

A BUDAPESTI FÖLDALATTI VASÚT ÚJ TÍPUSÚ ÁLLOMÁSÁNAK MODELLKÍSÉRLETE

FARKAS MIHÁLY, KÖRÖNDI LÁSZLÓ, KRISTÓF LÁSZLÓ, SZITTNER ANTAL,
TOMKA PÁL ÉS VISONTAI JÓZSEF*

(Beérkezett: 1969. okt. 27.)

A BME Acélszerkezetek tanszéke 1966—67-ben széles körű modellkísérleteket végzett a Budapesti Földalatti Vasút új típusú állomásával kapcsolatos elméleti és kiviteli kérdések tisztázása végett. A kísérletek során többféle talaj- és szerkezeti változat esetében megállapították a talajban és az alagútszerkezetben ébredő feszültségeket és igénybevételeket. A vizsgálatok folyamán a mérendő mennyiségek jellegének és nagyságának megfelelően a kísérleti feszültséganalízis módszereinek széles skáláját vonultatták fel. A cikk vázlatosan bemutatja a mérési eredmények alapján a tényleges szerkezetre átszámított igénybevételeket, illetve ezeknek és, a fontosabb talajjellemzőknek a kapcsolatát.

1. Bevezetés

A Budapesti Földalatti Vasút új típusú állomásával kapcsolatos elméleti és kiviteli kérdések tisztázására a BME Acélszerkezetek tanszékén széles körű modellkísérleteket végeztek. A modellkísérletek célja a talajban és az alagútszerkezetben ébredő feszültségek és igénybevételek megállapítása volt. A kísérletek során többféle talaj és szerkezeti változat került vizsgálatra. Jelen ismertetés ezekről a kísérletekről számol be, csupán nagy vonalakban érintve a kiértékelési eredményeket és az azokból levonható következtetéseket. A mérési eredmények feldolgozását, ill. kiértékelését Müller Miklós irányításával az UVATERV végezte el. A számítás néhány eredményének rendelkezésre bocsátásáért szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket.

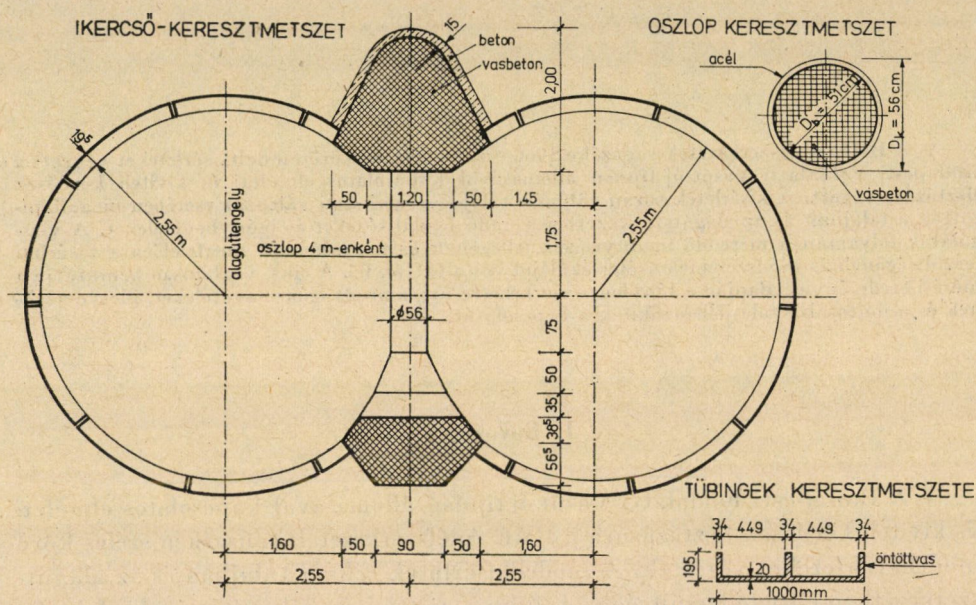
A modellkísérleteket szerzők két különböző súlyú szakaszban hajtották végre. Először optikai feszültségmérés segítségével mintegy előkészítették a kismintakísérleteket; az érdemi kísérletek jórészt ezután, a második fázisban következtek.

A modellkísérletek minden egyes fázisában szerzők a valójában inhomogén, anizotrop talajt rugalmas, homogén és izotrop anyaggal képezték le, amely utóbbi természetesen csak közelítőleg tükrözheti a talaj tényleges viselkedését. A leglényegesebb eltérés az, hogy a modellanyag — a tényleges

* Acélszerkezetek Tanszék, Budapesti Műszaki Egyetem, Műegyetem rakpart 3. Budapest XI.

talajjal ellentétben — húzó- és nyomófeszültség felvételét egyaránt lehetővé tette. A tartószerkezet és a talaj közötti ragasztott kapcsolatban húzófeszültség szintén felléphetett.

Az alagút-tartószerkezet tübingekből épül. A két alagút szelvényének metszésénél a gyűrűs tartószerkezet alul és felül igen erős fej- és talpgerendába fut össze, amelyek négyméterenként oszlopokkal kapcsolódnak egymáshoz.



1. ábra.

A tübingek öntöttvasból, a fej- és talpgerendák vasbetonból, az oszlopok betonnal kitöltött acélsövekből készülnek. A modellkísérletek során vizsgált ikerszelvény elrendezése, főbb méretei az 1. ábrán láthatók. A modellkísérletek különböző fázisaiban lényegében ez a szerkezet került modellezésre. A kísérleti változatok az alábbi jellemzőkben mutattak eltérést:

- a talaj rugalmas tulajdonságai (E , μ , c),
- a talaj terhelése (szimmetrikus, aszimmetrikus),
- a fej- és talpgerenda közötti oszlop csatlakozási módja (befogott, csuklós),
- a tübingekből összeállított gyűrűszerkezet, illetve a gyűrűszerkezet, valamint a fej- és talpgerenda kapcsolatainak kialakítása (folytatólagos, csuklós).

2. Optikai feszültségméréssel végrehajtott kísérletek

E kísérletek során az ikercsőves állomásszelvénnel áttört homogén rugalmas féltér viselkedését vizsgálták. Az alapvető szilárdságtani összefüggések közös érvényessége alapján bizonyítható, hogy a síkbeli alakváltozás állapotában levő talaj és szerkezet modellezhető a síkbeli feszültségi állapotban levő modellel. A vizsgálatok során az alagútszerkezet körüli talajfeszültségek eloszlásának kvalitatív meghatározására fektették a súlyt. Ennek érdekében az alábbi alapvető modellek feszültségállapotát vizsgálták:

a) a homogén rugalmas féltér helyett alkalmazott véges nagyságú tárcsa feszültségeloszlása a többi modellen nyert feszültségekkel való összehasonlítás érdekében;

b) a tervezett ikerszelvénynek megfelelő kivágású rugalmas féltér feszültségállapota, a teherhordó szerkezet beépítése nélkül;

c) a rugalmas féltér feszültségállapota az ikerszelvénynek megfelelő nagyságú, relatíve végtelen merev (tömör acél) kitöltés esetén;

d) a rugalmas féltér feszültségállapota a tényleges alagút-tartószerkezetnek megfelelő modell beépítése esetén. Ez utóbbi modellnek négy változatát vizsgálták:

- folytatólagos gyűrűszerkezet közbenső oszloppal, ill. anélkül,
- a tübingek illesztésének megfelelően kialakított csuklós gyűrűszerkezet közbenső oszloppal, ill. oszlop nélkül.

Az optikai feszültségméréssel végzett kísérletekhez a „talaj”-t optikailag igen jó aktivitással rendelkező ($S = 18,92$ kp/cm. rendszám) Columbia Resin CR 39 típusú allyl-gyantából készítették. A felhasznált tábla rugalmassági jellemzői:

$$E = 24\,800 \text{ kp/cm}^2 \text{ és } \mu = 0,413$$

voltak.

