

FALAZOTT BOLTÍVEK HAGYOMÁNYOS ELMÉLETE

PECK TIBORNÉ*

A falazott boltívek és boltozatok jelentős csoportját képezik történeti tartószerkezeteinknek. Jelen cikk áttekintést ad a falazott ívek elméletének történetéről, melyet az építési mechanika történetébe ágyazva mutat be.

A történeti korok tervezési módszerei főként empirikus szabályokon alapultak. A statika alapelveinek kidolgozása után, a 17. századtól kezdtek ívek tudományos vizsgálatával foglalkozni. Kezdetben a kutatók érdeklődése csak az ív alakjára irányult, sem az elemek közt, sem a támaszoknál fellépő erőket nem számították. Később, miután felismerték, hogy az ív stabilitása főként a megtámasztó szerkezettől függ, a vízszintes támaszerő értékének meghatározása vált a legfőbb törekvéssé. A 19. század kutatói az elmélet további, apróbb részleteit dolgozták ki.

A falazott ívek hagyományos elmélete a 18. század folyamán fejlődött ki. A klasszikus elmélet a szerkezetet egyensúlyi feltételek alapján, a nyomásvonal eszközével ellenőrzi. Az ív geometriájának döntő fontosságot tulajdonít, a szerkezeti anyag és a terhelés másodlagos jelentőségű.

A mai kutatás időszerűségét múltunk megismerése mellett történeti szerkezeteink védelmének igénye adja.

Kulcsszavak: falazott boltív, mechanikatörténet, ívek elmélete

1. BEVEZETÉS

A falazott boltívek mechanikai működéséről, a boltkövek közt lejátszódó erőjárástól ma már sok ismeretünk van. A középkortól napjainkig számos kutató foglalkozott ezzel a mechanikai problémával. A 18. század végére kifejlődött az a hagyományos elméletnek nevezhető tudásanyag, mely a mérnöki tervezés igényeinek megfelelt. Maradtak azonban nyitott kérdések, melyeket ma sokan próbálnak megválaszolni, főként a klasszikus elméletet alapul véve, felhasználva a modern számítási módszereket. Mit jelent a boltívek hagyományos elmélete, hogyan fejlőd-

* Okleveles építészmérnök. BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék. 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. Tel.: 463 1233; e-mail: macskasi.sil@silver.szt.bme.hu

dött ki ez a tudás, hol a helye az építési mechanika kialakulásában? Jelen cikk ezekre a kérdésekre kíván válaszolni.

A boltívek kutatástörténete fontos helyet foglal el az építési mechanika fejlődésében, hiszen a nyomott falak, oszlopok és a hajlított tartók mellett ez volt a történelmi korok harmadik fő tartószerkezeti típusa. A boltívek elméletének alakulását ezért a mechanika fejlődésének történetébe helyezve mutatjuk be.

Néhány korábbi előzmény után, szűk két évszázadon át, sok kutató kisebb-nagyobb lépéseivel, lassan alakult ki a falazott ívek elmélete. Néha téves eredményeket adtak tovább, ezeket mások később kijavították. Néha a felismerések nyilvánosságra sem kerültek, máskor igen furcsa, közvetett úton terjedtek az eredmények. Nem volt ritka, hogy bizonyos eredményeket több évtizeddel később más is sajátjának tekintett. Az akkori információáramlás, a tudományos élet területén is rendkívül lassú volt. A mechanikával, és így a boltív elméletével foglalkozó tudósok sokáig fizikusok, matematikusok voltak, akik egymás eredményeit csak levelezés útján ismerték meg. A 17. század elején egy francia szerzetes, Mersenne célul tűzte ki a tudományos eredmények összegyűjtését és közzétételét, ezért kiterjedt levelezést folytatott kora természettudósaival. Az első tudományos társaságok a század második felében alakultak (Royal Society 1660, Académie des Sciences 1666), és ekkor jelentek meg az első szakfolyóiratok is (Philosophical Transactions 1665, Journal des Savants 1665, Acta Eruditorum 1682).

Jelen cikk egy – a falazott boltívvel foglalkozó – készülő PhD disszertáció első, történelmi részét tartalmazza. A cikk fejezetei a boltívek elemeinek és mechanikai működésének vázlatos ismertetése után az egyes korok ‘szerkezettervezési’ módszereit, az elméleti tudósok eredményeit, a falazott boltívek működésére vonatkozó felismeréseket mutatják be a 19. század végéig.

A felhasznált források közül vannak átfogó, a történelmi korok építésének elméletét és gyakorlatát is felölelő munkák, melyek a cikk szinte minden fejezetéhez tartalmaznak anyagot [1], [2], [3]. Másik csoportba tartoznak azok a könyvek, amelyek az építményeket akár időrendi, akár tartószerkezeti rendszerük szerinti csoportosításban, de főként szerkezeti szempontból tárgyalják [4], [5], [6], [7], [8]. Ezek a források is annyira átfogó jellegűek, hogy külön hivatkozásként nincsenek feltüntetve a cikkben. A többi helyen a szövegben, illetve a fejezet címénél jelöltük meg a forrásokat.

1.1. BOLTÍVEK, BOLTOZATOK ELŐFORDULÁSA

A boltívek elemzésekor szinte lehetetlen elhatárolódni a térbeli boltozott szerkezetek vizsgálatától. Erőjátékuk azonos elven alapul, kialakulásuk egy időben történt. Az elméleti tudósok az ívet vizsgálták, akkor is, mikor kupolákkal foglalkoztak, hiszen a térbeli szerkezet felbontható síkbeli ívekre. Íveket legtöbbször

nyílások áthidalására, természeti akadályok leküzdésére, boltozatokat belső terek lefedésére építettek. Az első igazi boltívek megjelenése a Kr. e. 3–2. évezred fordulójára tehető.

