribuito ad una riduzione della deformazione volumetrica (e.g., Senapati and Maheshwari, 2012). Questo diventa meno evidente con il progredire della sequenza sismica per effetto dell’addensamento del deposito di terreno. Inoltre, in linea generale, si registrano delle sovrappressioni neutre maggiori nella colonna del tubo nei modelli con i sistemi di mitigazione rispetto a quello con il solo tubo. Questo è legato al fatto che il fenomeno di risalita tende in ogni caso a svilupparsi e le pressioni crescono mentre i sistemi ne impediscono il movimento.

La fase 12, pur essendo ad ampiezza maggiore, applicata a valle della sequenza sismica descritta, non comporta un ulteriore spostamento verso l’alto del tubo e nessuna considerazione particolarmente rilevante per il problema investigato anche dal punto di vista delle metodologie adottate.

4. Conclusioni

Una tubazione interrata di grande diametro il cui peso apparente risulta inferiore al peso specifico del terreno circostante mediamente addensato è soggetta al fenomeno di risalita. In questo lavoro si illustrano alcuni risultati di una sperimentazione su tavola vibrante. Evidenze di risalita si hanno con l’incremento delle sovrappressioni neutre nel modello, considerato il peso esiguo della tubazione e la profondità di interrimento relativamente modesta della stessa. La risalita si manifesta in maniera

consistente quando la liquefazione interessa in maniera estesa il deposito di terreno. In aggiunta allo spostamento verticale di tipo permanente, durante la campagna sperimentale è stato riscontrato uno spostamento orizzontale transitorio del tubo di notevole entità che deve essere portato in conto nella progettazione. Studiando l'impatto della sequenza sismica sulle prestazioni del tubo si è osservato che lo spostamento di risalita maggiore si ha con il primo terremoto che induce liquefazione in maniera diffusa nel banco di terreno, a valle del quale il grado di risalita si riduce per terremoti successivi anche se l'ampiezza dell'input sismico, a parità di altre caratteristiche, è maggiore. Quando il processo di risalita ha inizio, la tubazione assume un comportamento favorevole alla risalita per terremoti successivi, anche se l'ampiezza dell'input sismico diminuisce, il terreno è addensato e la liquefazione sta interessando un'area più ristretta. Queste considerazioni fanno riferimento ad uno scenario in cui il deposito di terreno continua a liquefare per input sismici consecutivi della sequenza. Relativamente alla durata di un singolo evento sismico, dopo innescata la risalita si registra fino a quando le sovrappressioni neutre sono significative, che generalmente coincide con il termine dello scuotimento. Dopo una sequenza sismica di ampiezza crescente e decrescente, un evento di ampiezza superiore a ciascuna fase della sequenza precedente non ha più effetti sulle prestazioni dell'opera. Dal canto delle metodologie di mitigazione, per contrastare gli effetti del fenomeno di liquefazione sull'opera interrata, ci si è affidati al principio di ostacolare il flusso di terreno responsabile del fenomeno di risalita. Sia il sistema costituito dal sacco di ghiaia che quello caratterizzato dalla presenza delle geogriglie, infatti, vanno ad ostacolare le deformazioni del terreno nella zona in cui vengono installati incrementandone la resistenza a taglio. Questo succede perché la ghiaia è di per sé un materiale non liquefacibile, che interrompe, dunque, nel deposito la continuità del fenomeno e le geogriglie trasferiscono al deposito quella resistenza a taglio che viene a mancare al terreno stesso. Entrambi questi sistemi possono essere facilmente installati in caso di nuovi impianti o sostituzione di vecchie tubazioni ma possono essere anche adottate per le opere esistenti limitandosi a scavare il terreno al di sopra del tubo. Inoltre, il sacco di ghiaia è composto da materiali che sono facilmente reperibili spesso direttamente in sito, oppure possono raggiungere il cantiere già pronti per l'installazione. Essendo il materiale ghiaioso dotato di buona permeabilità, il sacco di ghiaia può essere utilizzato insieme ad un sistema di drenaggio per rendere la soluzione ancora più efficace dissipando le sovrappressioni neutre che si generano nel deposito. Il sacco di ghiaia e le geogriglie hanno dimostrato che l'adozione di un sovraccarico non è necessaria per contrastare il fenomeno di risalita, perché l'aumento di resistenza al taglio anche di una piccola porzione del terreno al di sopra della tubazione risulta efficace. Si noti che la presenza di un sovraccarico può indurre una concentrazione di sollecitazioni aggiuntive sul tubo nonché la possibilità di incorrere in una spinta verso il basso con conseguenti cedimenti o schiacciamenti dell'opera che devono essere evitati.

Bibliografia

- Castiglia, M., Santucci de Magistris, F., Onori, F., Koseki, J. (2021a). Response of buried pipelines to repeated shaking in liquefiable soils through model tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, 106629.
- Castiglia, M., Santucci de Magistris, F., Onori, F., Koseki, J. (2021b). Mitigation systems for the uplift of buried pipelines in liquefiable soils under repeated shaking through model tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 148, 106850.
- Chian S.C., Wang J, Haigh S.K., Madabhushi S.P.G. (2015) Soil deformation during monotonic and seismic pipe uplift in liquefable soil. *Journal of Pipeline Engineering*, 14(1):33–41.
- Koseki J, Matsuo O, Koga Y. (1997) Uplift behavior of underground structures caused by liquefaction of surrounding soil during earthquake. *Soils Found*, 37(1): 97–108.
- Saran, S., Maheshwari, B. K., Singh, H. P. (2010). Liquefaction studies of the Solani sand reinforced with geogrid. In *Proceedings of 5th international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil dynamics*, San Diego, California, paper (No. 1.18).
- Senapati, S., Maheshwari, B. K. (2012). Effects of geogrid on dynamic strength characteristics of solani sand. *Indian Geotechnical Journal*, 42(4), 287-293.