Comportarea rezervoarelor pentru lichide la acțiuni seismice

Behaviour of liquid storage tanks under seismic actions

Dragoş Voiculescu

Universitatea Tehnică de Construcții București, Romania B-dul Lacul Tei nr. 124, sector 2 *E-mail: dravoi@hotmail.com*

Rezumat. În prezenta lucrare se face o trecere în revistă a problematicii comportării și calculului rezervoarelor pentru lichide supuse la acțiuni seismice.

Cuvinte cheie: rezervoare, seism, comportare

Abstract. In this paper, the authors are presenting briefly the problematics of behaviour and calculation for liquid storage tanks subjected to seismic actions.

Key words: tanks, earthquake, behaviour

1. Introducere

Rezervoarele, folosite ca spatii de depozitare pentru lichide de diverse feluri, care variază de la non-toxice și neinflamabile la foarte toxice și inflamabile, au o importantă economică deosebită. Consecintele deteriorării rezervoarelor sub actiuni seismice severe, cum ar fi de exemplu oprirea sistemului de alimentare cu apă (San Francisco, 1906), declanșarea unor incendii necontrolate care pot să aprindă rezervoare si clădiri adiacente, revărsarea unor fluide toxice (Niigata, 1964 și Miyagi-Ken-Oki, 1978) sau degajarea în atmosferă a unor produse chimice toxice pot provoca daune mult mai mari decât cutremurul în sine. Jennings [1] oferă un raport privind avariile suferite de rezervoare după cutremurul din San Fernando. Într-un raport scris de Wyllie [2] sunt descrise avariile provocate rezervoarelor de cutremurul din 1985 din Chile. Berz [3] rezumă toate dezastrele naturale majore, inclusiv cutremure, între 1960 și 1987. Este evident că daunele provocate de cutremure joacă un rol dominant în lista de dezastre naturale. Mai multe detalii asupra avariilor suferite de rafinării de petrol de la cutremure majore între anii 1933-1983 sunt furnizate de Nielsen și Kiremdijan [4]. Ei ajung la concluzia că avariile la instalatiile de depozitare ale rafinăriilor au fost deosebit de grave și indică necesitatea de creștere a performanțelor acestora.

Au fost observate următoarele moduri de cedare ale rezervoarelor în timpul acțiunilor seismice severe:

Dragoş Voiculescu

a) cedarea prin flambaj elasto-plastic a peretelui rezervorului în apropierea marginii inferioare ("picior de elefant"), cauzată de forțele axiale de compresiune care sunt o consecință a momentului de răsturnare, a se vedea figura 1;

b) flambajul elastic al peretelui rezervorului ("forma de diamant"), a se vedea figura 2;

c) flambajul elastic al peretelui rezervorului la partea superioară datorită scăderii bruște a presiunii interne;

d) cedarea acoperișului (fix sau flotant);

e) cedarea plăcii de la fundul rezervorului;

f) cedarea fundației;

g) ruperea conductelor de deservire ale rezervorului;

e) alunecarea de corp rigid a rezervorului.



Fig. 1: Cedarea peretelui prin flambaj elasto-plastic la bază (picior de elefant)

Cele mai relevante tipuri de cedare ale rezervoarelor sunt prin flambajul elasto-plastic al peretelui la baza ("picior de elefant"), și prin flambajul elastic al peretelui rezervorului ("forma de diamant").

Pentru a înțelege comportarea rezervoarelor de fluide lichide supuse la acțiuni seismice, au fost activate mai multe grupuri de cercetare pentru investigarea comportamentului dinamic al lichidelor conținute într-un înveliş din tablă subțire. Scopul a fost acela de a dezvolta metodele de proiectare la cutremur ale rezervoarelor de stocare a lichidelor, și de a furniza prescripții pentru inginerii implicați în construirea de rezervoare de stocare a lichidelor. Abordarea inginerească trebuie să fie bazată pe luarea în considerare a unui sistem dinamic cuplat, constând dintr-o coajă (un înveliş) cu un răspuns elastic sau elastic-plastic, conținutul de lichid al rezervorului, și o fundație deformabilă. Este o problemă de interacțiune lichid-structură-sol. Descoperirile științifice fundamentale care permit o estimare a încărcărilor dinamice în cazul rezervoarelor rigide sprijinite pe fundații rigide, au fost publicate de către Housner [5]. O recentă analiză a abordării inginerești a comportării rezervoarelor de stocare a lichidelor sub încărcări seismice este prezentată de către Rammerstorfer și al [6].

