

POTRESNA ANALIZA JEKLENIH CILINDRIČNIH REZERVOARJEV

SEISMIC ANALYSIS OF STEEL CYLINDRICAL LIQUID STORAGE TANKS

Toni Klemenčič, mag. inž. grad.
prof. dr. Boštjan Brank, univ. dipl. inž. grad.

bbrank@fgg.uni-lj.si

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani

Znanstveni članek

UDK 621.642:624.042.7

Povzetek | V članku ilustriramo komponente hidrodinamičnega pritiska na jeklene cilindrične rezervoarje zaradi potresa po SIST EN 1998-4. Ko so maksimalne vrednosti komponent ocenjene, jih lahko uporabimo za nelinearno analizo obnašanja rezervoarja. Za izbrani rezervoar prikažemo, kako se naredi geometrijska in materialna nelinearna analiza (za fiksno razmerje med navpičnim in vodoravnim pospeškom tal), s katero izračunamo vodoravne pospeške tal, pri katerih lahko pričakujemo uklon stene in nepovratne plastične deformacije rezervoarja.

Ključne besede: cilindrični rezervoar, hidrodinamični pritisk pri potresu, uklon cilindra, nelinearna analiza

Summary | We illustrate the components of the hydrodynamic pressure on steel cylindrical tanks as defined by SIST EN 1998-4. Once the maximal values of the components are estimated, they can be used for nonlinear analysis. We show for a particular tank how to apply geometrically and materially nonlinear finite element analysis (for fixed ratio between vertical and horizontal ground accelerations) in order to compute the horizontal accelerations related to the buckling of the cylinder wall and inelastic deformations of the tank.

Key words: cylindrical liquid storage tank, hydrodynamic pressures during earthquake, buckling of cylinder wall, nonlinear analysis

1 • UVOD

Veliki jekleni cilindrični rezervoarji so namenjeni skladiščenju tekočin. V Sloveniji se uporabljajo za skladiščenje naftnih derivatov, za skladiščenje in fermentacijo vina, uporabljajo se tudi v kemijski in farmacevtski industriji. Ker so praviloma prisotni ob velikih industrijskih objektih, v pristanišču in na nekaterih drugih pomembnih transportno-logističnih lokacijah in ker lahko zadržujejo nevarne tekočine, je njihova varnost zelo pomembna. Poškodbe rezervoarjev imajo lahko za posledico večjo finančno škodo in okoljsko ogroženost.

Potresna analiza je pomemben del projektiranja vsakega večjega jeklenega cilindričnega rezervoarja. Takšna analiza mora biti opravljene

na v skladu s (SIST EN 1998-4, 2006), kar pa se izkaže za relativno zahtevno nalogo. Za to sta vsaj dva razloga. (i) Projektiranje potresno odpornih rezervoarjev se razlikuje od projektiranja potresno odpornih stavb (in mostov). (ii) Standard (SIST EN 1998-4, 2006), ki v (informativnem) dodatku A podaja informacije o postopkih za potresno analizo rezervoarjev, je napisan tako, da se ga težko ustrezno uporabi brez dodatnega študija.

Namen tega članka je dvojen: (i) na kratko povzeti pomembne informacije iz dodatka A standarda (SIST EN 1998-4, 2006), ki se nanašajo na določevanje komponent hidrodinamičnega pritiska pri jeklenih

cilindričnih rezervoarjih, in (ii) predstaviti dva možna pristopa k uklonski analizi velikih jeklenih cilindričnih rezervoarjev zaradi potresne obtežbe.

V prvem delu članka podajamo kratek opis različnih komponent hidrodinamičnega pritiska na konstrukcijo rezervoarja, ki nastanejo zaradi potresa. (Pri tem naj omenimo, da je bil v okviru magistrske naloge (Klemenčič, 2016) napisan kratek računalniški program za izračun maksimalnih vrednosti teh komponent po (SIST EN 1998-4, 2006), ki je na voljo pri drugonavedenem avtorju.) V drugem delu članka pokažemo, kako se lahko v skladu s (SIST EN 1998-4, 2006)

izvrednoteni normirani hidrodinamični pritisk uporabi pri (geometrijsko in materialno) nelinearni analizi jeklenega rezervoarja z metodo končnih elementov. Takšna analiza omogoči

vpogled v (konservativno) oceno poškodb pri različnih nivojih maksimalnega vodoravnega pospeška tal za obravnavani tip (sidranega ali prostostoječega) rezervoarja. Pove tudi, pri

kako velikem pospešku tal lahko pričakujemo uklon stene in kdaj lahko pričakujemo nepovratne plastične deformacije dna in stene rezervoarja.

2 • PRITISKI, KI DELUJEJO NA REZERVOAR ZARADI POTRESA

Zaradi gibanja tal med potresom se tekočina v rezervoarju premika in zato dodatno pritiska na steno in dno rezervoarja. Temu pritisku rečemo hidrodinamični. Hidrodinamični pritisk na steno in dno rezervoarja je v strokovni literaturi ((Rammerstorfer, 1990), (Rammerstorfer, 1991)) in tudi standardu (SIST EN 1998-4, 2006) predstavljen kot vsota treh pritiskov: (i) pritiska, ki bi nastal, če bi se rezervoar in tekočina v njem impulzivno premaknila kot togo telo, (ii) pritiska, ki bi nastal, če bi v mirujočem rezervoarju valovala tekočina, in (iii) pritiska, ki bi nastal zaradi nihanja sistema rezervoar–tekočina. Ta razdelitev je mogoča, ker je medsebojno dinamično prepletanje omenjenih treh pojavov šibko.