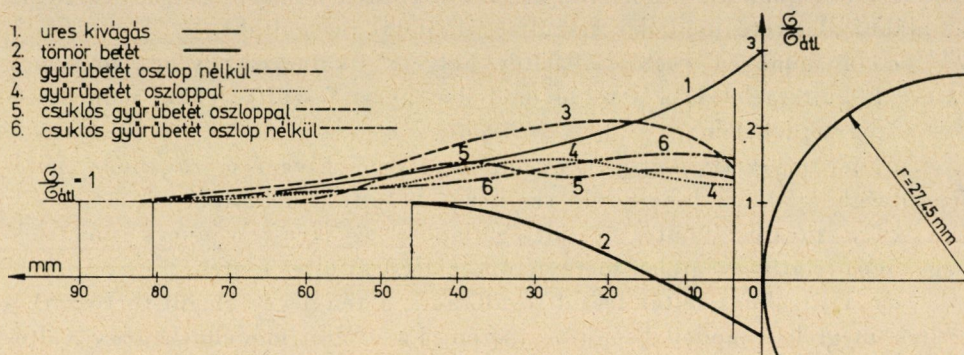
A tartószerkezetet alumíniumból állították elő, figyelembe véve a tényleges szerkezet és a modellszerkezet eltérő rugalmassági tényezőjét. A gyűrűszerkezetet hajlítómerevség-helyesen, az oszlopot nyomó- és hajlítómerevség-helyesen képezték le.

A modell léptéke az egyes változatoknál egymástól eltérő volt; ugyanazt a rugalmas féltér-táblát felhasználva, mindig a beépített szerkezetet változtatták; ez az újabb változatoknál a technológiai és optikai adottságok következtében a szerkezet-modell méretének állandó növelését tette szükségessé. A modell-lépték 1 : 120 és 1 : 100 között változott.

A modell vizsgálata a tanszék szórtfényű optikai feszültségmérő berendezésével történt. A rugalmas féltér felső peremére ható egyenletesen megoszló függőleges terhelést kis kéttámaszú átviteles tartókból álló terhelőrendszerrel és áttételes súlyteherrel hozták létre. A modellt az alsó szélén elhelyezett gumicsíkkal végig egyenletesen támasztották alá. A tiszta nyomásnak kitett műgyanta-lemez síkbeli oldalirányú alakváltozását nem korlátozták.

A kísérletek során szerzők elsősorban arra kívántak választ kapni, hogy a talajfeszültségek szempontjából az alagút okozta zavarás milyen távolságban enyészik el, másrészt pedig a talajban ébredő legnagyobb feszültségeket akarták meghatározni.

E kérdésekre az izoklinák, illetve az izoklinák alapján megszerkesztett főfeszültségi trajektóriák alapján kaptak választ. A gondosan megszerkesztett,



2. ábra.

egyenlő feszültségű pontokból (jelen esetben az egyenletesen terhelt felső kerület) függőleges irányban elindított főfeszültségi trajektóriák ugyanis jó tájékoztatást adnak a főfeszültségek nagyságának relatív mértékére. A függőleges irányú főfeszültségek eloszlása — az alagútszerkezet vízszintes felezővonalának megfelelő metszet mentén — a 2. ábrán látható, minden egyes feszültségábra mellett feltüntetve, hogy melyik kísérleti variációra vonatkozik. Az alagútszelvény közvetlen szomszédságában levő pont feszültségállapotának vizsgálata a szabad kerületű és a tömör acélbetéttel kitöltött kivágású modelleken az izokromata rendszámokkal, a tartószerkezettel merevített modelleken pedig a szerkezet mellé felragasztott 3 mm-es mérőbázisú nyúlásmérő ellenállásokkal történt.

Az optikai feszültségméréssel végrehajtott kísérletek alapján — amelyek jó kvalitatív összehasonlítási lehetőséget biztosítottak az egyes modell-változatok erőjátékára vonatkozóan, s amelyek bizonyos fokig előkísérleteket jelentettek a lényegesen nagyobb terjedelmű kisminta-kísérletekhez — szerzők megállapították, hogy a további kísérletek folyamán elegendő az alagút mellett kb. az alagút-átmérőnek megfelelő szélességű talajsáv leképezése.

3. Kismintán végzett kísérletek

Az optikai feszültségméréssel végzett kísérletek során elsősorban a talajban ébredő feszültségeket, ill. a főfeszültségi trajektóriákat vizsgálták. Ezek a kísérletek nem adtak azonban képet sem a tartószerkezet erőjátékára, sem

az alagútszerkezetben ébredő feszültségek nagyságára vonatkozóan. A kisminta-kísérletek elsőrendű feladata tehát a tartószerkezet erőjátékának vizsgálata volt.

A kisminta-kísérletek során

a) a különböző merevségű talajokban ébredő feszültségeket (a talaj merevségének hatását), valamint

b) a különböző merevségű talajokba ágyazott, egymástól szerkezetileg is eltérő tartószerkezetekben ébredő feszültségeket (az alagútszerkezet statikai rendszerének hatását) állapították meg.

A modellek léptékét a modell jó kialakíthatósága, valamint a megfelelő mérési és modellterhelési módszer biztosítása érdekében, továbbá lényegében a felhasználásra kerülő anyagok kereskedelmi mérete alapján 1:21,8-re vették fel.

3.1. A talaj modellezése és anyagjellemzőinek meghatározása

A kivitelezésre került talajmodellek alapterületét a különböző követelmények mérlegelése után 1 m × 1 m-ben állapították meg.

Tekintettel arra, hogy a vizsgálatok egyik fő célja annak kiderítése volt, hogy a különböző talajfajták esetében hogyan változik a tartószerkezet erőjátéka, szükséges volt a talajmodellek anyagjellemzőinek pontos ismerete. Már a megfelelő modell-anyagokat is csupán az anyagjellemzők birtokában lehetett a kipróbált anyagok közül kiválasztani; ezenkívül a mért nyúlásokból csak ezek segítségével számíthatók ki a feszültségek.

A vékony lemezekből összeragasztott különböző anyagú nyomópróbatestek rugalmassági tényezőjét Schopper-típusú 5 Mp-os szakítógéppen Hottinger gyártmányú, D 32 típusú induktív nyúlásmérővel $l = 40$ mm-es bázison végrehajtott mérések alapján határozták meg. Ez a műszer a két induktív adón kapott eredmény összegezése révén kiejti a külpontossági hibákat. A megfelelő anyagok kiválasztása után a ténylegesen felhasznált modell-anyagoknak azon darabjából készítették el a nyomópróbatesteket, amelyeket az alagútgyűrűk helyén vágtek ki a talajmodellekből.

Szerzők összesen négyfajta talajmodellt készítettek; ezek anyagjellemzőinek tájékoztató értékeit már a munka megkezdése előtt rögzítették. A leglágyabb modell gumiból készült; az 5 mm vastag gumilemezeket Araldit 106 és 953 U szilárdítóból készült ragasztóval, terhelés alatt, sablonban, kb. 50 mm vastag tömbbe (10 réteg) ragasztották össze. Ez a vastagság — a tervbe vett terhelés módját és nagyságát tekintetbe véve — már elég stabilnak mutatkozott. Az összeragasztott tömbön végzett mérések alapján a gumimodell anyagára

$$E_1 = 450 \text{ kp/cm}^2\text{-es rugalmassági tényezőt és}$$

$$\mu = 0,465\text{-es harántkontrakciós tényezőt kaptak.}$$

A harántkontrakciós tényező meghatározása során 0,001 mm-es érzékenyséű mozgatható mechanikus nyúlásmérőt (Pfender-típusú „Setzdehnungsmesser”-t) használtak $l = 40$ mm-es bázissal.

A legkeményebb talajtípust keményített PVC-lemezekből készítették; ezt a modellt négy, egyenként átlagosan 11,5 mm vastag PVC réteg közé helyezett két réteg, kb. 2—2 mm vastag kemény gumilemezből állították elő: így itt is kb. 50 mm vastag tömböt kaptak. A lemezeket — a gumimodellhez hasonlóan — Araldit típusú ragasztóval és szilárdítóval kötötték egymáshoz. A PVC-talajmodellből kivágott első próbatesten (hasáb) nyúlásmérő ellenállásokkal (a tényleges modellre felragasztottakhoz hasonló, EMG 120—20 típusúakkal) hajtották végre a méréseket. Minthogy a mérések során jelentős kúszást tapasztaltak, a méréseket különböző időpontokban megismételték. Az anyagjellemzők azonban ilyen módon sem határozhatók meg egyértelműen.

