

3. Răspunsul seismic al sistemelor SGLD

3.1. Mișcarea seismică

Reprezentarea cea mai uzuală a mișcării seismice în aplicațiile ingineresti folosește variația în timp a accelerației terenului $\ddot{u}_g(t)$ și se numește accelerogramă. Dacă se cunosc proprietățile unui sistem SGLD (masa m , rigiditatea k și coeficientul de amortizare c), precum și cele ale mișcării seismice (înregistrarea accelerației terenului $\ddot{u}_g(t)$), se poate determina deplasarea relativă $u(t)$, viteza relativă $\dot{u}(t)$ și accelerația relativă $\ddot{u}(t)$ a sistemului SGLD, rezolvând ecuația de mișcare:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (3.1)$$

Înregistrarea mișcării seismice se face cu ajutorul accelerometrelor, fiecare înregistrare conținând trei componente (două orizontale și una verticală). În cele mai multe cazuri mișcarea seismică înregistrată cu ajutorul accelerometrelor se presupune a fi independentă de răspunsul structurii. Această presupunere este valabilă numai pentru terenuri rigide. În cazul unor terenuri flexibile, mișcarea seismică poate fi afectată de interacțiunea teren-structură. Din același motiv (eliminarea influenței structurii asupra mișcării seismice), accelerometrele folosite pentru înregistrarea și caracterizarea mișcării seismice trebuie să fie amplasate în câmp liber, la o distanță rezonabilă de construcții existente.

În Figura 3.1 sunt prezentate câteva accelerograme ale unor evenimente seismice, la aceeași scară a timpului și accelerației. Se pot observa diferențe semnificative ale amplitudinii, duratei, și ale aspectului general a accelerogramelor.

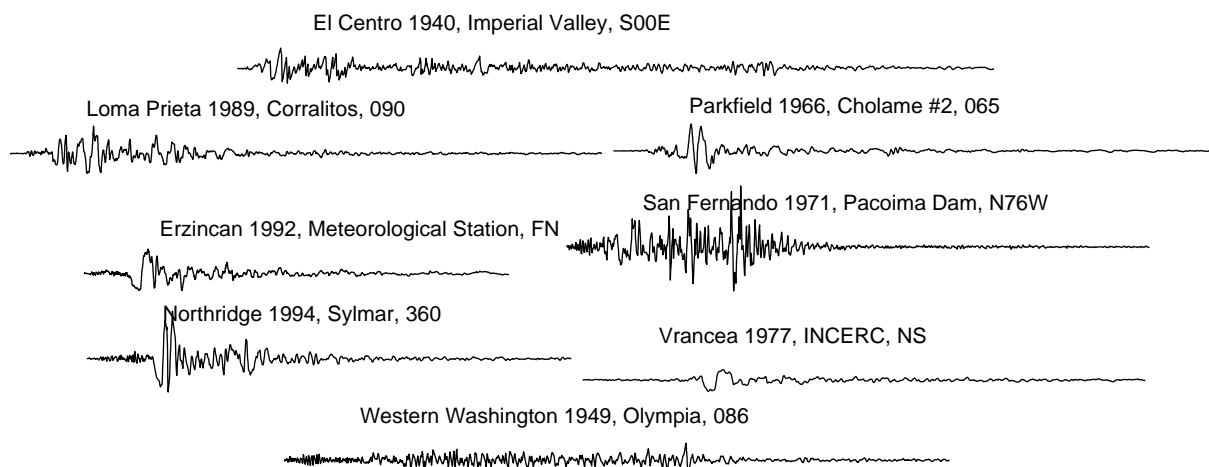


Figura 3.1. Accelerogramele câtorva cutremure, după Chopra, 2001.

Accelerogramele sunt definite de valori numerice înregistrate a intervale de timp discrete. În cele mai multe cazuri acest interval este de 0.02 sau 0.01 secunde.

În Figura 3.2 este prezentată accelerograma componentei nord-sud a înregistrării seismice de la El Centro, California, obținută în timpul cutremurului Imperial Valley din 18 mai 1940. Variația în timp a vitezei și deplasării terenului au fost obținute prin integrarea accelerației.

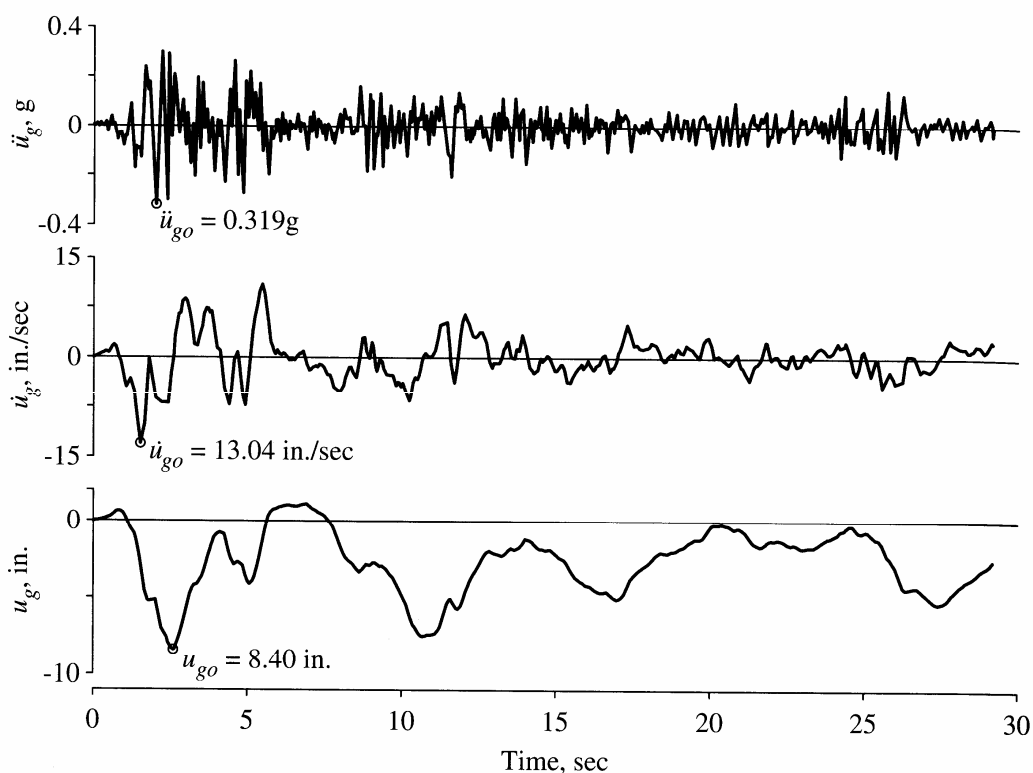


Figura 3.2. Componenta nord-sud a înregistrării seismice de la El Centro, California, obținută în timpul cutremurului Imperial Valley din 18 mai 1940 (Chopra, 2001).