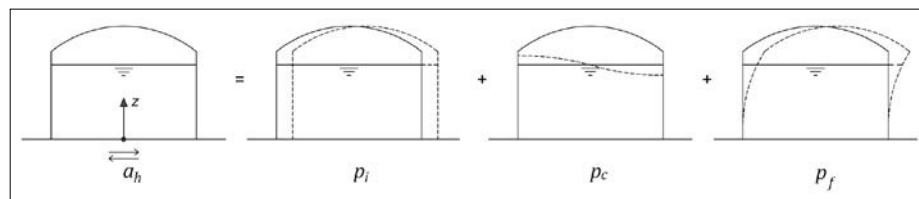
2.1 Pritiski zaradi vodoravne komponente potresa

Na sliki 1 so prikazana tri zgoraj omenjena stanja rezervoarja in tekočine v njem zaradi vodoravnega gibanja tal. Na sliki 1 (levo) se rezervoar in tekočina v njem hipno (impulzivno) in pospešeno premakneta kot togo telo. Pritisk na steno in dno rezervoarja, ki pri tem nastane, je poimenovan impulzivni pritisk p_i . Na sliki 1 (sredina) rezervoar miruje, tekočina v njem pa valovi, kar povzroča t. i. konvekcijski pritisk p_c na steno rezervoarja. Na sliki 1 (desno) pa rezervoar in tekočina v njem nihata kot povezan sistem, kar povzroča t. i. fleksibilni pritisk p_f na steno in dno rezervoarja. Pritiski p_i , p_c in p_f so tri komponente hidrodinamičnega pritiska na rezervoar.

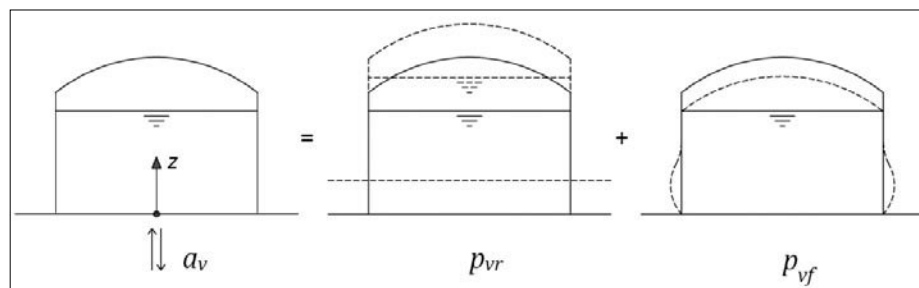
Tako p_i kot p_c in p_f se spreminjajo s časom. Pri nekem fiksnem času pa se njihove vrednosti spreminjajo tako po višini rezervoarja (so odvisne od koordinate z) kot po obodu rezervoarja (so odvisne od kota θ). Pri tem je razporeditev pritiskov p_i , p_c in p_f pri nekem fiksnem času po obodu rezervoarja sorazmerna $\cos\theta$, glejte sliko 3 (levo).

Med delovanjem potresa v vodoravni smeri se pojavi še inercijski pritisk zaradi mase stene rezervoarja p_w . Predpostavi se, da je pomemben samo tisti inercijski pritisk, ki bi nastal, če bi se rezervoar in tekočina v njem impulzivno premaknila kot togo telo. Deluje na steno re-

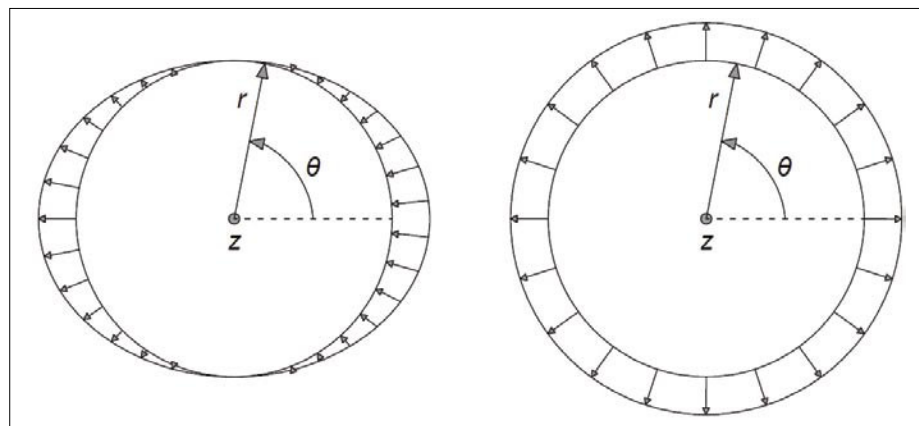
zervoarja in se spreminja s časom. Pri nekem fiksnem času je po višini proporcionalen debelini stene. Predpostavljeno je, da se po obodu spreminja s $\cos\theta$, slika 3 (levo) (EN 1998-4, 2006). Pri jeklenih rezervoarjih je inercijski pritisk mnogo manjši od hidrodinamičnega pritiska, zato se lahko zanemari.



