

ELEMENTTIMENETELMÄN ESI- JA JÄLKIKÄSITTELYISTÄ

Esa Hietikko

Rakenteiden Mekaniikka Vol 15
No. 2 1982 s. 1...10

YHTEENVETO: Elementtimallin luomisprosessissa tarvitaan usein välitöntä kommunikointia analyysoijan ja tietokoneen välillä. Artikkelissa käsitellään esi- ja jälkikäsitteilyohjelmistoja elementtimenetelmäanalyyseissä. TSV (tietokoneavusteinen suunnittelu ja valmistus, CAD/CAM) -laitteistojen voimakas lisääntyminen on osaltaan vaikuttanut esi- ja jälkikäsitteilyohjelmistojen käytön kasvamiseen. Tietokonegrafiikan merkitys korostuu voimakkaasti jälkikäsitteilyohjelmistoissa, joiden avulla valtavat määrät tulostuslistauksia muutetaan selkeiksi graafisiksi esityksiksi.

JOHDANTO

Tietokoneavusteisten suunnittelujärjestelmien voimakas kehittyminen viimeisen vuosikymmenen aikana on luonut uusia ulottuvuuksia rakenteiden elementtimenetelmäanalyyseihin.

Tunnetusti monimutkaisten rakenteiden elementtimallin luonti manuaalisesti on hankalaa, aikaa vievää ja virhealtista. Tietokoneen avulla voidaan mallintamisprosessi suorittaa huomattavasti vaivattomammin ja nopeammin. Erityisesti tietokoneen merkitys korostuu silloin, kun käytettävissä on täydellinen vuorovaikutteinen ohjelmisto, joka yhdistää ihmisen ja tietokoneen hyvät ominaisuudet. Elementtimenetelmäanalyyseissä jälkikäsitteilyssä tietokoneen käyttö painottuu lähinnä tietokonegrafiikan puoleen. Jälkikäsitteilyssä vuorovaikutteisyyden merkitys on huomattavasti vähäisempi kuin elementtimallin luonnissa.

Siirtämällä elementtianalyyseissä esi- ja jälkikäsitteilyt tietokoneen huoleksi voidaan saavuttaa huomattavia ajansäästöjä (tilanteesta riippuen 4-...20-kertaisia) ja ennen kaikkea analyyseissä luotettavuus on kertaluokkaa parempi, koska virheiden osuus on ratkaisevasti pienempi kuin manuaalisissa käsitteilyissä.

OHJELMISTOJEN VUOROVAIKUTTEISUUDESTA

Mallin luomisprosessissa tarvitaan usein välitöntä kommunikointia analyysoijan ja tietokoneen välillä. Näyttölaitteet ja keskustelutyypiset ohjel-

mistot ovat tärkeitä sisäänsyötössä. Erikoisesti vuorovaikutteisuus on erittäin tehokas työkalu suunnittelijoille ja analysoijille.

Elementtimenetelmänalyysissä voidaan periaatteessa rajoittaa kolmeen eri vuorovaikutteisuuden asteeseen: eräajo, puolittainen vuorovaikutteisuus ja täydellisen vuorovaikutteisuuden omaava graafinen järjestelmä.

Eräajotyyppeissä ohjelmistoissa vuorovaikutteisuus on hyvin vähäinen ja virhealttius suuri. Syöttö tapahtuu yleensä alfanumeerisesti joko näppäimistön tai reikäkorttien avulla.

Puolivuorovaikutteinen järjestelmä eroaa eräajomuodosta lähinnä siinä, että graafista informaatiota saadaan syötön aikana. Riippuen käytetyistä ohjelmistoista voidaan jo tällaisella järjestelmällä saavuttaa melkoisia ajansäästöjä ja parantaa luotettavuutta elementtimenetelmänalyysissä. Toisaalta laitteistovaatimukset ovat lähes samat kuin eräajomuodossa.

Vuorovaikutteisen graafisen järjestelmän syöttö tapahtuu erikoisen graafisen järjestelmän avulla, jolloin laitteistovaatimukset ovat huomattavasti suuremmat kuin edellä mainituilla. Edelleen vuorovaikutteisen järjestelmän tietokone on yleensä kapasiteetiltaan liian pieni elementtimenetelmänalyysi-ohjelman ajamiseen. Sen vuoksi käytettävissä on myös oltava isompi tietokone analyysiä varten ja joudutaan suorittamaan tiedon siirtoa tietokoneesta toiseen. Usein myös osia esi- ja jälkikäsitteilyohjelmista on delegoitava isommalle tietokoneelle.

