

CONTRIBUȚII LA ANALIZA COMPORTĂRII NELINIARE A STRUCTURILOR METALICE

Ing. Both Ioan

Rezumatul tezei

Transportul materialelor fluide și a sistemelor structurale folosite pentru traversarea conductelor metalice sunt prezentate în **capitolul 1**. Sunt evidențiate principalele tipuri de traversări și intervalul deschiderilor în care sunt recomandate acestea.

Traversările cu cabluri sunt prezentate mai în detaliu urmărindu-se substructurile (pilonii, fundațiile, cablurile și prinderea acestora de piloni și în fundații) care alcătuiesc aceste traversări. Vizualizarea acestor elemente sunt prezentate în figurile aferente capitolului.

În cursul timpului, cablurile au fost îmbunătățite din punctul de vedere al rezistenței la întindere iar prin metodele numerice, proiectarea și calculul forțelor în cabluri au devenit tot mai sigure. Protejarea cablurilor împotriva acțiunii mediului au crescut durata de viață a cablurilor, însă în exploatare apar defecte din manipulare și acționarea acestora. Aceste defecte sunt enumerate și prezentate grafic la descrierea cablurilor.

În **capitolul 2** este prezentat calculul analitic pentru cablul suspendat liber cu o deschidere, acționat de încărcarea verticală uniform distribuită pe toată deschiderea, urmând calculul cablului la variația de temperatură. Pornind de la relațiile din calculul în plan se pot deduce relații și pentru determinarea forței din cablu pentru o încărcare pe două direcții.

De asemenea, a fost studiată și influența rigidității cablului, pentru cazul încărcării cu greutatea proprie, obținându-se întâi forma cablului, iar apoi tangenta cablului cu orizontala și momentul încovoietor pentru arcul de coincidență.

După montarea cablului, se mai aplică o încărcare temporară pe toată deschiderea cablului, rezultând o nouă forță de întindere în cablu. În practică există și cazul încărcării pe o porțiune a deschiderii, cazul punerii în rețea a conductei. S-a făcut astfel, analiza cablului cu încărcare permanentă și încărcarea temporară uniform distribuită pe jumătatea deschiderii.

Tot în capitolul 2 este prezentat cablul flexibil pentru greutatea proprie cu rigiditate finită din încărcarea temporară aplicată pe toată deschiderea respectiv pe jumătatea deschiderii.

În traversările hobanate, cablurile se reazemă la nivele diferite. Calculul eforturilor din cablu este prezentat pentru greutatea proprie, încărcarea temporară și variația din temperatură.

Elementele de cablu se diferențiază de elementele de tip bară prin neliniaritatea geometrică. Aceasta se studiază prin trei moduri, fiecare fiind prezentat în capitolul 2: modulul de elasticitate echivalent al cablului drept, modelarea cablurilor cu element de cablu greu și discretizarea cablurilor în elemente finite dimensionale.

Capitolul 3 prezintă modelarea matematică a calculului nelinier pentru structurile alcătuite din bare și cabluri. Punctul de plecare este stabilirea sistemului de coordonate și mulțimea punctelor din starea inițială. Cu ajutorul tensorului deformațiilor specifice, se pot scrie deformațiile specifice axiale și unghiulare. Conform ecuației constitutive, se pot determina tensiunile unitare, având și matricea de rigiditate a materialului. Calculul detaliat se bazează pe ecuația fundamentală a metodei elementului finit în calculul static nelinier prezentat în același capitol.

Comportarea neliniară a traversărilor suspendate se poate studia scriind ecuațiile de echilibru static pe structura deformată. Ecuația constitutivă și ecuațiile de echilibru static sunt neliniare iar rezolvarea lor se va efectua folosind metode numerice iterative care să asigure exactitatea dorită.

