LA PROTEZIONE CON SCHERMI DI BOLLE D'ARIA DA ESPLOSIONI SUBACQUEE IN PROSSIMITÀ DI CENTRI ABITATI: UNA VALUTAZIONE DELLE AZIONI TRASMESSE ALLE STRUTTURE CIRCOSTANTI

Adolfo Bacci[1], Santo Petralia[2], Giovanni Brandimarte[2]

[1] XI° G.I. Costruzioni e Tecnologie, Accademia Navale, Viale Italia 52, 57100 Livorno;
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Facoltà d'Ingegneria, Via Diotisalvi 2, 56126, Pisa

[2] Commissione Permanente per gli Esperimenti del Materiale da Guerra, MARIPERMAN, Viale S. Bartolomeo 400, 19138 La Spezia

SOMMARIO

In questo lavoro si propone un sistema di protezione da esplosioni subacquee, adottato recentemente dagli autori in alcune bonifiche da ordigni inesplosi, costituito da uno schermo di bolle d'aria generato in prossimità della carica esplosiva da detonare. L'onda di pressione che si propaga in acqua dopo lo scoppio, attraversando la barriera riduce notevolmente la massima intensità e modifica la dipendenza dal tempo. L'efficienza della protezione è elevata sia per la tutela dell'ambiente subacqueo, sia per ridurre gli effetti sismici indotti nel fondale. Il modello meccanico, usato per spiegare il fenomeno dell'attenuazione, permette di determinare le azioni sulle parti immerse delle strutture vicine al punto d'esplosione e l'intensità delle vibrazioni che si propagano nel terreno.

1. INTRODUZIONE

Un aspetto di rilevante interesse, che spesso si presenta durante la bonifica di corsi d'acqua da ordigni bellici inesplosi ed inamovibili, consiste nella protezione delle strutture vicine al punto d'esplosione. Le costruzioni possono avere danneggiate le loro parti in acqua direttamente dalle pressioni prodotte dalla detonazione delle cariche, oppure essere eccessivamente sollecitate dalle vibrazioni trasmesse alle loro fondazioni dal sisma che segue lo scoppio. Ciò è possibile anche se le cariche non sono direttamente poggiate sul fondale. Infatti, la sovrappressione in acqua, generata dallo scoppio, è riflessa parzialmente dal fondo e si trasmette nel terreno producendo un'onda sismica che si diffonde concentricamente, interessando gli strati superficiali del terreno ed attenuandosi al crescere della distanza dal centro d'esplosione. Questo genere di attenuazione geometrica si può spiegare osservando che, anche se molto grande, l'energia trasmessa al terreno dallo scoppio ha un valore finito ed essa viene utilizzata per mettere in movimento una massa sempre più grande. Nonostante ciò, quando la quantità d'esplosivo è elevata, le vibrazioni prodotte nel terreno possono causare gravi danni anche a costruzioni relativamente distanti.

Recentemente è stato proposto dagli autori [1] un semplice metodo di protezione passiva da esplosioni subacquee. Esso consiste nel circondare la carica da fare brillare con uno schermo di bolle d'aria di opportuno spessore. L'efficienza del metodo, intesa come la capacità di abbattere il picco di pressione prodotto dalla detonazione in acqua, si è dimostrata elevata [2]. Ciò ha permesso di considerare la tecnica valida: sia per aumentare la sicurezza nelle operazioni di bonifica di corsi d'acqua da ordigni inesplosi ed inamovibili, sia per ridurre il sisma nei fondali protetti.