Fischer și al [7] și Veletsos și Tang [8], au elaborat și publicat proceduri practice de inginerie pe bază de studii parametrice. Aceste proceduri permit

proiectarea simplă a rezervoarelor de stocare a lichidelor tipice pentru industria petrochimică, rezistente la acțiuni seismice, folosind formule și diagrame specifice.



Figura 2: Cedare prin flambaj elastic al peretelui (în formă de diamant)

Există multe diferențe între prescripțiile curente și recomandările pentru proiectarea de rezistență la acțiuni seismice a rezervoarelor de stocare a lichidelor. Cu toate acestea, procedurile de proiectare la nivel global sunt similare, în special pentru rezervoarele ancorate în fundații. Procedurile de proiectare cuprind calculul acțiunilor dinamice, urmat de analiza de rezistență și stabilitate. Etapele principale ale acestor proceduri de proiectare sunt descrise pe scurt în continuare:

- Calculul acțiunilor dinamice prin metoda spectrelor de răspuns.
- Calculul frecvențelor naturale, al factorilor de amortizare, al factorilor de participare modală și a modurilor proprii de vibrație.
- Calculul răspunsului maxim de accelerație a fiecărui mod propriu de vibrație (mișcarea rigidă a "coloanei de lichid", vibrațiile interactive la contactul dintre peretele flexibil al rezervorului și lichidul conținut, vibrațiile datorate mișcării lichidului la suprafață liberă efectul de val), a se vedea figura 3.
- Calculul contribuțiilor maxime la momentul de răsturnare (corespunzătoare modurilor proprii de vibrație), datorate presiunii activate dinamic de excitația seismică orizontală.
- Suprapunerea contribuțiilor la momentul de răsturnare și a contribuțiilor la presiunea activată dinamic cauzate de excitația seismică orizontală.
- Calculul și suprapunerea contribuțiilor la presiunea dinamică activată de excitația sesmică verticală.
- Analiza capacității de rezistență și stabilitate.
- Suprapunerea de presiune cauzată de excitația orizontală cu cea cauzată de excitația verticală cu privire la diferitele tipuri de instabilitate ale pereților

rezervorului. Presiunea internă este stabilizatoare cu privire la flambajul elastic și destabilizatoare în cazul flambajului elasto- plastic.



Figura 3: Distributia contribuțiilor individuale ale presiunii activate dinamic

La rezervoarele care nu sunt ancorate de pământ, apar nelinearități ca urmare a contactului unilateral dintre baza rezervorului și fundație, în plus față de nelinearitățile datorate comportării elasto-plastice a materialului. Construcția unui rezervor fără ancore este mult mai ieftină, pentru că nu necesită o fundație specială din beton și nici ancoraje speciale. Comportamentul dinamic al unui rezervor neancorat este destul de diferit de cel al rezervoarelor ancorate. Ridicarea parțială a fundului rezervorului cauzată de momentul de răsturnare duce la creșterea forțelor de compresiune axială în peretele rezervorului. Prin urmare, fenomenul de instabilitate a pereților rezervorului poate să apară la momente de răsturnare mai mici.

2. Rezervoare ancorate

2.1. Excitația seismică orizontală

Housner [9] a propus o procedură simplă pentru rezervoarele rigide care se bazează pe metoda spectrului de răspuns. Scharf [10] a făcut deasemenea diverse comentarii cu privire la utilizarea spectrului de răspuns la metoda de calcul a încărcărilor dinamice pentru rezervoarele de stocare a lichidelor. În anii '70 a devenit clar că influența deformațiilor peretelui rezervorului, care este o coajă subțire, nu trebuie să fie neglijată și că încărcările dinamice pot fi mult mai mari decât cele de la rezervoarele rigide. Cercetările au condus la un model simplu (Figura 4), utilizat în prezent în prescripțiile pentru calculul încărcărilor dinamice din acțiuni seismice asupra rezervoarelor. Acestea permit determinarea momentului maxim de răsturnare, necesar pentru a analiza rezistența și stabilitatea rezervorului. Recapitulând, presiunea activată dinamic pe peretele rezervorului, datorită unei excitații seismice orizontale, considerând rezervorul cilindric deformabil, sprijinit pe un sol rigid, este dată de suprapunerea a patru componente:

 \mathbf{P}_{SL} este presiunea "de convecție" datorată efectului de val la suprafața lichidului (numărul de unde circumferențiale m = 1).