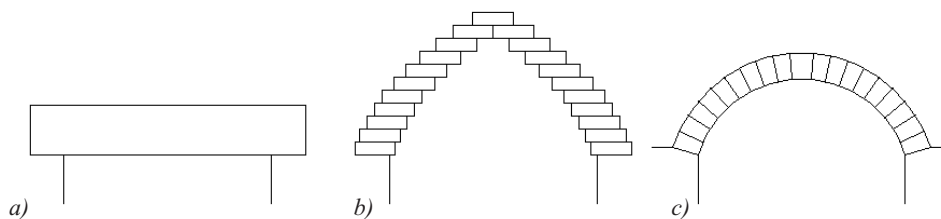
Az épületekben áthidalt falnyílások általában kis fesztávúak, építésük ritkán jelent szerkezeti problémát. Boltívek sorából épülnek fel a térbeli boltozatok is, egyes boltozattípusokon (hevederes donga, bordás keresztboltozat) hangsúlyosan ki is emelkednek az ívek bizonyos helyeken. Nagyobb kupolák rejtetten maradó szerkezete is gyakran tartalmaz boltíveket. A falazott ívek építésének igazi, mérnöki területe a hidépítés volt. A Krisztus előtti századokból származó 10 méternél kisebb fesztávú hidaktól évszázadok során jutottak el a 40–60 m támaszközű középkori hidakig. A fesztáv növekedése mellett a pillérek mérete is fokozatosan csökkent. Az ívek alkalmazásának szűkebb mérnöki területe volt a gátépítés. A sziklafalak közé épített vízszintes helyzetű dongák gazdaságosan, nyomóerőkkel veszik fel a víztömeg nyomását.

Térbeli boltozatokkal kezdetben sírépítményeket és alárendelt funkciójú helyiségeket, raktárakat, valamint mérnöki létesítményeket, vízvezetékeket, csatornákat fedtek. A római kortól aknázták csak ki a boltozásban rejlő téralakítási lehetőségeket, ekkor thermák, basilicák, később templomok stb. lefedésére is alkalmazták. A középkortól a hosszhajós és centrális kialakítású templomokban egyaránt használtak boltozatokat, később pedig palotákban, lakóházakban és egyéb világi funkciójú épületekben is egyre gyakoribb szerkezetté vált.

1.2. A BOLTÍV ELŐKÉPE – AZ ÁLBOLTÍV

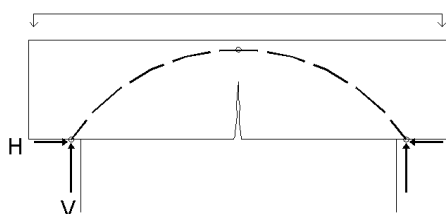
Kőből háromféle áthidaló szerkezet építhető: kőgerenda, álboltív és igazi boltív (1. ábra). Az áthidalható fesztáv és megjelenésük ideje is ezt a sorrendet követi.

Az egyszerű kőlapos áthidalások fesztávja az anyag húzószilárdságának csekély volta miatt erősen korlátozott, ezért nagy terek lefedését csak sűrűn elhelyezett oszlopokkal tudták megoldani. A hajlított kőgerenda viselkedése azonban közel sem annyira kedvezőtlen, mint ahogy az a gerendaelméletből következik. A



1. ábra. Kőből épített áthidalók. a) Gerenda. b) Álboltív. c) Boltív

szerkezet nagy mérete és térfogatsúlya miatt ugyanis a támaszoknál olyan nagy függőleges erők adódnak át, melyek képesek a gerenda és alátámasztása között megfelelő súrlódást biztosítani. A kőgerendák aljának húzófeszültségek okozta megrepedése után boltívszerű viselkedés valósul meg (2. ábra). Klasszikus görög dór templomokat vizsgálva többen végeztek ezt igazoló számításokat. A szokásos oszloptávolság és gerendamagasság arány mellett az ívszerű viselkedéshez szükséges oldalnyomást éppen biztosítani tudja az oszlop és gerenda közti súrlódás [13]. A számított oldalnyomásból a szélső oszlop alsó keresztmetszetében még éppen magidomon belüli dőléspont származik [14].



2. ábra. Kőgerendás szerkezet erőjátéka

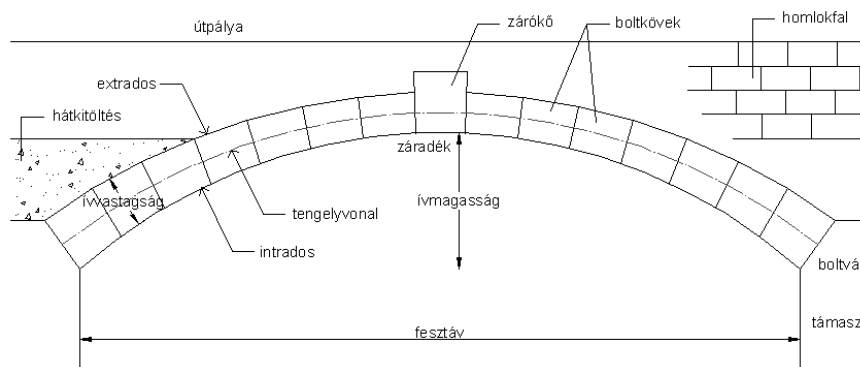
Álboltozatokat szinte minden földrészen, minden jelentős kultúrában építettek, ismertek Elő-Ázsia, Egyiptom, India, Amerika területéről ilyen emlékek éppúgy, mint az ősi Európa, Mykéne és Etrúria vidékéről. Az álboltozat egymás fölé helyezett, konzolosan kinyújtott vízszintes falazati sorokból áll. Az egyes elemek előre nyújtásának mértékét az határozza meg, hogy minden fugában a felette elhelyezkedő elemek súlypontja a csatlakozó felületen belül maradjon. Azonos méretű kőelemek esetén matematikailag könnyen leírható az álboltív görbéje. A kő anyagjellemzőinek figyelembevétel nélkül elvileg végtelen nagy fesztávú boltív építhető, természetesen az ehhez tartozó igen nagy magassággal. Amennyiben a kőlapok csatlakozó felületein éppen határfeszültség lép fel, számítható a szerkezet maximális mérete, mely a kő térfogatsúlyának és határfeszültségének függvénye. A szerkezeti tudást mutatja, hogy a nagyobb fesztávú álboltozatok geometriája, pl. Atreusz kincsesházának alakja, jól közelíti ezt a számított görbét [13].