Slika 1 • Hidrodinamični pritisk na rezervoar med vodoravnim premikanjem tal se lahko prikaže kot vsota treh pritiskov



Slika 2 • Hidrodinamični pritisk na rezervoar med navpičnim premikanjem tal se lahko prikaže kot vsota dveh pritiskov



Slika 3 • Potek pritiskov po obodu rezervoarja pri vodoravnem gibanju tal v smeri $\theta = 0$ (levo) in pri navpičnem gibanju tal (desno)

2.2 Pritiski zaradi navpične komponente potresa

Impulzivni in fleksibilni pritisk se pojavita tudi zaradi navpičnega gibanja tal (Veletsos, 1986), kot je prikazano na sliki 2. Na sliki 2 (levo) se rezervoar in tekočina v njem hipno (impulzivno) in pospešeno premakneta v navpični smeri kot togo telo. Posledica so osno simetrični impulzivni pritiski na steno rezervoarja v radialni smeri p_{vr} . Na sliki 2 (desno) pa rezervoar in tekočina v njem

nihata osno simetrično v radialni smeri, kar povzroča pritisk p_{vr} . Tako p_{vr} kot p_{vf} se spreminjata s časom. Pri nekem fiksnem času se spreminjata njuni vrednosti po višini rezervoarja (sta odvisni od koordinate z), po obodu pa sta njuni vrednosti konstantni, kot je prikazano na sliki 3 (desno).

2.3 Določitev pritiskov po SIST EN 1998-4

Standard (SIST EN 1998-4, 2006) v dodatku A podaja izraze za maksimalne vrednosti pritiskov p_{iv} , p_{wv} , p_{cv} , p_f ter p_{vr} in p_{vf} , glejte preglednico 1. Če je rezervoar zelo tog (če je npr. armiranobetonski), standard predpostavi, da je del hidrodinamičnega pritiska zaradi nihanja rezervoarja in tekočine pf zanemarljiv. Če pa je rezervoar deformabilen (npr. jeklen), pritiskov pf ne smemo zanemariti.

Izrazi za pritiske iz preglednice 1 veljajo za sidrane in delno sidrane rezervoarje (poglavje A1 v (SIST EN 1998-4, 2006)); torej za rezervoarje, ki so pričvrščeni na temelj. Standard (SIST EN 1998-4, 2006) dovoljuje, da se isti izrazi uporabljajo tudi za nesidrane rezervoarje (torej za rezervoarje, ki so na temelj le položeni), in pravi, da smo s tem (predvidoma) na varni strani (poglavje A.9). Razloži, da pri nesidranih rezervoarjih pride do zibanja dela dna rezervoarja (njegovega dvigovanja in spuščanja nazaj na temelj), ki podaljša nihajni čas sistema rezervoar-tekočina, s čimer se v spektru pospeškov pomaknemo v območje manjših pospeškov in s tem manjših fleksibilnih pritiskov. Impulzivni in konvekcijski pritisk pa sta enaka za sidrane in nesidrane rezervoarje (poglavje A.9).

Členi v (SIST EN 1998-4, 2006), navedeni v preglednici 1, navajajo (relativno kompleksne) eksplicitne izraze za maksimalne vrednosti komponent hidrostatičnega pritiska (ki pa se lahko lepo sprogramirajo, glejte (Klemenčič, 2016)). Standard (SIST EN 1998-4, 2006) dovoljuje, da se pri konvekcijskih pritiskih upošteva le osnovna oblika valovanja. Prav tako dovoljuje, da se pri fleksibilnih pritiskih upošteva le osnovna nihajna oblika sistema rezervoar-tekočina. Osnovno nihajno obliko sistema rezervoar-tekočina je zahtevno določiti. V (SIST EN 1998-4, 2006) je predlagan naslednji iterativni postopek, povzet po (Rammerstorfer, 1991), ki upošteva povezanost konstrukcije in tekočine z metodo dodatne mase (i je iteracijski indeks):

(a) Uporabite funkcijo $f^i(\zeta)$, ki predstavlja aproksimacijo poteka osnovne nihajne oblike po višini rezervoarja ($\zeta = z/H$, kjer je H višina

Pritiski	Člen v SIST EN 1998-4
Zaradi vodoravne komponente potresa	
Impulzivni pritisk p_i	A.2.1.1
Inercijski pritisk p_w	A.2.1.4
Konvekcijski pritisk p_c	A.2.1.2
Fleksibilni pritisk p_f	A.3.1
Zaradi navpične komponente potresa	
Impulzivni pritisk p_{vr}	A.2.2
Fleksibilni pritisk p_{vf}	A.3.3

Preglednica 1 • Členi v (EN 1998-4, 2006) za določitev pritiskov na cilindrični rezervoar

rezervoarja). Potek osnovne nihajne oblike v obodni smeri je določen s $\cos \theta$, glejte sliko 3 (levo). Lahko se predpostavi, da je začetna aproksimacija $f^1(\zeta)$ daljica, ki ima vrednost 0 pri $\zeta = 0$ in vrednost 1 pri $\zeta = 1$.

(b) Izračunajte fleksibilni pritisk $p_f^i = p_f(f^i(\zeta))$ z izrazi iz A.3.1 iz (EN 1998-4, 2006).

(c) Upoštevajte interakcijo med rezervoarjem in tekočino z »efektivno gostoto stene rezervoarja«, ki jo izračunate tako, da gostoti materiala stene ρ_s prištejete še »dodatno gostoto« zaradi interakcije

$$\rho^i(\zeta) = \frac{p_f^i(\zeta)}{2 g s(\zeta) f^i(\zeta)} + \rho_s \quad (1)$$

V (1) je $s(\zeta)$ debelina stene rezervoarja, ki se lahko (odsekoma) spreminja po višini, g pa je zemeljski pospešek.