 P_B este presiunea "de impuls" datorată mișcării de rigid a lichidului care este sincronizată cu accelerația orizontală a terenlui.

 P_D este presiunea datorată interacțiunii vibrației peretelui deformabil și a lichidului, adică m = 1,

 $P_{D,m}$ sunt componentele de presiune datorate vibrațiilor de interacțiune cu $m \ge 2$. Aceste componente, care rezultă din imperfecțiuni, pot fi neglijate în ceea ce privește estimarea momentului de răsturnare.



Fig. 4: Model simplificat

Momentul maxim de răsturnare se calculează prin suprapunerea contribuțiilor individuale datorate efectului de val, mișcării de corp rigid și a vibrațiilor datorate interacțiunii lichid-perete. Suprapunerea efectelor se bazează pe o suprapunere de tip SRSS. În abordările inginerești, formulele și schemele sunt prezentate pentru estimarea frecvențelor naturale și a maselor individuale și a înălțimilor din figura 4, care depind, în principal, de raportul $\alpha = H/R$, de mărimea parametrilor R sau H, și de densitatea lichidului conținut. Aceste formule și diagrame au rezultat din integrarea contribuțiilor fiecărei componente de presiune.

Pe această bază, momentul maxim de răsturnare ce rezultă din presiunile activate dinamic care acționează pe peretele rezervorului (presiunea pe fund nu este inclusă) poate să fie estimat de (în conformitate cu Fischer și al [7]):

$$MM = \left[\left(M_{SL} A_{SL} H_{SL} \right)^2 + \left(M_B A_B H_B \right)^2 + \left(M_D A_D H_D \right)^2 \right]^{1/2}$$
(1)

sau alternativ, în conformitate cu Haroun and Housner [11]:

$$MM = \left[\left(M_{SL} A_{SL} H_{SL} \right)^2 + \left(M_B A_B H_B + M_D A_D H_D \right)^2 \right]^{1/2}$$
(2)

în care, pentru rezervoarele concepute conform DIN 4119, raportul dintre masele efective (M_{SL} , M_B , M_D) și masa de lichid conținut (M_T) poate fi luat din fig. 5, și înălțimea corespunzătoare din fig. 6.



 A_{SL} , A_B și A_D sunt accelerațiile efective. Ele sunt obținute folosind spectrele de accelerație și factorii de participare modali. Frecvențele fundamentale pot să fie aproximate prin (conform cu Fischer și al [7]):

$$f_{SL} = [1/(2\pi)] [1,84 g \tanh(1,84 \alpha)/R]^{1/2} [1/s]$$
(3)

$$f_D = [E s_{1/3} / (\rho_L H)]^{1/2} / (2F_s(\alpha)R)]$$
 [1/s] (4)

unde

$$F_s(\alpha) = 0,157\alpha^2 + \alpha + 1,49; \qquad \alpha = H/R$$
 (5)

și $s_{1/3}$ este grosimea peretelui la înălțimea H/3.

10



Amplitudinea presiunilor la marginea de jos - valori necesare pentru a verifica stabilitatea și de a evalua rezistența peretelui rezervorului - poate fi estimată ca în figura 7.



Fig. 7: Amplitudinea presiunilor la marginea de jos a peretelui

2.2. Excitația seismică verticală

Componenta verticală a cutremurului conduce mai ales la moduri de vibrație axisimetrică. Din nou se pot distinge mișcarea de corp rigid, interacțiunea perete flexibil - lichid, precum și de efectul de val de suprafață liberă, Fischer et al [7]. Ele pot fi estimate prin formule simple similar cu procedura descrisă mai sus, Seeber [12].