A kezdetben erős kúszás a teher nagyságától függően $t = 4$ —6 perc után már lényegesen csökken. Ezért mind a próbatesteken végrehajtott anyagjellemző-méréseket, mind a modellszerkezeten később végrehajtott tényleges méréseket úgy végezték el, hogy minden egyes terhelési lépcsőnél 6 perces várakozás után olvasták le a nyúlásértékeket. A kúszás miatt jelentkező erőcsökkenést természetesen minden esetben korrigálták.

A fent leírt mérések alapján a gyengítés nélküli PVC-talajmodell rugalmassági jellemzői a $\sigma = 0$ —10 kp/cm²-es talajfeszültség-tartományban:

$$E_2 = 10700 \text{ kp/cm}^2, \text{ ill. } \mu \simeq 0,470.$$

A közölt anyagjellemzők természetesen mind a gumi, mind pedig a PVC esetében átlagértékek.

Újabb talajtípusoknak megfelelő talajmodellek készítése rendkívül költséges lett volna, ezért a további talajmodelleket szerzők úgy alakították ki, hogy a „talaj”-t lyukasztással gyöngítve, annak fajlagos összenyomódását növelték.

A lyukakkal gyengített PVC-lemezek rugalmassági tényezőjét először a megfelelő lyukrendszerek kiválasztása érdekében kellett meghatározni. A megbízó kívánsága szerint a tömör PVC-modellnél kapott $E \simeq 10\,000$ kp/cm²-es rugalmassági tényezővel szemben az eredeti E -érték kb. 50, ill. 25%-át kellett elérni.

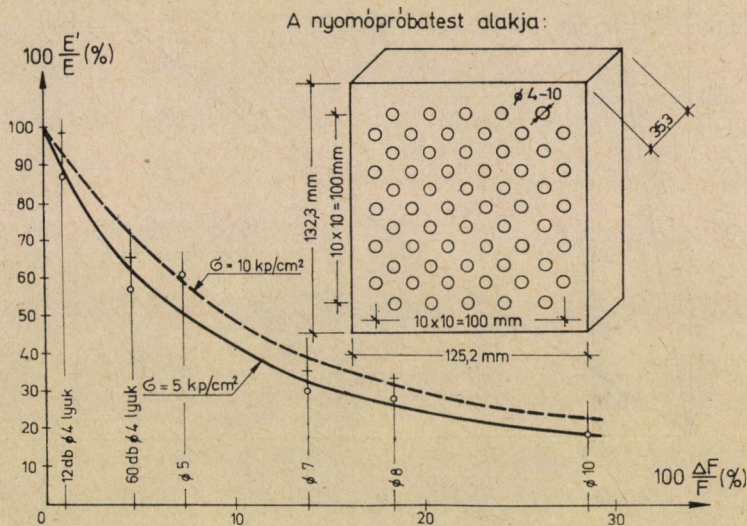
A talajmodell közepéből kivágott, egyre nagyobb lyukakkal ellátott második próbatestet (tárcsát) nyomógépen terhelve, az alakváltozásokat 4 db 0,01 mm érzékenyséű mérőórával mérték, s ez utóbbiak számtani középértékéből számították ki a Δl hosszváltozásokat. E mérések során is 6 perces időközök végén olvastak le. Miután a lyukasztott PVC-modellek anyagjellemzőinek vizsgálata során a Hooke-törvénytől való eltérés erősebben jelentkezett, ezért a rugalmassági tényezőt kétfajta feszültségértéknél ($\sigma = 5$ és 10 kp/cm²) is megállapították. A mérési eredmények alapján felrajzolható görbéknek megfelelően (3. ábra) — amelyek a rugalmassági tényező csökkené-

sét különböző feszültségek mellett a keresztmetszetgyengítés mértékének függvényében adják meg — a tényleges talajmodelleket $4/\sqrt{2}$ cm-es hálóban fúrt $\varnothing 10$ mm-es lyukakkal ($\Delta F/F = 0,0982$), ill. $\sqrt{2}$ cm-es hálóba sűrített $\varnothing 10$ mm-es lyukakkal ($\Delta F/F = 0,3927$) alakították ki. Ily módon két további „talaj”-t kaptak, amelyeknek rugalmassági tényezői:

$$E_3 = 5400 \text{ kp/cm}^2, \text{ ill. } E_4 = 2300 \text{ kp/cm}^2$$

voltak.

A tapasztalat szerint a próbatesten mért rugalmassági tényező erősen függött a próbatest előzetes terhelésétől. Ezért a modell tényleges rugalmas-



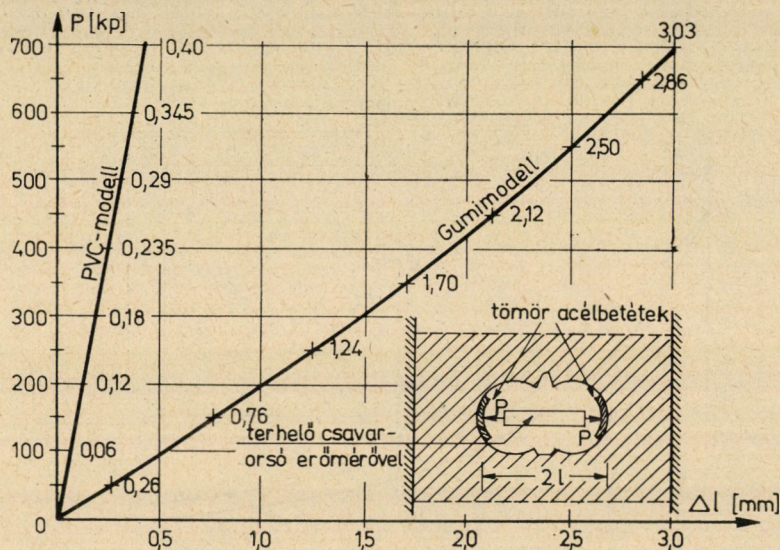
3. ábra.

sági tényezőjét magán a talajmodellen mérték. Ezt a mérést is a már korábban említett nagyérzékenységű mechanikai nyúlásmérővel hajtották végre. Ehhez a lyukasztás nélküli talajmodellre 4 ponton $l = 100$ mm bázisú mérőhelyet jelöltek ki. Az adott terhelési lépcsőkhöz tartozó hosszváltozásokat minden egyes modellen (gyengítés nélküli és gyengített modellek) megmérték. Mint-hogy a gyengítés nélküli modellre vonatkozólag mind a korábbi próbahasábon, mind a próbatárcsán végzett mérések alapján $E = 10\,700 \text{ kp/cm}^2$ -es rugalmassági tényező adódott, ezt az értéket a nyúlásmérés hitelesítési alapjának fogadhatták el. A lyukasztás nélküli és a különböző mértékben lyukasztott modelleken mért nyúlások alapján ezután a lyukasztott modellek rugalmassági tényezői számíthatók voltak. A PVC harántkontrakciós tényezőjének újabb meghatározására nem volt szükség, hiszen a lyukasztás nélküli modellen kapott

$\mu \cong 0,470$ -es érték majdnem elérte az elméletileg lehetséges maximumot. A lyukasztott modellekre tehát a $\mu = 0,5$ -es érték elfogadható volt.

A lyukasztott modelleken már a viszonylag alacsony igénybevételek esetében is jelentkezett kúszás; ennek hatását a kísérletek gyors, ütemszerű végrehajtásával és többszöri megismétlésével igyekeztek kiküszöbölni.