Az alaki hasonlóság ellenére statikai működés szempontjából éles határvonalat szokás húzni az álboltívek és igazi boltívek közé, az előbbiek konzolos gerenda-szerű, utóbbiak ívszerű viselkedése miatt. Valójában az álboltív nem áll olyan messze az igazi boltívtől. Ha nagy az elemek, illetve a felettük levő szerkezet súlya, akkor az álboltív a vízszintes fugákban súrlódással fel tudja venni a vízszintes erőt és bizonyos mértékben boltívként működhet.

A súlycsökkentés azonban megköveteli az igazi boltívet.

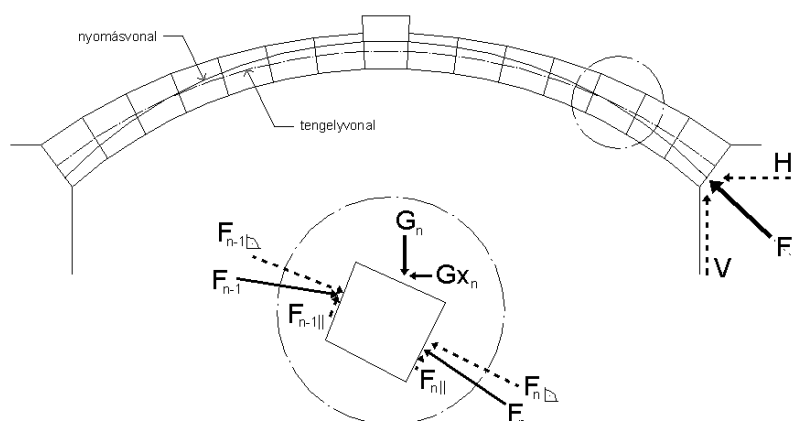
1.3. A BOLTÍV ELEMEI, ERŐJÁTÉKA

A boltívet alkotó boltkövek ívelt tengelyt követve helyezkednek el a boltvállak között (3. ábra). A boltív építése a kellő erősségű támaszok építésével kezdődik. Az ívet általában zsaluzaton építik, a boltvállaktól két oldalról elkezdve. Az ív az utolsó elem, a zárókő elhelyezése után válik önhordóvá, ezután távolítható el a zsaluzat. A zárókő gyakran nagyobb méretű, díszesebb kialakítású, bár statikai szempontból ennek ellenkezője lenne indokolt. A boltkövek alsó síkját intradosnak, felső síkját extradostnak nevezik, e két vonaltól egyenlő távolságra halad az ív tengelyvonala vagy középvonala.



3. ábra. A falazott boltív elemei

A szerkezet az íves formát követve vezeti le a terheket a zárókőtől a vállakig. Az út, melyet az erők terjedése határoz meg, a nyomásvonal (4. ábra), mely a legtöbb esetben nem egyezik meg a boltív középvonalával. Az elemek közt átadódó erőknek van a fugákra merőleges és azzal párhuzamos komponense is. Ezért függőleges teherből a támaszra nemcsak függőleges erő, hanem vízszintes támaszerő, vagyis oldalnyomás is átadódik, a keresztmetszetek igénybevétele pedig különleges nyomás és nyírás. A falazat húzószilárdság nélküli anyag, ezért a nyomásvonal mindenütt az ív vastagságon belül kell maradjon. A boltvállak feletti hátkitöltés szerepe a boltvállak kellő leterhelése, ezáltal a nyomásvonalnak a keresztmetszeten belül tartása. Ez a szinte minden esetben megtalálható 'segédszerkezet' gyakran szabályos falazati sorokból áll, néha feltöltés alkotja. Boltozott hidak szélső keresztmetszeteiben hátkitöltés helyett az extradostól az útpályáig, illetve annak parapetéig terjedő felfalazás, homlokfal készül, mely bizonyos mértékig együttdolgozik az ívszerkezettel.



4. ábra. A falazott ív erőjátékának alapjai

A boltív geometriáját jellemző fő adatok a fesztáv, vagyis a támaszok vízszintes távolsága a vállak magasságában, és az ívmagasság, azaz a vállak és a záradék függőleges távolsága. Az extrados és intrados távolsága az ívvastagság, mely gyakran változó, az erőjátéknak megfelelően a vállak felé közeledve növekszik.

2. ÉPÍTÉS TAPASZTALAT ALAPJÁN – ÓKOR ÉS KÖZÉPKOR

2.1. TERVEZÉS AZ ÓKORBAN

A termékeny folyóvölgyekben kialakult ókori kultúrák fejlett mérnöki létesítményeket, öntöző- és hajózácsatornákat, gátakat, kikötőket, utakat és hidakat, vízvezetékeket és szennyvízelvezető hálózatokat hoztak létre. Boltozott építmények mind a Folyóköz, mind Egyiptom építészetében megjelentek a Kr. e. 3–2. évezredben. Elsősorban mérnöki létesítményekben és a sírépítészetben alkalmazták ezeket, de később kapuépítményeket, belső tereket is fedtek boltozatokkal.

Az ókorban tapasztalati módszereket használtak a szerkezetek méreteinek meghatározására. Az ókori Kelet monumentális építészetére a hatalmat kifejező, lenyűgöző méretek voltak jellemzőek. Az anyag, s főleg a munkaerő-takarékosság nem volt szempont a piramisok, zikkuratok építésénél, az állékonyság, időállóság és monumentalitás érdekében súlyos, nagy tömegű, masszív szerkezeteket hoztak létre. Az elő-ázsiaiak fejlett csillagászati és matematikai, az egyiptomiak mértani és számtani ismereteiket főként az épületek kitéréséhez, az építés szervezéséhez használták fel.