Dragoş Voiculescu

2.3. Analiza capacității de rezistență și stabilitate

Pornind de la estimarea încărcărilor dinamice, se poate face analiza capacității de rezistență și stabilitate. Formula empirică care conduce la estimări corecte, dezvoltată de Rotter și Seide [13] pentru plăci cilindrice sub compresiune axială și presiunea internă este:

$$n_x^{\text{crit}} = 0,605 \text{ (Es}^2/\text{R)} [1 - (p\text{R}/(s\sigma_y))^2] *$$
$$* [1 - 1/(1,12 + k^{1,15}] (\sigma_y/250 + k)/(1 + k), \tag{6}$$

unde:

 n_x^{crit} este forța axială critică de membrană

 σ_{y} este limita de curgere

p este presiunea internă

E este modulul lui Young

k este R/(400s)

R este raza rezervorului

s este grosimea peretelui la baza rezervorului

Acest rezultat se poate vedea, de exemplu, în figura 8 pentru cutremurul din Friuli (1976), pentru cazul rezervoarelor de oțel din industria petrochimică.



Fig. 8: Accelerația critică a terenului la care apar diverse moduri de instabilitate a pereților la rezervoarele ancorate

3. Rezervoare neancorate

În analiza rezervoarelor neancorate, investigarea acțiunii în placa de la partea de jos a rezervorului este esențială pentru a obține forța axială de compresiune în peretele rezervorului. Deoarece apar neliniarități din interacțiunea lichid – structură - teren (geometrice și de material), și deasemenea problema de contact cu terenul trebuie să fie rezolvată, calculul răspunsului dinamic al rezervoarelor neancorate este foarte complicat. Prin urmare, nu sunt pe deplin satisfăcătoare modele disponibile. Clough [14] presupune că rezervorul care tinde să se răstoarne reazemă, pe de o parte, pe un tronson de circumferința și, pe de altă parte, pe o suprafață circulară poziționată exentric, a se vedea figura 9a.

Wozniak and Mitchell [15] au prezentat un model îmbunătățit de răsturnare a rezervorului care ține cont de formarea articulațiilor plastice, vezi Figura 9b.



Fig. 9: Model de răsturnare: (a) DP Clough [14]; (b)Wozniac și Mitchell [15]

Rezultatele complete ale analizelor numerice - Scharf [10] - arată o puternică influență a rigidității acoperișului asupra distribuției forțelor axiale de compresiune. Acest fapt a fost, de asemenea, raportat de către Natsiavas [18] și Sakai [19]. Figura 10 arată forța axială n_x la partea de jos a rezervorului pentru un rezervor cu o rigiditate mică și respectiv mare la partea superioară (acoperiș sau inel marginal), la diferite intensități ale cutremurului.



Fig. 10: Forța axială de compresiune la fundul rezervorului (diverse situații)

Pornind de la rezultatele studiilor parametrice, a fost dezvoltat un grafic care permite estimarea forței axiale maxime de compresiune la baza peretelui la rezervoarele neancorate $N_{neacorate}$, Scharf [10]. Graficul se bazează pe forțele axiale maxime de compresiune pentru rezervoarele ancorate $N_{ancorate}$ (a se vedea figura 11).



Fig. 11: Forța maximă de compresiune în funcție de momentul de răsturnare

S-a ajuns la concluzia că această creștere a forței axiale de compresiune nu trebuie neglijată, mai ales în cazul rezervoarelor "înalte". Influența creșterii forței axiale de compresiune asupra diferitelor tipuri de instabilitate a pereților rezervorului este remarcabilă.

4. Concluzii

a. La rezervoare pot să apară mai multe moduri de cedare în timpul acțiunilor seismice severe. Cele mai relevante sunt flambajul elasto-plastic și flambajul elastic al peretelui rezervorului. b. Proiectarea rezervoarelor ancorate ia în considerare excitația orizontală și verticală a actiunii seismice și include analiza capacității de rezistență și stabilitate.

c. Pentru rezervoarele neancorate, calculul răspunsului dinamic este foarte complicat și nu este disponibil un model pe deplin satisfăcător, dar au fost dezvoltate mai multe proceduri de calcul simplificat.