Allo scopo di avere una base teorica che confermi gli interessanti risultati sperimentali [3], si è cercato di spiegare il fenomeno, utilizzando il seguente modello. Consideriamo uno strato di liquido di lunghezza e larghezza illimitate, la cui profondità è D. La sua superficie superiore è libera, mentre il contorno inferiore è a contatto con un fondale, costituito di terreno avente proprietà meccaniche note. Una carica, di peso W, è posta alla distanza H dal fondale ed è circondata da schermi piani di bolle d'aria, il cui spessore è s. La regione protetta diviene un parallelepipedo a base quadrata di lato L. Il volume di liquido circondato dalla protezione è delimitato superiormente dalla superficie libera del fluido, lateralmente dagli schermi di bolle d'aria ed inferiormente da un altro strato distante d dalla carica. Le distanze fra le barriere e la carica sono maggiori del massimo raggio della bolla gassosa che si forma dopo l'esplosione. Quando l'ordigno detona, la barriera protettiva, raggiunta dall'onda di sovrappressione, si comprime riflettendo e trasmettendo il moto del fluido. L'energia liberata nello scoppio, in parte, raggiunge la massa di fluido che si trova di là dallo schermo ed, in parte, è dissipata nella proiezione violenta di liquido, oltre la superficie libera del canale.

Nelle ipotesi precedenti, tutti i processi termodinamici che seguono lo scoppio sono considerati adiabatici. Il campo di pressione, trasmesso oltre lo schermo protettivo, e la corrispondente riduzione della sovrappressione massima sono determinati nell'ambito di validità delle equazioni linearizzate del moto di un fluido. L'interazione fra il liquido ed il fondale è studiata come un caso particolare del classico problema di Lamb [4] del moto forzato di un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo. Pertanto, dopo aver determinato il campo di spostamento nel terreno, sono note le caratteristiche del sisma che si propaga nel suolo. Di conseguenza, confrontando i valori massimi degli spostamenti in un punto della superficie del fondale, sia quando esso è protetto, sia quando la barriera di bolle d'aria è assente, si quantifica l'efficienza della protezione in termini di riduzione del valore massimo dello spostamento. Le semplici relazioni trovate permettono il progetto tecnico degli schermi protettivi, proporzionandoli in modo da contenere le azioni sulle strutture entro limiti prefissati, ritenuti sicuri.

Figura 1. La protezione con schermi di bolle d'aria.

2. IL COEFFICIENTE DI COMPRESSIBILITÀ DELLO STRATO DI BOLLE

In un liquido il passaggio di un'onda di pressione, causata da un'esplosione, è accompagnato da rapide variazioni di densità di massa e da trasformazioni termodinamiche adiabatiche. Il legame fra la pressione e la densità del fluido non è lineare, ma del tipo Il prodotto è detto coefficiente di compressibilità adiabatica, mentre è una costante caratteristica del fluido, che dipende dal rapporto fra i calori specifici a pressione e volume costanti. L'equazione costitutiva di una miscela di gas ed acqua, ad esempio quella che forma lo strato di protezione, a causa della rapidità con cui avvengono le sue compressioni e le dilatazioni, può essere ritenuta analoga alla precedente. La compressibilità dello strato di bolle d'aria e di liquido sarà compresa fra quella del solo gas e quella solo liquido, in funzione della concentrazione dei singoli componenti.

Nel seguito, indichiamo con ρ_0 e ρ', rispettivamente, le densità del fluido in quiete ed in quello disturbato e supponiamo che la variazione di densità $\rho = \rho' - \rho_0$ sia piccola rispetto alla densità in condizioni di riposo, . Inoltre, sia p_0 la pressione nel liquido indisturbato, p' la pressione dopo il passaggio dell'onda d'urto ed, infine, $p = p' - p_0$ la sovrappressione causata dall'esplosione. Il legame costitutivo fra la pressione e la densità può essere espresso in termini di sovrapressione e di variazione di densità. Si ha così

,

nella quale posto , la sovrapressione diviene

(1)

Utilizzando la (1), una valutazione del coefficiente di compressibilità dello strato composto da bolle di gas e liquido può essere effettuata come segue. Indicando con i pedici "*g*", "*L*" ed "*s*" rispettivamente il gas, il liquido e lo strato, sia il volume del gas contenuto in un volume di controllo dello strato e la corrispondente concentrazione. Se è il volume di liquido, si ha , per cui la frazione di volume liquido nello strato è Quando il valore della pressione nello strato passa da p_0 a p', il coefficiente di dilatazione cubica del liquido, posto $\gamma_L \cong 1$, è