3.2. Determinarea răspunsului seismic

Împărțind ecuația (3.1) cu m se obține:

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = -\ddot{u}_g \quad (3.2)$$

De aici reiese că deplasarea unui sistem SGLD sub acțiunea mișcării seismice depinde doar de pulsația proprie e vibrație ω_n (sau de perioada proprie de vibrație T_n) și de fracțiunea din amortizarea critică ζ , și se poate scrie $u \equiv u(t, T_n, \zeta)$. Astfel, orice două sisteme SGLD cu aceleași valori T_n și ζ vor avea același răspuns în deplasare, chiar dacă acestea au mase și rigidități diferite.

Deoarece înregistrările seismice sunt definite la intervale de timp discrete și sunt foarte neregulate, acestea nu pot fi exprimate analitic. De aceea, rezolvarea ecuației de mișcare se face prin metode numerice (metoda diferențelor centrale, metoda Newmark, etc.)

În Figura 3.3a este prezentat răspunsul în deplasare a trei sisteme SGLD având aceiași amortizare dar perioade proprii de vibrație diferite, sub acțiunea mișcării El Centro. Se poate observa că timpul necesar efectuării unei oscilații complete este apropiat de perioada proprie de vibrație T_n . Acest fenomen este adevărat doar în cazul mișcărilor seismice cu o bandă largă de frecvențe. Din aceeași figură se poate observa creșterea deplasării de vârf odată cu creșterea perioadei proprii de vibrație.

În Figura 3.3b este prezentat răspunsul în deplasare a trei sisteme SGLD având aceeași perioadă proprie de vibrație, dar amortizări diferite, sub acțiunea aceleiași înregistrări seismice. Deoarece cele trei sisteme au aceeași perioadă proprie de vibrație, alura deformațiilor este similară de la un sistem la altul, valorile de vârf înregistrându-se la aproximativ același perioade de timp. Pe de altă parte, valorile mai mari ale amortizării conduc la reducerea deformațiilor.

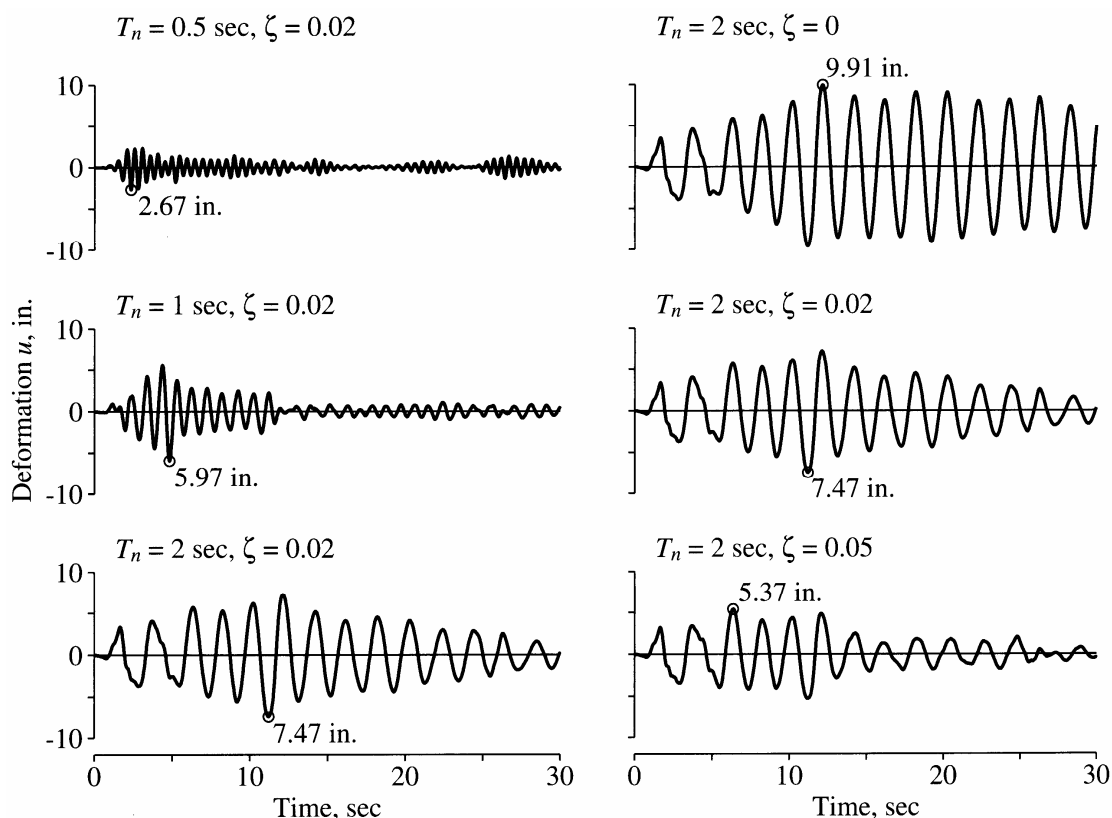


Figura 3.3. Răspunsul în deplasare a unor sisteme SGLD sub acțiunea mișcării El Centro.

3.3. Spectre elastice de răspuns

Noțiunea de spectru de răspuns a fost introdusă în 1932 de către M. A. Biot, aceasta fiind în zile noastre un concept central în ingineria seismică. Spectrele de răspuns reprezintă o metodă convenabilă de sintetizare a răspunsului seismic al unor sisteme SGLD sub acțiunea unei înregistrări seismice date.

Un **spectru de răspuns** este reprezentarea valorii de vârf a răspunsului seismic (în termeni de deplasare, viteză, accelerație, etc.) al unui sistem SGLD funcție de perioada proprie de vibrație T_n (fie pulsația sau frecvența de vibrație proprie), pentru o valoare fixă a fracțiunii de amortizare critică ζ . În domeniul construcțiilor spectrele sunt construite în general folosind perioada proprie de vibrație ca și abscisă, aceasta având o semnificație intuitivă.

Spectrele elastice de răspuns se bazează sisteme SGLD elastice. Matematic, spectrele de răspuns elastice al deplasării, vitezei relative și accelerației totale se pot exprima, respectiv, prin:

$$u_0(T_n, \zeta) = \max_t |u(t, T_n, \zeta)| \quad (3.3)$$

$$\dot{u}_0(T_n, \zeta) = \max_t |\dot{u}(t, T_n, \zeta)| \quad (3.4)$$

$$\ddot{u}_0(T_n, \zeta) = \max_t |\ddot{u}(t, T_n, \zeta)| \quad (3.5)$$

3.3.1. Spectru elastic de răspuns al deplasării

În Figura 3.4 este ilustrat modul de construire a unui spectru de răspuns al deplasării pentru înregistrarea seismică El Centro (Figura 3.4a). Deplasarea unor sisteme SGLD elastice sub acțiunea acestei mișcări seismice este prezentată în Figura 3.4b. Pentru fiecare sistem, se determină răspunsul de vârf al deplasării $D \equiv u_0$, care este reprezentat funcție de perioada proprie de vibrație corespunzătoare în Figura 3.4c pentru a obține spectrul de răspuns al deplasării.