A modellkísérleti eredmények jobb feldolgozhatósága érdekében szerzők olyan méréseket is végeztek, amelyek eredményei alkalmasak az ágyazási



4. ábra.

együtthatók összehasonlítására is. Tekintettel azonban a vizsgált próbatest véges szélességű tárcsa-jellegére, a kapott értékek abszolút mértékként nem fogadhatók el. Az ágyazási együttható-mérést az alagútgyűrűk beragasztása előtt, az alagútszelvénynek megfelelően kivágott talajmodellen végezték el. A vizsgálathoz a talajmodellt a terhelőkeretbe helyezték és oldalfületein megtámasztották. Ezután az ikerszelvény két oldalfalánál kb. 30 mm vastag, teljes talajmodell-szélességű (50 mm), negyedkörív-alakú tömör acél nyomótestet helyeztek el, amelyet egy dinamométerrel összeépített terhelő orsó segítségével több lépésben terheltek. A terhelési lépcsőknek megfelelően 0,02 mm-es nóniuszú tolómérővel mérték a nyomótestek egymástól való eltávolodását, tehát az ágyazat benyomódását. A dinamométert nyomógépben hitelesítették. A mérés elvi módszerét és eredményeit a gumi- és a lyukasztás nélküli PVC-lemezre a 4. ábra szemlélteti.

3.2. *A tartószerkezet modellezése*

A tényleges szerkezetet alkotó tübingek öntöttvasból készülnek, amelynek rugalmassági tényezője az adatszolgáltatás szerint: $E = 10^6$ kp/cm². A modellnél ugyanezt az anyagot — a kiadódó rendkívül kis méretek és a várható anyaghibák miatt — nem lehetett alkalmazni. Alumínium alkalmazására a kis falvastagság miatt megmunkálási okokból szintén nem kerülhetett sor, ezért a tübingekből álló gyűrűszerkezetet a rendelkezésre álló 260 mm átmérőjű öntöttacél csőből esztergályozták ki, amely anyagának rugalmassági tényezője $E = 2,1 \cdot 10^6$ kp/cm² volt. A tübingek leképzésekor a keresztbordákat nem vették figyelembe; ennek megfelelően a modell-tartószerkezetet 2 db hárombordás gyűrűként alakították ki.

Ez utóbbiakon az eltérő E -érték miatt nem lehetett lineáris modellezést alkalmazni. Egyidejűleg felület és inercia szempontjából is helyes leképezés pedig azért nem volt megvalósítható, mert a modell-gyűrűszerkezet méreteinek megállapítása során kötöttséget jelentett az, hogy a tübinggyűrű minimális vastagságát megmunkálási okokból ~ 1 mm-nél kisebbre nem vehették fel és hogy a gyűrűben kialakított középső bordára a nyúlások (ill. feszültségek) megállapítása végett nyúlásmérő ellenállásokat kívántak felragasztani. Ez utóbbi igény miatt a középső bordát viszonylag szélesre (2,5 mm) kellett kialakítani. Minthogy a talaj viselkedése szempontjából az alakváltozások helyessége volt a kívánatos, szerzők az

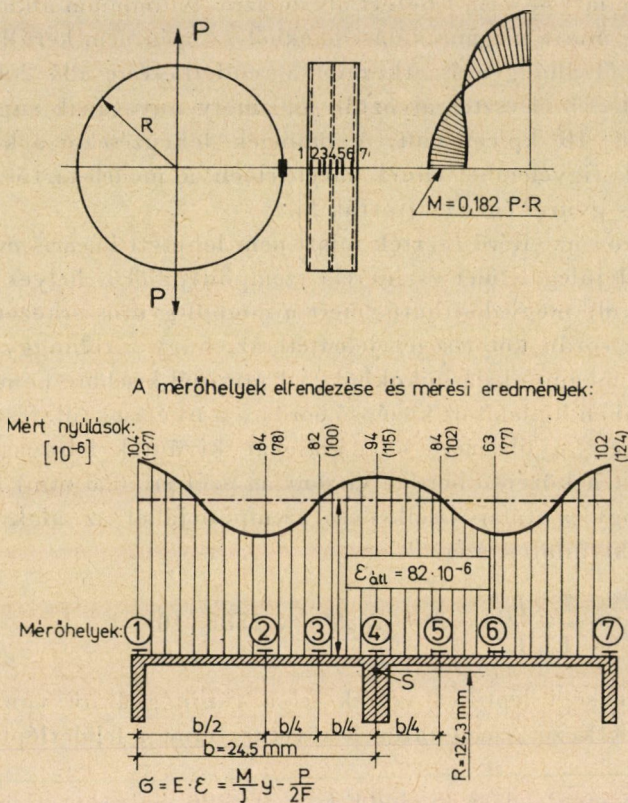
$$\frac{E_{sz} J_{sz}}{E_m J_m} = \lambda^4 = 21,8^4 = 2,2585 \cdot 10^5$$

pontos hajlítómerevségi léptéket vették fel a tübinggyűrűre vonatkozóan. A derékerőkből keletkező kisebb hatások következtében a felületlépték hibája elhanyagolható.

A fentieknek megfelelően kiadódó $J_m = 0,0296$ cm⁴ tehetetlenségi nyomatékú tartószerkezet tényleges merevségét a kész gyűrűn nyúlásmérő ellenállások, illetve Huggenberger gyártmányú „Deformeter” elnevezésű, 10” mérőbázisú mozgatható mérőműszer segítségével végrehajtott feszültség-, illetve alakváltozásméréssel ellenőrizték. Az ellenőrző mérésekből, melyek során a gyűrűket felfüggesztett állapotban koncentrált súlyteherrel terhelték, határozottan kitűnt, hogy az alakváltozásmérés a merevségi értékekre pontosabb és megbízhatóbb eredményt ad, mint a feszültségmérés. Emellett a nyúlásméréskor azt is tapasztalták, hogy a feszültségeloszlás a vékonyfalú gyűrű metszete mentén nem egyenletes (5. ábra). Emiatt a beépítendő gyűrűkre viszonylag nagyszámú nyúlásmérő ellenállást (egy-egy vizsgált keresztmetszetben 2—8 db-ot) ragasztottak fel.

A fej- és talpgerenda rendkívül nagy merevsége miatt szerzők ezeknek csupán alakhelyes leképzésére törekedtek és eltekintettek a vasbeton szer-

kezeti anyag és az alkalmazott öntöttvas modellanyag különböző rugalmassági tényezői miatt kiadódó hatásoktól. Az oszlop modellezésekor a kibetonozott acélső helyett epoxigyantával kiöntött alumíniumcsövet használtak. Ennél a leképezésnél természetesen azt is figyelembe kellett venni, hogy az 5 cm



5. ábra.

vastag modell a valóságban 1,09 m hosszúságú szerkezetet képvisel, a tényleges szerkezetben pedig 4,0 m-re vannak egymástól az oszlopok. Minthogy az oszlopok összenyomódása a derékerőből származik, azok leképezését EF-helyesen oldották meg. Egyidejűleg az oszlop EI hajlítómerevségét megnövelték. Ezáltal a karcsúság, s így a kihajlás elleni biztonság is nagyobb lett; ez utóbbi a már előre tervbe vett túlterhelés miatt kívánatos is volt.

A különböző típusú modeltalajokkal végzett kísérletsorozatok keretében a szerkezetben is végrehajtottak módosításokat: a kísérletek egyes fázisaiban az ikerszelvény közbenső oszlopát csuklósan, ill. befogottan, a tübinggyűrűt pedig folytatólagos, ill. csuklós elrendezéssel alakították ki.

3.3 Modellterhelő berendezés

A terhelőberendezést szerzők a következő szempontoknak megfelelően alakították ki:

- a modell csak fekvő állapotban terhelhető;
- a fekvő modellen fellépő nagy súrlódás kiküszöbölésére a modell alajozott üveglapra fektetendő;
- a talajmodell terhelésekor a terhelőerő fokozatos növelése kb. 10 kp/cm²-es talajfeszültségig biztosítandó, úgy, hogy az a fél modellszélességben eltérő is lehessen (szimmetrikus, ill. aszimmetrikus terhelés);
- a végtelen féltér előállítása érdekében a „talaj”-t oldalirányban meg kell támasztani, egyúttal azonban nem szabad megakadályozni a terhelőerő irányú elmozdulást (összenyomódást).

