Anexa nr. 9 la Contract nr. 21N

Contractor: INCD Fizica Pământului
Cod fiscal : 5495458 (anexa la procesul verbal de avizare interna nr.15/31.10.2016)

De acord,
DIRECTOR GENERAL

Dr.Ing. Constantin IONESCU

Avizat,
DIRECTOR DE PROGRAM

Prof. Gheorghe MĂRMUREANU

RAPORT DE ACTIVITATE AL FAZEI

Contractul nr.: 21N 11.03/2016
Proiectul: Seismologia neliniară în caracterizarea complexă a hazardului seismic local.

Faza: **I, Seismologia neliniară. Tipuri de pământuri și caracterul lor neliniar la solicitări dinamice (seismice). Moduri de testare. Legi constitutive la pământuri.**
Termen: 31.10.2016

1. Obiectivul proiectului:
- Calcularea caracteristicilor dinamice ale pământurilor și rolul lor împreună cu alți parametrii (seismologici, geologici, geofizici, etc.) în evaluarea amplasamentelor;
- Evaluarea comportării stratelor și masivelor de pământuri sub acțiuni dinamice (seismice).
- Cuantificarea influenței neliniarităților parametrilor pământurilor asupra datelor de hazard local;

2. Rezultate preconizate :

Reducerea riscului seismic, prin *reducerea pierderilor umane și materiale (atât la clădirile sociale sau industriale cât și la bunurile materiale din interiorul acestora)* în caz de cutremur major, adoptarea unui grad superior de siguranță în proiectare. Creșterea calității vieții din zone dens populate aducând un plus de siguranță în comportarea clădirilor în caz de seism puternic și contribuind la creșterea încrederii populației în fondul locativ construit și în viitor de a face față unui cutremur puternic printr -un fond locativ rezistent la seisme puternice.

Pentru atingerea obiectivului se vor calcula date de hazard seismic local : accelerații, deplasări, viteze, spectre de răspuns, amplificări, factori de amplificare spectrală, la suprafața terenului (amplasamentului) și unde mai este cazul.

3.Obiectivul fazei:

- Prezentarea elementelor definitorii ale seismologiei neliniare și a hazardului seismic.
- Analiza tipurilor de pământuri și caracterul lor neliniar la solicitări seismice (dinamice) la care se prezintă exemple concrete de comportament neliniar al diferitelor tipuri de pământuri funcție de starea de deformație.
- Principalele teste dinamice ”in situ” și de laborator pentru punerea în evidență a comportamentului neliniar al pământurilor când sunt supuse unor forțe dinamice (seismice).
- Legi constitutive la pământuri.

4.Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei:

- rezultate experimentale de determinare a modulului tranversal G și amortizărilor pe probe de pământ netulburate extrase din straturi de adâncime, realizate pe coloana rezonantă Drnevich;
- Analiză de oportunitate asupra principalelor teste ”in situ” și de laborator pentru punerea în evidență a comportamentului neliniar al pământurilor când sunt supuse unor forțe dinamice (seismice).
- Studii teoretice despre legile constitutive la pământuri.

5.Rezumatul fazei:

1. ***Seismologia neliniară.***

1.1. Introducere

Seismologia neliniară își are originile, relative recent, la începutul anilor 1980, mai precis în 1983 la o conferință a seismologilor și inginerilor geotehnicieni, sub auspiciile ”United States Nuclear Regulatory Commission” și ”United States Geological Survey” în Statele Unite ale Americii. Conferința și-a propus să dezbată situația existentă în cercetările legate de ”efectele condițiilor locale asupra mișcărilor seismice puternice”. Subiectul cel mai dezbătut și istoric pentru prima oară într-o întâlnire științifică a fost neliniaritatea răspunsului amplasamentului la mișcări seismice puternice.

Prin neliniaritate la comportarea pământurilor înțelegem fenomenul care aduce schimbări în proprietățile mecanice ale stratelor de pământ, manifestate prin răspunsul dinamic al acestora, în timpul mișcărilor seismice puternice. Neliniaritatea în răspunsul stratelor de pământ este funcție de starea de deformare, deoarece deformarea în masivul de pământ este cu atât mai mare cu cât crește nivelul de stress datorată seismului care afectează amplasamentul. [1]

În Institutului Național de C-D pentru Fizica Pământului în cadrul fostului Departament de ”Seismologie Inginerească” și în prezent prin Departamentul ”Cercetare – Dezvoltare Inovare în Științele Pământului” s-au făcut și se efectueză cercetări teoretice și experimentale de seismologie neliniară de către un grup de cercetători de înaltă calificare.

Aceste cercetări au fost posibile datorită studiilor teoretice realizate de-a lungul timpului, contractelor care au implicat aplicarea practică a acestor cercetări și a testelor de laborator realizate de-a lungul timpului pe un sistem mecanic - electronic specializat în a pune în evidență variațiile neliniare ale modului transversal – torsional (G, daN/cm^2) a modului lui Young, (E, daN/cm^2) și a amortizărilor torsionale și longitudinale, cu starea de deformare torsională, γ, și cea longitudinală, ε, din probele de pământ, în aparatura numită ”coloane rezonante”. Stările de deformații induse în probe sunt echivalente cu deformațiile produse de seisme puternice de diferite magnitudini în masivele de pământ. INCDFP deține două coloane rezonante : Drnevich și Hardin .

1.2. Hazard seismic

Pentru studiile de amplasamente se realizează analize de risc seismic care au două componente : hazardul și vulnerabilitatea. Evaluarea hazardului seismic este foarte importantă pentru realizarea de construcții sigure și rezistente la cutremure. Hazardul seismic natural reprezintă un pericol ce există teoretic pentru o anumită zonă și poate avea origini tectonice, vulcanice, etc.

Vom prezenta în continuare o definiție larg acceptată a hazardului seismic adoptată de ”Grupul de Experți UNDRO, Geneva, 9-12 iulie 1979” [2] :

$$H_{t,A,m,y}(S) = P_t\,[Y \geq y \mid M \geq m;\ S \quad A\,] \qquad (1.1)$$

H – hazardul seismic, ca parametru statistic poate fi exprimată prin funcția P(Y > y) ce descrie probabilitatea P, că într-un loc dat S și într-un interval de timp t, valorile unui parametru Y a mișcării terenului (accelerație, viteză, deplasare, etc.) sau intensitatea macro seismică I să depășească un anumit nivel y, ca urmare a producerii unui cutremur cu o magnitudine M, mai mare decât o valoare aleasă m, într-o arie dată A, învecinată amplasamentului de interes. Definiția se poate rezuma astfel : hazardul seismic, H, este definit prin probabilitatea de apariție a unui eveniment seismic cu potențial de distrugere, într-o zonă definită și într-un interval de timp.