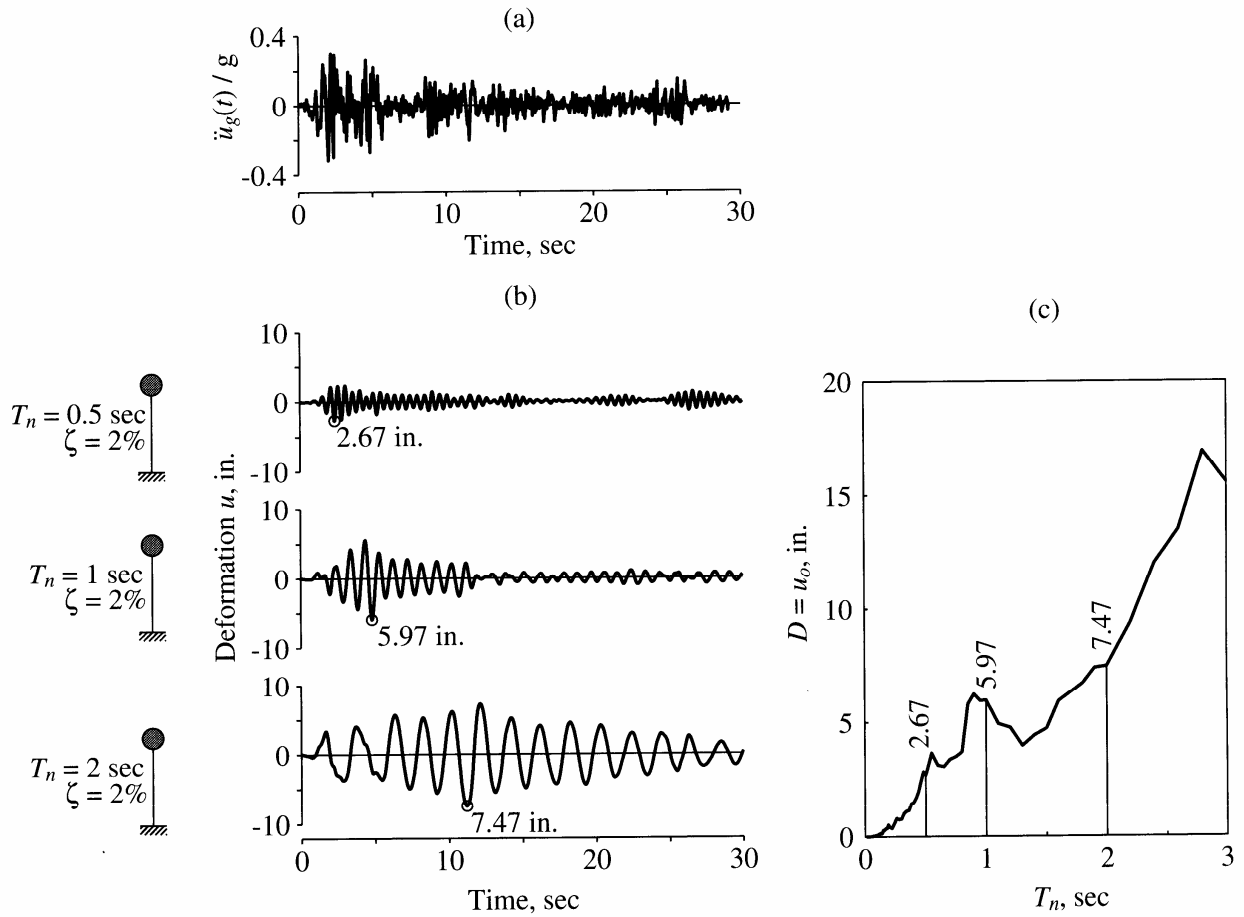


Figura 3.4. Ilustrarea construirii unui spectru de răspsund al deplasării: înregistrarea seismică (a), deplasarea unor sisteme SGLD cu T_n diferite (b) și spectru de răspsund pentru deplasare (c), Chopra, 2001.

Spectrul de deplasare este foarte important, deoarece pe baza deformațiilor unui sistem SGLD se pot determina eforturile induse în structură (vezi capitolul 2.1.6).

3.3.2. Spectru elastic de răspsund al pseudo-vitezei

Pseudo-viteza relativă spectrală, sau, mai simplu, **pseudo-viteza spectrală** este notată cu V și este dată de expresia:

$$V = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.6)$$

unde T_n reprezintă perioada proprie de vibrație a unui sistem SGLD, iar D este deplasarea spectrală a acestuia.

Pseudo-viteza V are unități de viteză, dar are prefixul "pseudo" pentru că nu este egală cu viteza relativă maximă \dot{u}_0 a sistemului SGLD. Pseudo-viteza V este în relație directă cu energia de deformație de vârf E_{S0} , prin relația:

$$E_{S0} = \frac{mV^2}{2} \quad (3.7)$$

Această relație se poate obține pe baza definiției energiei de deformație și a relației (3.6):

$$E_{S0} = \frac{ku_0^2}{2} = \frac{kD^2}{2} = \frac{k(V/\omega_n)^2}{2} = \frac{mV^2}{2}$$

Spectrul de pseudo-viteză se poate obține direct din spectrul de deplasare folosind relația (3.6). În Figura 3.5b este prezentat spectrul de pseudo-viteză pentru înregistrarea El Centro.

3.3.3. Spectru elastic de răspuns al pseudo-accelerației

Cunoscând deformația de vârf a unui sistem SGLD, eforturile de vârf pot fi determinate pe baza conceptului de forță statică echivalentă, discutate în capitolul 2.1.6:

$$f_{S0} = ku_0 \quad (3.8)$$

unde k este rigiditatea sistemului SGLD. Înlocuind k cu expresia $m\omega_n^2$ obținem:

$$f_{S0} = m\omega_n^2 u_0 = mA \quad (3.9)$$

unde

$$A = \omega_n^2 u_0 = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad (3.10)$$

Mărimea A se numește **pseudo-accelerația spectrală**, are unități de accelerație, dar este diferită de accelerația de vârf \ddot{u}_0' a sistemului SGLD. Spectrul de pseudo-accelerație se poate obține direct din spectrul de deplasare folosind relația (3.10). În Figura 3.5c este prezentat spectrul de pseudo-accelerație pentru înregistrarea El Centro.