Metodele numerice folosite în calculul neliniar sunt prezentate în **capitolul 4**. De-a lungul timpului au fost dezvoltate mai multe metode numerice pentru rezolvarea problemelor neliniare. În cadrul analizei neliniare se urmărește trasarea curbei caracteristice forță deplasare. Strategiile iterative au anumite caracteristici. Cea mai des folosită strategie, Newton-Raphson, are ca parametru încărcarea constantă și se oprește la atingerea punctului critic. Powell Simons-Bergan-Malestad au ca parametru deplasarea continuă, iar metoda nu se aplică dincolo de punctul unde deplasarea de control este staționară. Metoda Rops-wempner-Cristfield are ca parametru lungimea constantă a arcului și trece peste punctul critic. Powell Simons au conceput o metodă folosește ca parametru lucrul mecanic exterior constant. Chan folosește o tehnică indirectă care trece peste punctul critic având parametru minimul normei deplasărilor neechilibrate. Bergan folosește în tehnica lui, norma minimă a forței neechilibrate care nu depășește punctul critic. Gierhniski și Smith Grave au conceput o tehnică indirectă care trece peste punctul critic, având parametru din iterație răspunsul ponderat constant.

Strategia de monitorizarea a semnelor determinatului matricii rigidității tangente care stabilește când incrementul inițial al încărcării ar schimba semnul este cu succes folosit la studiul arcului. Monitorizarea semnelor incrementului lucrului mecanic sau parametrului curent al rigidității care determină când parametrul inițial de încărcare ar inversa semnul nu a permis rezolvarea dincolo de pasul punct limită al deplasărilor.

Capitolul 5 prezintă analiza comportării traversărilor de conducte și considerațiile avute în vedere la analiza diferitelor sisteme constructive.

Traversările cu conducta suspendată direct pe piloni, poate fi analizată ca un fir flexibil. O atenție sporită trebuie acordată compunerii eforturilor axiale din suspendarea conductei cu eforturile axiale generate de presiunea interioară, și cu efortul rezultat din încovoierea conductei (momentul încovoietor la mijlocul deschiderii). Se poate determina o săgeată optimă care depinde de parametrul „b” determinat conform ecuațiilor prezentate în capitol.

Traversările cu cabluri curbe sunt structuri static nedeterminate. Cea mai importantă necunoscută este tensiunea din fir care se determină prin componenta orizontală a acestora. Pentru efortul din conductă se izolează o substructură din traversare și scriind condițiile de echilibru static. Se determină astfel eforturile pentru starea inițială care, mai apoi, sunt folosite la determinarea eforturilor la aplicarea unei încărcări suplimentare. Având eforturile în structură se pot determina deplasările cablului cu ajutorul cărora se pot calcula eforturile în calculul de ordinul doi.

Traversările cu cabluri drepte sunt structuri la care conducta este o grindă continuă rezemată elastic în dreptul prinderii cablurilor. După o predimensionare a acestora în calculul liniar se poate face analiza comportării neliniare a traversării. În traversările cu cabluri drepte se găsesc și traversările în consolă și traversările suspendate cu un pilon sau doi piloni la care eforturile se determină după ce se stabilesc structurile de bază și se aplică metoda forțelor având ca necunoscute eforturile din cabluri.

Traversările de conducte sunt structuri complexe datorită celor două materiale de construcție folosite și pentru tipurile de elemente care compun structura. Conducta are forma circulară, ceea ce implică un studiu diferit pentru verificarea stabilității. Cablurile au forma geometrică neliniară și comportare neliniară în funcție de nivelul de solicitare axială. Pilonii presupun considerații suplimentare față de stâlpii structurilor civile obișnuite. Cercetările din ultima perioadă au adus modificări normelor de proiectare. Prevederile acestora, care au relevanță în dimensionarea elementelor constructive ale

traversărilor suspendate, sunt dezbătute în **capitolul 6** „Norme și standarde”. Sunt cuprinse: SR-EN 1993-1-11-Proiectarea structurilor cu elemente întinse, SR EN 1993-1-9-Proiectarea structurilor de oțel. Oboseală, SR EN 1993-4-3-Proiectarea structurilor de oțel. Conduce, SR EN 1991-1-4-Acțiuni asupra structurilor. Acțiuni din vânt, SR EN 1993-1-5-Acțiuni asupra structurilor. Acțiuni termice, SR-EN 1991-1-6-Acțiuni pe durata execuției.