A klasszikus kultúrákban a tapasztalatok alapján való építés során fejlett szerkezeti tudás alakult ki. A hellén gondolkodásmód következményeként a görögök magas fokú mértani, számtani tudásukat csak kevésbé használták fel az építészetben. Az önmagáért való, spekulatív gondolkodás lenézte az „alkalmazott” tudományt. A görög templom építését meghatározó törvényszerűségek inkább esztétikai (érzékelési) szempontok alapján rögzültek. A méreteket az alapul választott modulus (az oszloptörzs aljának alaprajzi sugara) többszöröseként, vagy részeként adták meg, függetlenül az abszolút méretektől. Ezzel a szerkezeti méreteket is egyszerű geometriai formába foglalták, s mai szóval, képlettel fejezték ki. Nem statikai számítás, hanem tapasztalatok alapján születtek, mégis gyakorlati célra jól alkalmazhatóak voltak ezek az arányok.

Hasonló eredményre jut a modern tudomány is, mikor a szabványokban geometriai arányokat is rögzít. Fontos különbség azonban, hogy ez utóbbi eredmények részletes erőtan vizsgálat alapján a gyakorlati alkalmazáshoz való egyszerűsítésből származnak.

A rómaiakat nem a jelenségek törvényszerűségeinek felfedezése, hanem azok célszerű felhasználása érdekelte. Belső tereik (és szerkezeteik) méreteinek meghatározására a görögökhöz hasonló arányokat és ökölszabályokat használtak: „A templomokat úgy kell beosztani, hogy a szélesség a hosszúság fele legyen ... a homlokzaton levő oszlopok vastagsága a magasságnak 1/8-dát teszi ...” (Vitruvius: Tíz könyv az építészetéről IV. könyv, IV. fejezet.)

Az ókorból származó építészetrel foglalkozó legjelentősebb mű, Vitruvius „Tíz könyv az építészetéről” című műve elsősorban nem műszaki szempontú megközelítést tükröz. Könyvében az építész neveléséről, épületesztétikai kérdésekről írt fejezeteket az oszloprendek, épülettípusok ismertetése követi, s viszonylag keveset ír technikai kérdésekről. Vitruvius nem tárgyalja a boltozati formákat, a boltozatok építését, ami bizonyos mértékig érthető is, hiszen a mű Augustus korában íródott, amikor a római boltozási technika még nem bontakozott ki. Ír viszont a boltozással összefüggő igen fontos kérdésről, az oldalnyomást felvevő gyámfalak tervezéséről: „Ha az épület pillérekre nyugszik, s ezek fölé ékalakú és éleikkel a középpont felé tartó bolthajtásokat emelünk, akkor a szélső pilléreket vastagabbra kell készíteni ... Ha tehát a sarokpillérek kellő erősségűek és az ékalakú boltköveket összetartják, ezek a műnek szilárdságát biztosítják.” (Vitruvius: Tíz könyv az építészetéről VI. könyv, XI. fejezet.)

A rómaiak állandó kísérletező kedvük nyomán három-négyszáz év alatt a néhány méter fesztávú dongáktól a 40 m átmérőjű kupoláig jutottak el. A szerkezeti érzék fejlődését mutatják hidaik arányai (pillérek és fesztáv szélességi viszonyának csökkenése az idők folyamán), mely arányok írásos formában nem maradtak fenn.

2.2. TERVEZÉS A KÖZÉPKORBAN

A népvándorlás áradata elnyelte a görög-római kultúrát. Az épített környezet, főként a meg nem értett mérnöki létesítmények elpusztultak, tönkrementek az utak, a vízvezetékek, a csatornahálózat. A boltozatépítés hagyományai Bizáncban, Kis-Ázsiában éltek tovább, a Nyugatrómai Birodalom területén az ezredforduló után kezdtek újra nagyobb fesztávú boltozatokat építeni. A hosszhajós templomok lefedésére változatos megoldások alakultak ki, a fejlődés a gótika vázas, kőbordás szerkezeteihez vezetett.

A középkor építőmesterei mérnökök és művészek voltak egy személyben. Templomok, paloták, kolostorok építői tervezték a hidakat, erődítéseket, hadigépeket, csatornákat is.

A középkorban kevés könyv íródott és maradt fenn, melyekből az akkori tervezési módszereket megismerhetnénk. Legnevezetesebb ezek közül Villard de Honecourt vázlatkönyve az 1230-as évekből, mely építészeti vázlatok mellett építőgépek, hidak és egyéb szerkezetek rajzait is tartalmazza. Más építészeti vázlatkönyvek (Heutsch 1472, Roritzer 1486, Lacher 1516 stb.) mellett képes kéziratosokat (J. Marianno 1438), technikai képeskönyveket (G. Agricola 1556) is ismerünk, valamint a középkori kódexek ábrázolásaiból is megismerhetjük az építési módszereket. Az építkezésekkel kapcsolatban fennmaradt iratok főként számlakönyvek, melyekből inkább a kivitelezésre, mintsem a tervezésre következtethetünk. A középkori technikai íráskor részletes utasításokat tartalmaznak a munkavégzés módjáról, de teljesen hiányzik belőlük az 'elmélet', vagyis az a törekvés, hogy az előírásokat általános elvekből vezessék le.

A középkori mesterek kevés matematikai ismerettel rendelkeztek, nem számoltak, hanem szerkesztéssel tűzték ki az épületek méreteit. A szerkesztés egyszerű geometriai úton, trianguláris vagy kvadratikus hálóval történt. A tervezésnek ezt a módját főként az alaprajz és homlokzat meghatározásához használták, a szerkezeti méreteket tapasztalat alapján állapították meg. A tervezés során modelleket is építettek, ezek közül azonban egy sem maradt fenn.

A híres építőmesterek messze vidékről utaztak egy-egy építkezés helyszínére, s tapasztalataikat kicserélve egyre nagyobb szerkezeti tudásra tettek szert. A középkori szerkesztés különös módja a valós léptékű modellkísérlet volt. A már máshol kipróbált és bevált méreteket bátran alkalmazták. Merészebb szerkezetek kísérleteinél a templom egy-egy hajóját felépítették, ez szolgált modellül a további szakaszokban. Mivel az építés lassan, általában hosszú évekig folyt, a falazatnak volt ideje megtapasztalni az évszakok váltakozásának hatását, lejátszódhattak az időben elhúzódó folyamatok. Amennyiben a merészebb geometriájú szerkezet kiállta a próbát, a további épületszakaszokon is alkalmazták, ellenkező esetben változtattak rajta. Ez magyarázza azt, hogy a középkori katedrálisok is egyre anyagta-
karékosabb szerkezetűek lettek – modern méretezési módszer nélkül.

