

8. Proiectarea antiseismică a podurilor

8.1. Principii de proiectare

Podurile sunt structuri ingineresti destinate traversării unor obstacole de către o cale de comunicație terestră. Din punct de vedere structural, un pod se compune din suprastructură și infrastructură (vezi Figura 8.1). Suprastructura (tablierul) este partea superioară a podului care preia încărcările din trafic. Infrastructura servește la transmiterea eforturilor de la suprastructură către teren și este alcătuită din pile (reazeme intermediare) și culee (reazeme de capăt). Legătura dintre infrastructură și suprastructură poate fi de tip încastrat, articulat, sau simplu rezemat. Deseori sunt necesare reazeme simplu rezemate și rosturi de dilatație pentru a limita eforturile provenite din variații de temperatură.

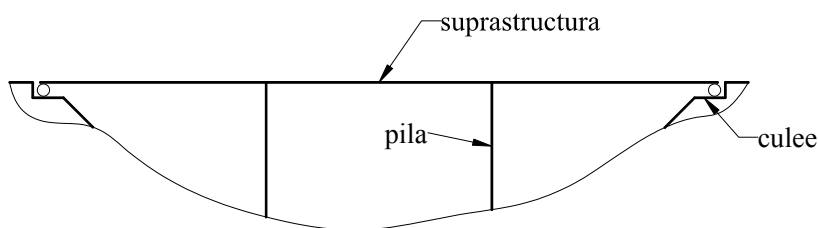


Figura 8.1. Elementele principale ale structurii unui pod.

Importanța prevenirii colapsului podurilor în urma unor cutremure de pământ are la bază câteva motive. Primul dintre acestea este același cu cerința impusă clădirilor în general: prevenirea pierderilor de vieți omenești. Cel de-al doilea constă în faptul că în foarte multe cazuri podurile reprezintă legături vitale în rețeaua de transport. În lipsa unor căi de comunicație alternative, distrugerea unui pod poate întrerupe traficul, făcând imposibile activitățile echipelor de intervenție în situații de urgență. În fine, întreruperea traficului pe un termen mai lung după un cutremur, poate avea efecte economice nefavorabile. De aceea, cerința fundamentală a normelor de proiectare antiseismică este aceea de a asigura comunicațiile de urgență în urma unui eveniment seismic de calcul (Eurocode 8-2, 2003).

Ca și în cazul structurilor pentru clădiri, podurile pot fi proiectate conform principiului de comportare disipativă sau comportare slab-disipativă. Podurile **slab-disipative** sunt cele care au o **ductilitate limitată** (termen folosit de Eurocode 8-2, 2003). Prin proiectare **nu** se asigură cerințe speciale care să asigure o ductilitate superioară structurii. Încărcările seismice sunt determinate pe baza unor factori de comportare $q \leq 1.5$. În cazul podurilor răspunsul cărora este dominat de modurile superioare de vibrație (de exemplu podurile suspendate), sau atunci când structura are un comportament fragil (datorită unor forțe axiale sau tăietoare mari), este recomandată asigurarea unui comportament elastic al structurii sub efectul acțiunii seismice de calcul. În acest sens, se utilizează un factor de comportare $q=1$.

Podurile **disipative** (sau **ductile** în terminologia Eurocode 8-2, 2003) sunt proiectate astfel ca să aibă un comportament ductil sub efectul acțiunii seismice de calcul, disipând energia seismică prin incursiuni în domeniul inelastic. Din această cauză, forțele seismice sunt reduse față de cele corespunzătoare unui răspuns elastic, folosind valori supraunitare ale factorului de comportare q .

Alegerea abordării de proiectare (disipativă sau slab-disipativă) este la latitudinea proiectantului, rațiunile principale fiind cele de natură economică. În general, în zonele de seismicitate medie și ridicată (cu valoarea de calcul a accelerației de vârf a terenului $a_g > 0.1g$), proiectare pe baza principiului de comportare disipativă este mai economică. Principiul de proiectare disipativă sau slab-disipativă a podurilor este identic cu cel aplicat și altor tipuri de structuri. Pentru detalii suplimentare vezi capitolele 6.1 și 7.1.

Cerința fundamentală de proiectare la starea limită ultimă (SLU) este aceea de asigurare a integrității structurale (podul trebuie să-și păstreze capacitatea portantă), chiar dacă unele elemente pot suferi avarii considerabile (Eurocode 8-2, 2003). La starea limită de serviciu (SLS) structura poate suferi doar avarii minore, astfel ca traficul să nu fie perturbat.