Koko analyysin suorittamiseen kuluva aika on graafisessa vuorovaikutteisessa järjestelmässä hieman pienempi kuin puolivuorovaikutteisessa järjestelmässä, mutta tarvittavien lisälaitteistojen määrä on huomattavasti suurempi.

Johtuen graafisten ohjelmistojen standardoinnin puuttumisesta vuorovaikutteiset ohjelmistot ovat yleensä sidottuja yhteen tietokoneeseen ja graafisiin oheislaitteisiin.

Toisaalta graafinen vuorovaikutteinen järjestelmä saattaa olla ns. valmisjärjestelmä (turn key system), johon kuuluvat ohjelmistot kaikkine tarvittavine laitteineen. Tällöin elementtimallintaminen on liitetty osaksi suurempaa suunnittelun ja valmistuksen yhdistävää integroitua järjestelmää.

Tietokonegrafiikan merkitys elementtimallin luonnissa on myös suuri. Vuorovaikutteisessa järjestelmässä malli on yleensä koko ajan näkyvässä kuvaputkella ja kaikki malliin tehdyt muutokset tulevat näkyviin välittömästi. Tällöin voidaan mahdolliset virheet havaita ja korjata välittömästi.

ELEMENTTIVERKON LUOMINEN TIETOKONEEN AVULLA

Yleisimmin on esikäsitteilyohjelmistoissa elementtiverkon luomiseen käytetty kahta erilaista menetelmää. Näitä voidaan nimittää osittavaksi menetelmäksi ja kokoavaksi menetelmäksi. Osittavassa menetelmässä rakenne määritellään pisteiden, viivojen ja osapintojen avulla ja elementtiverkko generoidaan

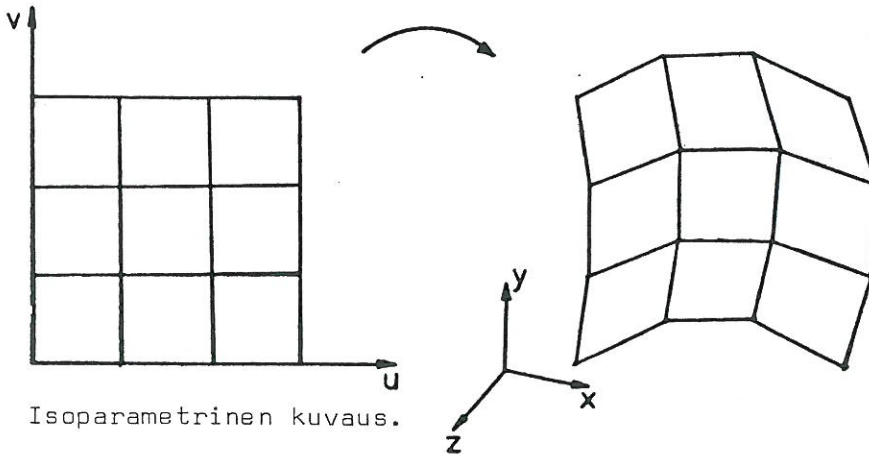
automaattisesti näiden mukaan. Kokoavassa menetelmässä määritellään aluksi rakenteen solmupistejako ja sen jälkeen elementit generoidaan solmupisteiden avulla. Kokoava menetelmä on käytössä lähinnä vuorovaikutteisissa järjestelmissä.

Kokoavassa menetelmässä hankaluutena on usein elementtien generointi, koska se edellyttää solmupistejoukolla varsin tiukkaa säännöllisyyttä. Osittavassa menetelmässä taas verkon tihentäminen tietyissä kohdin saattaa tuottaa hankaluuksia.

Saavutettu ajansäästö on kummassakin menetelmässä keskimäärin sama.

Osittavassa menetelmässä käytössä on yleisimmin lähinnä kaksi algoritmia: isoparametrinen menetelmä ja transfiniitti kuvaus.

Isoparametrisen kuvauksen käyttäminen elementtiverkon generointiin on luonnollinen seuraus käyristetystä elementeistä. Menetelmässä kuvataan idealisoitu neliöverkko todelliseksi verkoksi kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. Isoparametrinen kuvaus.