2.3. AZ ÉPÍTÉSI MECHANIKA KEZDETEI

Az épületszerkezetek méretezéséhez tudományos alapot adó statika és szilárd-ságtan ismeretanyaga sokáig az általános természettudomány keretén belül fejlődött, matematikusok és fizikusok művelték. A mérnöki tudomány önállóvá fejlődése csak a 18. században következett be. Amikor régi korok gondolkodóinak fejtegetéseit vizsgáljuk, el kell vonatkoztatnunk mai mechanikai ismereteinktől. Ami számunkra magától értetődő, gondolkodásunkban már képlettel leírt jelenség, az akkor nagy felismerést jelentett.

Az ókorból ránk maradt művek közül Arisztotelész és Archimédesz írásai tárgyalják az egyensúly törvényét. Az Arisztotelésznek tulajdonított „Mechanikai problémák” című értekezés a mozgás különböző problémáival foglalkozott. A kétkarú emelőre vonatkozó gondolatmenete a következő volt: Az emelőre helyezett tömegek a forgásponttól mért távolságukkal arányos utat tesznek meg azonos idő alatt, tehát a forgásponttól mért távolságukkal arányos a sebességük. Mivel két erőt akkor tekintett egyenlőnek, ha az általuk mozgatott tömegek és azok sebességének szorzata azonos, így a tömegek és ‘erőkarjaik’ szorzatának azonosságát kapta eredményül. A gondolatmenet tévedéseket tartalmaz, mégis végeredményül helyesen fogalmazza meg a kétkarú emelő egyensúlyára vonatkozó törvényszerűséget.

Archimédesz, szemben Arisztotelész bölcséleti módszerével, kétségtelen bizonyosságokat vett alapul, s ezekre építette fel szabályait. A kiindulásul vett állítások közül a legfontosabbak a következők voltak:

- I. Az emelő két oldalán egyenlő távolságra felfüggesztett egyenlő tömegek egyensúlyban vannak.
- II. Az emelő két oldalán különböző távolságra felfüggesztett egyenlő tömegek nincsenek egyensúlyban, a távolabb felfüggesztett tömeg lefelé húzza az emelő karját.
- III. Az emelő két oldalán egyenlő távolságra felfüggesztett különböző tömegek nincsenek egyensúlyban, a nagyobb tömeg lefelé húzza az emelő karját.

Fentiekből következtette, hogy az emelő karjaira helyezett, egyensúlyban levő tömegek nagysága fordítottan arányos felfüggesztéseik távolságával. Ezzel meghatározta a statikai nyomaték fogalmát és megalapozta a statika tudományát.

Mindkét tudós azonos eredményre jutott, de Arisztotelész tételeit általános törvényekből vezette le, a jelenséget előidéző okokat vizsgálva. Ez magyarázza, hogy a középkor folyamán a statika fejlődése az ő tanításából indult ki.

A középkori arab tudósok, akik maguk is foglalkoztak statikával, a görög Euklidésznek is tulajdonítottak mechanikai tárgyú értekezéseket, ezek azonban görög forrásokban nem maradtak fenn.

A statika középkori fejlődésében nagy szerepet játszó Jordanus Nemorarius a reneszánszig hatást gyakorolt a tudósokra. Életéről igen keveset tudunk, valószínűleg a 13. században fogalmazta meg az emelővel és ferde lejtővel kapcsolatos elképzeléseit [10]. Az emelőre helyezett súlyok egyensúlyának bizonyítását abból a megállapításból vezette le, hogy „az erő, mely G súlyt h magasságba emel, G/n súlyt $h \cdot n$ magasságba tud emelni”. Bevezette a helyzettől függő nehézség fogalmát, s a lejtőre helyezett testek egyensúlyából megállapította, hogy – mai megfogalmazásban – a lejtőirányú erőkomponens nagysága arányos a lejtő meredekségével.

A középkori tudósok elméleti fejtegetései sokszor tartalmaztak hibákat, eredményeik és a gyakorlati tapasztalatok közötti ellentmondásokat. Eközben az építőmesterek az elmélettől teljesen függetlenül fejlett statikai érzékkel, az emelő, ék, lejtő törvényszerűségeinek gyakorlati ismeretével és alkalmazásával dolgoztak.

Ebben a korban igen előremutató volt Roger Baconnak a természettudományos megismerésről vallott elve, miszerint a megismerés helyes módszere a kísérletezés, az abból szerzett tapasztalatok értékelése és matematikai számításokkal igazolása.

3. ELMÉLET ÉS GYAKORLAT – A RENESZÁNSZTÓL A 18. SZÁZADIG

3.1. A KORARENESZÁNSZ ÉPÍTÉSZ-TUDÓSAI

A 15. századtól kezdett megváltozni a tudomány és technika viszonya, átalakulás ment végbe az elmélet és gyakorlat kapcsolatában. Addig az elméleti tudósok, a filozófusok, megvetve a kétkezi munkát, tagadták a kézművesek és technikusok megfigyeléseinek értelmét, ezután kezdték elismerni a mérnökök tevékenységének tudományos jelentőségét. Általánossá vált a tudományban a jelenségek megfigyelésének, az empirikus kutatásnak előtérbe kerülése, a technikai és tudományos ismeretek együttműködése alakult ki [11].

Az építési gyakorlatban csak a 19. század elejére vált teljesen természetessé az építéstechnikai problémák tudományos vizsgálata, de ennek a változásnak a gyökerei négyszáz évvel korábbra nyúlnak vissza.