8.2. **Calculul structural la acțiunea seismică**

În cele mai multe cazuri analiza structurală a structurilor pentru poduri poate fi realizată pe două modele plane: unul pe direcția longitudinală și altul pe direcția transversală. Metoda uzuală de calcul a structurilor pentru poduri la acțiunea seismică este un calcul **elastic** folosind metoda de calcul **modal cu spectre de răspuns** (vezi capitolul 5.3.2). În cazul în care răspunsul structurii este guvernat de un singur mod propriu de vibrație, se pot folosi metode simplificate de calcul, după principiul forțelor laterale din capitolul 5.3.1 aplicabile pentru structuri multietajate. Eurocode 8-2, 2003 folosește denumirea de **metoda modului fundamental** pentru acest tip de analiză. Răspunsul seismic al unui pod este guvernat de un singur mod de vibrație atunci când masa pilelor poate fi neglijată în comparație cu masa tablierului ($\leq 20\%$) și atunci când structura podului este regulată în plan orizontal (excentricitatea dintre centrul de masă și cel de rigiditate este mai mică decât 5% din lungimea tablierului).

Pentru metoda de calcul modal cu spectre de răspuns, acțiunea seismică este definită prin spectre de răspuns (vezi capitolul 5.2): două componente orizontale și una verticală. Componenta verticală poate fi în general neglijată, în special în zonele de seismicitate redusă. Totuși **componenta verticală** a mișcării seismice trebuie considerată în următoarele cazuri (Eurocode 8-2, 2003):

- în cazul tablierelor realizate din beton precomprimat
- pentru analiza efectelor asupra reazemelor și rosturilor
- atunci când obiectivul proiectat se află în proximitatea unei falii active (componenta verticală a mișcării seismice este importantă în apropierea zonei epicentrale, vezi capitolul 3.7.2)

Majoritatea structurilor au dimensiuni în plan relativ mici în comparație cu lungimea de undă a mișcării seismice, astfel încât acțiunea seismică poate fi considerată aceeași pentru întreaga fundație a clădirii. La structurile cu deschideri mari, cum sunt podurile, atunci când dimensiunea în plan este comparabilă cu lungimea de undelor seismice, punctele în care acționează mișcarea seismică (prinderea în fundații a pilelor) pot înregistra mișcări diferite. La limită, pilele unui pod înregistrează mișcări în contrasens, inducând deformații și eforturi suplimentare în structură. Mișcarea diferențiată a punctelor de rezemare a structurii se numește **variabilitate spațială a acțiunii seismice**. Acest fenomen poate fi important la structurile cu deschideri mari condițiile geologice și topografice accentuează acest fenomen. Conform Eurocode 8-2 (2003), variabilitatea spațială a mișcării seismice trebuie considerată la determinarea răspunsului seismic al structurilor pentru poduri în următoarele cazuri:

- atunci când există discontinuități geologice (de exemplu un teren slab situat direct peste rocă)
- atunci când terenul are o topografie variată
- dacă lungimea podului depășește 600 metri

8.3. **Ductilitatea și conformarea seismică a structurilor pentru poduri**

Podurile pot fi realizate din diverse materiale de construcție, iar principiile de asigurare a ductilității la nivel de material, secțiune și element sunt aceleași cu cele descrise în capitolul 6 (pentru structurile metalice) și capitolul 7 (pentru structurile din beton armat).

Aspectele specifice podurilor sunt cele de asigurare a ductilității la nivel de structură. La structurile pentru poduri, **zonele disipative** sunt amplasate în pile, de obicei la baza acestora. Aceste zone care sunt supuse unor deformații inelastice importante trebuie proiectate și detaliate astfel ca să dezvolte o ductilitate cât mai bună. Cerințele specifice sunt cele discutate în capitolele 6 și 7. În cazul structurilor din beton armat sunt esențiale armarea zonelor disipative care să asigure o confinare adecvată a betonului, prevenirea cedării din forță tăietoare și dispunerea înădărilor în afara zonelor disipative. În Figura 8.2a este prezentat un exemplu de avariere datorită armării insuficiente a zonei disipative de la baza unei pile din b.a., iar în Figura 8.2b o cedare fragilă din forță tăietoare. În cazul structurilor metalice, cerințele fundamentale de asigurarea a unui comportament ductil în zonele disipative le reprezintă prevenirea flambajului la nivel de element și voalarea secțiunii.