Hazardul seismic este rezultat al : cutremurelor de pământ tectonice, de vulcanism; explozii, prăbușiri de teren, alunecări de teren, etc. Metodologiile uzuale privind calculul hazardului seismic sunt incluse în metodele : deterministe, semiprobabiliste, probabiliste cu input simplu sau multiplu, metode hibride, neodeterministe. Cunoașterea hazardului seismic al unei zone, regiuni, etc. este un element esențial în acțiunea de reducere a riscului la cutremure și în realizarea managementului prevenirii dezastrelor la seisme în cazul de față.

Rezultatul unei analize de hazard seismic se poate exemplifica prin: o descriere a mișcării terenului, ca rezultat al unui cutremur, o hartă ce exemplifică diferite caracteristici ale terenului în diferite regiuni și care au aceeași probabilitate de a fi depășite. Unii din factorii esențiali în estimările de hazard seismic sunt : valoarea maximă de calcul a accelerației, în timpul cutremurului : a_{max} [m/s^2], perioada fundamentală de vibrație (T, [s]) a terenului, foarte importantă pentru evitarea rezonanței dintre teren și structură, pentru asigurarea stabilității sistemului teren – structură în timpul seismului. O altă mărime foarte importantă și uneori neglijată în cazul cutremurelor adânci vrâncene este estimarea duratei de producere a seismului, care poate face diferența dintre pagube ușoare și catastrofale (dacă avem mișcări de mai lungă durată).

1.3. Seismologia neliniară în studiile de hazard seismic.

Folosirea cunoștințelor de seismologie neliniară în studiile de hazard seismic pentru caracterizarea viitoarelor amplasamente (sau re-evaluarea unora mai vechi) conduce la o mai bună cunoaștere a modului cum se va comporta un amplasament și masivul de pământ pe care se află în cazul unui seism puternic. Prin comportamentul masivului de pământ înțelegem să cunoaștem : accelerațiile, vitezele, deplasările, spectre de răspuns, etc. datorate cutremurelor care l-ar afecta.

2. Tipuri de pământuri și caracterul lor neliniar la solicitări dinamice (seismice)

2.1. *Tipuri de pământuri şi comportarea lor la solicitări dinamice (seismice), parte teoretică.*

Denumirea generică de ”pământuri” reprezintă o mare varietate de materiale, apărute în decursul erelor geologice ale Pământului ca rezultat al proceselor de degradare a rocilor. Clasificările din diverse standarde cuprind zeci de grupe și subgrupe, de aceea nu vom intra în detalierea lor, dar din punct de vedere a proprietăților mecanice (care ne interesează cel mai mult fiind vorba de rezistența lor ca terenuri de fundare) două mari categorii prezintă o importanță deosebită : nisipurile și argilele, deși au proprietăți mecanice comune, au la bază modele mecanice diferite.

Pământurile sunt materiale simple cu memorie, nisipurile fiind de tipul ”independent de viteză” (rate – independent) și argilele de tipul ”dependent de viteză” (rate dependent).

Există o mare varietate de pământuri cuprinse între grupele ”nisipuri” şi ”argile” şi atunci o delimitare precisă a tipului de comportament nu poate fi făcută. Este de remarcat că un acelaşi pământ poate avea comportări diferite în funcție de : umiditate, grad de îndesare, drumul de încărcare, etc. Pământurile manifestă o comportare tensiune – deformație foarte complexă și câteva din caracteristicile importante, în cazul încărcărilor dinamice (seismice) sunt descrise de buclele histerezis.

În Fig. 2.1 este prezentată încercarea ciclică de torsiune la o presiune din celulă de 0,248 daN/cm^2 a unui nisip uscat și curat. Aceste bucle ne arată că pământurile au o comportare

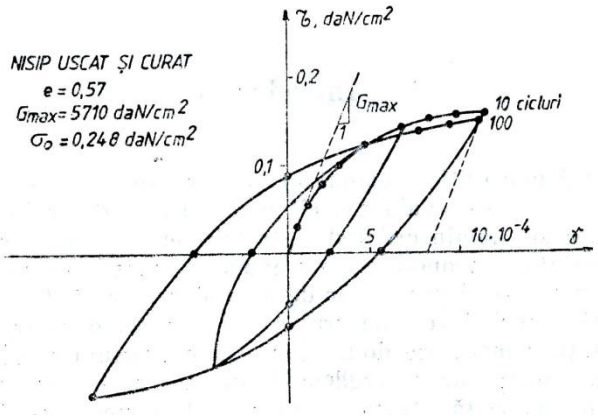

Fig.2.1

puternic neliniară, iar la valorile mai mari ale tensiunilor este o curgere și o capacitate considerabilă de absorbție a energiei, în special când deformațiile sunt mari.

În teoria clasică şi universal valabilă a elasticității liniare, aplicată la corpuri omogene și izotrope (cum considerăm pământurile prin aproximare), avem de determinat 15 funcții necunoscute : trei deplasări u_i ; șase deformații specifice ε_{ij} ; șase tensiuni σ_{ij}; pentru care dispunem de 15 ecuații :

trei ecuații de mişcare : $\sigma_{ij} + F_i = \rho \ddot{u}_i$ (i,j = 1,2,3) (2.1)

unde F_i sunt forțele de volum ; ρ este masa specifică, (densitatea).

Ecuațiile (2.1) sunt valabile în cazul deformațiilor infinitezimale și al mișcărilor neamortizate.

șase relații între deformații specifice (ε) și deplasări (u), (relațiile lui Cauchy) :

$$\varepsilon_{ij} = 1/2 \ \ x \ \ (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (i,j = 1,2,3) \qquad (2.2)$$

Șase relații finite între tensiuni și deformații ; în cazul corpurilor liniar elstice, omogene și izotrope, introducând Legea lui Hooke sub forma :

$$\sigma_{ij} = \lambda\, \delta_{ij}\, \varepsilon_{kk} + 2\, \mu\, \varepsilon_{ij} = \lambda\, \delta_{ij}\, \partial u_k/\partial x_k \ + \mu\, (\partial u_j / \partial x_i + \partial u_i / \partial x_j) \qquad (2.3)$$

unde λ și μ sunt constantele lui Lame (aceste constante depind numai de doi coeficienți elastici ai materialului), δ_{ij} este simbolul lui Kronecker și ν este coeficientul lui Poisson.