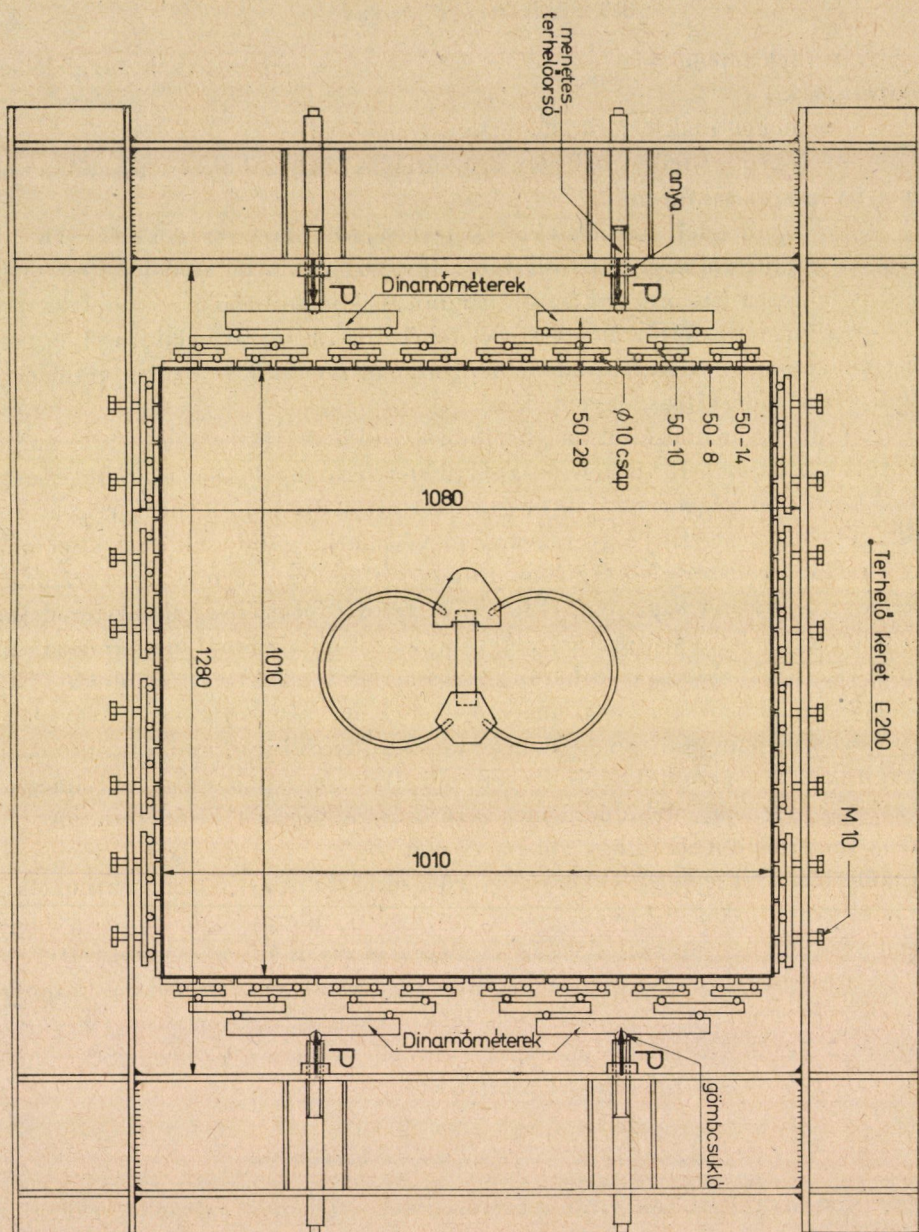
A fenti kívánalmaknak megfelelően összeállított terhelőkeret a 6. ábrán látható. A talajmodell terhelése az U 200-as idomacélokból összehegesztett merev keret két véggerendáján megtámasztott 4 db laposmenetű csavarorsó segítségével történt. Egy-egy csavarorsó végpontja gömbcsuklóval kapcsolódott a terhelőrendszer első tagjához, amely kéttámaszú tartókból összeállított teherelosztó rendszer segítségével lehetővé tette a fél szélességű talajmodellre jutó teher egyenletes szétosztását. A talajmodell oldalirányú megtámasztását szintén csavarokkal szabályozható, görgős alátétekre fektetett elemekkel biztosították. A terhelő és a megtámasztó elemek hosszát úgy választották meg, hogy közöttük minimálisan 2—2 mm távolság maradjon, ami a talajmodell alakváltozását a peremeken is megengedi. Az üveglapon és az oldalmegtámasztásokon fellépő súrlódóerő meghatározására végzett kísérleteik alapján szerzők megállapították, hogy abban az esetben, ha csak az egyik keretgerendán működik a terhelőerő, akkor ez az erő a súrlódás miatt a szemközti orsókig maximálisan 5%-kal csökken. Az egymással szemben levő orsók egyidejű egyenletes terhelése a súrlódási veszteségeket minimálisra csökkentette.

A terhelőerők nagyságának beállítása a terhelő csavarorsókhoz kapcsolódó első kéttámaszú gerendák terheletlen oldalára felragasztott 2—2 db hossz- és 2—2 db keresztirányú nyúlásmérő ellenállás segítségével (teljes hídkapcsolás), előzetes hitelesítés alapján történt.

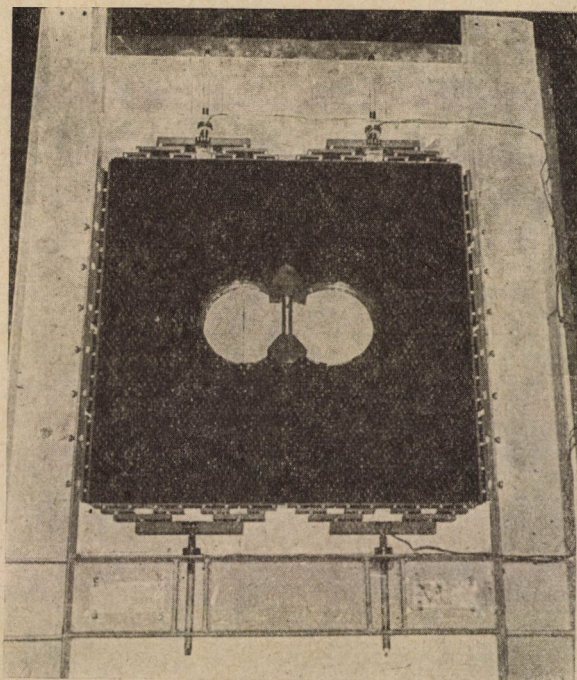
3.4. Mérőműszerek és mérési módszerek

A kismintakísérletek során a tartószerkezet alakváltozásának, valamint a talajban és a szerkezetben ébredő feszültségeknek megállapítása volt a feladat.

