GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA

1992/7

44 OLDAL
XLIV. ÉVFOLYAM

Tartalom

Hegesztett rácsos csőszerkezetek optimális méretezése

Dr.Farkas József Dr.Galántai Aurél** Dr.Jármai Károly****

1. Bevezetés

Az optimális méretezés szintézis, amely az analitikai eredmények és gazdaságossági szempontok együttes figyelembevételével lehetővé teszi a szerkezettervező számára, hogy a legalkalmasabb szerkezetvariánst kiválassza és matematikai módszerekkel érjen el súly- és költségmegtakarítást.

Az optimális méretezés objetív alapot ad a szerkezetváltozatok összehasonlítására. Az optimáló program fő részét képezi a szerkezettervezési szakértői rendszereknek.

E tanulmány célja az optimális méretezés alkalmazásának bemutatása egyszerű szerkezetmodellen, a Zhou és Tits (1991) által kifejlesztett új szekvenciális kvadratikus programozási módszer segítségével.

A korszerű gyártástechnológia lehetővé teszi olyan *vékonyfalú szelvények* gyártását, amelyek helyi horpadásra is ki vannak használva és igy jelentős súlycsökkentést eredményeznek. A vékonyfalú szelvények közül főként a zárt kör-, négyzet- és négyszögcsövek alkalmazhatók előnyösen teherviselő szerkezetekben, mert legjobbak a stabilitási tulajdonságaik.

A csőszerkezetek fő alkalmazási területei: tengeri olajfúró állomások szerkezetei, magasépületek vázai, rácsos térlefedő szerkezetek, rácsos hidak, járművázak, oszlopok, tornyok. Különösen a tengeri platformok és az épületvázak tekintetében végeztek az utóbbi időben igen sok kísérleti és elméleti vizsgálatot és ma már korszerű nemzetközi tervezési irányelvek teszik lehetővé a biztonságos méretezést.

A rácsos szerkezetek igen sok típusa tervezhető a legváltozatosabb topológia, geometria, rúdszelvények, csomópontok, anyagkombinációk, gyártástechnológia alkalmazásával. Az alkalmazási terület szerint sokféle terhelés veendő figyelembe, főként a statikus és a váltakozó igénybevétel különböztetendő meg.

A Nemzetközi Hegesztési Intézet (International Institute of Welding - IIW/XV. bizottsága - hegesztés-tervezés- keretében igen aktívan működő XV-E albizottság (csőszerkezetek) kidolgozta a csőszerkezetek tervezési irányelveit. Statikus terhelésű szerkezetekre részletes tervezési szabályokat tartalmaz a *Design Recommendations* (1989), melynek fő részei szerepelnek az *Eurocode 3* (1990) európai acélszerkezeti szabványtervezetben is.

A váltakozó igénybevételű szerkezetekre is állítottak össze tervezési irányelveket (*Recommended fatigue design,* 1985), ezek továbbfejlesztése folyamatban van. A körcsövekből hegesztett szerkezetek csomópontjainak tervezési irányelveit statikus terhelésre a *TÜV Rheinland* kiadásában három nyelven publikálták (Wardenier 1991) és további füzetek megjelentetését tervezik a Csőszerkezetek Nemzetközi Fejlesztési Bizottsága (CIDENT - Comité International pour le Développement et l' Étude de la Construction Tubulaire) szerkesztésében.

Az IIW XV-E albizottság már négy nemzetközi *csőszerkezeti konferenciát* rendezett (Boston 1984, Tokio 1986, Lappeenranta 1989, Delft 1991), de a csőszerkezetek más konferenciákon is jelentős szerepet kapnak, pl. a tengeri szerkezetek (offshore structures) konferenciáin és igen sok tanulmány jelenik meg a szerkezettervezési folyóiratokban (Zhin-walled Structures, Computers and Structures, Journal of Structural Engineering USA, Journal of Constructional Steel Research, Engineering Structures stb.)

Az optimális méretezés során olyan szerkezeti megoldást keresünk, amely minimálja a célfüggvényt és kielégíti a méretezési feltételeket.

Az optimális méretezés három fő fázisa: *1. előkészítés,* analízis, a szerkezetvariánsok megválasztása, a méretezési feltételek és célfüggvény(ek) megfogalmazása; *2. matematikai* korlátozásos függvényminimálás; *3. értékelés*, összehasonlítások, tervezési irányelvek, szakértői rendszerek kidolgozása.