(č) Z »efektivno gostoto stene rezervoarja« (1) izračunajte nihajne oblike sistema rezervoar-tekočina (to se naredi z modelom rezervoarja, katerega stene imajo gostoto $\rho^i(\zeta)$). Poiščite nihajne oblike, za katere velja, da so v obodni smeri proporcionalne $\cos \theta$ (to je lahko mukotrpa naloga). Tista med njimi, ki ima največji nihajni čas, je iskana nihajna oblika $\Phi^{i+1} = f^{i+1}(\zeta)\cos \theta$, iz katere odčitajte nov približek poteka nihajne oblike po višini rezervoarja $f^{i+1}(\zeta)$.

(d) Ponovite (a), (b) in (c). Če se $\rho^{i+1}(\zeta)$ zelo malo razlikuje od $\rho^i(\zeta)$, je $f^{i+1}(\zeta)$ zadosti dobra aproksimacija in lahko končate iteracijski postopek. Drugače nadaljujte pri točki (č) $i + 1$ iteracije.

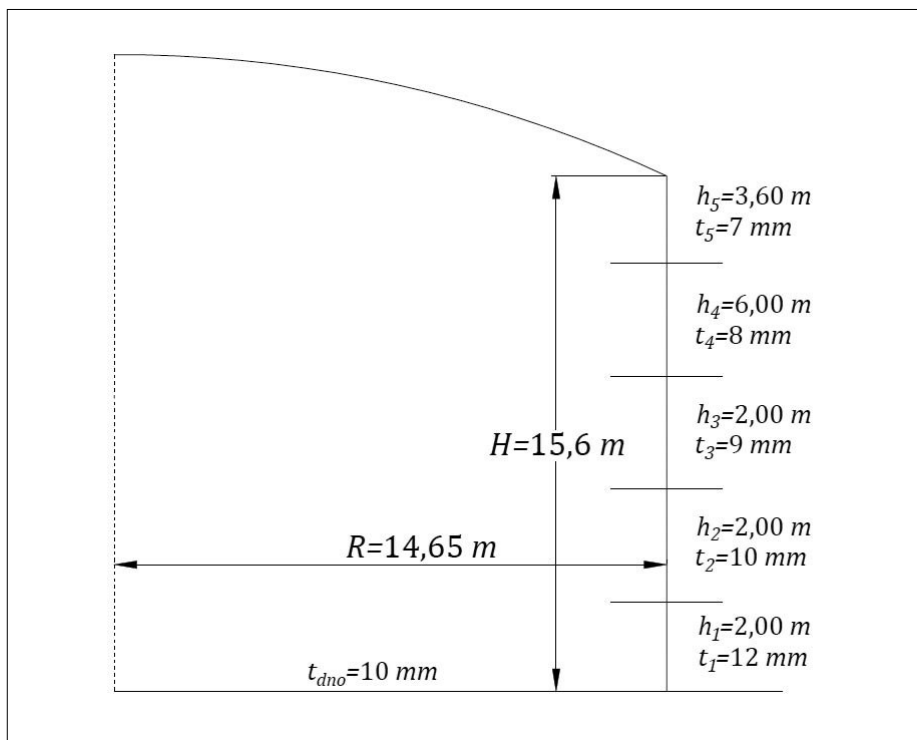
V preglednici 2 so podane vrednosti faktorja obnašanja q , ki ga standard (SIST EN 1998-4, 2006) dovoljuje pri posameznih pritiskih za mejno stanje nosilnosti.

Pritiski	q faktor
Zaradi vodoravne komponente potresa	
Impulzivni pritisk p_i	1,5
Inercijski pritisk p_w	1,5
Konvekcijski pritisk p_c	1
Fleksibilni pritisk p_f	1,5
Zaradi navpične komponente potresa	
Impulzivni pritisk p_{vr}	1,5
Fleksibilni pritisk p_{vf}	1,5

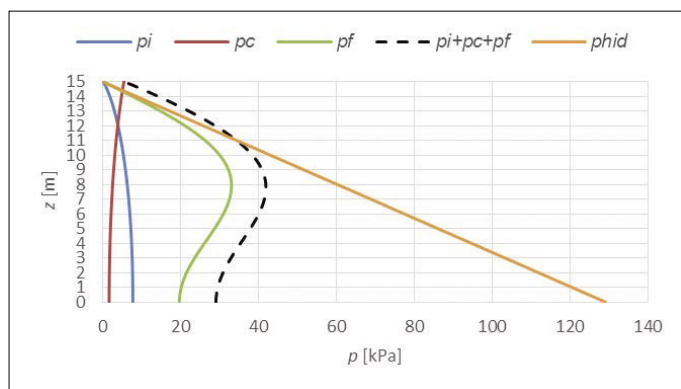
Preglednica 2 • Faktor obnašanja (q faktor) za posamezne pritiske za mejno stanje nosilnosti.