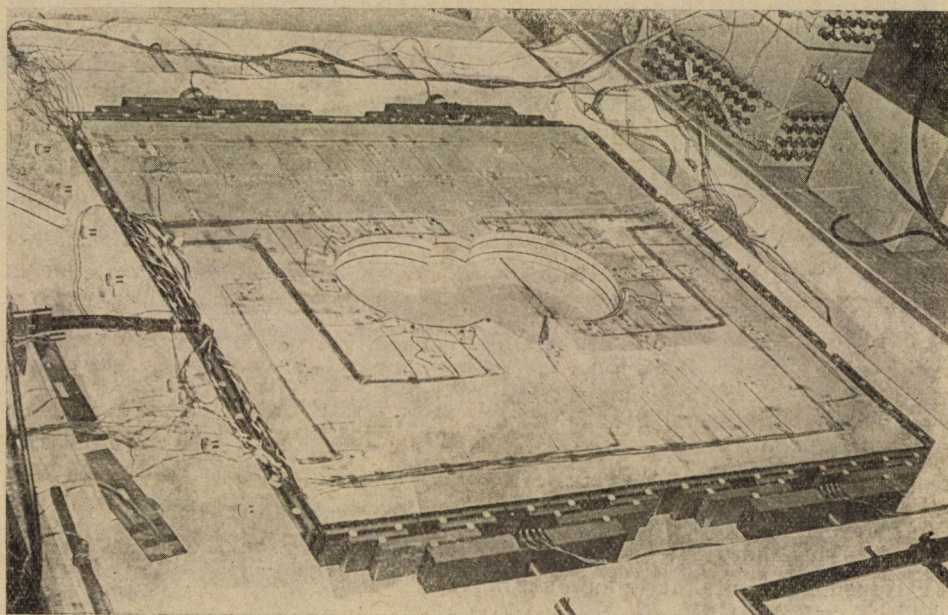
A szerkezet alakváltozásának mérésekor 0,02 mm-es nóniuszbeosztású ellenőrző tolómérőt használtak, úgy, hogy a vizsgált távolságok végpontjain — az alagútszelvény közvetlen környezetében, illetve a tartógyűrűn — egy-egy köralaprájú pontjelölést ragasztottak fel és ezek külső érintőpontjainak távol-



6. ábra.



7. ábra.



8. ábra.

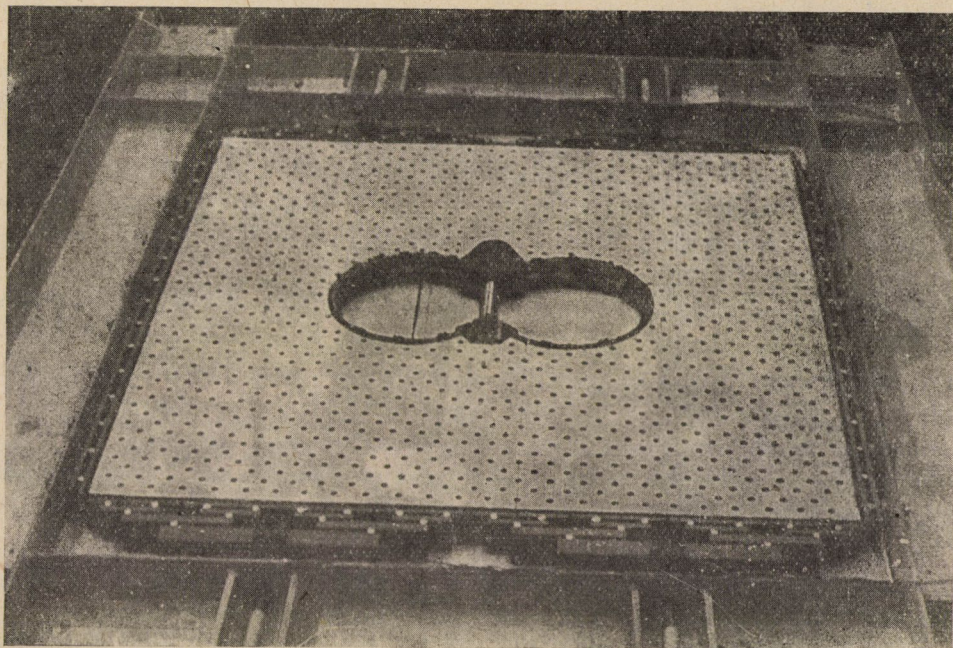
ságát, illetve távolságváltozását mérték. E mérések során figyelemmel kísérték a két gyűrű függőleges átmérőjének, az ikerszelvény vízszintes összméretének és szimmetriatengelyének hosszváltozását, illetve — a legtöbb esetben — a tartógyűrű alakváltozását a függőlegetől kb. 30°-kal eltérő átlókban is.

A talajban fellépő nyúlásokat a különböző talajmodelleken eltérő módszerekkel mérték meg; ezután a rugalmassági tényezők ismeretében kiszámíthatók a feszültségek. A gumimodelleken ($E \cong 450 \text{ kp/cm}^2$) a $\sigma = 10 \text{ kp/cm}^2$ -es feszültség szintén várható $\varepsilon = 2,5\%$ -os talajnyúlás megmérése kis mérőbázis esetében — tekintettel a vizsgált pontok igen nagy számára, és arra, hogy ezekben a pontokban a síkbeli feszültségi állapot meghatározásához 3—3 adat szükséges — csupán az említett mozgatható nyúlásmérővel volt megoldható. 20 mm-es mérőbázis mellett a műszer $\pm 0,5 \text{ mm}$ -es méréstartománya elegendőnek bizonyult. Ez a nyúlásmérő lehetővé tette a feszültségeknek sok ponton és több irányban való meghatározását is. A gumimodelleken összesen 69 pontban végeztek mérést, úgy, hogy minden egyes pontban egy 20 mm élhosszúságú szabályos háromszög $1/16''$ -os golyókkal kijelölt csúcsainak távolságát mérték. A mérőhelyek elrendezése a 7. ábrán jól látható.

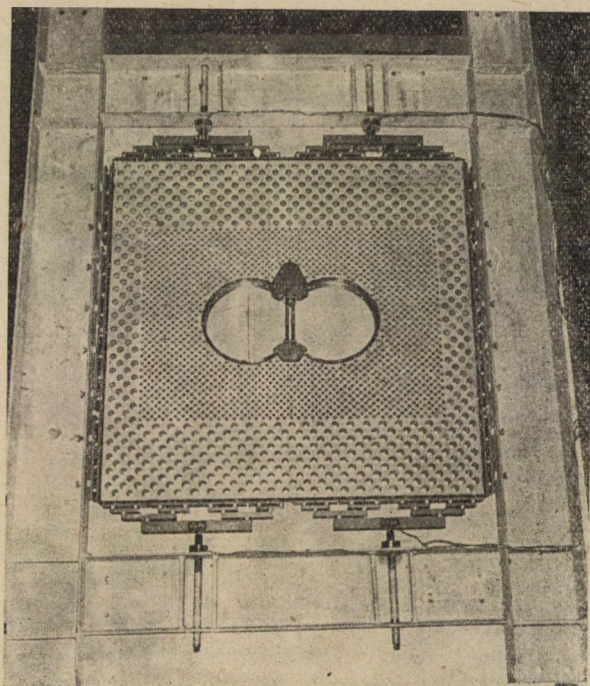
A PVC-ből készült talajmodellek közül szerzők csak a lyukasztás nélküli, gyöngítetlen modellen végeztek nyúlásmérést. Az $E \cong 10\,000 \text{ kp/cm}^2$ mellett $\sigma = 10 \text{ kp/cm}^2$ feszültség szintén kiadódó $\varepsilon \cong 1\%_{00}$ -nyi viszonylagos nyúlás nyúlásmérő ellenállással jól mérhető; mechanikus nyúlásmérővel viszont ilyen kis alakváltozások mérése még aránylag nagy bázis alkalmazása esetén sem oldható meg megfelelő pontossággal. Ezért erre a talajmodellre a 8. ábrán látható módon EMG gyártmányú 120 Ω -os nyúlásmérő ellenállásokat ragasztottak fel. A lyukasztott modelleken csupán a rugalmassági tényező ellenőrzésére végeztek nyúlásmérést néhány pontban Pfender típusú műszerrel, $l = 100 \text{ mm}$ -es bázissal.

A tartógyűrű erőjátékának vizsgálata érdekében az esztergályozással kialakított bordás gyűrű külső és belső felületére — a talajmodellbe való be- ragasztás előtt — nyúlásmérő ellenállásokat ragasztottak fel. A gumiból készült modellen (7. ábra) a gyűrű külső és belső felületén, valamint a befogottan kialakított oszlopokon összesen 55 db 10 mm bázisú EMG ellenállást, a középső borda belső felületén pedig 20 db Huggenberger gyártmányú BP 120—20 ($l = 20 \text{ mm}$) típusú ellenállást helyeztek el. A PVC modelleken összesen 38 db mérőellenállást alkalmaztak (9. és 10. ábra). Itt a gyűrűfelületre valamivel kevesebb ellenállást ragasztottak, ugyanis az egyes tübingkeresztmetszetek mentén jelentkező feszültségváltozásokat ekkor nem mérték, az oszlopra azonban, tekintettel a csuklós és befogott változatra, több mérőelem került.