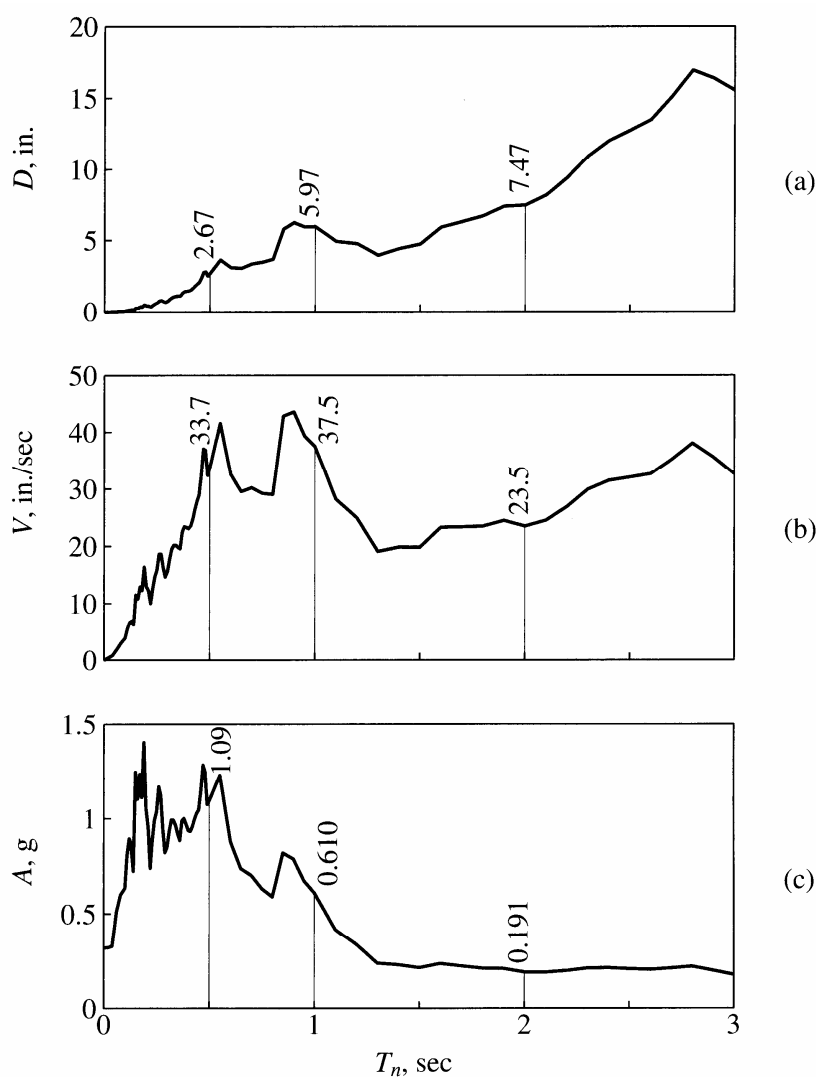


Figura 3.5. Spectre de răspuns pentru înregistrarea El Centro: spectrul de deplasare (a), spectrul de pseudo-viteză (b) și spectrul de pseudo-accelerație (c), Chopra, 2001.

3.3.4. Spectrul combinat D-V-A

Spectrele de deplasare, de pseudo-viteză și de pseudo-acelerație conțin aceeași informație, reprezentând trei modalități diferite de prezentare a aceleiași informații. Cunoscând unul din aceste spectre, celelalte două se pot determina direct pe baza ecuațiilor (3.6) și (3.10).

Cele trei spectre sunt utile însă pentru că fiecare are o semnificație fizică distinctă. Astfel, spectrul de deplasare indică deformația de vârf a sistemului SGLD, spectrul de pseudo-viteză este în relație cu energia de deformație de vârf a sistemului SGLD, iar pe baza spectrului de pseudo-acelerație se poate obține forța statică echivalentă care acționează asupra unui sistem SGLD suspus acțiunii seismice.

Ecuațiile (3.6) și (3.10) pot fi scrise sub următoarea formă:

$$\frac{A}{\omega_n} = V = \omega_n D \quad \text{sau} \quad \frac{T_n}{2\pi} A = V = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (3.11)$$

Luând logaritmul zecimal al relației $(T_n/2\pi)A = V$, aceasta poate fi scrisă sub forma $\lg T_n + \lg A - \lg 2\pi = \lg V$. Reprezentată la scară logaritmică (cu $\lg T_n$ pe abscisă și $\lg V$ pe ordonată), ecuația precedentă reprezintă o dreaptă înclinată la $+45^\circ$ pentru o valoare constantă $\lg A - \lg 2\pi$. În mod similar, ecuația $V = (T_n/2\pi)D$ reprezentată pe o scară logaritmică reprezintă o dreaptă înclinată la -45° pentru o valoare constantă $\lg D + \lg 2\pi$.

În Figura 3.6 este prezentat spectrul de răspuns D-V-A combinat pentru înregistrarea El Centro și o fracțiune din amortizarea critică $\zeta=2\%$. Această reprezentare mai este cunoscută sub denumirea de grafic tripartit și a fost dezvoltată în 1960 de către Veletsos și Newmark.

Dintr-un spectru de răspuns combinat D-V-A se pot determina pentru orice perioadă proprie de vibrație T_n a unui sistem SGLD: pseudo-viteza spectrală V (de pe scala verticală), deplasarea de vârf D (de pe scala înclinată la $+45^\circ$) și pseudo-acelerația spectrală A (scala înclinată la -45°). Spectrele de răspuns pot fi calculate și reprezentate pentru câteva valori ale fracțiunii din amortizarea critică, pentru a acoperi o gamă largă de structuri inginerești.