Tablierul trebuie proiectat astfel ca să rămână în domeniul elastic. Sunt permise avarii minore la elementele secundare, cum ar fi rosturile de dilatație, parapete, etc. Astfel, suprastructura (tablierul, reazemele, rosturile de dilatație) reprezintă elemente **nedisipative**. O cerință importantă este ca tablierul să nu se deplaseze de pe reazeme în urma deformațiilor suferite în timpul acțiunii

seismice. Un exemplu de cedare a unui pod din cauza incapacității aparatelor de reazem de a prelua deformațiile excesive induse de cutremur este cazul podului Showa avariat grav în timpul cutremurului din 1964 din Niigata, Japonia (vezi Figura 8.4a).

Comportamentul elastic al **elementelor nedisipative** (tablier, reazeme) se asigură pe baza principiilor de proiectare bazată pe capacitate (vezi capitolul 6.1.2). Astfel, forțele de calcul asupra elementelor nedisipative trebuie să corespundă echilibrului de forțe la formarea mecanismului plastic, în care eforturile din articulații plastice țin cont de suprarezistența acestora (din cauza consolidării și a rezistenței reale mai mare decât cea caracteristică).

În cazul structurilor disipative, o ductilitate de ansamblu superioară se obține atunci când articulațiile plastice se formează simultan în cât mai multe pile. Există multe cazuri când configurația terenului poate conduce la pile cu rigidități foarte diferite (vezi Figura 8.3). Atunci când tablierul este continuu, pilele cu rigiditatea mai mare vor atrage forțe seismice mai mari, ceea ce conduce la o solicitare neuniformă a acestora și la cedarea lor prematură. De aceea, pilele trebuie să aibă pe cât posibil o **distribuție cât mai uniformă a rigidității și rezistenței**. Atunci când nu este posibilă asigurarea unei rigidități uniforme, o soluție posibilă este dispunerea unor rezeme de alunecare sau din elastomeri între suprastructură și pilele cu rigiditate mare, care să elimine sau să limiteze transmiterea forțelor de inerție de la suprastructură la pile.



Figura 8.2. Avariarea unei pile de la viaductul Hanshin în timpul cutremurului din 1995 din Kobe, Japonia (a) și cedarea din forță tăietoare la pilele unui viaduct la cutremurul San Fernando, SUA, din 1971 (b), Moehle și Eberhard, 2000.

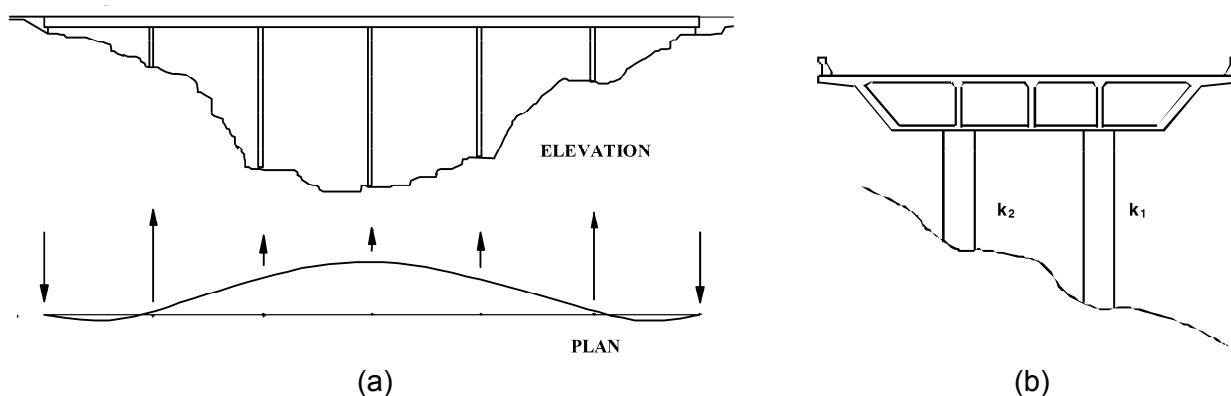


Figura 8.3. Exemple de poduri cu distribuții nefavorabile ale rigidității între pile în plan longitudinal (a) Eurocode8-2, 2003, și în plan transversal (b) Duan și Chen, 2003.