Isoparametrisessä kuvauksessa alueen reunaviivat on esitettävä Lagrangen polynomien avulla. Solmupisteet sijoitetaan vakiokoordinaattikäyrien leikkauspisteisiin u - ja v -suunnissa. Yhdistämällä solmupisteet käyriä pitkin saadaan nelikulmioelementeistä muodostettu verkko, jonka voidaan edelleen diagonalisoida kolmioelementtiverkoksi.

Ongelmana isoparametrisessä kuvauksessa on se, että rakenteessa, jonka reunoja ei voi kuvata tarkasti Lagrangen polynomeilla esiintyy tiettyä virhettä alkuperäisen ja generoidun rakenteen välillä.

Transfiniitin kuvauksen avulla sen sijaan saadaan approksimoiva pinta, joka toteuttaa todellisen pinnan yhtälön äärettömän monessa pisteessä. Kuvauksella voidaan mallintaa kaikki reunakäyrät, jolloin geometrasta virhettä ei synny.

Yksinkertaisin kuvaus saadaan silloin, kun sovelletaan lineaarista interpolointia kahden reunakäyrän välillä kaavan (1) mukaisesti

$$P(u,v) = (1-v)\psi_1(u) + v\psi_2(u) \quad (1)$$

missä u on normalisoitu parametri, joka kulkee reunakäyriä ψ_1 ja ψ_2 pitkin

ja v normalisoitu koordinaatti, joka saa arvon nolla reunalla ψ_1 ja arvon yksi reunalla ψ_2 ja on siten lineaarinen approksimaatio reunojen välillä.

Jos alue on määritelty neljän reunakäyrän ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 ja ψ_4 avulla, voidaan muodostaa kaksi interpolointifunktiota, joista toinen interpoloi suuntaan u ja toinen suuntaan v

$$\begin{aligned}\bar{P}_1(u,v) &= (1-v)\psi_1(u) + v\psi_2(u) \\ \bar{P}_2(u,v) &= (1-u)\psi_3(v) + u\psi_4(v)\end{aligned}\tag{2}$$

Em. kuvaukset voidaan yhdistää Boolean summaoperaattorin avulla, jolloin saadaan

$$\begin{aligned}\bar{P}(u,v) &= (1-v)\psi_1(u) + v\psi_2(u) + (1-u)\psi_3(v) \\ &+ u\psi_4(v) - (1-u)(1-v)F(0,0) \\ &- (1-u)vF(0,1) - uvF(1,1) \\ &- u(1-v)F(1,0)\end{aligned}\tag{3}$$

missä $F(u,v)$ on kuvatun pinnan yhtälö. Samaan tapaan voitaisiin johtaa transfiniitit kuvaukset kolmen reunakäyrän reunustamalle pinnalle ja pintojen avulla määritetyille volyymikappaleille.