Ecuația (2.3) poate fi scrisă sub forma :

$$\varepsilon_{ij} = 1/E \ \ ((1 + \nu)\sigma_{ij} - \nu\, \sigma_k\, \delta_{ij}) = 1/2G\, (\sigma_{ij} - \nu\, \sigma_{kk}\, \delta_{ij} /(1 + \nu)); \ \ (i,j = 1,2,3) \qquad (2.4)$$

unde E și G sunt modulii de elasticitate longitudinală și transversală.

În cazul problemelor dinamice, atât deplasările dinamice u_k și deformațiile specifice ε_{ij} , cât și tensiunile σ_{ij} nu sunt numai funcții de punct, ci și de variabila temporală t, ceea ce atrage după sine și punerea de condiții inițiale. Ecuațiile 2.1 – 2.3 sau 2.4 formează sistemul fundamental de ecuații al elasto-dinamicii liniare și dacă atragem și condițiile la limită, atunci ele formează sistemul complet de ecuații al teoriei clasice a elasticității, în caz dinamic. Prezentarea acestor elemente a fost necesară pentru înțelegerea etapelor modului cum s-a ajuns la modelul vâsco-elestic neliniar prezentat în continuare.

2.2. *Exemple de comportament de neliniaritate la pământuri.*

În continuare vom prezenta câteva exemple de comportare neliniară la solicitări dinamice.

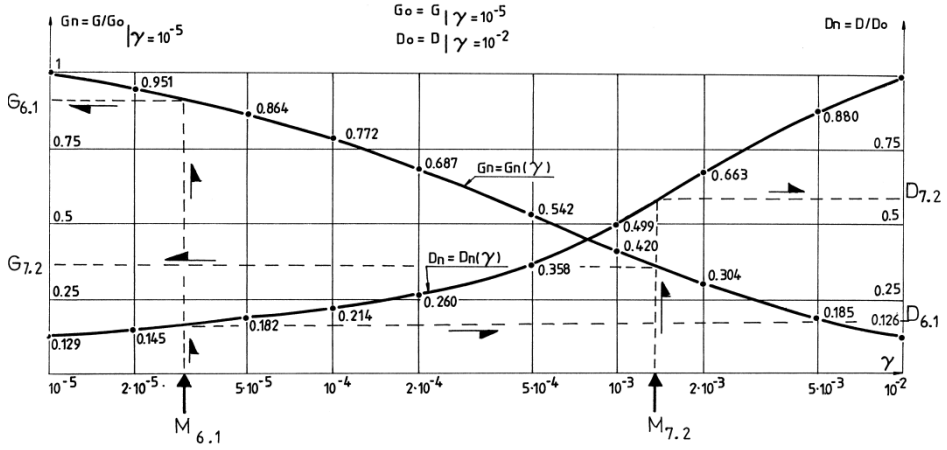

Fig.2.2.

În Fig. 2.2. se prezintă curbe normalizate de nisip cu pietriș realizate cu ajutorul coloanei rezonante Drnevich. Se pot observa nivelele de solicitare versus deformații care corespund la seisme Vrâncene reale de magnitudine 6,1 și 7,2; valorile prezentate sunt normalizate. Se observă scăderea modulului de torsiune G cu deformația și creșterea amortizării cu starea de deformație din masivul de pământ.

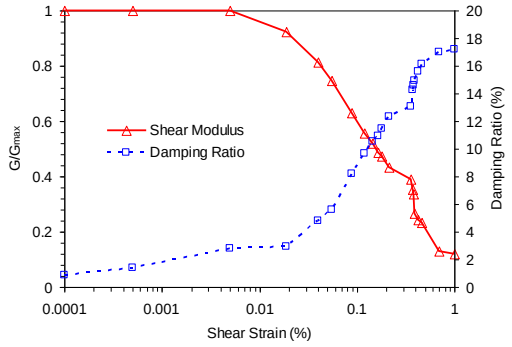

Fig. 2.3. nisip argilos

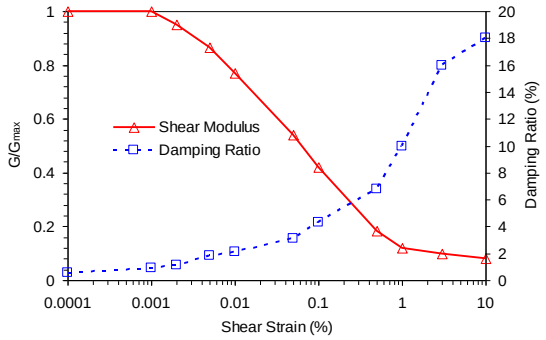

Fig.2.4 nisip cu pitriș

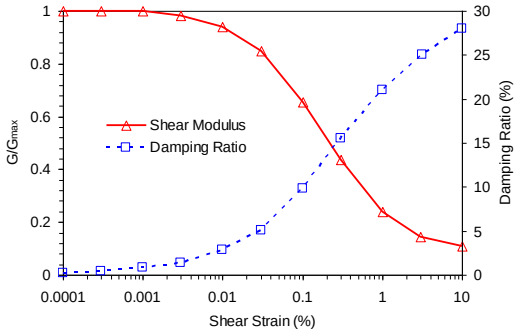

Fig. 2.5. argilă

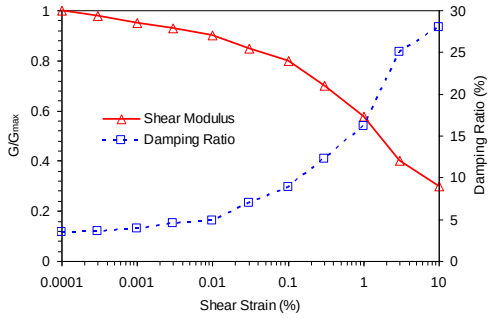

Fig. 2.5. marnă nisipoasă

În figurile 2.3, 2.4, 2.5 și 2.6 se prezintă teste pe coloana rezonantă Drnevich (INCDFP) pe următoarele materiale : nisip argilos (Fig.2.3), nisip cu pietriș (Fig.2.4), argilă (Fig. 2.5) și marnă nisipoasă (Fig.2.6). În figuri se vede variația modulului de forfecare (shear modulus) și a raportului de amortizare (damping ratio) cu starea de deformație indusă în masivul de pământ. Datele sunt în formă normalizată.