Capitolul 7 prezintă analiza numerică a comportării traversărilor suspendate pentru conducte. Sunt prezentate discretizarea structurii traversării suspendate și matricile neliniare de rigiditate ale elementelor finite (bara, cablul și tirantul de susținere). Calculul numeric permite obținerea rezultatelor mult mai rapid și corect. Dificultățile apar la calculul neliniar și ele cresc odată cu deschiderea traversării.

Tot în acest capitol este făcută o documentare privind proiectarea asistată de calculator. Sunt descrise programe de calcul din domeniul construcțiilor, care folosesc metoda elementului finit. În această parte se poate observa dezvoltarea cu rapiditate a acestui domeniu, dezvoltare regăsită prin multitudinea programelor de analiză dar și prin funcțiile pe care acestea le oferă. Începând de la o grafică 3D, programele încearcă să ușureze munca utilizatorului. Datele de intrare conțin module bine structurate care permit deseori folosirea bibliotecilor de materiale și secțiuni transversale. Tipurile de analiză au devenit din ce în ce mai numeroase. Trecerea la tipuri diferite de analiză (liniară - neliniară, neliniară - P- Δ - large displacements) este facilă iar în funcție de opțiunea selectată sunt disponibile modulele cu parametrii folosiți în analiza numerică respectivă. Rezultatele obținute sunt tot mai evidente datorită graficii disponibile. Diagramele de eforturi, forma deformată a structurii și deplasările diferitelor puncte, rotirile nodurilor, energia consumată, distribuția eforturilor și direcțiile acestora pot fi redată atât grafic cât și tabelar. Toate aceste funcții duc la viteza sporită în analize și o mai bună înțelegere a comportării structurale.

Analiza traversării cu două cabluri drepte este efectuată în plan, prin calcul analitic și prin calcul numeric. Calculul numeric a fost realizat cu ajutorul a două programe SAP2000 și SCIA Engineer. Rezultatele obținute se încadrează în intervalul de eroare de 3%, astfel încât se poate spune ca valorile eforturilor din calculul numeric sunt apropiate de rezultatele obținute prin calcul analitic. Forma dorită a traversărilor se obține prin aplicarea forței de pretensionare. Utilizând opțiunile disponibile în cele două programe și descrise în capitolul de mai sus, valorile eforturilor din elementele structurale pentru ambele metode de calcul sunt aproape identice. Comportarea spațială este dificil de analizat prin calcul analitic, dar din similitudinea rezultatelor obținute la calculul planar, se consideră corecte rezultatele obținute prin calcul numeric.

Sunt efectuate analize succesive în care forța de pretensionare ia valori în intervalul 50-100kN. S-a arătat că influența variației asupra forței axiale din conductă este mică. Momentul încovoietor, care are o pondere decisivă în dimensionarea conductei, poate lua valori mult diferite, pentru o variație mică a forței de pretensionare. Perioada proprie de vibrație a cablurilor laterale a fost analizată prin analiza modală cu programul SAP2000 arătându-se combinațiile și valorile predominante ale perioadei de vibrație a cablului lateral. Valorile perioadelor proprii nu se suprapun cu perioada de vibrație a cablului datorată încărcării din vânt.