Az itáliai reneszánsz építészei, képzőművészei közül sokan kezdtek érdeklődni fizikai, mechanikai problémák iránt. Kezdett kialakulni valamiféle kapcsolat az egzakt tudományok és az építőgyakorlat között. Ez szorosan összefüggött az ókori művészet, az ókori szerzők iránti vonzódással. A fellelhető görög és latin iratokat lefordították és tanulmányozták, a klasszikus ókor építészeti alkotásait felmérték. A 15. századi Firenzében megvalósult a technikai és tudományos tevékenységnek

a korábbiakban ismeretlen egysége, mely egy igen jelentős építészeti műben, a firenzei dóm kupolájának építésében is megmutatkozott. A feladatra kiírt pályázat nyerteseként Brunelleschi 1420–36 között aláállványozás nélkül építette meg a 42 m fesztávolságú kupolaszerkezetet. Brunelleschi, aki eredetileg ötvös volt, később kezdett építészettel foglalkozni, ismerte a római boltozatokat és alapos matematikai és mechanikai tanulmányokat is folytatott.

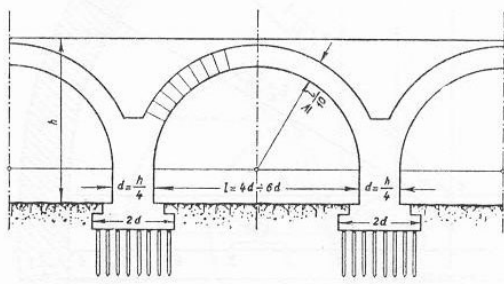
A korai reneszánsz tudományban és művészetben kiemelkedő egyéniségei közül Leon Battista Alberti és Leonardo da Vinci munkásságával foglalkozunk. Mindketten számos művészeti és tudományos területen tevékenykedtek.

3.1.1. Leon Battista Alberti

A firenzei Leon Battista Alberti (1404–1472) tanulmányai után irodalommal, joggal, pedagógiával foglalkozott, értekezéseket, könyveket írt. Humán műveltség mellett kitűnő matematikus volt. Festészettel, építészettel később találkozott, érdeklődése ez utóbbi felé az antik római épületek hatására alakult ki. Ő dolgozta ki Róma első hiteles topográfiáját. Építészetének fő ihletői a monumentális antik épületek voltak, melyek kompozíciós módszereit használta alkotásainál. Főként homlokzatok tervezésekor alkalmazott szigorú arányrendszerét a zenei harmóniából kölcsönözte.

Komplex, tudományos építészetelméleti írása, a „De re aedificatoria libri decem” először 1485-ben, latinul jelent meg. Alberti szerint az építészeti szépség objektív szabályai az arányokban keresendők: „... ugyanazok a számok, amelyek által a kellemes hangzat élvezetet okoz fülünknek, szemünket és szellemünket is gyönyörködtetik.”

Boltozott hidak méretezéséhez az alábbi szabályt találjuk fent említett művének IV. könyvében (5. ábra):



5. ábra. Falazott hidak arányai (Alberti, 1485)

„A pillérek vastagsága a hídmagasság $\frac{1}{4}$ része legyen. A boltozatok fesztávja ne legyen több, mint a pillérvastagság hatszorosa és ne legyen kevesebb annak négyszeresénél. A boltkövek vastagsága legalább a fesztáv $\frac{1}{10}$ -e legyen.”

Alberti írásában a térbeli boltozott szerkezeteket is elemezte, állítása szerint legtökéletesebb forma a boltívek és boltgyűrűk rendszeréből álló kupola.

3.1.2. Leonardo da Vinci [12]

A reneszánsz gondolkodók közül kimagasló lángelme Leonardo da Vinci (1451–1519), aki nemcsak festő és szobrász, hanem mérnök, építész és természettudós is volt. Foglalkozott haditudománnyal, geometriával, mechanikával, hidraulikával, csillagászattal, anatómiával. Milánó városi mérnökeként folyószabályozásokat, öntöző- és hajózácsatornákat, zsilipeket, hidakat is tervezett.

Rengeteg ötlet rejtett jegyzeteiben, sokszor kifejlesztés nélkül, rendezetlenül. A problémák megoldását gyors, lényegretörő vázlatokban fogalmazta meg, s ha a megvalósíthatóságot bizonyítottan látta, új probléma felé fordult. Életében semmit nem hozott nyilvánosságra írásai közül, mintegy öt és félezer ábrát tartalmazó vázlatfüzeteiből és jegyzetkönyveiből ismerjük gondolatait.

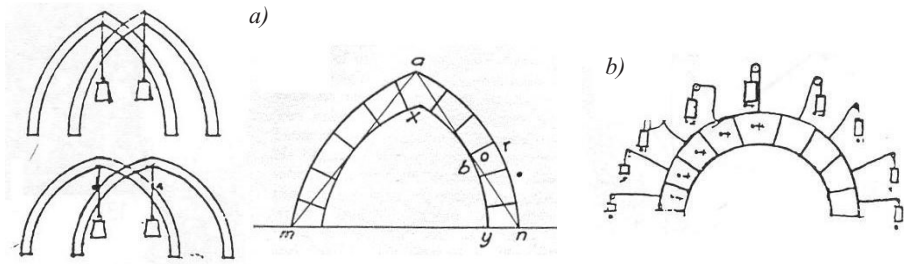
Ismerte az ókori és középkori statikával foglalkozó írásokat, ezeket továbbfejlesztette, tévedéseiket kiigazította, a törvényszerűségeket világosan fogalmazta meg. Mechanikai tárgyú feljegyzéseiben a hajlított tartókról, nyomott oszlopokról, az anyagok szilárdságáról írtakkal messze megelőzte korát. Mérnöki szemléletét jellemzi, hogy a szerkezetek anyagtakarékosságát és tartósságát is fontosnak tartotta.

Felismerte, hogy a gerendák teherbírása a megtámasztási pontok távolságától is függ, a szélesség növelésével pedig egyenesen arányos. A négyzetes arányosságot nem ismerte, talán ezért nem találunk feljegyzései között utalást a hajlított tartó teherbírásának és magasságának kapcsolatára. Tudta, hogy a nyomott oszlopok teherbírása nem egyenesen arányos keresztmetszetükkel, hanem a keresztmetszet és a hossz arányával van összefüggésben.