3. *Moduri de testare a comportamentului neliniar a pământurilor la solicitări dinamice – seismice.*

3.1. Elemente de bază

Solicitările dinamice-seismice care afectează pământurile sunt între valorile $\gamma = 10^{-6} - 10^{-1}$ % (γ - deformare specifică). Când se fac diferite tipuri de teste într-un amplasament trebuie să ținem seama de unde este extrasă proba, de deformațiile induse în teren și de variația locală a condițiilor de teren.

Ideia de bază este să vedem ce se întâmplă în masivul de pământ la diferite deformații, pe care la considerăm identice cu cele induse în timpul seismelor puternice, în cazul României cele produse în regiunea Vrancea. Deformațiile induse și măsurate în masivul de pământ se pot realiza prin diferite metode ”in situ” și se pot simula și în laborator. Alegerea metodei ține de

posibilitățile financiare, timpul avut la dispoziție și de mărimea deformației pe care doresc să o analizeze cei care au nevoie de date.

În Tabelul 3.1. vom prezenta ordinul de mărime aproximativ a deformațiilor induse în masivul de pământ la teste ”in situ” și de laborator.

Mărimea deformației		10^{-6} 10^{-5} 10^{-4} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1}		
Caracteristici mecanice		elastice	Elasto-plastice	rupere
Teste ”in situ”	Metoda Rayleigh	----------		
	Vibrații forțate	----------		
	Încărcare repetată	----------		
Teste de laborator	Propagarea undei	----------		
	Coloane rezonante	----------		
	Încărcare repetată	----------		

Tabelul 3.1.

Modulii dinamici determinați ”in situ” și în laborator diferă, acest lucru se datorește : neomogenitatății masivului de pământ, efectului reologic al anumitor tipuri de pământuri (cu precădere argile), tulburării probelor extrase din forări, etc. Nu putem să clamăm superioritatea determinărilor de ”in situ” față de cele de laborator, fiind cazuri în care nu putem compara și nu putem aplica dacât un fel de test.

3.2. Teste ”in situ”. Descriere. Exemple.

În continuare vom prezenta pe scurt câteva din cele mai uzitate teste ”in situ”.

Testul de vibrare în regim permanent.(testul modului de forfecare).[3]. Metoda constă în excitarea bazei construcției la vibrații verticale, la o frecvență cunoscută și din găsirea diferenței de fază dintre sosirea undelor Rayleigh în două puncte situate la o distanță cunoscută. Având cunoscută diferența de fază și distanța dintre punctele de observație, d, lungimea de undă a undelor Rayleigh poate fi determinată.

Se știe din geofizică că viteza undelor Rayleigh, V_R, și viteza undei transversale, V_S, sunt aproximativ egale pentru un coeficient Poisson între 0,25 – 0,5. (Spre exemplificare unui ν=0,5 îi corespunde V_R=0,955 V_S și pentru ν=0,25 îi corespunde V_R=0,920 V_S).

Valoarea modulului de forfecare, G, poate fi obținută din relația clasică :

$$G = \rho V_S^2 \approx \rho V_R^2 ; \qquad (3.1)$$

unde ρ este densitatea de masă a mediului de propagare.

Testul de propagare a undelor. Undele seismice sunt generate prin impact sau prin explozii folosind cantități mici de explozibil. Prin măsurarea timpului în care undele parcurg o anumită distanță putem calcula vitezele V_p și V_s.

În cazul când avem calculate V_p , modulul lui Young , E, poate fi calculat astfel:

$$E = (1-2\nu)(1 + \nu)\, \rho\, V^2_p / (1 - \nu) \qquad (3.2)$$

Cunoscându-l pe E și având pe V_s în câmp liber G poate fi și el calculat :

$$G = \rho\, V^2_S\,. \qquad (3.3)$$

Metoda vibrării forțate a unor blocuri de beton armat. Metodă folosită în multe țări pentru determinarea ”in situ” chiar în excavația fundației a lui E și G.

Teste cu placa încărcată ciclic. La acest tip de încercare se aplică la început o încărcare statică și se măsoară tasarea totală, se înlătură încărcarea și se măsoară partea elastică recuperată. În continuare, sarcina este mărită în trepte și procesul se repetă. De aici se determină valoarea C_u ca raportul dintre intensitatea sarcinii și tasarea recuperată corespunzătoare (revenirea elastică) la o treptă de încărcare. Testul se face la nivelul terenului de fundație cu plăcu de dimensiuni variabile 30 x 30cm – 60 x 60cm. Odată calculat C_u , se calculează E și G.

3.3. Teste de laborator pe coloane rezonante. Determinarea variației modulului de forfecare și a funcției de amortizare cu starea de deformație.

Coloanele rezonante moderne au fost create de Hardin și Drnevich după anul 1970. În coloana Hardin proba de pământ cilindrică (înălțime 8-10cm și diametrul de 3,57 cm) este solicitată numai la vibrații torsionale și se poate modela influența greutății unei construcții asupra probei prin greutatea de circa 100 daN a vibratorului, iar în coloana rezonantă Drnevich se pot exercita asupra probei vibrații longitudinale , cât și vibrații torsionale cuprinse între 10^{-5}% și 10^{-2}%.

Probele de pământ se prelevează din carote de pământ extrase prin foraje mecanice din amplasamente unde se fac eforturi pentru a fi cât mai puțin tulburate. Fiecare probă corespunde unui strat de pământ, iar dacă avem strate de dimensiuni mari se extrage câte o probă la partea superioară, mijlocul și partea inferioară a stratului.