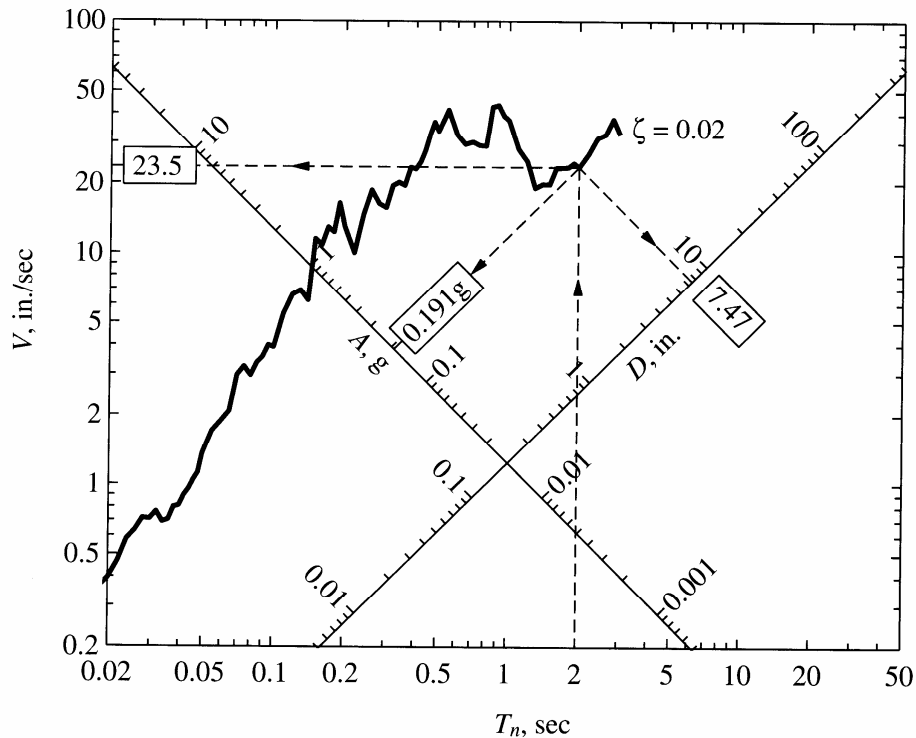


Figura 3.6. Spectrul de răspuns D-V-A combinat pentru înregistrarea El Centro, $\zeta=2\%$ (Chopra, 2001).

3.3.5. Spectre de viteză și accelerație

Spectrele elastice de răspuns al vitezei și accelerației se pot obține conform relațiilor (3.4) și (3.5). Există însă puține motive pentru studierea acestor spectre, deoarece deplasările și eforturile maxime din structură se pot determina fără aceste spectre.

În general spectrele de viteză și de pseudo-viteză sunt apropiate ca formă și alură, valorile celor două spectre fiind foarte apropiate pentru amortizări mici în domeniul de perioade medii.

Spectrele de accelerație și de pseudo-accelerație sunt identice în lisa amortizării ($\zeta=0$), dar diferă pentru valori ale amortizării diferite de zero. Diferența dintre cele două spectre crește cu amortizarea și este maximă în domeniul perioadelor lungi. Pseudo-accelerația este întotdeauna mai mică decât accelerația spectrală. Acest fapt se poate demonstra pe baza observației că produsul mA reprezintă forța elastică maximă dezvoltată în sistem sub efectul acțiunii seismice. Spre deosebire de aceasta $m\ddot{u}'_0$ reprezintă suma forței elastice și a celei de amortizare.

3.4. Caracteristicile spectrelor elastice de răspuns

În Figura 3.7 sunt prezentate spectre de răspuns pentru înregistrarea El Centro, normalizate la valorile de vârf ale deplasării terenului u_{g0} , vitezei terenului \dot{u}_{g0} și accelerației terenului \ddot{u}_{g0} . În Figura 3.8 este prezentat spectrul de răspuns normalizat pentru o fracțiune din amortizarea critică $\zeta=5\%$, împreună cu o idealizare a acestuia (reprezentată cu linie întreruptă). Vom discuta proprietățile spectrului de răspuns pentru diferite domenii ale perioadei proprii de vibrație, separate de valorile $T_a=0.035$ sec, $T_b=0.125$ sec, $T_c=0.5$ sec, $T_d=3.0$ sec, $T_e=10$ sec, $T_f=15$ sec.

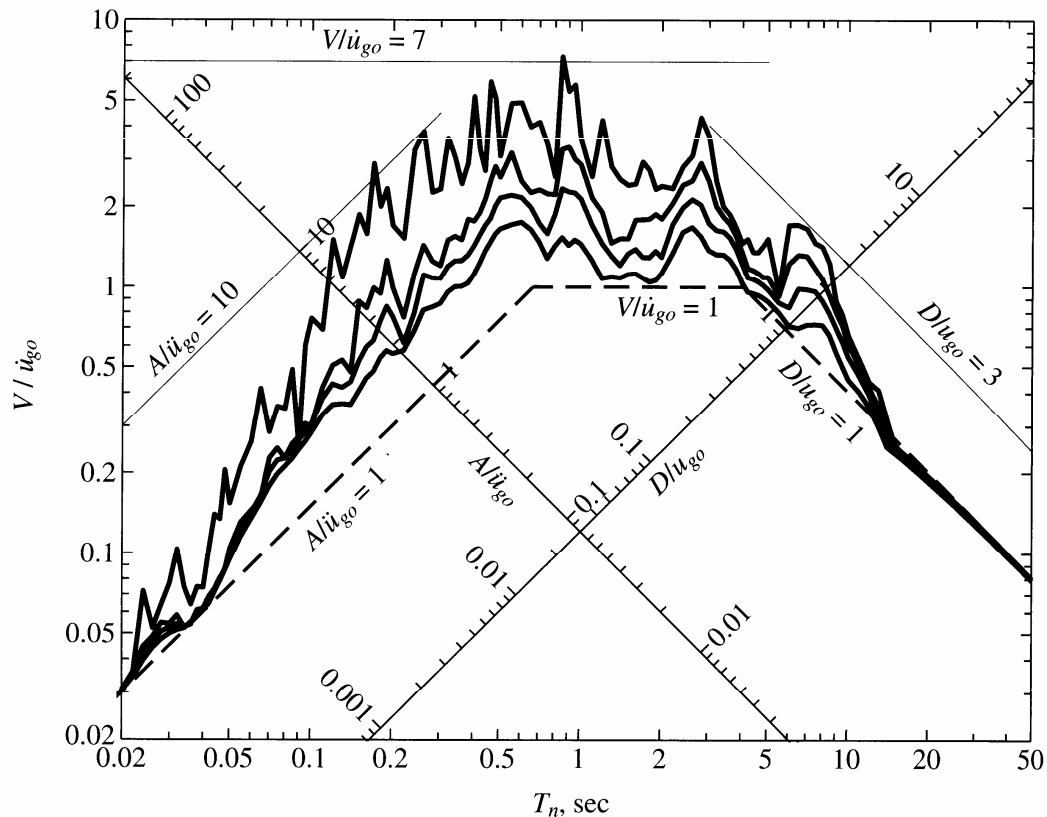


Figura 3.7. Spectre de răspuns normalizate pentru înregistrarea El Centro, pentru trei valori ale fracțiunii din amortizarea critică: $\zeta=0, 2, 5$ și 10% (Chopra, 2001).