2.4 Velikosti posameznih pritiskov

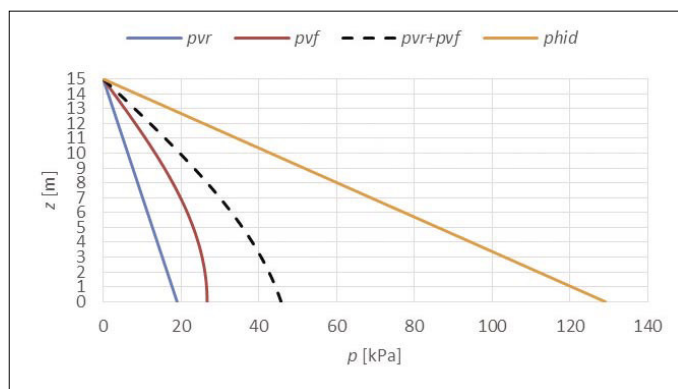
Za ilustracijo si poglejmo, kakšne so komponente hidrodinamičnega pritiska po standardu (EN 1998-4, 2006) za jekleni cilindrični rezervoar s slike 3, ki je namenjen hranjenju naftnih derivatov z gostoto 860 kg/m^3 . Prerez in osnovne dimenzije jeklenega rezervoarja so prikazani na sliki 4. Cilindrična stena rezervoarja je sestavljena iz jeklenih obročev petih debelin, kakovost jekla pa je S355 (SIST EN 10025-3, 2004). Cilindrična stena je na spodnjem robu privarjena na jekleno dno, ki je prosto postavljeno na betonsko podlago. Rezervoar torej ni sidran. Drugi podatki o rezervoarju so podani v (Baumgartner, 2011). Predpostavljeno je, da je kupolasta streha rezervoarja iz aluminija specifične teže 27 kN/m^3 in debeline 10 mm . Rezervoar je obremenjen z lastno težo, hidrostatičnim pritiskom P_{hid} in hidrodinamičnim pritiskom zaradi potresne aktivnosti. Maksimalne komponente hidrodinamičnega pritiska so določene za vodoravni pospešek tal $a_h = 0,25 \text{ g}$ in navpični pospešek tal $a_v = 0,225 \text{ g}$. Predpostavimo torej, da je vrednost navpičnega pospeška tal



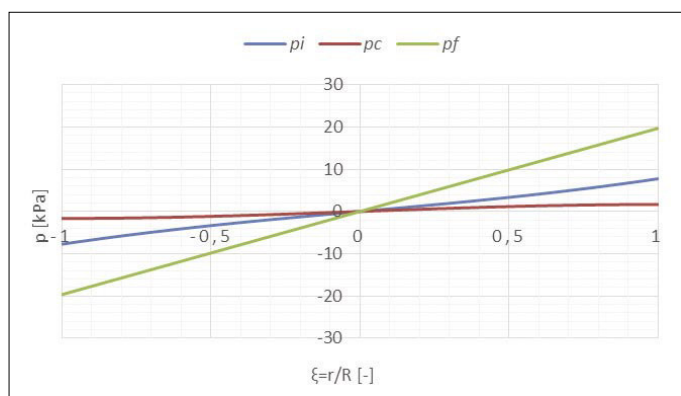
Slika 4 • Polovica prečnega prereza obravnavanega rezervoarja



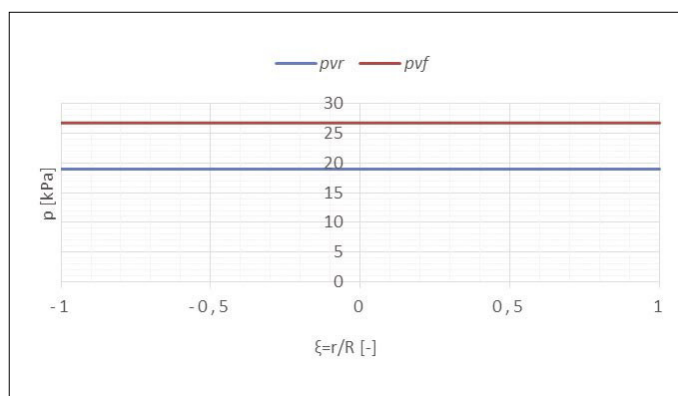
Slika 5 • Primerjava komponent hidrodinamičnega pritiska s hidrostatičnim pritiskom (zaradi vodoravnega vzbujanja) za faktorje q iz preglednice 2



Slika 6 • Primerjava komponent hidrodinamičnega pritiska s hidrostatičnim pritiskom (zaradi navpičnega vzbujanja) za faktorje q iz preglednice 2



Slika 7 • Komponente pritiskov na dno rezervoarja (zaradi vodoravnega vzbujanja) za faktorje q iz preglednice 2



Slika 8 • Komponente pritiskov na dno rezervoarja (zaradi navpičnega vzbujanja) za faktorje q iz preglednice 2

90 % vodoravnega pospeška, kot priporoča (SIST EN 1998-1, 2004) (poglavje 3.2.2.3, preglednica 3.4).

Komponente hidrodinamičnega pritiska so v obravnavanem primeru manjše od hidrostatičnega pritiska (glejte slike 5 in 6). To je zato, ker smo predpostavili relativno majhne vrednosti vodoravnega in navpičnega pospeška tal. Pri valovanju, ki povzroča konvekcijski pritisk, se aktivira le zgornji del

mase tekočine v rezervoarju, zaradi česar je ta pritisk najmanjši od vseh komponent hidrodinamičnega pritiska na sliki 5. Na slikah 7 in 8 so prikazani pritiski na dno rezervoarja (R je polmer rezervoarja).

2.4 Kombinacija posameznih pritiskov

Maksimume posameznih komponent hidrodinamičnega pritiska lahko kombiniramo z navadnim seštevanjem, čeprav ta način

lahko vodi v konservativno oceno (SIST EN 1998-4, 2006), poglavje A.2.1.5. Drugačini priporočeni načini kombiniranja različnih komponent hidrodinamičnega pritiska so podani v (SIST EN 1998-4, 2006), poglavje A.3.3). V standardu (SIST EN 1998-4, 2006) je navedeno, da bi kombinacija komponent hidrodinamičnega pritiska po metodi korena vsote kvadratov (SRSS) podcenila dejanske vplive potresa.