În testele pe coloane rezonante pentru un anumit nivel de putere (realizată din amplificatorul aflat în sistem), corespunde un nivel de vibrare (reglat din aparatură) care ne dă o anumită deformație. La fiecare nivel de deformație corespunde o valoare a modulului dinamic G (modul transversal al probei) și o valoare a funcției de amortizare a probei D. La aceasta corespunde și o frecvență de vibrare, iar când aceasta corespunde cu frecvența proprie a probei avem rezonanța sistemului probă – vibrator. De aici putem trage concluzia că frecvența și deformația nu sunt variabile independente. Aparatura numită ”coloane rezonante” are niște limitări fizice, cu ajutorul ei pot fi calculate numai câteva valori ale lui G și D, acestea fiind plasate într-o ”secțiune” a suprafeței $G = G(\gamma,\omega)$ și $D = D(\gamma,\omega)$. Aceste secțiuni corespund la o bandă de frecvență de la 1 – 50 Hz și o bandă de deformație de 10^{-3}% - $5x10^{-1}$%. Se observă influența stării de deformație asupra caracteristicilor dinamice ale pământurilor, dar tot odată observăm o influență minoră a frecvenței de peste 10 Hz asupra funcțiilor de frecvență G și D din ecuațiile de mai sus. După cum se știe seismologia inginerască este interesată în principal de banda de frecvențe 1 – 10 Hz. Din considerente de calcul se poate considera că G și D sunt independente de frecvență în acest interval, deci sunt constante după cum se vede în Fig. 3.1 și 3.2. În aceste condiții modulul dinamic și funcția de amortizare pot fi determinați în totalitate din coloana rezonantă prin metoda regresiei polinomiale.[4].

Este necesară o alegere rațională a lui G (cel mai important parametru pentru proiectare din

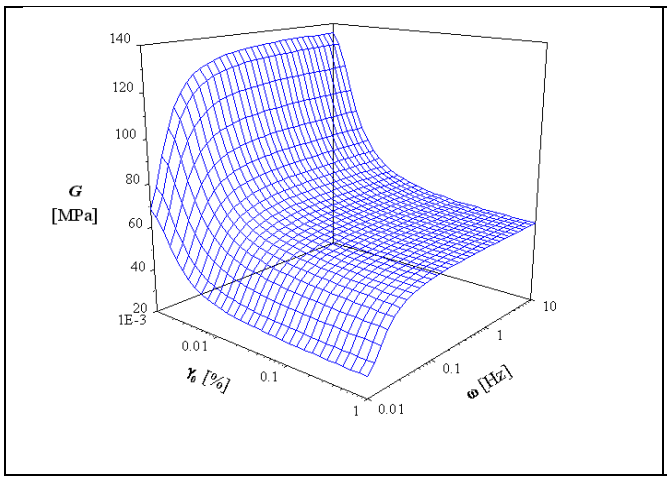

Fig.3.1

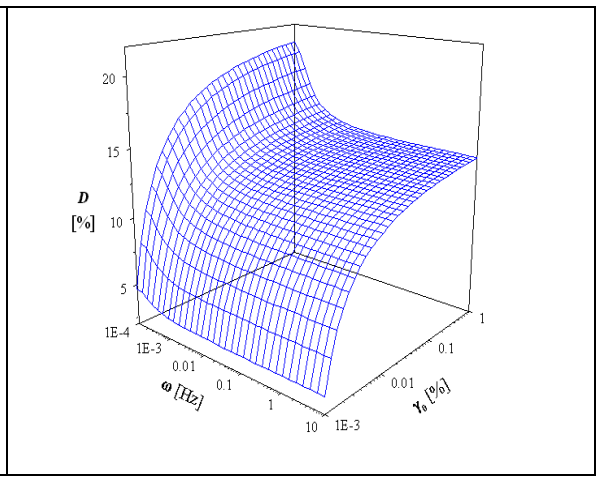

Fig. 3.2

cei enumerați) în așa fel încât să se ia în considerare factorii care îl influențează, cum ar fi : presiunea medie efectivă (presiunea din celula de testare a aparatelor triaxial și coloane rezonante, care trebuie să țină seama de adâncimea de unde este extrasă proba), indicele porilor, amplitudinea deformației, gradul de saturație, efectele reologice (în special la argile), numărul de cicluri de încărcare pe secundă, deformațiile induse în teren și nu în ultimul rând de condițiile locale de teren. Dintre aceștia presiunea medie, amplitudinea deformației și indicele porilor sunt cei mai importanți.

Presiunea medie și nivelul deformației sunt diferite în testele făcute ”in situ” și deoarece acești parametri exercită cea mai mare influență asupra modulului de forfecare G, atunci aici se găsește cauza principală a diferenței dintre valorile parametrilor dinamici ai pământurilor obținuți ”in situ” prin diferite metode cât și apoi față de cei obținuți în teste de laborator.

4. *Legi constitutive la pământuri.*

4.1. Considerații generale.

Modelul matematic al corpului elastic se obține completând aspectul geometric și mecanic al problemei cu un aspect de natură fizică, experimentală, adică se introduce ”*o lege constitutivă”, ceea ce înseamnă o relație între tensiuni și deformații specifice*, care, pentru a nu crea dificultăți de calcul, trebuie să fie cât mai simplă cu putință. De exemplu, în cazul unidimensional se admite, ca lege constitutivă ”Lege lui Hooke”.

Legile constitutive se bazează pe unele ipoteze principale :

- Istoria deformațiilor este compusă din două etape despărțite de momentul t_0 al primei solicitări exterioare. Efectele primei etape sunt induse în caracteristicile mecanice pe care pământurile le au ”in situ”;
- Pământurile supuse unei prime încercări monoton crescătoare au o comportare de corp elastic sau vâsco-elastic neliniar;
- Orientarea particulelor constituente ale pământurilor este suficient de aleatoare pentru ca pământurile să poată fi considerate materiale izotrope etc.;
- Pământurile sunt materiale simple cu memorie, nisipurile fiind de tipul ”independent de viteză” (rate – independent) și argilele de tipul ”dependent de viteză” (rate dependent).

În genere nisipurile au proprietăţi reologice reduse şi de aceea poate fi folosit un model elastic neliniar, iar argilele care au proprietăţi reologice semnificative, pot fi modelate cu un model vâsco-elastic neliniar.

În continuare voi prezenta tabelul 5.1. [3] unde este prezentată modelarea comportării pământurilor funcţie de starea de deformaţie. Acest tabel sugerează şi legile constitutive cele mai potrivite pentru anumite situaţii practice.

Deformaţia transversală (γ) %	10^{-6} | 10^{-5} | 10^{-4} | 10^{-3} | 10^{-2} | 10^{-1}			
	Deformaţie mică (γ)	Deformaţie medie (γ)	Deformaţie mare (γ)	Deformaţie de rupere (γ)
elastic				
Elasto-plastic				
rupere				
Efectul repetiţiei la încărcare				
Efectul ratei de încărcare				
Model/lege constitutivă	Linear elastic model	Visco-elastic model	Dependenţa de istoria încărcării	
Analize de răspuns a masivului de pământ	Model Linear	Metoda linear echivalentă	Metoda integrării pas cu pas	

Tabel 4.1.