La **podurile oblice** axa longitudinală a tablierului nu este perpendiculară pe elementele infrastructurii (pile și culee). Tablierul acestor poduri au tendința să se rotească în plan vertical, conducând la deplasarea de pe reazeme a tablierului. Din acest motiv podurile oblice și cele curbe nu sunt recomandate în zone seismice. Eurocode 8-2, 2003 recomandă evitarea podurilor cu un unghi oblic mai mare de 45° în zonele de seismicitate ridicată. În Figura 8.4b este prezentată colapsul unui viaduct oblic ca urmare a deplasării tablierului la rosturile de dilatație.



(a)



(b)

Figura 8.4. Cedarea podului Showa în timpul cutremurului din 1964 din Niigata, Japonia datorită deplasării de pe reazeme (a) - <http://cee.uiuc.edu/sst/education/liquefaction/SHOWA.html> și cedarea viaductului Gavin Canyon la cutremurul din 1994 din Northridge, SUA (b) - http://www.its.dot.gov/JPODOCS/REPTS_TE/13775.html

În general, **structurile continue** au o comportare seismică mai bună decât cele care au un număr mare de reazeme mobile și rosturi de dilatație. Acestea din urmă sunt însă necesare pentru a limita eforturile din variații de temperatură.

8.4. Tipuri de structuri și factori de comportare

Ca și în cazul structurilor pentru clădiri, metoda standard de analiză în cazul structurilor pentru poduri este metoda de calcul modal cu spectre de răspuns (un calcul elastic). În cazul proiectării pe baza principiului de comportare disipativă a structurii, capacitatea structurii de a se deforma în domeniul inelastic (cu degradarea elementelor structurale, dar fără a ajunge la colaps) este reflectată prin factorii de comportare q . Valoarea de referință a factorilor de comportare q pentru diferite tipuri de structuri este prezentată în Tabelul 8.1.

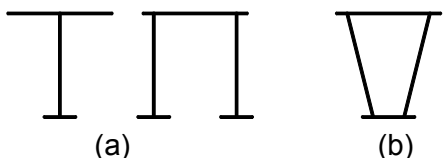
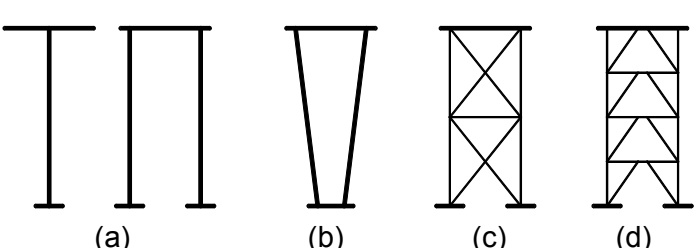

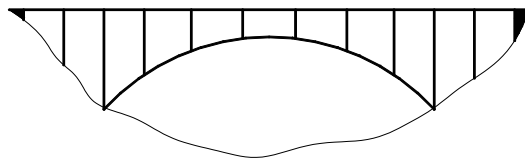
Valorile factorilor de comportare q din Tabelul 8.1 reflectă ductilitatea diferitelor tipuri de elemente disipative (a tipului de structură), a diferitelor materiale folosite și a principiului de proiectare folosit. Astfel, structurile bazate pe un comportament disipativ sunt caracterizate de factori de comportare mai ridicați. La structurile din b.a., forța tăietoare reprezintă un mod de solicitare fragil. Cu cât lungimea unei pile raportată la înălțimea secțiunii (raportul $\alpha_s=L/h$) este mai mică, cu atât forța tăietoare corespunzătoare formării articulației plastice la baza pilei va fi mai mare. De aceea, factorul de comportare q are valori reduse în cazul pilelor cu un raport L/h redus, atunci când elementul structural este susceptibil la cedare din forță tăietoare.

În cazul structurilor metalice se poate observa că structurile necontravântuite și cele contravântuite excentric sunt cele mai ductile, iar cele contravântuite centric – cele mai puțin ductile. Această observație reflectă faptul că la structurile metalice, deformațiile inelastice de încovoiere și de forfecare sunt foarte ductile, în comparație cu cele de întindere (vezi capitolul 6).

La structurile de poduri la care suprastructura este prinsă rigid de culee, rezultă o structură cu rigiditatea foarte mare în plan orizontal. Structurile care sunt foarte rigide oscilează solidar cu

terenul de fundare, rezultând deplasări relative apropiate de zero și accelerații ale structurii apropiate de accelerația terenului. Aceste structuri nu înregistrează amplificări importante ale mișcării seismice de către structură și pot fi proiectate pe baza unor factori de comportare $q=1$ (în cazul structurilor foarte rigide - $T \leq 0.03$ s) sau $q=1.5$ (în cazul structurilor mai puțin rigide - $T > 0.03$ s).