3 • ANALIZA UKLONA REZERVOARJA Z NELINEARNO METODO KONČNIH ELEMENTOV

Pri jeklenih rezervoarjih je največji problem uklon stene. V nadaljevanju za kontrolo uklona stene dejanskega jeklenega rezervoarja uporabimo geometrijsko in materialno nelinearno metodo končnih elementov. Analizo opravimo s programom Abaqus (Abaqus Manuals, 2011).

3.1 Podatki o rezervoarju in analizi

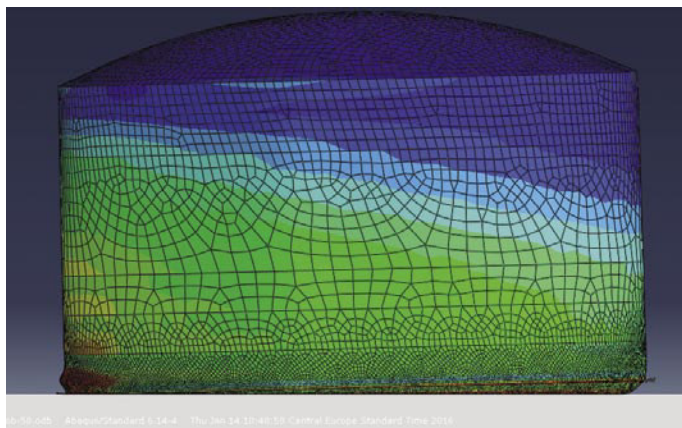
Obravnavamo rezervoar s slike 4. Obnašanje jekla rezervoarja opišemo z elasto-plastičnim materialnim modelom z izotropnim utrjevanjem. Kvaliteta jekla je S355: elastični modul je $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$, Poissonov količnik je $\nu = 0,3$, napetost na meji plastičnega tečenja je $\sigma_y = 355 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$, modul izotropnega utrjevanja je $H = 3,23 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ (SIST EN 10025-3, 2004) in gostota jekla je $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$. Rezervoar ni sidran in prosto stoji na temelju. Pri analizi predpostavimo, da je dno rezervoarja v stiku s togo podlago. Stik modeliramo na naslednji način: v navpični smeri imamo idealen kontakt med dnom in

podlago (dovoljen je odmik dna od podlage), v vodoravni smeri pa trenjski kontakt, ki ga modeliramo s Coulombovim zakonom in koeficientom trenja med jeklom in betonom, ki je po (Baltay, 1990) enak 0,45. Drugi podatki o rezervoarju so bili podani v poglavju 2.4.

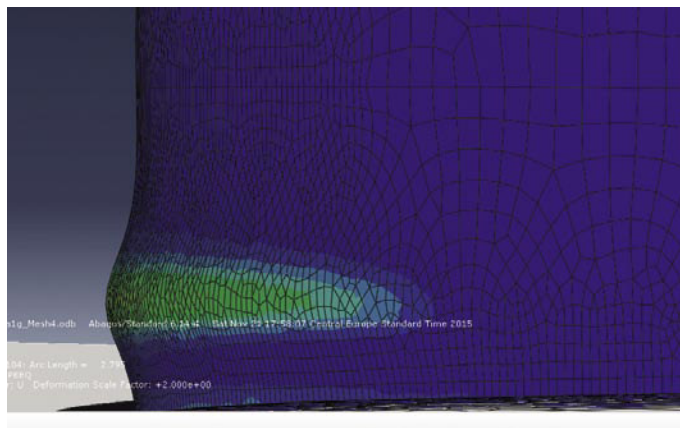
Analizo naredimo v dveh korakih. V prvem koraku izračunamo stanje rezervoarja pod vplivom hidrostatičnega pritiska P_{hid} in lastne teže rezervoarja. V drugem koraku pa analiziramo vpliv hidrodinamičnega pritiska na rezervoar, ki nastane zaradi potresa. Pred tem izračunamo vse komponente hidrodinamičnega pritiska: (i) za vodoravni pospešek tal 1 g, (ii) za navpični pospešek tal 1 g ter (iii) za faktorje q iz preglednice 2. Seštejemo tako dobljene komponente hidrodinamičnega pritiska zaradi vodoravnega vzbujanja, $p_h = p_i + p_c + p_r$, in komponente hidrodinamičnega pritiska zaradi navpičnega vzbujanja, $p_v = p_{vr} + p_{vt}$, in vpeljemo parameter analize $\lambda = a_h/g$. Pritiske na rezervoar definiramo v odvisnosti od $\lambda = a_h/g$ kot

$$p(\lambda) = p_{hid} + p_h a_h + p_v a_v = \underbrace{p_{hid}}_{1.korak} + \underbrace{\lambda \left(p_h + \frac{a_v}{a_h} p_v \right)}_{2.korak} \quad (2)$$

Parameter λ v drugem koraku analize postopoma povečujemo in iščemo rešitev nelinearnih enačb z Riksovo metodo (Abaqus Manuals, 2011). Pri tem predpostavimo, da je razmerje vodoravnega in navpičnega pospeška tal enako $a_v/a_h = 0,9$. S takšno analizo lahko ocenimo, pri kateri vrednosti vodoravnega pospeška tal bo nastal: (i) pojav elasto-plastičnega uklona stene rezervoarja na dnu rezervoarja (tj. pojav t. i. slonove noge, ki je najpogostejša poškodba jeklenih rezervoarjev pri potresu), (ii) pojav neelastičnih deformacij v steni rezervoarja, (iii) pojav neelastičnih deformacij v dnu rezervoarja in (iv) pojav dviga dna rezervoarja. Ocenimo lahko torej, kakšne poškodbe rezervoarja lahko pričakujemo pri določeni vrednosti vodoravnega pospeška tal. Če v enačbi (2) drugi člen odštejemo od prvega, dobimo obtežni primer za uklon zgornjega dela cilindra, ki se tudi lahko zgodi med potresom. Rezultatov takšne analize v nadaljevanju ne prikažemo.