(2)

in cui ΔV_L è la diminuzione di volume di liquido seguito dall'aumento di pressione *p*. La stessa operazione eseguita per il gas conduce al coefficiente di dilatazione cubica Pertanto, utilizzando le precedenti espressioni dei coefficienti di dilatazione cubica per il liquido ed il gas, il coefficiente Ω_s per la miscela fluida composta da bolle di gas e liquido diviene

(3)

La relazione costitutiva valida per lo strato di bolle è

Il coefficiente di dilatazione cubica per lo strato piano di spessore *s* si valuta semplicemente. Infatti, ponendo con il vettore spostamento dei punti del fluido, la variazione di volume unitaria della barriera, considerata piana, è data dalla relazione dove sono gli spostamenti subiti dalle facce opposte dello strato, mentre è la normale alla superficie dello strato. La risposta alle variazioni di pressione dello strato è

(4)

E' interessante osservare che, quando poiché *p* deve rimane finito, è cioè la componente dello spostamento in direzione normale alla barriera è una funzione continua. Ciò significa che l'effetto di interferenza dello strato è annullato e la massa fluida non ha ostacoli nel suo interno.

Infine, se consideriamo trascurabile la compressibilità del liquido rispetto a quella del gas, l'espressione (3) diviene

(5)

3. L'INTERAZIONE FRA IL FLUIDO E LO SCHERMO DI BOLLE D'ARIA

La sorgente delle onde di pressione, cioè la carica esplosiva, è considerata una sfera di raggio *a*. L'incremento di pressione, generato nel liquido dall'esplosione della carica, si suppone decrescente nel tempo con un decadimento esponenziale a partire da un valore di picco iniziale P_0. In queste ipotesi, fissato un sistema di riferimento polare sferico la cui origine *O* è il centro della carica, usando le stesse notazioni della sezione precedente ed osservata la simmetria del problema fisico, indicando con il vettore che definisce la velocità dei punti particelle fluide, le equazioni differenziali linearizzate che descrivono il moto del fluido, quando le forze di volume sono ininfluenti rispetto al gradiente di pressione, sono

(6)

Adottando l'ipotesi acustica, cioè valida in acqua per e cercando la soluzione delle equazioni (6) nella forma cioè in termini del potenziale di velocità le equazioni (6) si riducono all'equazione delle onde a simmetria sferica

(7)

in cui

L'equazione (7) deve essere associata alle condizioni al contorno

(8)

ed a quelle iniziali di fluido a riposo.

In questo semplice caso il potenziale di velocità ha espressione

(9)

per cui la pressione diviene

(10)

In prima approssimazione, allo scopo di dare una stima della drastica riduzione del picco di pressione osservato oltre la barriera di bolle di gas, si suppone che la distanza *d* dello schermo dal centro della carica, sia sufficientemente grande da poter trascurare il termine convettivo dell'equazione (7) rispetto al gradiente di velocità . L'onda di pressione incidente sullo schermo si considera così approssimativamente piana.

La semplificazione precedente riduce il problema dell'interazione fra il fluido e lo strato alla soluzione delle seguenti equazioni differenziali

(11)

Se osserviamo che la velocità delle particelle fluide è dove la funzione $u(r,t)$ è la componente radiale del vettore spostamento, e che la soluzione delle equazioni (11) è del tipo $f(t-r/c_L)$, si ottiene $u(r,t)=\varphi(r,t)/c_L$.

Posto con $\varphi_{1inc}(r,t)$ e $\varphi_{1rif}(r,t)$ rispettivamente il potenziale di velocità dell'onda incidente e dell'onda riflessa, le condizioni al contorno divengono

(12)

dove la funzione $P(r,t)$ ha espressione

(13)

4. LA PRESSIONE NEL LIQUIDO OLTRE LO SCHERMO DI BOLLE

La soluzione del problema con dati al contorno ed iniziali definito dalle equazioni (11) e (12) può essere trovata usando la soluzione di D'Alambert dell'equazione delle onde. Omettendo la parte analitica, l'espressione della pressione trasmessa oltre lo schermo di bolle, nell'ipotesi e dopo aver posto

, diviene

(14)

Nelle figura 2 è riportato il confronto fra la pressione che investe lo schermo e quella trasmessa al variare del rapporto β/α.