A nyúlásmérő ellenállásokkal végrehajtott mérésekhez Huggenberger IT1 típusú mérőhidakat alkalmaztak K 24 típusú mérőhelykiegénylőkkel, valamint Hottinger gyártmányú DDM 4 típusú digitális nyúlásmérőt S 24 típusú mérőhelyátkapcsolóval.



9. ábra.



10. ábra.

3.5. A modellek készítése

A talajmodell és a tartószerkezetet képviselő tartógyűrű készítésének kérdése már korábban említésre került. Az öntöttacélból esztergályozott tartógyűrűk merevségének megállapítása után a nyúlásmérő ellenállásokat a még zárt gyűrűkre ragasztották fel, ezután a fej- és talpgerenda befogási helyén megerősített gyűrűket szétvágták, majd az öntöttvasból készült fej- és talpgerendákba Araldit 106-tal beragasztották.

A gumimodellen a befogottan kialakított oszlopot a fej- és talpgerendába besüllyesztve ragasztották be. A PVC-modellen a csuklós, ill. befogott csatlakozást úgy modellezték, hogy az oszlopnak két végén csuklós megtámasztást adtak, illetve a csuklóknál elhelyezett megtámasztólappal és megfelelő betétlapokkal az oszlopot lapokra támaszkodóvá alakították át.

Az összeállított tartószerkezetet a gumival közel azonos rugalmasságú, fenyőolajjal lágyított epoxigyantával ragasztották be mind a gumi-, mind a PVC-„talaj”-ba.

A kész gumimodellt a 7., a lyukasztás nélküli PVC-modelt a 8., a lyukasztott PVC-modelleket pedig a 9. és 10. ábra mutatja.

A 9. ábrán látható, kb. 10%-os felületgyengítésű PVC talajmodell teljes felületén egyenletes kiosztásban készítettek furatokat marógéppel, ill. oszlopos fúrógéppel. A nagymértékben gyengített modell (l. a 10. ábrát, kb. 39%-os gyengítés) kifúrása során az alagútszerkezet környékén a $\varnothing$ 10 mm-es lyukakat sűrítették be ($\sqrt{2}$ cm-es háló), a széleken pedig a lyukátmérőt növelték meg 20 mm-re, a lyukkiosztás megtartása mellett ($4/\sqrt{2}$ cm-es háló). A modell szélein és közepén a fajlagos gyengítés mértéke azonos, a megelőző variánshoz képest pontosan négyszeres.

3.6. Kísérleti program a különböző modelleken

I. Gumimodell: gumi-talaj beépített alagút-tartószerkezet nélkül. Ennek a kísérletnek a célja elsősorban az volt, hogy összehasonlítási alapot teremtsen a megfelelő optikai feszültségmérési, valamint a később, a tartószerkezettel merevített talajmodellel végrehajtott kísérletek között.

II. Gumimodell: a fenti modell beragasztott tartószerkezettel. Ezen a változaton a bordás alagút-tartógyűrű még folytatódólagos volt, a talp- és a fejgerendába be volt fogva, és így teljes körív-hossza mentén, összes keresztmetszetében alkalmas volt derékerők és nyomatékok felvételére is.

III. Gumimodell: az előzőhöz hasonló körülmények között végrehajtott modellkísérlet azzal a különbséggel, hogy a gyűrű és a fej-, ill. talpgerenda kapcsolatánál a bordák átvágásával a tübinggyűrűt gyakorlatilag csuklósan csatlakoztatták a gerendákhoz. Ha a szerkezeten ugyanis valamelyik kereszt-

metszet plasztikus állapotba jut, a megfolyt keresztmetszet a továbbiakban csuklóként viselkedik. Tekintettel arra, hogy a befogások környezetében nyomatéki maximumok alakulnak ki, s ugyanott a szerkezetben a vasbetongerendák és az öntöttvas tübingek csatlakozásánál a csukló kialakulása egyébként is valószínű, az első csuklókat ezen a négy (gyűrűnként két-két) helyen modellezték.

IV. Gumimodell: szerzők ezzel a modellel az egyes öntöttvas tübingelemek között kialakulható csuklós kapcsolatot kívánták modellezni. Ennek érdekében az alagút tartószerkezet bordáit az összes tübingcsatlakozásnál átvágták.

A három utóbbi kísérlet során befogott oszlopot alakítottak ki. A gumimodellekkel végrehajtott kísérletek folyamán fokozatosan növelt szimmetrikus, ill. aszimmetrikus külső terhelést alkalmaztak. A szimmetrikus teher maximális értékén ($P = 2 \times 2500$ kp; $\sigma_{\text{talaj}} = 10$ kp/cm²) sem lépett fel a szerkezetben káros deformáció.

I. PVC-modell: az I. gumimodell megfelelője; az alagútszelvény méreteinek megfelelő kivágású talajmodell, a tartószerkezet beépítése nélkül. A talajfeszültségek megállapításához szükséges nyúlásokat itt nyúlásmérő ellenállásokkal határozták meg.

II. PVC-modell: a II. gumimodell párhuzamos megfelelője. Az alagútszelvénytel gyengített talajszelvénybe beragasztották a csuklós megtámasztású oszloppal merevített tartószerkezetet.

III. PVC-modell: a II. PVC-höz hasonló kísérlet, „befogott” oszloppal. Az oszloplapokra való támaszkodást a csuklók kiiktatásával, a fej-, ill. talpgerenda és az oszlopfaj, ill. oszloptalp közé befestített négy kis betétlappal biztosították.

IV. PVC-modell: kisebb mértékben gyengített ($E \simeq 5400$ kp/cm²) modell, két végén csuklós megtámasztású oszloppal. A megfelelő rugalmassági tényező elérése érdekében a kész PVC-talajmodellt $4/\sqrt{2}$ cm-es hálóban fűrt $\varnothing 10$ mm-es lyukakkal gyengítették; ezzel az azonos erőre jelentkező alakváltozásokat megnövelték. Az így kapott talajmodellen a helyi alakváltozások természetesen már nem voltak mérhetőek.

V. PVC-modell: kisebb mértékben gyengített modell. Az előzőhöz hasonló kísérlet befogott (lapokra támaszkodó) oszloppal.

VI. PVC-modell: erősen gyengített ($E \simeq 2300$ kp/cm²) modell, csuklós oszlopmegtámasztásokkal. A VI. PVC és VII. PVC jelű modellek számára a talaj rugalmassági tényezőjét $\sqrt{2}$ cm-es hálóban fűrt $\varnothing 10$ mm-es lyukrendszerrel csökkentették tovább. Ezen kísérlet során, melyet időrendben utolsóként hajtottak végre, a terhelő erőt 2×2900 kp-ig növelték anélkül, hogy a tartószerkezet tönkrement volna.

VII. PVC-modell: az előzőhöz hasonló kísérlet befogott (lapokra támaszkodó) oszloppal.

A II., IV., V. és VII. jelű PVC modellek néhány jellegzetes pontjában szerzők $l = 100$ mm-es mérőbázison mechanikus nyúlásmérést is végeztek — mint az már korábban is említésre került — elsősorban a rugalmassági tényezők értékének pontosabb meghatározása végett. Minthogy a PVC-modelleken az oszlop csuklós és befogott (lapokra támaszkodó) kialakítása bizonyos deformációkhoz volt kötve, a PVC II—VII. kísérletek során a terhelések legnagyobb részében 2×100 kp-os előterhet alkalmaztak.

A kísérletek néhány főbb jellemzőjét az I. táblázat tartalmazza.