Slika 9 • Deformacija rezervoarja pri $\lambda = 0,25$. Na levi strani imamo uklon stene, na desni strani pa dvig dna



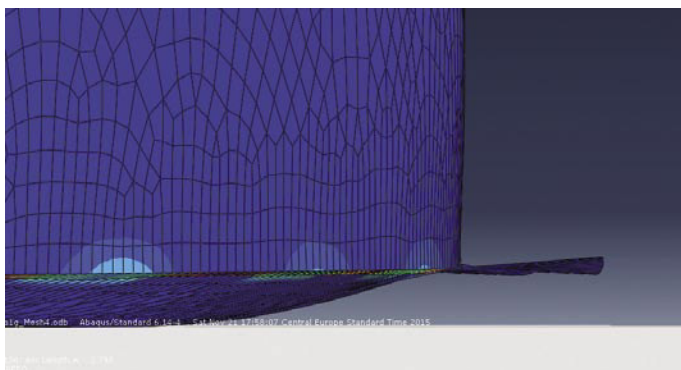
Slika 10 • Območje uklona stene rezervoarja pri $\lambda = 0,25$

3.2 Rezultati analize

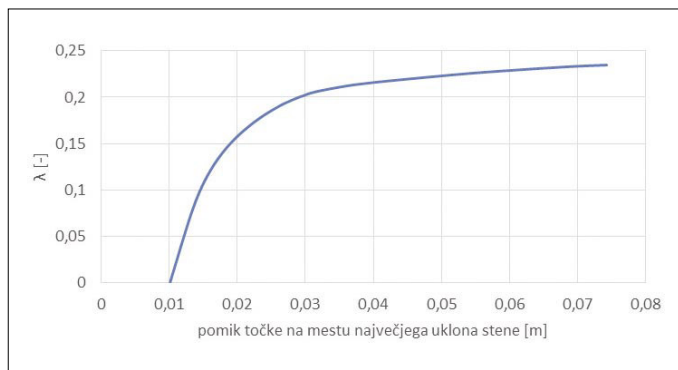
Prva neelastična deformacija se zgodi, ko se začne rezervoar dvigovati, in sicer na mestu spoja med plaščem in dnem rezervoarja. Takrat je $\lambda = 0,15$, oziroma $a_h = 0,15$ g. Neelastična deformacija stene rezervoarja se pojavi nekoliko kasneje. Plastični uklon v obliki t. i. slonove noge se začne pri $\lambda = 0,20$, kar pomeni, da imamo začetek pojava uklona

na stene pri vodoravnem pospešku tal 0,20 g (pri čemer je navpični pospešek tal enak 0,18 g). Od $\lambda = 0,20$ dalje se plastične deformacije stene in dna povečujejo. Obravnavani rezervoar bo praktično v celoti v elastičnem stanju do $a_h = 0,20$ g (razen ozkega zunanjšega pasu dna, katerega plastifikacija pa ni problematična). Slika 9 prikazuje deformacije celotnega rezervoarja pri $\lambda = 0,25$.

Na sliki 10 je prikazan detajl uklona stene rezervoarja. Pomik točke na mestu največjega uklona stene prikazujemo na sliki 12. Pri $\lambda = 0,25$ zabeležimo pomik 7,5 cm. Pojavi se dvig rezervoarja na nasprotni strani od uklona stene, glejte sliko 11, ki prikazuje detajl dviga spodnjega roba rezervoarja. Pri $\lambda = 0,20$ beležimo dvig 23 cm.



Slika 11 • Območje dviga rezervoarja pri $\lambda = 0,25$



Slika 12 • Diagram vodoravnega pomika točke stene rezervoarja v odvisnosti od vodoravnega pospeška tal na mestu uklona

4 • ANALIZA UKLONA REZERVOARJA S FORMULO IZ (EN 1998-4, 2006)

T. i. slonova noga (oziroma plastični uklon) na dnu stene rezervoarja nastane zaradi kombiniranja velikih radialnih nateznih napetosti in velikih tlačnih navpičnih napetosti, ki so posledica prevrnilvenega momenta. Prevrnilveni moment nastane zaradi asimetričnih pritiskov na steno rezervoarja, ki so posledica vodoravnega vzbujanja rezervoarja.

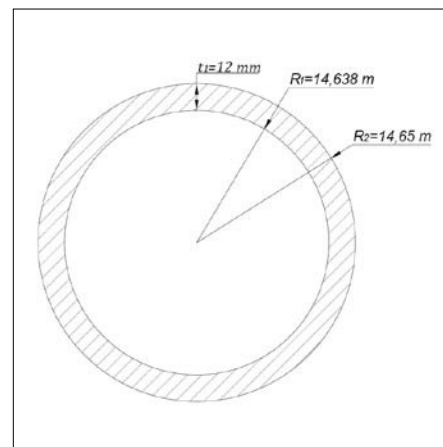
Tudi z enostavno analizo, pri kateri ne potrebujemo metode končnih elementov, lahko preverimo, ali bo pri določenem pospešku tal nastal plastični uklon dna stene. Uporabimo: (i) prevrnilveni moment tik nad dnem, ki ga izračunamo z izrazi iz (SIST EN 1998-4, 2006), (ii) membransko teorijo lupin ter (iii) enačbo (3), ki jo podaja standard (SIST EN 1998-4, 2006) v poglavju A.10. Enačba (3) izhaja iz kritične osne napetosti pri uklonu cilindričnih lupin (4), ki ji je dodan empirični del. Uklon preverimo tako, da po membranski teoriji lupin izračunamo napetost, ki nastane na dnu stene zaradi prevrnilvenega momenta, in jo primerjamo s kritično uklonsko napetostjo σ_m iz (3)

$$\sigma_m = \sigma_{c1} \left(1 - \frac{p R}{s f_y} \right) \left(1 - \frac{1}{1,12 + r^{1,15}} \right) \left(\frac{r + f_y / 250}{r + 1} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{c1} = 0,6 E \frac{s}{R} \quad (4)$$