Tabelul 8.1. Valoarea de referință a factorului de comportare q (după Eurocode 8-2, 2003).

| Tipul elementului ductil | Comportament | |
|--|---|---|
| | slab-disipativ | disipativ |
| <p>Pile din beton armat:</p> <p>Pile verticale supuse la încovoiere (a)</p> <p>Pile înclinate supuse la încovoiere (b)</p>  | <p>1.5</p> <p>1.2</p> | <p>$3.5\lambda(\alpha_s)$</p> <p>$2.1\lambda(\alpha_s)$</p> |
| <p>Pile metalice:</p> <p>Pile verticale necontravântuite [supuse la încovoiere] – (a)</p> <p>Pile înclinate necontravântuite [supuse la încovoiere] – (b)</p> <p>Cadre contravântuite centric – (c)</p> <p>Cadre contravântuite excentric – (d)</p>  | <p>1.5</p> <p>1.2</p> <p>1.5</p> <p>-</p> | <p>3.5</p> <p>2.0</p> <p>2.5</p> <p>3.5</p> |
| <p>Culee prinse rigid de suprastructură:</p> <p>În general</p> <p>Structuri "fixe" (cu perioada proprie de vibrație în direcția orizontală $T \leq 0.03$ s)</p>  | <p>1.5</p> <p>1.0</p> | <p>1.5</p> <p>1.0</p> |
| <p>Arce</p>  | <p>1.2</p> | <p>2.0</p> |
| <p>$\alpha_s = L/h$, unde L este distanța de la articulația plastică până la punctul de moment zero, iar h este înălțimea secțiunii pe direcția de acțiune a momentului încovoiator din articulația plastică</p> <p>Pentru $\alpha_s \geq 3$ $\lambda(\alpha_s) = 1.0$</p> <p>Pentru $3 > \alpha_s \geq 1$ $\lambda(\alpha_s) = \sqrt{\alpha_s/3}$</p> | | |

Aceste valori reprezintă limita maximă a factorului de comportare care poate fi folosită în proiectare, atunci când structura îndeplinește toate condițiile care să-i asigure un comportament ductil. Printre situațiile care pot conduce la o ductilitate scăzută și care necesită reducerea factorilor de comportare se numără următoarele (Eurocode 8-2, 2003):

- Structuri cu un **comportament seismic neregulat**. Solicitarea neuniformă a elementelor disipative conduce la concentrarea a deformațiilor inelastice în câteva elemente structurale (pile), ducând la o ductilitate redusă la nivelul întregii structuri și la o capacitate redusă de disipare a energiei seismice.
- În cazul structurilor din b.a., valori ridicate ale **forței axiale de compresiune** pot reduce ductilitatea articulațiilor plastice de încovoiere. Valorile factorului de comportare din Tabelul 8.1 sunt valabile pentru forțe axiale din gruparea seismică de încărcări care nu depășesc 30% din rezistența secțiunii la forță axială. Pentru forțe axiale care depășesc 30% din rezistența secțiunii la forță axială, este necesară folosirea unui factor de comportare redus. În cazurile în care forța axială de calcul depășește 60% din rezistența secțiunii la forță axială, nu se poate conta pe un comportament disipativ al structurii, încărcarea seismică fiind determinată pe baza unui factor de comportare $q=1$.

Proiectarea pe baza conceptului de comportare disipativă implică acceptarea unor degradări în elementele disipative în urma acțiunii seismice de calcul. Eventualele degradări ale elementelor de rezistență trebuie să poată fi inspectate și remediate. De aceea, **zonele disipative trebuie să fie accesibile**. Atunci când acestea nu sunt accesibile pentru inspecție și lucrări de remediere (de exemplu baza pilelor aflate în apă de adâncime mare) este necesară utilizarea unor factori de comportare reduși față de valorile de referință. Proiectare pe baza unor factori de comportare reduși va implica o cerință de ductilitate redusă, adică degradări mai reduse ale elementelor disipative. Eurocode 8-2 (2003) recomandă multiplicarea valorilor de referință a factorului de comportare q cu 0.6 atunci când zonele disipative nu sunt accesibile.