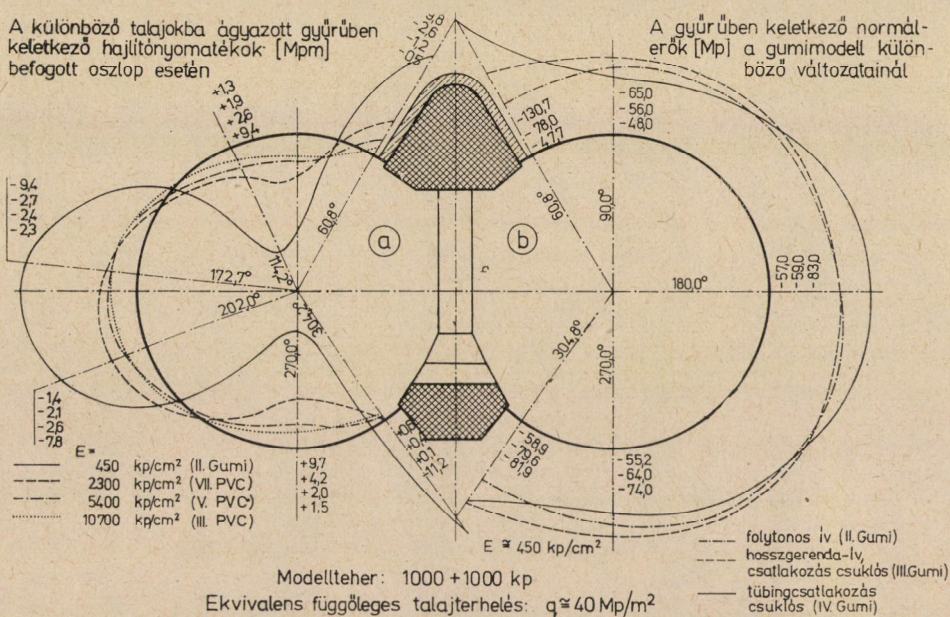
I. táblázat

Modell jele		Rug. tény. E kp/cm ²	Alagút tartószerk. kialakítása	Oszlop	Teher		Nyúlásmérés helye			Alak- változás- mérés helye
					szimm.	aszimm.	talaj	gyű- rűk	osz- lop	
Gumimodellek	I.	450	nincs beépítve	nincs	+	—	+	—	—	talaj
	II.		folytonos gyűrűk	befogott	+	+	+	+	+	gyűrűk
	III.		csuklók a befo- gásoknál		+	+	+	+	+	
	IV.		csuklós gyűrűk		+	+	+	+	+	
PVC modellek	I.	10700	nincs beépítve	nincs	+	—	+	—	—	talaj
	II.		folytonos gyűrűk	csuklós	+	+	+	+	+	gyűrűk
	III.			befogott	+	+	+	+	+	
	IV.	5400		csuklós	+	+	—	+	+	
	V.			befogott	+	+	—	+	+	
	VI.	2300		csuklós	+	+	—	+	+	
	VII.			befogott	+	+	—	+	+	

4. Modellkísérleti eredmények

A modellkísérleti eredmények feldolgozásából szerzők csupán néhány részletet kívánnak bemutatni. A 11—12. ábrákon feltüntetett igénybevételek a mérési eredmények átszámítása alapján a tényleges szerkezetre vonatkoznak.

A 11/a. ábrán a különböző talajokba ágyazott gyűrűszerkezetben ébredő hajlítónyomatékok összehasonlítása látható olyankor, amidőn a gyűrű az oszlopba mereven be van fogva.



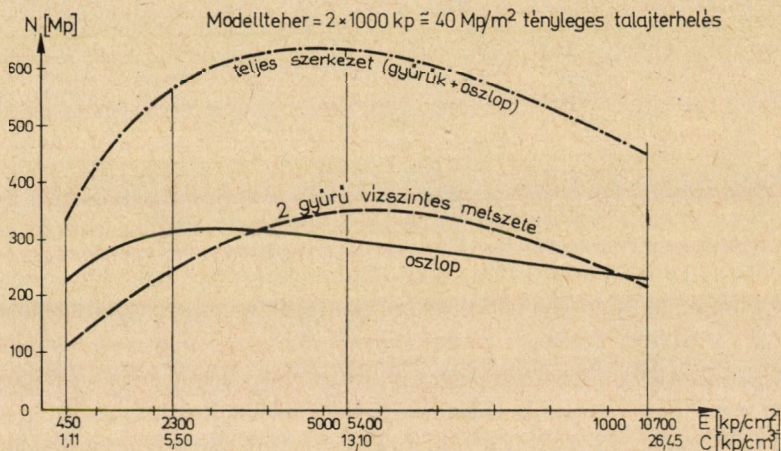
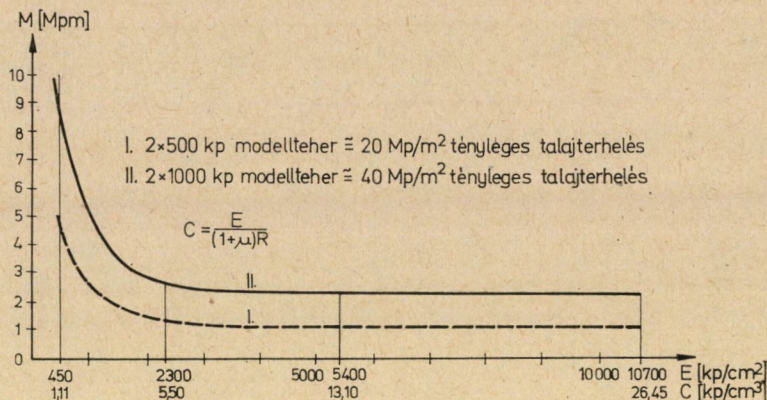
11. ábra.

A 11/b. ábrán bemutatásra kerül, hogy a különböző gumimodell-változatokon (befogott ív, csuklósan csatlakozó ív és csuklós rúdlánc) hogyan alakulnak a gyűrűben ébredő derékerők.

A 12/a. ábrán a gyűrű nyomatékainak összehasonlítása látható a vízszintes metszetben, a talaj rugalmassági tényezőjének és ágyazási együtthatójának függvényében. Az ábrából megállapítható, hogy a nagyobb szilárdságú, kötöttebb talajokban a nyomaték közel exponenciálisan csökken. Ez az eredmény az elméleti megfontolásokkal összhangban van.

A 12/b. ábrán szerzők a különböző talajmodelleken kapott, a gyűrűben és az oszlopban ébredő derékerők változását közlik a talaj rugalmassági tényezőjének és ágyazási együtthatójának függvényében. A kísérletek tanúsága szerint a derékerőnek közbenső szélső értéke van, amely természetesen a szerkezet és a talaj viszonylagos merevségének függvénye.

Model Test on a Station of New Design for the Budapest Subway. The Department of Steel Structures at the Technical University in Budapest in 1967 conducted extensive experiments for clearing up some theoretical and constructional problems in connection with a new design of station on the Budapest Subway. During the experiments the stresses which arose in the soil and tunnel structure have been determined for several types of soil and tunnel structures. For the investigations a number of methods of the experimental stress analysis have been applied in conformity with the nature and magnitude of the values to be measured. On the basis of the results of measurements the stresses reduced to the actual size of structures and their relation to the soil characteristics of major significance are outlined.



12. ábra. a, b

Modellversuche über eine neue Stationsanlage der Budapester Untergrundbahn. Am Lehrstuhl der Stahlkonstruktionen der Budapester Technischen Universität wurden weitreichende Versuche angestellt zur Klärung einiger theoretischer und Ausführungsprobleme im Zusammenhang mit einer neuen Bahnstation der Untergrundbahn in Budapest. Die Untersuchungen der im Boden und in der Tunnelkonstruktion hervorgerufenen Spannungen und Beanspruchungen wurden auf mehrere Boden- und Bauarten erstreckt. Bei der Untersuchung wurden zahlreiche Methoden der Spannungsanalyse durch Versuche, dem Charakter und der Größe der zu messenden Werte entsprechend, angewendet. Aufgrund der Meßwerte werden die auf die natürliche Größe der Konstruktion umgerechneten Beanspruchungen bzw. deren Beziehung zu einigen wichtigeren Bodenkennwerten schematisch vorgeführt.