Figura 2: Confronto fra la pressione incidente e quella trasmessa oltre lo schermo di protezione.

Il massimo valore della pressione trasmessa oltre lo schermo di bolle è

(15)

raggiunto quando

Il fattore di riduzione della pressione nel passaggio dell'onda di pressione attraverso lo strato è

(16)

La relazione (14) presenta, inoltre, alcune situazioni limite che sono di interesse. Innanzitutto, consideriamo il caso in cui . L'espressione della pressione diviene ed il picco massimo si riduce del fattore Mentre, se , ovvero il caso di protezioni reali, la pressione è ed il coefficiente di riduzione del picco di pressione diviene Infine, quando si ha , di conseguenza c'è un aumento di pressione trasmessa rispetto al caso di fluido non protetto.

5. L'INTERAZIONE FRA IL FLUIDO ED IL FONDALE

La sovrappressione che si propaga all'interno del fluido dopo il tempo H/c_L raggiunge la superficie del fondale. L'interazione che nasce fra il liquido ed il terreno è responsabile di un moto sismico che si propaga fino a notevole distanza, ma che interessa solo gli strati più superficiali del terreno.

La risposta dinamica di un mezzo solido all'eccitazione causata da un'onda che si muove sulla sua superficie è un problema di considerevole importanza nel progetto delle strutture destinate a resistere alle azioni prodotte dalle esplosioni. Nel seguito, allo scopo di determinare l'attenuazione esercitata dallo schermo di bolle che protegge il terreno del fondo, si utilizzano i risultati del classico problema di Lamb [4], in cui un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo, è soggetto ad una forza concentrata in un punto della sua superficie. L'intensità della forza si suppone variabile nel tempo con legge assegnata. Questo modello permette di determinare il campo di spostamenti nel terreno in forma esplicita solamente in punti distanti dall'epicentro dell'esplosione. E' importante osservare che nel seguito si considera la superficie del semispazio libera da tensioni, escludendo la presenza della forza concentrata, trascurando così la presenza del liquido. Ciò equivale a trascurare il moto d'interazione fra il terreno ed il liquido.

Consideriamo la risultante delle pressioni che agiscono sulla porzione quadrata di superficie di fondale, $A = L^2$, base del parallelepipedo le cui facce sono gli schermi di bolle che circondano la carica, ormai esplosa. Il punto d'intersezione delle diagonali della superficie quadrata sia anche l'origine O di un sistema di coordinate polari cilindriche r, θ, z che individua i punti del semispazio elastico, di costanti di Lamé λ e μ, omogeneo ed isotropo di densità di massa ρ_t costante, per mezzo del quale si simula il suolo del fondo. La velocità delle onde di dilatazione sia , quella delle onde di distorsione sia ed, infine, la velocità delle onde superficiali di Rayleigh sia c_R. Il problema di elastodinamica che si vuol risolvere consiste nel determinare il campo di spostamento $\mathbf{u}(r,z,t)$ dotato di simmetria polare, sulla superficie del semispazio elastico $z = 0$, generato dalla forza concentrata applicata in O e variabile nel tempo.

Nel seguito si analizzano due situazioni. La prima consiste nel determinare lo spostamento dei punti della superficie semispazio elastico quando la protezione è assente. La seconda situazione prevede, invece, la presenza di uno schermo protettivo posto ad una distanza $h = H - d$ dalla superficie del semispazio elastico.