Referințe

- [1] *Jennings, P.E.* (Ed), "Engineering Features of the San Fernando Earthquake", EERI-71-02, pp. 434-470, California Institute of Technology, Pasadena, 1971.
- [2] Wyllie, L.A., Bolt, B., Durkin, M.E., Gates, J.H., McCormick, D., Smith, P.D., Abrahamson, N., Castro, G., Escalante, L., Luft, R., Olson, R.S. and Vallenas, J., "The Chile Earthquake of March 3, 1985", Earthquake Spectra, Vol.2, No. 2, Chapter 5, pp. 373-409, 1986.
- [3] Berz, G. "List of Major Natural Disasters, 1960-1987", Natural Hazards, Vol. 1, pp. 97-99, 1988.
- [4] *Nielsen, R., and Kiremidjian, A.S.*, "Damage to Oil Refineries from Major Earthquakes", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, pp. 1481-1491, 1986.
- [5] *Housner, G.W.*, "The Dynamic Behaviour of Water Tanks", Bulletin of the Seismological Society of America, **Vol. 53**, pp. 381-387, 1963.
- [6] *Rammerstorfer, F.G., Scharf, K. and Fischer, F.D.*, "Storage Tanks Under Earthquake Loading", Appl. Mech. Rev., Vol. 43, pp. 261-282, 1990.
- [7] *Fischer, F.D., Rammerstorfer, F.G. and Scharf, K.*, "Earthquake Resistant Design of Anchored and Unanchored Liquid Storage Tanks Under Three-Dimensional Earthquake Excitation", Structural Dynamics Recent Advances, Schueller, G.I. (Ed), Chapter 5. 1, pp. 317-371, Springer-Verlag, 1991.
- [8] *Veletsos, A.S., and Tang, Y.*, "Soil-Structure Interaction Effects for Vertically Excited Tanks", Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering 9WCEE, Tokyo/Kyoto, Japan, **Vol. VI**, pp. 631-636, 1988.
- [9] *Housner, G.W.*, "Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 47, No. 1, pp. 15-35, 1957.
- [10] Scharf, K., "Beiträge zur Erfassung des Verhaltens von erdebenerregten, oberirdischen Tankbauwerken", Doctoral Thesis, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 4, Nr 97, VDI Verlag, Düsseldorf, FRG, 1990.
- [11] *Haroun, M.A. and Housner, G.W.*, "Earthquake Response of Deformable Liquid Storage Tanks", Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 48, pp. 411-417, 1981.
- [12] Seeber, R., "Das dynamische Verhalten fernerregter flüssigkeitsgefüllter Tankbauwerke auf elastischem Untergrund, Doctoral Thesis, Institute of Mechanics, University of Mining and Metallurgy, Leoben, Austria, 1988.

Dragos	Voiculescu	
Drugog	, orearesea	۰.

- [13] *Rotter, J.M. and Seide, P.*, "On the Design of Unstiffened Shells Subjected to an Axial Load and Internal Pressure, Proceedings of the ECCS Colloquium on Stability of Plate and Shell Structures, Ghent University, Belgium, pp. 539-548, 1987.
- [14] *Clough, D.P.*, "Experimental Evaluation of Seismic Design Methods for Broad Cylindrical Tanks", UCB/EERC-77/10, University of California, Berkely, 1977.
- [15] *Wozniak, R.S. and Mitchell, W.W.*, "Basis of Seismic Design Provisions for Welded Steel Oil Storage Tanks", Proceedings of the Session of Advances in Storage Tank Design, API Refining Dept., pp. 485-493, 1978.
- [16] Auli, W., Fischer, F.D. and Rammerstorfer, F.G., "Uplifting of Earthquake-Loaded Liquid-Filled Tanks", Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference, ASME, PVP Vol. 98-7, pp. 71-85, 1985.
- [17] *Rammerstorfer, F.G., Billinger, W. and Fischer, F.D.,* "Stabilität flüssigkeitsgefüllter unverankerter Zylinderschalen auf schräger Unterlage, Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik ZAMM", Bd 68, T240-T243, 1988.
- [18] Natsiavas, S., "Simplified Models for the Dynamic Response of Tall Unanchored Liquid Containers", Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference, ASME, PVP Vol. 157, pp. 15-21, 1989.
- [19] Sakai, F., Isoe, A., Hirakawa, H. and Mentani, Y., "Experimental Study on Uplifting Behaviour of Flat-based Liquid Storage Tanks Without Anchors", Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering 9WCEE, Tokyo/Kyoto, Japan, Vol. VI, pp. 649-654, 1988.
- [20] *Bureau, G.*, "Seismic Design Guidelines for Liquid Storage Tanks: Applicability and Limitations", Proceedings of the 4th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Mexico, City, Mexico, pp. 343-354, 1989.
- [21] *Niwa, A. and Clough, R.W.*, "Buckling of Cylindrical Liquid-Storage Tanks Under Earthquake Loading", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **Vol. 10**, pp. 107-122, 1982.

16