Se observă că pentru $\gamma < 10^{-3}$ răspunsul pământului la încărcare ciclică nu depinde de ciclicitatea încărcării, totodată pentru $\gamma < 10^{-5}$ comportarea pământului este practic elastică, iar între $10^{-3} < \gamma < 10^{-5}$ pământul se comportă după modelul vâsco-elastic şi poate fi analizat prin metoda liniar echivalentă (introdusă în numeroase analize de dinamica solului ca : Shake, Flush, Quad4, etc.)

În continuare vor fi prezentate unele din cele mai cunoscute legi constitutive folosite la pământuri.

4.2.Ecuații constitutive pentru starea plană de deformație în pământuri. Modelul lui Hooke.
Pământurile sunt în mod inerent elasto-plastice, deoarece deformarea lor este compusă din alunecarea dintre particule și deformația elastică a particulelor individuale. Formularea elasto-plastică a *relațiilor constitutive* dintre pământuri reprezintă cel mai bine fizica comportării lor. Dacă reprezentarea elasto-plastică este superioară din punct de vedere fizic se va folosi Legea lui Hooke dintre tensiuni și deformații, în cazul stării plane de deformație, făcând o îmbunătățire printr-o formulare incrementală. În felul acesta se vor lua în considerare, cel puțin în parte, efectele inerente ale anizotropiei induse datorită încărcării, cât și cele datorită direcției și rotației vectorului tensiune incrementală.
Pământurile nu se comportă, în cazul stării de deformație plană exact ca un pachet de bare. Cu toate acestea modelul este destul de realist [5] ca să avem o cuplare relativ ușoară dintre tensiunile normale, din plan și din afara planului, la deformațiile longitudinale, pentru deformația plană, în materiale din macroparticule (pământuri). Pentru deformația plană din planu x_1x_2 în pământuri, este probabil că γ_{13}, γ_{31}, γ_{23}, γ_{32} sunt relativ mici. Deci, materialele din macroparticule, supuse la o deformație plană, pot fi considerate mai corect bidimensionale, decât anizotrope transversal. Acest model simplu demonstrează anizotropia indusă, datorită drumului încărcării, în pământuri.

4.3.Comparații dintre modele de tensine deformație (legi constitutive).
Pentru a avea o mai bună privire generală asupra modelelor de tensiune deformație am realizat Fig. 4.1 unde se prezintă o comparație între mai multe legi constitutive, cum reușesc acestea ”potrivirea” pe curba reală de tensiune-deformație la pământuri. Analizând acestă figură se ajunge la următoarele concluzii arătate în Tabelul 4.2.
4.4.Modelul vâsco-elastic liniar

Relația constitutivă pentru solidul elastic liniar este :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\,\varepsilon_{kl} \quad ; \qquad (4.1)$$

C_{ijkl} = tensorul de ordinul patru al coeficienților elastici, tensorul lui Hooke.

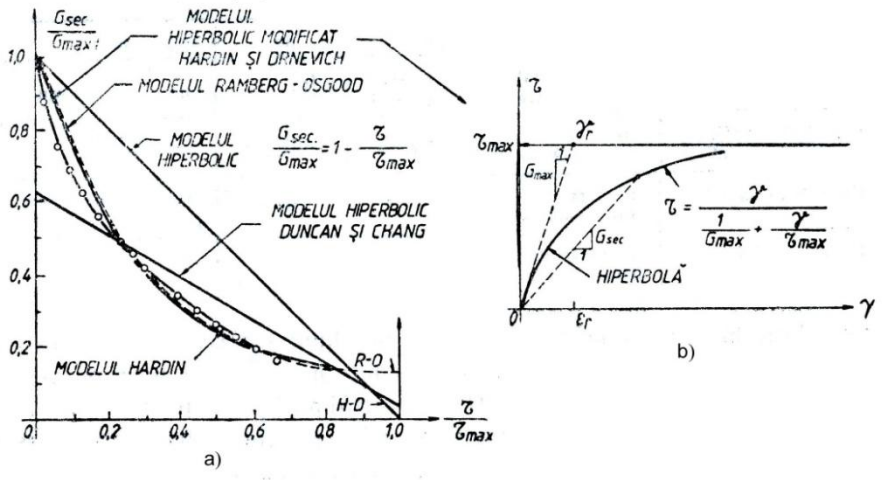

Fig. 4.1.

Modelul din Fig. 4.1	”potrivirea”
Hiperbolic	Slabă
Hiperbolic Duncan-Chang	La deformații intermediare
Hiperbolic modificat Hardin-Drnevich	La deformații mici și intermediare
Ramberg-Osgood	La deformații mici și intermediare
Hardin	La toate deformațiile

Tabel 4.2.

Aceste matriale nu au nici o pierdere de energie internă, sunt materiale ideale, ele nu există în realitate și cu atât mai puțin în scoarța terestră unde atenuarea energiei seismice este un fapt stabilit. Această ”deviație” de comportament a unui material față de cea a unui material elastic pur este cunoscută sub numele de ”anelasticitate”. Amortizarea anelastică în mod obișnuit, depinde într-o formă complicată de temperatură, frecvență și tipul vibrației, de starea de deformație indusă de cutremur.

În teoria clasică a elasticității se admite că relațiile tensiune – deformație sunt liniare și independente de timp, iar ipoteza micilor deformații ne conduce la posibilitatea aplicării principiului suprapunerii efectelor pentru încărcări și deformații. Experiențele efectuate pe pământuri arată că, după o încărcare bruscă, cu o sarcină care este menținută constantă, deformațiile cresc în timp, iar după descărcare ele nu se anulează instantaneu. Pentru descrierea acestor fenomene, în cazul unidimensional, vom folosi relația de forma :

$$f(\sigma, \varepsilon, t) = 0 \qquad (4.2)$$

σ – tensiunea; ε – deformația specifică; t- timpul

Modelul simplu este bazat pe suprapunerea a două mecanisme de rezistență la deformație : elasticitatea liniară și vâscozitatea Stokes. Un material de acest fel este numit vâsco-elastic liniar. Cuvântul liniar implică două limitări pentru relația (4.2). Un material este vâsco-elastic liniar, dacă deformațiile sunt mici (adică, componentele tensiunii sunt liniar raportate la componentele deformației la un moment dat) și dacă are loc principiul suprapunerii lui Boltzman. Acest principiu este baza teoriei matematice a corpurilor liniar vâsco-elastice. El afirmă că dacă ciclul de tensiune $\sigma_1(t)$ produce deformația $\varepsilon_1(t)$, iar ciclul de tensiune $\sigma_2(t)$ produce deformația $\varepsilon_2(t)$ atunci suma ciclurilor $\sigma_1(t) + \sigma_2(t)$ produce deformația $\varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t)$.