A célfüggvény kifejezheti a költséget, súlyt, térfogatot, keresztmetszet-területet. A súlyminimálás egyszerűbb, mint a költségminimálás, mert a költségtényezők erősen változnak országok és gyárak szerint is. A súlyminimálás volt a kiinduló fázisa az optimális méretezésnek a repülőgépszerkezetek területén. Ma is alapvető szerepe van a súlyminimálásnak, de fontos a költségminimum keresése is a gazdaságosság szempontjából a többi iparágban is. Pl. a hegesztési költségek jelentős szerepet kapnak a bordázott lemezek gazdaságos tervezésénél.

A méretezési feltételek szilárdsági, stabilitási, fáradási, rezgési korlátozások, továbbá gyártási korlátozások, pl. méretkorlátozások, geometriai megkötések.

A rácsos csőszerkezetek optimális méretezésénél több speciális szempontot kell figyelembe venni. Rácsos tartók optimálásánál általában a rudak keresztmetszeti területeit vesszük ismeretleneknek. A csőszerkezeteknél ez nem megfelelő, mert speciális geometriai és méretkorlátozási feltételeket (érvényességi tartományokat) kell kielégíteni, amelyek az egyes szelvényméretekre (átmérő, szélesség, vastagság) vonatkoznak. Ezért a körcsö-

---

*egyetemi tanár, a műszaki tudomány doktora, Miskolci Egyetem, Szállítóberendezések Tanszéke

**egyetemi docens, intézeti igazgató, a matematika tudomány kandidátusa, ME, Matematikai Intézet

***egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa, ME, Szállítóberendezések Tanszéke

veknél az átmérő és vastagság, a négyzetcsöveknél a szélesség és vastagság szerepel ismeretlenként.

A rácsos tartók optimálásának további specialitása, hogy nem célszerű minden rudat más szelvényűre tervezni, mert ez túlságosan bonyolulttá tenné a gyártást. Ezért a szerkezetet olyan blokkokra bontjuk, amelyekben a rudak szelvényei azonosak. Igy csökken az ismeretlenek száma és egyszerűsödik a gyártás.

Az alkalmazandó szelvények gyártott méreteit több szabvány írja elő, legcélszerűbb az ISO 4019 nemzetközi szabványt alkalmazni.

Az optimálás során a szelvényméretek az ismeretlenek, de a rácsos tartó geometriáját illetve topológiáját is lehet optimálni, igy pl. a párhuzamos övü tartók szerkezeti magassága is lehet ismeretlen.

A szelvényméreteket lehet folytonos vagy diszkrét változókként kezelni. E tanulmányban folytonos függvényeket kezelő programozási módszert alkalmazunk. Az így kapott nem kerek ill. nem járatos méretű szelvényeket kerekítés nélkül használjuk pl. összehasonítási célokra, viszont a gyakorlati tervezéshez utólag kerekíteni kell ezeket pl. az ISO 4019 által megadott szelvények szerint. E tanulmányban nem térünk ki a kerekítésre, amely utólagos diszkretizáló programrésszel végezhető el.

2. Az FSQP optimalizálási programcsomag leírása

Az FSQP 2.3. verziószámú FORTRAN nyelven írt programcsomag JIAN L. ZHOU és ANDRE L. TITS (Electrical Engineering Department and Systems Research Center. University of Maryland, College Park, MD 20742) munkája.

Az FSQP (Feasible Sequential Quadratic Programming) v. 2.3. programcsomag olyan egy és többcélú (minimax) programozási feladatok hatékony megoldását teszi lehetővé, amelyekben általános egyenlőtlenség alakú és lineáris egyenlőség alakú feltételek fordulnak elő.