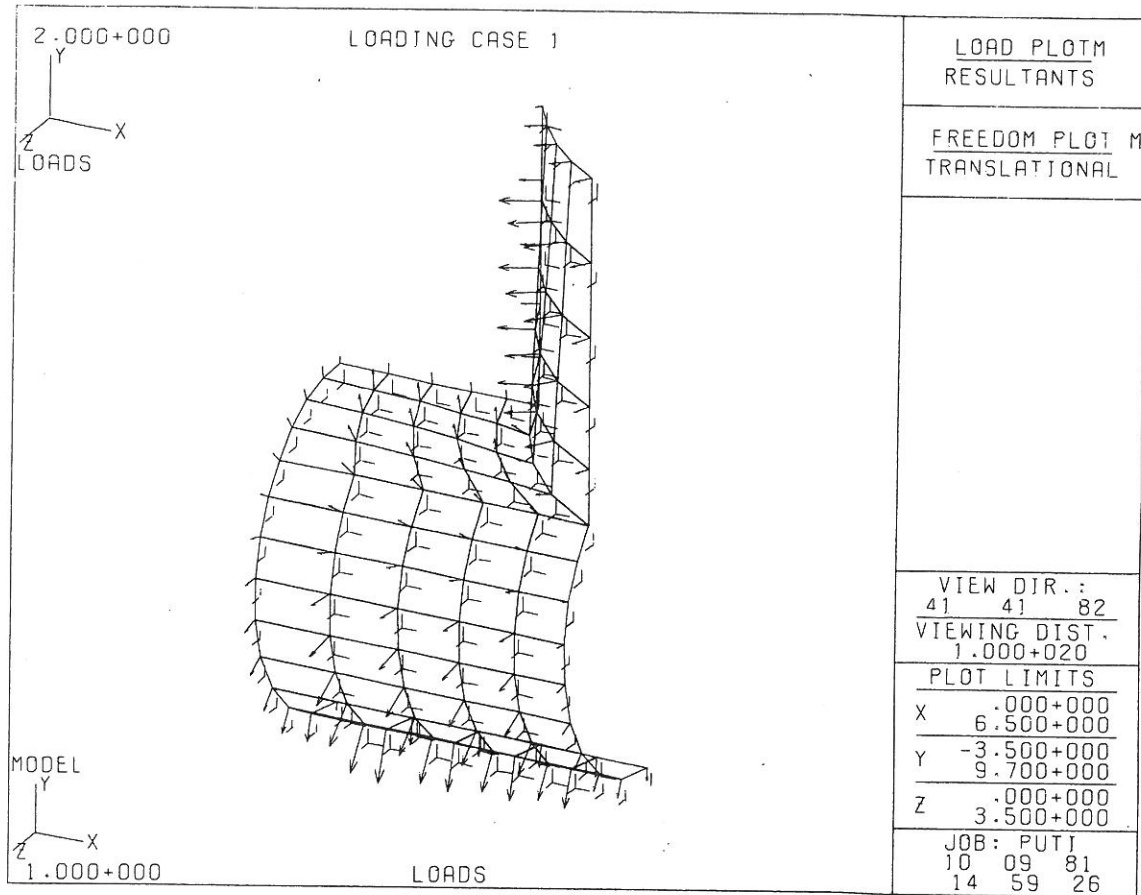
REUNAehtoJEN JA KUORMITUSTEN GENEROINTI

ReunaehtoJen ja kuormitusten generointimahdollisuutta on pidettävä lähes yhtä tärkeänä kuin verkon generointimahdollisuuttakin. Tunnetusti reunaehdoilla on hyvin suuri vaikutus analyysin tuloksiin. Jopa yhden solmupisteen yksi väärä reunaehto saattaa aiheuttaa tuloksiin hyvin suurta heittoa. ReunaehtoJen graafisella tulostuksella voidaan niiden oikeellisuus tarkistaa nopeasti (kuva 2).

Kuormitusten generoinnissa on merkitystä lähinnä pinta- ja tilavuuskuormituksissa. Esimerkiksi useitasatoja elementtejä sisältävän rakenteen keskipätkokuormitusvektorin manuaalinen laskeminen on työn ja tuskan takana.

Yleensä esikäsitteilyohjelmistoihin ei voida sijoittaa algoritmeja, jotka suorittavat ekvivalentin solmupistekuormitusvektorin laskemisen muotofunktioiden avulla. Sen sijaan käytetään staattista tasoitusta. Yksinkertaisilla pinta- ja solidielementeillä staattisella tasoituksella saadaan riittävän tarkka kuormitusvektori. Sen sijaan palkkielementeillä ja korkeamman asteen pinta- ja solidielementeillä olisi suotavaa käyttää elementtien muotofunktioita kuormitusten laskentaan.

Kuormitusten graafisen esityksen merkitys on lähes yhtä tärkeä kuin reunaehdoillakin. Havainnollisin esitys saadaan aikaan piirtämällä kuormituksen



Kuva 2. Putkiyhteen elementtiverkko, painekuormitus ja reunaehdot.

resultanttivektori solmupisteisiin skaalattuna sopivasti (kuva 2).