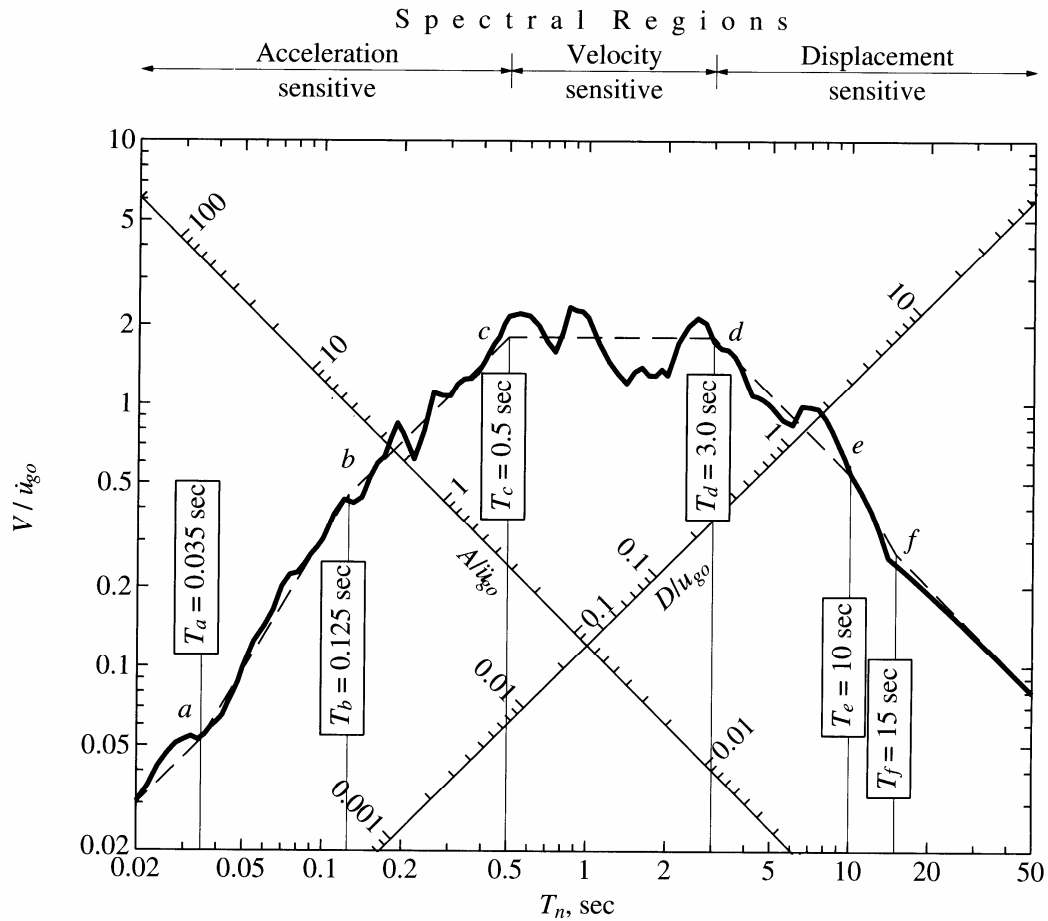


Figura 3.8. Spectru de răspuns normalizat pentru înregistrarea El Centro $\zeta=5\%$ (linie continuă) și reprezentarea idealizată (linie întreruptă), Chopra, 2001.

Pentru structuri cu perioada proprie de vibrație mică ($T_n < T_a$), valoarea de vârf a pseudo-accelerației A este apropiată de accelerația de vârf a terenului \ddot{u}_{g0} , iar deplasarea spectrală D este mică. Interpretarea fizică a acestui fenomen constă în faptul că un sistem cu perioada proprie de vibrație mică este foarte rigid, sistemul deformându-se foarte puțin, mișcarea acestuia fiind în esență identică cu mișcarea terenului (vezi Figura 3.9a). Astfel, accelerația totală de vârf a acestui sistem este apropiată de accelerația de vârf a terenului.

Pentru structuri cu perioada proprie de vibrație mare ($T_n > T_f$), valoarea de vârf a deplasării D este apropiată de deplasarea de vârf a terenului u_{g0} , iar pseudo-accelerația spectrală A este mică. Interpretarea fizică a acestui fenomen constă în faptul că un sistem cu perioada proprie de vibrație mare este foarte flexibil, terenul deplasându-se sub masa care rămâne fixă (vezi Figura 3.9b). Astfel, deformația de vârf a acestui sistem este apropiată de deplasarea de vârf a terenului.

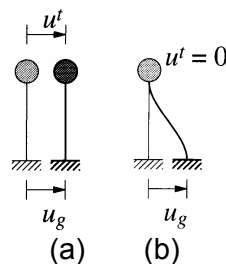


Figura 3.9. Deformația unui sistem foarte rigid (a) și a unui sistem foarte flexibil (b).

Pentru structuri cu perioada proprie de vibrație mică, cuprinse între T_a și T_c , pseudo-accelerația spectrală A depășește accelerația de vârf a terenului \ddot{u}_{g0} cu valori care depind de T_n și ζ . Pe porțiunea dintre T_b și T_c pseudo-accelerația spectrală A poate fi considerată constantă.

Pentru structuri cu perioada proprie de vibrație mare, cuprinse între T_d și T_f , deplasarea spectrală D depășește deplasarea de vârf a terenului u_{g0} cu valori care depind de T_n și ζ . Pe porțiunea dintre T_d și T_e deplasarea spectrală D poate fi considerată constantă.

Pentru structuri cu perioada proprie de vibrație intermediară, cuprinse între T_b și T_c , pseudo-viteza spectrală V depășește viteza de vârf a terenului \dot{u}_{g0} cu valori care depind de T_n și ζ și poate fi considerată constantă.

Pe baza observațiilor anterioare, spectrul de răspuns poate fi împărțit în trei domenii. Domeniul de perioade lungi ($T_n > T_d$) se numește **domeniul de deplasări spectrale constante**, răspunsul structurii în acest domeniu de perioade fiind în strânsă legătură cu deplasarea terenului. Domeniul de perioade scurte ($T_n < T_c$) se numește **domeniul de accelerație spectrală constantă**, răspunsul structurii în acest domeniu corelat cu accelerația terenului. Domeniul de perioade intermediare, ($T_c < T_n < T_d$) se numește **domeniul de viteză spectrală constantă**, răspunsul structurii în acest domeniu fiind cel mai bine corelat cu viteza terenului. Aceste observații sunt evidente în cazul reprezentării tripartite a spectrelor de răspuns, dar ar fi fost mai greu de evidențiat din reprezentarea individuală a celor trei spectre de răspuns (D, V, A).