2.1. Az FSQP programcsomaggal megoldható feladatok

Az FSQP programcsomag lényegében két fajta feladat megoldására alkalmas. Az alapfeladat alakja a következő:

$$
\begin{array}{lll}
(P) & \min\limits_{x} \max\limits_{i \in I^f} \{f_i(x)\}. & \\
 & b \le x \le b_u & \\
 & g_j(x) \le 0, & j=1,\ldots\ldots,n_i \\
 & g_j(x) = \langle c_{jnj}, x\rangle - d_{j-nj} \le 0, & j=n_1+1,\ldots\ldots,t_i \\
 & \langle a_j, x\rangle = b_j,\ j=1,\ldots\ldots,l_e. &
\end{array}
$$

ahol $I^f = \{1,\ldots\ldots n_f\}$, $x \in R^n$ megengedett tartomány, $b \in R^n$ alsó korlát, $b_u \in R^n$ felső korlát, $a_j \in R^n$, $b_j \in R$, $j = 1, \ldots\ldots l_e$, az $f_i: R^n \rightarrow R$ $(i = 1,\ldots, n_f)$ célfüggvények simák, a $g_j: R^n \rightarrow R$ $(j = 1, \ldots\ldots, n_i)$ feltételi függvények nemlineárisak és simák, $c_j \in R^n$, $d_j \in R$, $j = 1 \ldots\ldots t_i-n_i$.

A másik feladattípus, amely az FSQP programcsomaggal megoldható, lényegében az első (P) feladat variánsának tekinthető:

$$
\begin{array}{lll}
(PL_{oo}) & \min\limits_{x} \max\limits_{i \in I^f} \{/f_i(x)/\} & \\
 & b \le x \le b_u & \\
 & g_j(x) \le 0, & j=1,\ldots\ldots,n_i \\
 & g_j(x) = \langle c_{jni}, x\rangle - d_{j-ni} \ge 0, & j=n_i+1,\ldots\ldots,t_i \\
 & \langle a_j, x\rangle = b_j,\ j=1,\ldots\ldots,\ e. &
\end{array}
$$

Mint látható itt csak a célfüggvényben van változás. A (P) optimalizálási feladat az f_i célfüggvények maximumát (felső burkolóját) minimalizálja. A (PL_{oo}) feladat pedig tkp. a célfüggvények abszolut értékének maximumát (felső burkolóját) minimalizálja.

2.2. A FSQP eljárás

Az eljárás matematikai alapjait E.R. Panier és A.L. Tits (1989) cikke alapján ismertetjük az előző szakaszban ismertetett feladatnál egyszerűbb

$$
(P) \quad \min f(x)
$$
$$
x \in X = \{x : x \in R^n,\ g_j(x) \le 0,\ j = 1,\ldots,m)
$$

esetre, hol $f: R^n - R$, $g_j(x): R^n - R$ $(j = 1,\ldots\ldots, m)$ sima függvények. Ezt egészítjük ki később azokkal a továbbfejlesztésekkel, amelyek az FSQP v. 2.3. programcsomagban kerültek alkalmazásra. Hesse-mátrixának (H) egy szimmetrikus és pozitív definit becslése az x_k helyen. A szekvenciális kvadratikus programozás egy iterációja ekkor a következő:

Először számítsuk ki a d^o irányvektort a

$$
\min \frac{1}{2} \langle d^o, Hd^o\rangle + \langle \nabla f(x_k), d^o\rangle
$$
$$
g_j(x_k) + \langle \nabla g_j(x_k), d^o\rangle \le 0, \quad j = 1,\ldots\ldots, m
$$

kvadratikus programozási feladat megoldásaként.

Minimalizáljunk a d^o irány mentén.

Olyan x_{k+1} új közelítést keresünk, amelyre teljesül, hogy

$$
x_{k+1} \in X, \qquad f(x_{k+1}) \le f(x_k).
$$

A most vázolt eljárásnak két komoly nehézsége van: az egyik a $g_j(x_k) + \langle \nabla g_j(x_k), d^o\rangle \le 0$, $(j = 1,\ldots\ldots, m)$ feltételek lehetséges inkonzisztenciája, a másik pedig az iránymenti minimalizálás (kilépési feltételeinek) alkalmas megválasztása. Az f a d^o irányában csökkenő az x_k pontban. Előfordulhat azonban az is, hogy d^o nem megengedett irány az x_k pontban, mert az aktív feltételekre $\langle \nabla g_j(x_k), d^o\rangle = 0$ fennállhat. Ha d^o megengedett, de a minimumhely közelében vagyunk, akkor előfordulhat, hogy nem lehetséges egy teljes lépést tenni. Ez az eljárás (szuperlineáris) konvergenciáját rontja le.

A szekvenciális kvadratikus programozás előbbiekben jelzett nehézségeit oldja meg Tits és munkatársainak az FSQP programokban megvalósított eljárása.