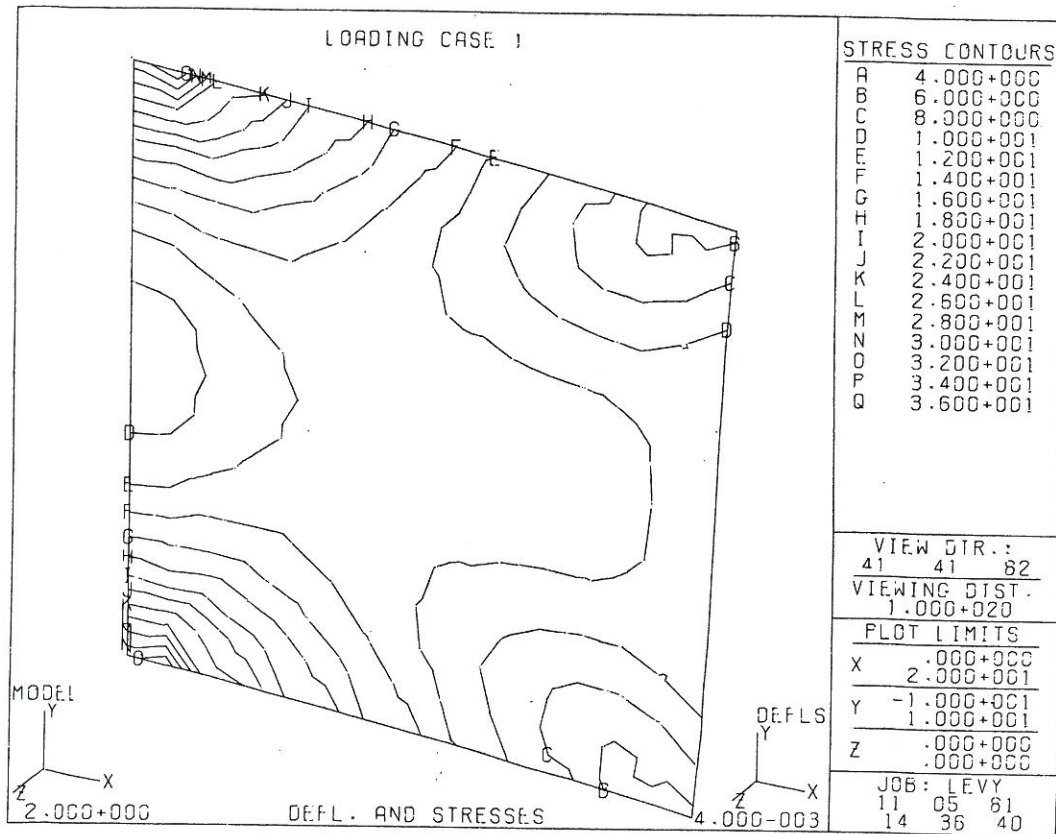
ANALYYSIN JÄLKIKÄSITTELY

Jälkikäsitteilyohjelmistot ovat yleensä lähinnä graafisia ohjelmistoja, joissa vuorovaikutuksen osuus on vähäisempi kuin esikäsitteilyohjelmistoissa. Vuorovaikutteisen graafisen järjestelmän etu painottuukin jälkikäsitteilyissä lähinnä tulostuksen valintamahdollisuuteen ja siihen, että tuloksia voidaan käyttää hyväksi, jos analyysi joudutaan suorittamaan uudelleen.

Normaalisti jälkikäsitteilyohjelmistot tulostavat graafisesti rakenteen muodonmuutokset liioiteltuina siirtyminä. Tämä voidaan toteuttaa varsin yksinkertaisen tietokoneohjelman avulla varsinkin silloin, kun käytetyillä elementeillä ei ole siirtymien derivaattavapausasteita. Käytettäessä palkkielementtejä on ainakin visuaalisesti graafinen esitys enemmän todellisuuteen pohjautuva, jos muodonmuutoskuvaan piirretään palkkien todelliset taipumaviivat.

Siirtymien havainnollisuutta voidaan lisätä piirtämällä pohjaksi alkuperäinen elementtiverkko ilman siirtymiä.

Rakenteen jännitysten tulostaminen graafisesti tapahtuu tavallisimmin pintaelementeillä tasajännityskäyrien muodossa (kuva 3). Palkkielementtien jännitystulostuksessa tulee lisätyötä, koska syöttötietoina on annettava normaali- ja poikkipintasuureiden lisäksi poikkipinnan suurimmat etäisyydet neutraaliakselista. Tarkan taivutusmomenttikuvion määrittäminen tuottaa myös hankaluuksia silloin, kun rakenteella on kenttäkuormituksia. Pelkän taivutusteorian mukaan lasketut jännitykset eivät aina vastaa todellisuutta, sillä esimerkiksi estetystä väännöstä syntyvät lisäjännitykset saattavat olla hyvinkin suuria.



Kuva 3. Levyn vertailujännitykset (VMVEH) tasajännityskäyrien avulla esitettynä.

Volyymikappaleiden kolmiulotteisen jännitystilakentän kuvaaminen kaksiuulotteisella graafisella laitteella ei onnistu suoraan. Yleisimmin käytössä on menetelmä, jossa volyymikappaleeseen annetaan leikkaustaso ja tulostetaan jännitykset siinä tasajännityskäyriin. Tällöin jännitystulostuksessa joudutaan piirtämään useita kuvia ja hankaluuksia saattaa syntyä sopivien leikkaustasojen löytämisessä.