Analiza traversărilor cu patru cabluri drepte a fost analizată prin calcul analitic și prin calcul numeric. A fost arătată comportarea traversării cu și fără forța de pretensionare, rezultând valori ale eforturilor, în elementele structurale, foarte apropiate. Analiza spațială a fost realizată ținând cont de combinațiile de încărcare. Eforturile în conductă au valori mai mici decât la traversarea cu două cabluri drepte ceea ce permite reducerea dimensiunilor elementelor structurale. Au fost realizate succesiv

analize cu grosimea peretelui conductei cuprinsă în intervalul 5-12mm, pentru care sunt prezentate eforturile și săgeata maximă. Se observă că la traversarea cu patru cabluri drepte consumul de oțel este mai mic cu 48%.

Analiza traversărilor cu cabluri parabolice este prezentată prin rezultate obținute din calcul analitic și calcul numeric cu două programe de calcul pentru o traversare cu deschiderea centrală de 75m. Este descris modul de introducere al datelor pentru obținerea rezultatelor similare cu cele analitice. După corelarea procedurii pentru calculul numeric a fost analizată spațial o traversare cu deschiderea de 160m, unde s-a avut în vedere introducerea combinațiilor de încărcare.

Traversările suspendate sunt sensibile la acțiunea vântului. Pentru observarea răspunsului traversării la acțiuni laterale ale vântului, s-a făcut o analiză dinamică la o variație a vântului obținută de la o stație automată cu traductor ultrasonic. Sunt prezentate variațiile perioadelor proprii de vibrație ale fiecărei traversări analizate anterior pentru următoarele situații de încărcare: permanent, pretensionat, pretensionat și conducta plină. Sunt prezentate diferențele între analiza care ia în considerare masa echivalentă doar din încărcarea permanentă și încărcarea permanentă și cvasipermanentă (umplerea conductei). Pentru traversările cu cabluri drepte diferențele între situațiile de analiză prezentate anterior sunt mici. Traversările cu cabluri parabolice însă prezintă diferențe de până la 76mm în funcție de masa echivalentă considerată și până la 20mm în funcție de situația de încărcare asupra căreia acționează încărcarea laterală.

Pe parcursul construcției unei traversări pot acționa încărcări climatice și tehnologice. Valoarea lor caracteristică se determină în funcție de perioada de revenire considerată. Sunt prezentate formule recomandate în noile norme europene. Montajul traversărilor suspendate cu cabluri parabolice are 5 etape majore prezentate anterior. Etapa de montare a conductei poate fi împărțită în mai multe faze. În teză este prezentat modul de analiză și introducerea datelor la un program de calcul ce permite analiza pe faze de construcție. În funcție de soluția aleasă la montarea conductei, eforturile care apar pot să depășească valorile rezultate la analiza traversării în fază finală. Aceasta se datorează flexibilității și deplasărilor mari pe care le prezintă cablul la forțe concentrate. Sunt prezentate cazul montării conductei, simetric pornind de la mijlocul deschiderii centrale, cazul montării conductei, simetric, pornind de la pilonii traversării, cazul montării conductei începând de la un pilon și cazul montării conductei pe mai multe tronsoane. Eforturile minime au rezultat pentru ultimul caz analizat.

Capitolul 8 prezintă un rezumat al tezei, contribuțiile personale și valorificarea rezultatelor.

În **anexa 1** a tezei este prezentat un calcul pentru determinarea încărcării transversale datorate vântului conform euronormelor. **Anexa 2** enumeră STAS-uri și norme care au relevanță în proiectarea structurilor cu cabluri drepte. **Anexa 3** prezintă calculul analitic al unei traversări cu două cabluri drepte cu luarea în considerare a conductei continue pe reazeme elastice. **Anexa 4** prezintă calculul încărcării din chiciură pe forme circulare. **Anexa 5** prezintă detaliat un program realizat în MathCad, pentru determinarea forțelor într-un cablu și formei cablului în funcție de parametrul ales ca dată de intrare. **Anexa 6** face referire la determinarea eforturilor în conductă și tiranții unei traversări cu cabluri drepte, iar **anexa 7** vine în completare, cu determinarea eforturilor în cablul parabolic, ancoraje și pilon.