Algoritmus

Paraméterek: $\alpha \in (0, 1/2)$, $\beta \in (0, 1)$.

Adatok: $x_0 \in H$, $H_0 \in R^{nxn}$ szimmetrikus és pozitív definit.

0. lépés: Legyen $k = 0$.

1. lépés: A kutatási ív meghatározása.

1. Számítsuk ki a d^o irányt a

$$\min_{d^o} \; < d^o, H_k d^o > + < \nabla f(x_k), d^o >$$

$$g_j(x_k) + < \nabla g_j(x_k), d^o > \in 0, \quad j = 1, \ldots\ldots, m$$

kvadratikus programozási feladat megoldásaként.

Ha $d = 0$, akkor stop.

ii. Legyen $d = d^1 (x_k)$, $p_k = p(d)$ és $d_k = (1-p_k) d + p_k d$

iii. Legyen $d_k = d(x_k, H_k)$.

2. Lépés: Ivmenti kutatás (minimálás). Számítsa ki az első $t_k \in \{1, \beta, \beta^2, \ldots\}$ számot, amelyre teljesül

$$f \{x_k + td_k + t^2 d_k) \leq f(x_k) + \alpha t < \nabla f(x_k), d_k >$$

és

$$g_j (x_k + td^k + t^2 d_k) \leq 0, \quad j = 1, \ldots, m.$$

3. lépés: Update. Számítsuk ki az $L(x, \mu)$ Lagrange-függvény egy új, szimmetrikus és pozitív definit H_{k+1} közelítését. Legyen $x_{k+1} = x_k + td_k + t^2 d_k$ és $k = k+1$ Menjünk az 1. lépésre.

2.3. Az FSQP programcsomag rövid leírása

A programcsomag az előző szakaszban leírt, meglehetősen bonyolult algoritmust valósítja meg számos továbbfejlesztéssel. Ezek közül az alábbiakat kell kiemelni.

Ha az x kiinduló közelítés nem megengedett megoldás, akkor a program generál egy megengedett induló megoldást úgy, hogy minimálja a feltételi függvények maximumát.

Az előző szakaszban az iránymenti keresés olyan Armijo-Goldstein típusú keresés volt, amely az $f(x_{k+1}) \leq f(x_k)$ monoton csökkenést írja elő. Ezt valósítja meg az FSQP-AL nevű eljárás.

Az FSQP-NL nevű eljárás nem monoton típusú iránymenti keresést tesz lehetővé (Grippo-Lampariello-Lucidi féle keresés). Ennek lényege az, hogy a függvény csökkenését legfeljebb négy iterációs lépésen belül írja elő.

Mindkét esetben az eljárás konvergenciája szuperlineáris.

Az FSQP programcsomag a kvadratikus programozási (rész) feladatok megoldására K. Schittkowski QLD nevű kvadratikus programcsomag az FSQPD.FOR és a QLD.FOR programokból áll. A programcsomagot felhasználó program szerkezete (egy programot feltételezve) a következő kell, hogy legyen

PROGRAM Programnév
CALL FSQPDC
END
Célfüggvényeket megadó szubrutin
Feltételek értékeit megadó szubrutin
Célfüggvények gradienseit megadó szubrutin
Feltételi függvények gradienseit megadó szubrutin
Főprogram vége

Az FSQPD rutin automatikusan meghívja a QLD rutint. Az FSQPD programnak van olyan opciója is, amikor a célfüggvények, illetve a feltételi függvények deriváltjait numerikusan számolja. A D betű a dupla pontosságú verzióra utal. Az FSQPD.FOR FORTRAN forrásnyelvű rutin hossza mintegy 2080 sor (77KB), a QLD.FOR eljárás hossza pedig 1170 sor (32 KB). Az FSQPD programcsomatot SUN 4/SPARCstation 1 gépen tesztelték UNIX operációs rendszer alatt.

Az eljárás működik MS-DOS operációs rendszerben a szerényebb teljesítményű IMB PC XT/AT 386 gépeken is az MS FORTRAN 5.0 fordító programmal. A nagy fordítási idő miatt azonban célszerű object fájlokat készíteni az FSQPD.FOR és QLD.FOR programokból és az FL/... főprogram.for FSQPD OBJ QLD.OBJ opciót használni.

(Folytatjuk)