VUOROVAIKUTUSASTEEN VAIKUTUS

Yhden suurimmista hankaluuksista muodostaa kaupallisten ohjelmistojen va-

linnassa niistä olemassaolevan tiedon vähäisyys. Valmistajat ovat yleensä haluttomia lähettämään käyttäjän manuaaleja, sen sijaan kauniita esitteitä löytyy. Esitteistä kuitenkin usein puuttuu juuri se oleellinen tieto, joka saattaisi vaikuttaa ratkaisevasti valintatilanteessa.

Erittäin hyvät yhteenvedot eri elementtimenetelmässä käytetyistä analyysi-, esi- ja jälkikäsitteilyohjelmista ovat esittäneet Fredriksson et al. /15/ /16/, ja se onkin suositeltavaa luettavaa em. ohjelmistojen valintaa harkitseville.

Seuraavassa on vertailtu kahta eri vuorovaikutteisuuden asteen omaavaa ohjelmistoa: GIFTS 1100 ja COMPUTERVISION CADD3 FEM.

GIFTS 1100 on lähinnä puolivuorovaikutteinen esi- ja jälkikäsitteilyohjelmisto, jota ajetaan graafisen päätteen avulla. Toinen vertailuohjelma on COMPUTERVISION valmisjärjestelmään sisältyvä mallintamisohjelmisto.

Kummassakin ohjelmassa syöttö tapahtuu komentomuodossa. Seuraavassa on yhteenvedonomaaisesti esitelty kummankin ohjelman mallintamisominaisuuksia. Kaikkia erityispiirteitä ei tietenkään tällaisen esityksen puitteissa ole mahdollista esittää, mutta tähän on pyritty keräämään tärkeimmät. Elementtityypeistä on esitetty ne elementit, jotka soveltuvat SAP4-analyysiohjelmalle.

GIFTS 1100

Rakenteen geometrian luonti tapahtuu palkkielementeillä kokoavalla menetelmällä ja pinta- ja solidielementillä osittavan menetelmän mukaisesti. Osittavassa menetelmässä sallittuja reunakäyriä ovat suora, ympyränkaari ja polynomi. Elementtiverkkoa voidaan tihentää tietyissä kohdin. Palkkielementeillä voidaan valita jokin 11 poikkipinnasta, jonka poikkipintasuureet lasketaan automaattisesti käyttäjän ilmoittamien dimensioiden mukaan.

Käytettäessä analyysiohjelmaa SAP4 ovat seuraavat elementtityypit sallittuja:

- sauva
- palkki
- levy-, laatta- ja kuorielementit
- pyörähdyssymmetriset elementit
- kuusitahokaselementti.

Kuormituksina voidaan generoida pistekuormien lisäksi pinta- ja tilavuuskuormituksia. Reunaehdot ja kuormitukset saadaan näkyviin myös graafiseen tulostukseen.

Rakenteen kuva saadaan graafiselle päätteelle mallintamisen mielivaltaisessa vaiheessa antamalla piirtokomento. Kuvat voidaan saada myös piirturin avulla.

CV - CADD3 FEM

Rakenteen geometrian kuvaus tapahtuu palkki- ja pintaelementeillä osoitta-

valla menetelmällä ja kokoavaa menetelmää voidaan käyttää minkä tahansa rakenteen geometrian luontiin. Kokoavaa ja osittavaa menetelmää voidaan käyttää myös sekaisin. Pintaelementtien osittavassa menetelmässä voidaan reunakäyrinä käyttää suoraa, ympyränkaarta tai B-spline-käyrää.

Kokoavassa menetelmässä solmupisteitä voidaan luoda yksitellen, siirtämällä joukkoa solmupisteitä, kiertämällä joukkoa solmupisteitä tai peilaamalla. Elementtejä voidaan luoda yksitellen tai generoimalla solmupisteryhmästä.