Există mai multe metode de determinare a perioadelor $T_a, T_b, T_c, T_d, T_e, T_f$. De notat faptul că valorile acestor perioade care stabilesc domeniile de deplasare constantă, viteză constantă și accelerație constantă nu sunt unice, și pot varia considerabil de la o înregistrare seismică la alta. Același lucru este valabil și pentru factorii de amplificare a mișcării seismice $D/u_{g0}, V/\dot{u}_{g0}, A/\ddot{u}_{g0}$.

Amortizarea are ca efect reducerea deplasării, pseudo-vitezei și pseudo-accelerației spectrale (vezi Figura 3.7). Pentru o amortizare egală cu zero spectrul de răspuns este marcat de variații bruște pentru variații mici ale perioadei proprii de vibrație a structurii. Odată cu creșterea amortizării, răspunsul structurii este mult mai puțin sensibil la variația perioadei proprii de vibrație a structurii. Efectul amortizării este minim pentru $T_n \rightarrow 0$ și $T_n \rightarrow \infty$, dar este important pentru $T_b < T_n < T_d$, efectul maxim fiind observat în domeniul de viteză spectrală constantă.

3.5. Spectre elastice de proiectare

Spectrele de răspuns determinate pentru mișcări seismice care au avut loc în trecut nu sunt în general folosite pentru proiectarea construcțiilor. Acest fapt are la bază câteva aspecte. În primul rând, spectrul de răspuns al unei înregistrări individuale este extrem de accidentat, o variație mică a perioadei proprii de vibrație a structurii rezultând în valori foarte diferite ale pseudo-accelerației, și, în consecință, a forțelor seismice de calcul. În cel de-al doilea rând, Spectrele de răspuns înregistrate într-un amplasament dat variază considerabil de la un cutremur de pământ la altul, după cum se poate observa din Figura 3.10. Nu în ultimul rând, există multe teritorii pentru care nu sunt disponibile înregistrări seismice. De aceea, spectrele elastice de proiectare, pe baza cărora se determină forțele seismice care acționează asupra unei structuri, sunt alcătuite din linii drepte sau din curbe netede.

Spectrele elastice de proiectare trebuie să fie reprezentative pentru mișcările seismice înregistrate în amplasament în timpul unor evenimente seismice anterioare. În cazul în care nu există înregistrări seismice anterioare, se pot folosi înregistrări existente pentru alte amplasamente cu condiții similare. Factorii care trebuie considerați pentru a obține "condiții similare" includ magnitudinea cutremurului, distanța de la falie la amplasament, structura geologică traversată de undele seismice și condițiile locale ale terenului din amplasament.

Spectrul elastic de proiectare se bazează pe analiza statistică a unui set de n înregistrări seismice reprezentative pentru un amplasament dat. Înregistrarea i este notată cu $\ddot{u}_g^i(t)$, căreia îi corespund valorile de vârf ale deplasării, vitezei și accelerației terenului $u_{g0}^i, \dot{u}_{g0}^i, \ddot{u}_{g0}^i$. Fiecare accelerogramă este apoi normalizată la valoarea de vârf a accelerației terenului, pentru a avea

aceiași valoare de vârf a accelerației terenului (pot fi folosite și alte criterii de normalizare). După ce se calculează spectrele de răspuns pentru fiecare înregistrare seismică, pentru fiecare valoare a perioadei proprii de vibrație T_n vor exista n valori ale deplasării D^i , pseudo-vitezei V^i și pseudo-accelerației spectrale A^i ($i=1\dots n$). O astfel de interpretare a datelor pentru $n=10$ accelerograme este prezentată în Figura 3.11. Analiza statistică oferă valoarea medie și media plus o abatere standard pentru fiecare valoare a perioadei T_n . Spectrul obținut din valorile medii ale ordonatelor spectrale este mult mai neted decât spectrele individuale. Aceiași concluzie este valabilă și în cazul spectrului mediu plus o abatere standard. În consecință, idealizarea acestor spectre prin linii drepte este mult mai ușoară decât cea a unui singur individual.

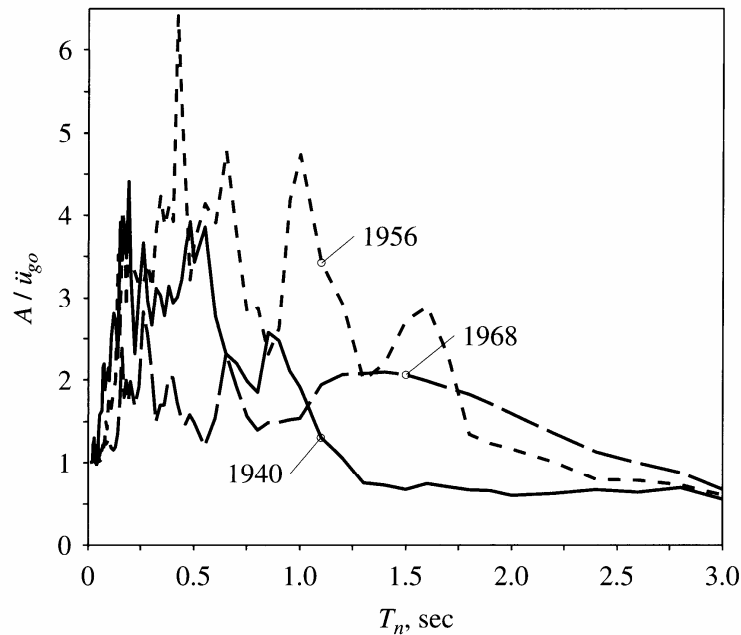


Figura 3.10. Spectre de răspuns normalizate ale pseudo-accelerației pentru evenimente seismice (18 mai 1940, 9 februarie 1956 și 8 aprilie 1968) înregistrate în același amplasament (El Centro); $\zeta=2\%$, Chopra, 2001.

Există proceduri prin care se pot determina valorile perioadelor caracteristice T_a , T_b , T_e și T_f , precum și a factorilor de amplificare dinamică pentru pseudo-accelerație $\alpha_A = A/\ddot{u}_{g0}$, pseudo-viteză $\alpha_V = V/\dot{u}_{g0}$ și deplasare $\alpha_D = D/u_{g0}$. Pentru setul de accelerograme înregistrate în California pe amplasamente cu teren rigid, Newmark și Hall au propus următoarele valori constante ale perioadelor caracteristice: $T_a=1/33$ sec, $T_b=1/8$ sec, $T_e=10$ sec, și $T_f=33$ sec. Perioadele T_c și T_d se pot determina din intersecția dreptelor de deplasare, pseudo-viteză și pseudo-accelerație constantă. Valorile factorilor de amplificare dinamică pentru spectrul mediu al aceluiași grup de înregistrări au fost: $\alpha_A = 2.12$, $\alpha_V = 1.65$, $\alpha_D = 1.39$ (vezi Tabelul 3.1).