Pentru a descrie comportarea vâsco-elastică a pământurilor trebuie să fie introduse noi concepte care nu existau în cazul corpului elastic liniar.

Fluajul este deformarea înceată și continuă a unui material sub tensiune constantă. Pentru studiul său avem funcția :

$$\varepsilon(t) / \sigma_o = \varphi\,(t, \sigma_o) \qquad (4.3)$$

Funcția φ (t, σ_o) se numește *funcție de fluaj*. Dacă f(t) = 0, sunt numai deformații elastice. Dacă la timpul t = t_1 începem să descărcăm corpul, deformația descrește în mod gradual și se micșorează printr-un proces de revenire (sau fluaj invers). Dacă revenirea este completă avem *fluaj elastic,* iar corpul se numește cu elasticitate întârziată. Dacă materialele vâsco-elastice sunt supuse la o deformație constantă, tensiunea se va micșora în mod gradual printr-un proces cunoscut ca relaxare.

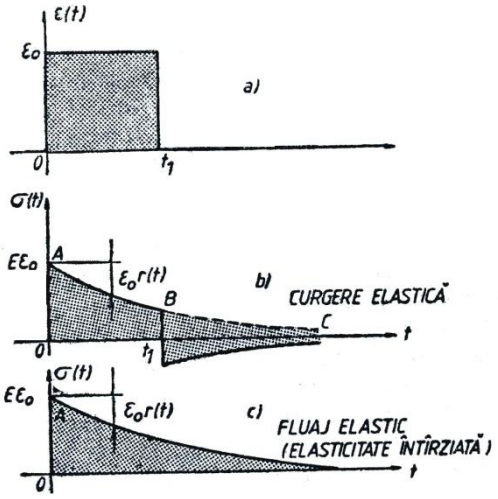

Fig. 4.2.

Funcția de relaxare are forma :

$$\Psi(t, \sigma_o) = \sigma(t) / \varepsilon_o \qquad (4.4)$$

În acestă situație proba la momentul t = 0 se deformează până la valoarea ε_o și tensiunea va avea intensitatea $\sigma(0^+) = E\varepsilon_o$, dar apoi descrește după curba ABC din Fig. 4.1.b.

$$\sigma(t) = \sigma(0^+) + \sigma`(t) = E\varepsilon_o + \varepsilon_o r(t) \qquad (4.5)$$

unde r(t) este o funcție ce trebuie determinată experimental. Deci,

$$\Psi(t, \sigma_o) = E + r(t) = \Psi(0^+, \sigma_o) + r(t) \qquad (4.6)$$

Dacă la momentul t = t_1 descărcăm corpul, tensiunea normală își schimbă semnul și apoi descrește Fig. 4.1. b. Pentru t $\rightarrow\infty$, corpurile cu elasticitate întârziată nu au tensiuni reziduale. Aceste funcții φ și ψ joacă un rol important în *teoria vâsco-elasticității*.

4.5. *Modelul vâsco-elastic neliniar*

Comportarea neliniară a pământurilor a constituit și încă constituie obiectul a numeroase cercetări teoretice și experimentale atât în studiile mai vechi cât și în cele mai noi. Cu toată diversitatea punctelor de vedere conținute în aceste studii, punctul comun al acestor lucrări sunt ”modulii variabili” care iau în considerare tocmai dependența constantelor elastice ale pământurilor, de starea de tensiune sau deformație.

Pe legea constitutivă vâsco-elastic neliniară se bazează seismologia neliniară.

Pământurile sunt materiale vâsco-elastice neliniare cu următoarele ecuații constitutive [1, 4].

$$\sigma(\varepsilon,t) = K^*(\varepsilon)\ \varepsilon(t) = (\sum_p^{0,2} K_p^*\ \varepsilon^p\ )\ \varepsilon(t) \qquad (4.7)$$

$$\tau(\gamma,t) = G^*(\gamma)\ \gamma(t) = (\sum_p^{0,2} G_p^*\ (-\gamma)^p\ )\ \gamma(t) \qquad (4.8)$$

Aceste ecuații constitutive sunt formal echivalente cu forma polinomială a ecuațiilor constitutive elastic neliniare, în care s-au considerat numai primii trei termeni ai dezvoltării, iar ecuațiile constitutive dinamice mai pot fi scrise și sub forma :

$$\sigma_{ij} = K^*\ (\varepsilon)\ \varepsilon\ \delta_{ij} + 2G^*(\gamma)\ e_{ij} \qquad (4.9)$$

unde σ_{ij} sunt componentele carteziene ale tensorului tensiunii, iar e_{ij} sunt componentele carteziene ale tensorului deviatorului tensorului deformațiilor. Forma lor condensată e similară cu legea lui Hooke :

$$\sigma_{ij} = c^*_{ijkl}\ (\varepsilon,\gamma)\ \varepsilon_{kl} \qquad (4.10)$$

Echivalența formală a ecuației (4.10) cu legea lui Hooke, facilitează formularea și rezolvarea problemelor dinamice din pământurile considerate materiale vâsco-elastice liniare, exemplu în tehnicile numerice ale diferențelor finite și/sau ale elementelor finite ce sunt aplicate curent în rezolvarea acestora.

În cazul studiat de noi cu ce se întâmplă în coloana rezonantă, proba solicitată dinamic în regim staționar de vibrații armonice torsionale sau longitudinale avem:

$$\sigma(t) = \int_\infty^t K\ (\varepsilon,t-\varepsilon)\ \varepsilon\ (s)ds \qquad (4.11)$$

$$\tau(t) = \int_\infty^t G\ (\gamma,t-\gamma)\ \gamma\ (s)ds \qquad (4.12)$$

în care $K(\varepsilon,t)$ și $G(\gamma,t)$ sunt funcțiile neliniare de relaxare, exprimate polinomial, iar problema constă în a modela răspunsul dinamic al probei în deformații.