Käytettäessä analyysiohjelmaa SAP4 ovat seuraavat elementtityypit CV:n varsin laajasta elementtikirjastosta sallittuja:

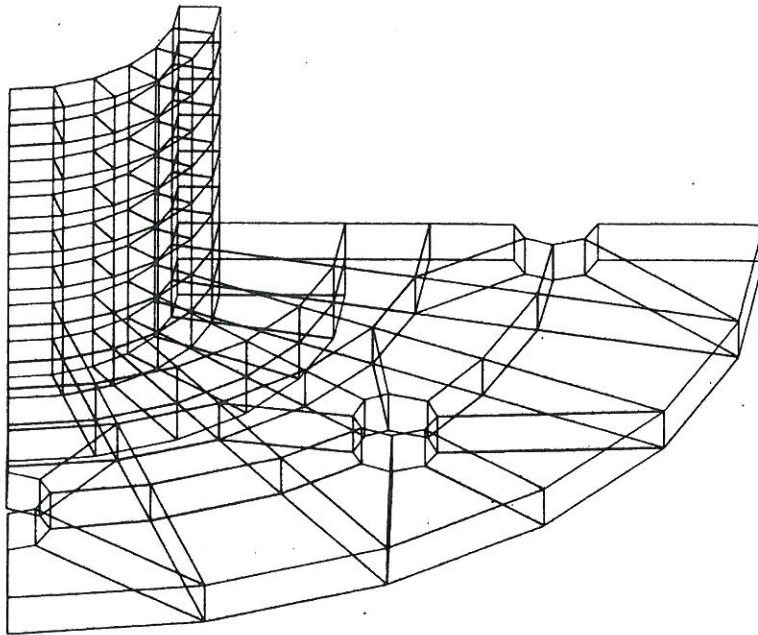
- palkki
- sauva
- levy-, laatta- ja kuorielementti.

Kuormituksia voidaan antaa ainoastaan solmupisteisiin. Kuormitukset näkyvät myös graafisessa tulostuksessa.

Mallin kuva on koko ajan näkyvässä graafisella päätteellä ja kaikki tehdyt muutokset tulevat välittömästi näkyviin.

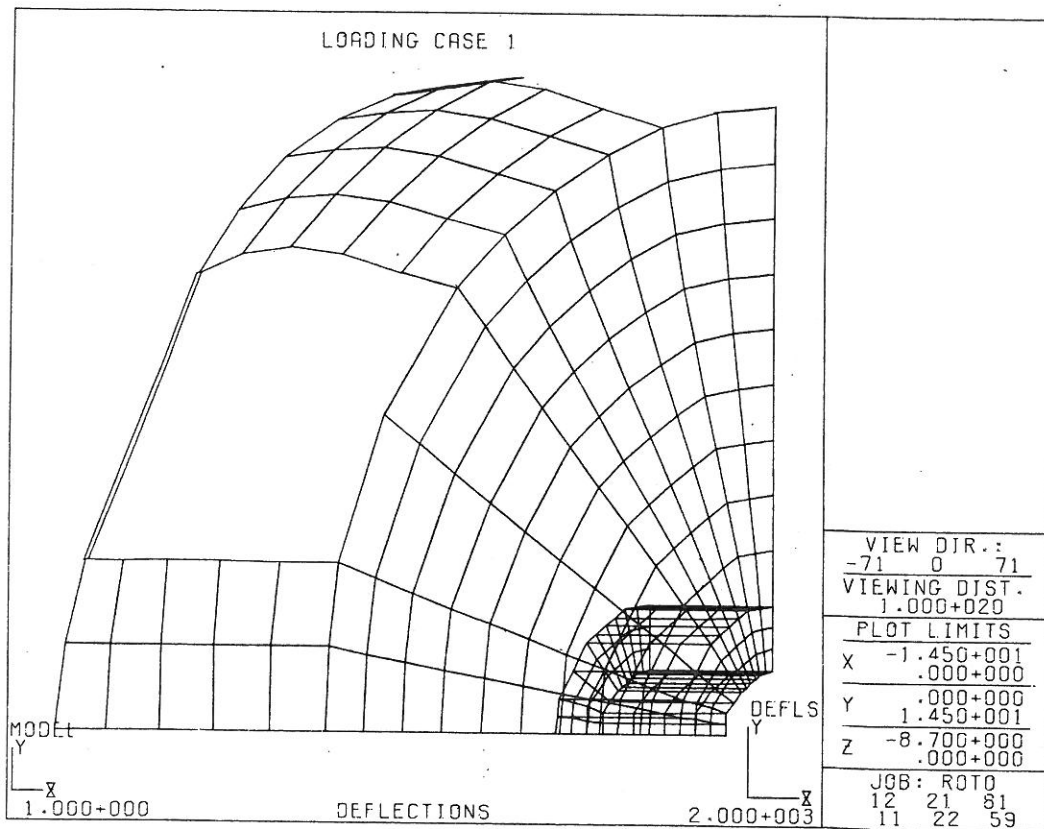
Analyysiajtoa varten käytettävissä on oltava isompi tietokone, koska mallintamisohjelma sisältyy COMPUTERVISION-valmisjärjestelmän grafiikkaan keskittyneeseen tietokoneeseen, jonka kapasiteetti ei riitä esim. SAP4-ohjelmalle tai vastaavalle.