Tabelul 3.1. Factori de amplificare dinamică pentru spectre elastice de proiectare (Chopra, 2001, pe baza Newmark și Hall, 1982).

amortizarea, ζ (%)	valori medii			valori medii plus o abatere standard		
	α_A	α_V	α_D	α_A	α_V	α_D
1	3.21	2.31	1.82	4.38	3.38	2.73
2	2.74	2.03	1.63	3.66	2.92	2.42
5	2.12	1.65	1.39	2.71	2.30	2.01
10	1.64	1.37	1.20	1.99	1.84	1.69
20	1.17	1.08	1.01	1.26	1.37	1.38

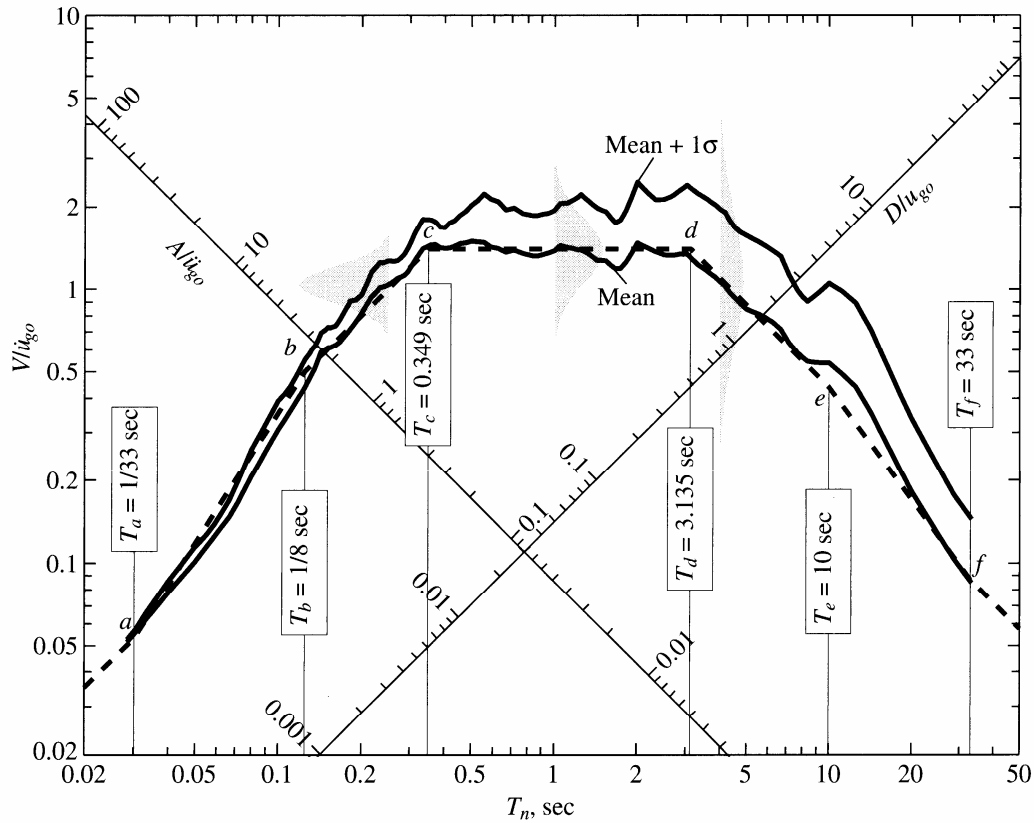


Figura 3.11. Media și media plus o abatere standard a spectrelor de răspuns, cu distribuțiile probabilistice pentru V la valori ale $T_n=0.25, 1.0, 4$ sec.; $\zeta=5\%$ (Chopra, 2001, pe baza Newmark și Hall, 1982).

Procedura de construire a unui spectru de proiectare tripartit este exemplificată în Figura 3.12 și constă din următorii pași:

- se reprezintă grafic cele trei linii punctate corespunzător valorilor de vârf ale accelerației terenului \ddot{u}_{g0} , vitezei terenului \dot{u}_{g0} și deplasării terenului u_{g0} .
- se obțin valorile factorilor de amplificare dinamică α_A , α_V , α_D din Tabelul 3.1 pentru amortizarea dată ζ
- se multiplică accelerația de vârf a terenului \ddot{u}_{g0} cu factorul de amplificare α_A pentru a obține linia b-c reprezentând domeniul de pseudo-accelerație spectrală constantă
- se multiplică viteza de vârf a terenului \dot{u}_{g0} cu factorul de amplificare α_V pentru a obține linia c-d reprezentând domeniul de pseudo-viteză spectrală constantă
- se multiplică deplasarea de vârf a terenului u_{g0} cu factorul de amplificare α_D pentru a obține linia d-e reprezentând domeniul de deplasare spectrală constantă
- se trasează liniile $A = \ddot{u}_{g0}$ pentru perioade mai mici de T_a și $D = u_{g0}$ pentru perioade mai mari de T_f
- se completează graficul cu liniile de tranziție a-b și e-f

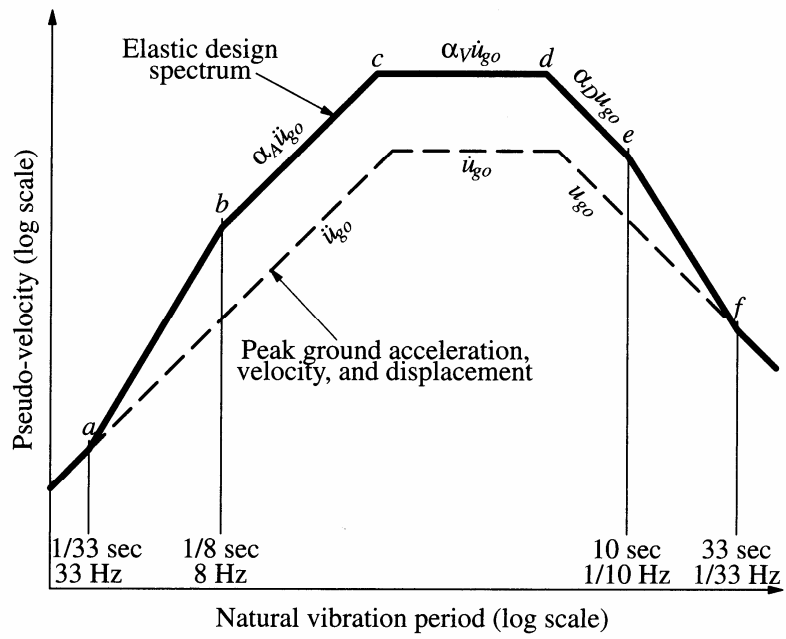


Figura 3.12. Construirea spectrului elastic de proiectare (Chopra, 2001).