La risultante delle pressioni che agiscono sulla superficie di riferimento, utilizzando un coefficiente di riflessione acustica $R = 2$, e trascurando la fase transitoria di ricoprimento, nel caso di assenza di protezione diviene

, (17)

mentre la presenza dello schermo protettivo, quando , cioè nel caso di una protezione reale, porta alla risultante

. (18)

A grande distanza dalla carica, l'effetto dell'esplosione è visto come istantaneo e puntuale. Ciò consente di semplificare notevolmente l'espressione del campo di spostamento, in quanto la dipendenza dal tempo delle risultanti (18) e (19) può essere sostituta per semplicità di calcolo, ad esempio, con la più semplice espressione . Le costanti G_0 e τ sono determinate, nei due casi, imponendo la condizione

e l'uguaglianza dell'impulso nell'intervallo di tempo cioè

Se la protezione è assente si hanno e , mentre se il fondale è protetto dallo schermo di bolle si ricavano e Le espressioni semplificate delle risultanti divengono

(20)

Le differenze fra la funzione esponenziale e quella approssimante sono riportate in figura 3.

Figura 3: Risultante con decadimento esponenziale e funzione approssimante.

Le componenti del vettore spostamento, rispettivamente orizzontale e verticale,, limitatamente alla quota legata alle onde superficiali di Rayleigh [4], sono

(21)

dove , mentre

Omettendo i laboriosi passaggi analitici, che peraltro non contribuiscono ad accrescere la comprensione meccanica del fenomeno, si ottengono le espressioni delle componenti orizzontale e verticale del campo di spostamento, valide per grandi valori di *r*, cioè a grande distanza dalla sorgente. Si ha così

(22)

dove

.

Figura 4. (a) *Spostamento orizzontale in un punto.* (b) *Spostamento verticale.*

Nelle Figure 4.a e 4.b sono riportati i diagrammi qualitativi rispettivamente della componente orizzontale e, rispettivamente, di quella verticale dell'*intero* vettore spostamento. Si osserva che nel punto considerato, viene registrato innanzitutto un piccolo moto generato dall'arrivo delle onde di dilatazione, successivamente giunge un debole movimento dovuto all'arrivo delle onde di distorsione, immediatamente seguito da notevoli spostamenti prodotti dalle onde di Rayleigh. I diagrammi di Figura 4 sono un sismogramma teorico, alquanto discosto da uno reale per varie ragioni. Infatti, il terreno è assunto omogeneo ed isotropo, senza stratificazioni e disomogeneità che provocano dispersioni ed effetti secondari. Il modello che simula la sorgente impulsiva può non essere aderente agli effetti prodotti dall'esplosione reale. Infine, non si considera la presenza del liquido sopra il fondale, il quale interagendo con il terreno contribuisce ad accrescerne l'inerzia.

Il coefficiente di riduzione dello spostamento può essere determinato nel modo seguente. Sostituendo nelle (22) le espressioni di G_0 e τ determinate nelle due situazioni di moto, si ottiene il coefficiente di riduzione dello spostamento del suolo. Infatti, osservando che $q(r,0,t)$ attinge il suo valore massimo quando , il coefficiente di riduzione dello spostamento orizzontale e verticale è

(23)

Infine, si osserva che il coefficiente di riduzione per il picco di pressione, al variare del rapporto β/α è meno elevato rispetto a quello per lo spostamento. Ciò è da ritenere legato all'ulteriore decadimento degli effetti con la distanza dalla sorgente dovuto alla propagazione sulla superficie del fondale.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] A. Bacci, S. Petralia, G. Brandimarte & Altri, Fading out the pressure peak from underwater explosion by air bubble sceens, *Proceedings of XXI.th World Congress of Pyrothecnics*, Tokyo, (1997)

[2] A. Bacci, S. Petralia, The use of air bubbles screens in the underwater explosions: the safety of the structures near the point of explosion, accettato per la presentazione e la pubblicazione su "*Proceedings of 3rd World Autumn Seminar on Propellent, Explosives and Pyrothecnics*", Chendu, China (1999)

[3] Marina Militare Italian, Attenuazione dell'onda d'urto subacquea mediante fogli di polietilene a bolle d'aria, *Report Interno: 9401*, Mariperman, La Spezia (1996)

[4] M. Bath, *Mathematical aspect of seismology*, Elsevier, Amsterdam, pp. 362-365 (1968).