Foglalkozott acélhuzalok törőszilárdságának mérési módjával.

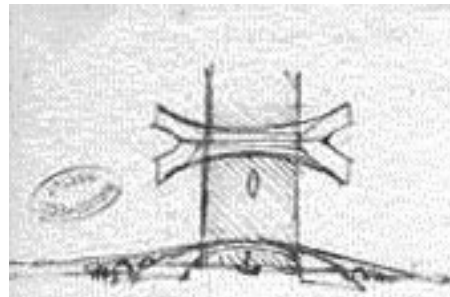
Boltívekre vonatkozó jegyzetei és vázlatai is maradtak fenn, ezek az első tudományos igényű boltív-vizsgálatok. Állítása szerint az ív két, önmagában nem állékony szegmensrészből álló erős szerkezet. Az egyensúly biztosítéka, hogy a két szegmens azonos nyomóerőt adjon át egymásnak a csatlakozási pontban. Leonardo vázlataiban bemutatta a boltívek tönkremeneteli helyeit, a fesztáv szélső negyedpontjaiban, ahol a nyomásvonal kilép a keresztmetszetből. Fontosnak tartotta ezért a boltvállak kellő leterhelését. Különböző görbájú íveket, félkörívet, csúcsvet, szegmensívet vizsgált. Nem osztotta azt az akkoriban általános nézetet, hogy

a félkörív kedvezőbb alakú, mint a csúcsív. Leonardo szerint a boltív akkor állékony, ha a záradék és boltváll külső pontjait összekötő húr nem metszi az ív belső vonalát (6.a. ábra). Ez a záradéki koncentrált teherre vonatkozó megállapítás. Az ív oldalnyomásának mérésére is volt kísérleti ötlete (6.b. ábra). Teljes általánosságban vizsgálta az íveket, a nyílásáthidalástól kezdve a vízszintes síkú, támfalszerkezetként és a fordított, alapozásként használt ívekre kiterjedően.



6. ábra. Leonardo vázlatai. a) Koncentrált erővel terhelt boltív.
b) Boltív oldalnyomásának mérése

Vázlatkönyvében fennmaradt egy Boszporuszon átívelő kőhíd terve. Az elképzelés szerint a 720 láb (276 m) fesztávú, 57 m ívmagasságú szerkezet záradékvastagsága 9 m lett volna (7. ábra). (2001-ben Norvégia és Svédország között Leonardo vázlata alapján hasonló szerkezetű fahidat emeltek.)



7. ábra. Leonardo terve a Boszporusz áthidalására

3.2. A MÉRNÖKI TUDOMÁNY KIALAKULÁSA

3.2.1. *A statika alapjai*

A 16. század elejétől a korareneszánsz közeledési kísérlet után az építőművészet és a mechanika újra kettévált, matematikusok, fizikusok fejlesztették tovább a mechanika tudományát. A 15. és 16. század tudósai (Cardano, Tartaglia, Ubaldo, Benedetti) statikáról, mechanikáról írt műveikben nagyrészt Jordanus Nemorarius és Leonardo gondolatait idézték. A 17. századig két nagy mechanikai probléma izgatta a természettudósokat, az erőparalelogramma és a hajlítás témája, mai megfogalmazásban a statika és a szilárdságtan alapvető törvényeinek felismerése.

A holland Simon Stevin (1548–1620) 1586-ban hollandul, majd 1608-ban latinul megjelenő „*Mathematicorum Hypomnemata de statica*” című könyvében szabatosan meghatározta az erőparalelogramma és a statikai nyomaték fogalmát. Foglalkozott a ferde lejtő problémájával, a testek súlypontjának számításával. Ő jelölte először az erőt egy, az erő nagyságával arányos hosszúságú vonalszakasszal. Az erők összetételével később Roberval (1602–1675), Galilei (1564–1642), majd Varignon (1654–1722) és Newton (1642–1727) foglalkoztak. A statikai nyomatékok összegzésének tétele Varignon nevéhez fűződik.

3.2.2. *A szilárdságtan alapjai*

A hajlított gerenda feszültségállapotának vizsgálata Galileo Galilei nevéhez fűződik. A pisai egyetemen folytatott orvostani, bölcsészeti és matematikai tanulmányai után matematikát kezdett tanítani. Később csillagászati kutatásai meggyőzték a kopernikuszi tanok helyességéről, s 1632-ban megírta a „Párbeszéd a két legfontosabb világrendszeréről” című művét, melynek megjelenése után megindult ellene az inkvizíciós eljárás. A tudós tanainak megtagadására kényszerült, és így élete hátralevő idejét korábbi mechanikai tanulmányai folytatásának szentelte. Az 1638-ban megjelent „*Discorsi e dimostrazioni mathematiche intorno a due nuove scienze*” című könyvének második beszélgetése tárgyalja a testek belső szilárdságát és a gerendák teherbírását. A hajlított tartók teherbírásának vizsgálatában elért eredményei alapján nevezhetjük őt a szilárdságtan megalapítójának. Befogott gerendánál a terhelő erők statikai nyomatékát a befogási keresztmetszetben egyenletesen eloszló húzófeszültségekkel egyensúlyozta, s így jutott arra a következtetésre, hogy a tartó szélességével egyenes, magasságával négyzetes arányban nő a teherbírás. Galilei még nem ismerte a rugalmasság fogalmát, így az ő módján számolva a téglalap keresztmetszetű tartó keresztmetszeti modulusa $\frac{1}{2} bh^2$ -re adódna a helyes $\frac{1}{6} bh^2$ helyett.

Később többen (Mariotte, Hooke, Jakob Bernoulli, Leibniz) is foglalkoztak a problémával, míg két évszázaddal később a helyes megoldásig eljutottak (Parent, Coulomb).