V enačbah (3) in (4) je R polmer rezervoarja, f_y je napetost na meji plastičnega tečenja, s je debelina stene rezervoarja, kjer preverjamo odpornost na uklon, p je seštevek vseh pritiskov, ki delujejo na steno rezervoarja na tej višini, E je modul elastičnosti in $r = R/s/400$. Slika 13 prikazuje obravnavani prerez tik nad dnem rezervoarja, kjer kontroliramo uklon. Napetost zaradi prevrnilvenega momenta M izračunamo kot

$$\sigma = \frac{M}{W}, \quad W = \frac{I}{e}, \quad I = \frac{\pi}{64} (D_2^4 - D_1^4) \quad (4)$$



Slika 13 • Prerez rezervoarja tik nad dnem

V (3.4) je D_1 notranji (manjši) premer rezervoarja, D_2 je zunanji (večji) premer rezervoarja in $e = D_2/2$. V preglednici 3 podajamo rezultate. Primerjamo kritično uklonsko napetost σ_m z napetostjo σ za različne pospeške tal. Iz preglednice 3 se vidi, da formula (3) napove plastični uklon stene pri vodoravnem pospešku tal $a_h \approx 0,19$ g, kar se lepo sklada z analizo po metodi končnih elementov, ki napove plastični uklon pri $a_h = 0,20$ g (glejte poglavje 3.2).

Vodoravni in navpični pospešek tal	σ_m (MPa)	σ (MPa)	σ/σ_m (-)
$a_h = 0,1$ g, $a_v = 0,09$ g	39,83	16,45	0,41
$a_h = 0,18$ g, $a_v = 0,162$ g	35,20	29,49	0,84
$a_h = 0,19$ g, $a_v = 0,171$ g	31,19	31,12	0,99
$a_h = 0,25$ g, $a_v = 0,225$ g	24,08	33,39	1,38

Preglednica 3 • Kontrola uklona stene rezervoarja pri različnih pospeških tal s pomočjo formule (3)

5 • SKLEP

V članku prikažemo dva načina kontrole plastičnega uklona stene na dnu cilindra zaradi potresa pri jeklenih rezervoarjih. Takšen uklon je najbolj pogosta oblika poškodbe jeklenega (nesidranega) cilindričnega rezervoarja med potresom ((Rammerstorfer, 1990),

(Rammerstorfer, 1991), (Structural safety of industrial steel tanks, 2013)). Prvi način temelji na precej kompleksni nelinearni analizi z metodo končnih elementov, ki vključuje geometrijsko in materialno nelinearnost ter trenjski kontakt med dnom rezervoarja in

temeljem. Drugi način pa temelji na enostavni membranski teoriji lupin in empirični formuli za kritično uklonsko napetost. Izkaže se, da za obravnavani rezervoar (Baumgartner, 2011) oba načina napovesta praktično enako vrednost vodoravnega pospeška tal, pri katerem bo nastal plastični uklon dna cilindra rezervoarja. Seveda pa dobimo s prvim načinom analize informacije, kakšno stanje rezervoarja lahko pričakujemo pri določeni velikosti potresa.

6 • LITERATURA

- Abaqus Manuals, Providence, Dassault Systems, 2011.
- Baltay, P., Gjelsvik, A., Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress, American Society for Civil Engineers, 1990.
- Baumgartner, M., Projektiranje jeklenega cilindričnega rezervoarja, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2011.
- EN 10025-3, Vroče valjani izdelki iz konstrukcijskih jekel – 3. del: Tehnični dobavni pogoji za normalizirana/normalizirana valjana variva drobnozrnata konstrukcijska jekla, 2004.
- EN 1998-1, Evrokod 8: Projektiranje potresno odpornih konstrukcij, 1. del: Splošna pravila, potresni vplivi in pravila za stavbe, 2006.
- EN 1998-4, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 4: Silos, tanks and pipelines-osnutek, 2006.
- EU, Structural safety of industrial steel tanks, pressure vessels and piping systems under seismic loading, Luksemburg, Publication office of European Union, 2013.
- Klemenčič, T., Potresna analiza jeklenih cilindričnih rezervoarjev, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2016.
- Rammerstorfer, F. G., Scharf, K., Fisher, F. D., Earthquake Resistant Design of Anchored and Unanchored Liquid Storage Tanks Under Three-Dimensional Earthquake Excitation, v: Schüller, G. I. (ur.), Structural Dynamics: Recent Advances, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag: str. 317–371, 1991.
- Rammerstorfer, F. G., Scharf, K., Fisher, F. D., Storage tanks under earthquake loading, Applied Mechanical Review 43: 261–282, 1990.
- Veletsos, A. S., Tang, Y., Dynamics of Vertically Excited Liquid Storage Tanks. Journal of Structural Engineering: 1228–1246, 1986.