Vom studia cazul vibrațiilor torsionale, unde G este funcția de relaxare neliniară și are expresia:

$$G(\gamma) = \sum_k^{0,2}(g^0_k + (g^0_k - g^\infty_k)\ \exp\ (-\ \beta^t_k))(-\gamma)^k \qquad (4.13)$$

Acționată de o deformație de următoarea formă:

$\gamma(t) = \gamma\ \exp(i\omega t)$; γ – amplitudinea deformației; ω – frecvența excitației ; (4.14)

prin procesări succesive ale relațiilor de mai sus se ajunge la următoarele:

forma simplă a ecuației tensiune-deformație

$$\tau(t) = \left|\ G^*\ (\gamma_o,\ i\omega)\ \right|\ \gamma_o\ e^{i(\omega t+\delta)} \qquad (4.15)$$

și relațiile :

$$G(\gamma,\omega) = G^*\ (\gamma,\ i\omega) = (G_r^2\ (\gamma,\omega) + G_i^2\ (\gamma,\omega))^{1/2} \qquad (4.16)$$

$$D(\gamma,\omega) = \tan\delta\ (\gamma,\omega) = G_i(\gamma,\omega)/G_r(\gamma,\omega) \qquad (4.17)$$

$G_r(\gamma,\omega)$ = funcția modul de acumulare; $G_i(\gamma,\omega)$ = funcția modul de atenuare

Funcția (4.16) este numită *funcția modul de torsiune dinamică*, este funcție de modul cum este aplicată încărcarea, (i se mai spune și modulul de forfecare), iar funcția (4.17) este *funcția de amotizare torsională*, și caracterizează proprietățile disipative ce produc defazajul dintre deformații și tensiuni. [2]. Din interpretarea fizică a ecuației (4.15) rezultă că deformația armonică în regim permanent rămâne în urmă față de tensiune, cu o cantitate dată de unghiul δ.

Relațiile (4.15) – (4.17) ne conduc la determinarea experimentală a funcției modul de torsiune dinamică și a funcției de amortizare, prin găsirea relației dintre tensiune și deformație, într-o epruvetă supusă la deformație torsională armonică simplă. Acest lucru poate fi realizat în coloană rezonantă.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Mărmureanu Gh., Mișicu M., Cioflan C.O., Bălan St.F., Apostol B.F.," Nonlinear Seismology – The Seismology of the XXI Century", in Lecture Notes of Earth Sciences, "Perspective in Modern Seismology", vol. 105, 2004, Springer Verlag, Heidelberg, pp. 47-67.
2. Mărmureanu Gh., "Certitudini/incertitudini în evaluarea hazardului și a riscului seismic Vrâncean". Editura Academiei Române, (2016).
3. Woods R.D.," Mesurement of Dynamic Properties", Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, June, (1988).
4. Bratosin D., "Elemente de dinamica pământurilor", Editura Academiei Române. (2002)
5. Hardin B.O., Plane Strain Constitutive Equations for Soils, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109 no. 3 (1990).

6.Rezultate, stadiul realizării obiectivului fazei, concluzii și propuneri pentru continuarea proiectului

Rezultate :

- Definirea seismologiei neliniare și a hazardului seismic.
- Descrierea tipurilor de pământ și explicarea comportării lor neliniare la solicitări dinamice (seismice). Toate aceste rezultate fiind analizate și prezentate din punct de vedere al seismologiei neliniare;
- Exemple concrete de teste pe mai multe tipuri de pământuri realizate de echipa proiectului pe coloana rezonantă Drnevich;
- Prezentarea principalelor teste "in situ" și de laborator folosite la caracterizarea comportării neliniare a pământurilor la solicitări dinamice (seismice);
- Rolul legilor constitutive a pământurilor în seismologia neliniară.

Stadiul realizării obiectivului fazei :

obiectivele propuse în cadrul fazei I a proiectului **PN 16 35 01 04** au fost îndeplinite integral.

Concluzii:

- În faza I a proiectului a fost arătată complexitatea și multidisciplinaritatea acestui relativ nou domeniu care este seismologia neliniară. S-a prezentat modul cum s-a ajuns la necesitatea acestor studii, testele ”in situ” și de laborator care arată comportarea neliniară a pământurilor în regim dinamic (seismic), deci a fost dovedită existența reală în timpul seismelor puternice a acestor fenomene care dacă nu sunt luate în considerare pot duce la pierderi de vieți omenești și pagube materiale însemnate afectând construcțiile civile și industriale.
- A fost tratat aspectul teoretic prin legile constitutive la pământuri care transpun în formule matematice fenomenele fizice care au loc în timpul cutremurelor puternice.
- În cazul modelului vâsco-elastic neliniar se vede că există o corespondență foarte bună între partea teoretică și partea experimentală - testele pe coloane rezonante.
- În faza II vom arăta cum aplicînd noțiunile de seismologie neliniară parametrilor de hazard seismic vom avea un ”input seismic” în amplasamente mai aproape de realitate în cazul seismelor puternice care afectează o mare parte din teritoriul României. Astfel se va crește gradul de siguranță în exploatare a clădirilor viitoare și a celor reabilitate după efectuarea analizei amplasamentelor prin considerentele seismologiei neliniare (la cele unde se va constata că e nevoie de studii suplimentare în afara celor cerute de normele în vigoare).

Diseminare :

Bălan S. F., Apostol B.F., ”The Necessity of Considering Nonlinear Seismology in Site Evaluation” “16th International Multidisciplinary Scientific GeoConferences SGEM 2016; Sciences and Technologies in Geology, Exploration and Mining. ISBN : 978-619-7105-55-1; ISSN 1314-2704; DOI: 10.5593/sgem2016B11; 30.06-6.07.,2016 Albena, Bulgaria.

Lucrarea a fost publicata în Conference Proceedings la SGEM 2016, Vol.3 care este catalogată Proceedings ISI.

Bălan S.F., Toma-Dănila D., Apostol B.F. „Reinforced concrete buildings behaviour in the Metropolis of Bucharest during strong earthquakes in Romania” International Conference on Urban Risks ICUR 2016 Proceedings (30 June – 2 July 2016, Lisbon, Portugal). Proceedings : ISBN: 978-989-95094-1-2.

Propunem continuarea proiectului prin importantele obiective enumerate, în schema de realizare, în anul viitor.

Responsabil proiect

Dr.ing. Ștefan Florin Bălan, CS I