Kuvissa 4 ja 5 on esitetty kaksi esimerkkiä, jotka antavat kuvaa ajansäästöistä. Kuvassa 4 on esitetty kauluslaipan elementtiverkko, jonka luomiseen COMPUTERVISION-järjestelmällä kului aikaa n. puolitoista tuntia. Elementtinä on käytetty yksinkertaista kuusitahokaselementtiä. Kuvassa 5 on esitetty GIFTS-ohjelmiston avulla UNIVAC 1100/22-tietokoneessa mallinnettu roottori,



Kuva 4. Kauluslaipan elementtiverkko.

johon vaikuttaa keskipakokuormitus. Mallintaminen kesti n. tunnin, johon aikaan sisältyy myös kuormitusvektorin generointi.



Kuva 5. Keskipakokuormitetun suurtehohälyttimen roottorin liioitellut muodonmuutokset.

Elementtimenetelmää käyttänyt voi esimerkkien avulla arvioida ajansäästökerrointa. Esimerkkejä ei ole tarkoitettu tarkaksi vertailuanalyysiksi, vaan niiden ainoa päämäärä on antaa summittaista kuvaa esi- ja jälkikäsittelyiden avulla saavutettavista ajansäästöistä. Mallintamiseen käytetty aika riippuu tietenkin voimakkaasti mallintamista suorittavan henkilön valmiudesta suuren vuorovaikutteisuuden takia. Myös tietokoneen kuormitusasteella on vaikutusta asiaan.

LÄHDELUETTELO

- [1] Hietikko, E., Elementtimenetelmässä tarvittava esi- ja jälkikäsittely tietokoneavusteisessa suunnittelujärjestelmässä. Diplomityö. Oulu 1981. 112 s.
- [2] Buck, K.E., von Bodisco, U., Winkler, K., Pre- and postprocessors for finite element programs - requirements and their realization in SUPERNET. Finite Element Congress. Baden-Baden, W-Germany 1978.

- [3] Fredriksson, B., Mackerle, J., Persson, A.B.G., Finite element programs in integrated software for structural mechanics and CAD, Computer Aided Design 13(1981)1, s. 27...39.
- [4] Karjalainen, J.A., Tietokoneavusteisen suunnittelun perusteet. Luentomoniste. Oulu 1981.
- [5] Krouse, J.K., CAD/CAM-bridging the gap from design to production. Machine Design 52(1980)13, s. 117...125.
- [6] Habert, R., Shephard, M.S., Abel, J., Gallagher, R.H., Greenberg, D.P., A general two-dimensional, graphical finite element processor utilizing discrete transfinite mappings. International Journal for Numerical Methods in Engineering 17(1981), s. 1015...1044.
- [7] Singh, S., A computer aided finite element mesh generation system for plane and curved surfaces. Int. Conf. Computer Aided Design. London 1974.
- [8] Brown, B.E., Modelling of solids for three-dimensional finite element analysis. University of Utah, Ph. D. 1977. 112 s.
- [9] Määttänen, M., Elementtimenetelmä. Luentomoniste. Oulu 1978.
- [10] Kamel, H.A., McCabe, M.W., Applications of GIFTS III to structural engineering problems. An International Journal Computers & Structures 7(1976)3, s. 399...415.
- [11] CADD3 finite element modelling, Computervision, TMS-34-39, 1980.
- [12] CADD3 automatic fem generation, Computervision, TMS-39-141, 1980.
- [13] CADD3 graphics operator. Revision 11. Computervision 1980.
- [14] GIFTS 1100. User reference. Sperry Univac 1980, USA.
- [15] Fredriksson, B., Mackerle, J., Structural mechanics finite element computer programs, surveys and availability. Linköping, Sweden 1979.
- [16] Fredriksson, B., Mackerle, J., Structural mechanics pre- and postprocessor programs, surveys and availability, Linköping, Sweden 1979.

Esa Hietikko, dipl.ins., TSV-insinööri Oy