A szilárdságtan tudományának kifejlődése terén fontos lépés volt a munka fogalmának tisztázása (Galilei, Descartes). A matematikus Bernoulli család tagjai, Johann Bernoulli (1667–1748) és Jacob Bernoulli (1654–1705) a virtuális elmozdulások elvének megfogalmazásával és az egyik végén befogott rúdra vonatkozó rugalmas vonal egyenletének felállításával vitték előre a tudományt. Robert Hooke (1635–1703) kísérletei alapján állapította meg, hogy „az erő, melyet a kifeszített rugó kifejt, arányos a kifeszítés hosszával” (1678). Hangsúlyozta, hogy az erő és a deformáció közti egyenes arányosság nemcsak rugókra, hanem minden rugalmas anyagra igaz.

3.2.3. *A mechanika gyakorlati alkalmazásához vezető út*

A mechanika és az egész fizikai világkép egységes kialakulása ebben az időben történt. Az égi és földi fizika egyesítése Newton két fontos törvényére, a newtoni mozgástörvényre és az egyetemes vonzástörvényre épült.

Az anyagok szilárdságára vonatkozó kísérletek a 18. század elejétől kezdődtek (Girard, Réaumur, Musschenbroek). Fák, fémek és üvegek húzó, hajlító és nyomószilárdsági értékeit mérték és foglalták táblázatokba. A kövek szilárdságának mérésére először a párizsi Panthéon építése során került sor.

Nagy lökést adott a mechanika fejlődéséhez a 17. század végén, 18. század elején kifejlesztett differenciálszámítás. Ennek hatására a 18. században elterjedté vált, hogy a mechanikai problémákat visszavezették bizonyos mennyiségek minimumának vagy maximumának meghatározására, amit teológiai indoklással is alátámasztottak: „a világ a legtökéletesebb alkotó munkája, nincs olyan dolog, ami nem a maximum vagy a minimum törvénye szerint működjön...” (Coulomb, 1773).

A rugalmas vonal elméletével foglalkozott Euler (1707–1782) és Lagrange (1736–1813). Utóbbi elméleti tudósként olyan matematikai módszereket fejlesztett ki, melyeket később sok gyakorlati statikai kérdés megoldásánál használtak.

Charles Auguste Coulomb (1736–1806) nevéhez a gyakorlati statika megalapítása fűződik. Fiatalkorában francia hadmérnökként egy gyarmati kolónián végzett erődítési munkákat. Visszatérve Franciaországba a fizika számos területén fejtette ki munkásságát, elsősorban az elektromosságtan, mágnesességtan és mechanika tudományágában.

1773-ban megjelent „Essais sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l’architecture” című írása mér-

földkő az építési mechanika fejlődésében. A főbb tartószerkezetek méretezését tudományos módon és a gyakorlati alkalmazásra összpontosítva mutatta be. Általános módszere volt, hogy a tönkremenetelben fontos szerepet játszó mennyiséget a lehetséges értékek között változtatva határozta meg a teherbírás korlátait. Foglalkozott kő- és téglafalak nyomási tönkremenetelével, hajlított tartók, boltívek, támfalak és a földnyomás elméletével.

Thomas Young 1807-ben bevezette a rugalmassági modulus fogalmát, s ezzel új fejezetét nyitotta meg a szilárdságtan tudományának. A rugalmas testek mechanikájával foglalkozó tudósok közül kiemelkedő Poisson (1781–1840) és Cauchy (1789–1857) munkássága.

Mindeközben a gyakran előforduló épületszerkezetek (boltozatok, pillérek, támfalak, alapozások) méretezésére a legtöbb esetben még a matematikai vagy geometriai alakban megfogalmazott empirikus szabályokat használták.

Az építőművészet és a tudomány reneszánsz kori közeledése csak rövid ideig és néhány nagy egyéniségre kiterjedő jelenség volt. Később, egészen a 18. század elejéig a mechanika tudományát újra matematikusok, fizikusok művelték. Ekkorra alakultak ki a statika és szilárdságtan alaptörvényei, lettek ismertté a fontos építőanyagok (fa és vas) szilárdsági tulajdonságai. A 18. század közepére jött el az idő, amikor a tudományos módszerek helyet kaptak az építési gyakorlatban. Ennek időpontját az első mérnöki szakvélemény elkészítéséhez, a római Szent Péter-bazilika kupolarepedéseinek 1743-as vizsgálatához kötik.

A Bramante és Michelangelo tervei alapján a 16. században épült templom kupoláján építése után százötven évvel komoly repedések jelentkeztek. XIV. Benedek pápa több matematikust és építészt is megbízott a kupola repedéseinek vizsgálatával, statikai ellenőrzésével és az esetleges megerősítési javaslat kidolgozásával. R. G. Boscowich, F. J. Sacquier, T. le Seur jezsuita matematikusok szakvéleménye szerint a repedések egyedüli oka a kupolagyűrű tágulása. A kupola vállánál fellépő oldalnyomás értékét is kiszámították a virtuális elmozdulások elvének felhasználásával (számításukban hibákkal). Megerősítési javaslatuk további két vasgyűrű beépítését tartalmazta. Az építész szakértők tiltakoztak az elméleten alapuló megközelítés ellen, szerintük az empirikus módon épített szerkezet ugyanazon a módon javítható. Giovanni Poleni, velencei matematikus és fizikus a kupola megrepedését több okkal, földrengéssel, rossz kivitelezéssel, és főként az alapok süllyedésével magyarázta. Az általa javasolt beavatkozás azonos volt a három matematikuséval. Megerősítésként Vanvitelli 1743 és 1744 között öt további gyűrűt épített be. A szakvélemények kapcsán kibontakozó vita vezetett oda, hogy a 19. század elejére már természetesnek tartották a gyakorlati kérdéseknek elméleti alapon való tárgyalását.

3.2.4. A mérnöki oktatás kialakulása

A mérnöki módszereknek a gyakorlatba való bevonásával párhuzamosan a század során kialakult a műszaki oktatás rendszere és az önálló mérnöki szakterület. A mai mérnökök elődei a hadmérnökök voltak, akik az erődítések építése mellett mélyépítési feladatokat is elláttak. Ezekhez több műszaki ismeretre volt szükség. A francia hadmérnökök szervezetét, a Corps des ingénieurs du Genie militaire-t 1675-ben alapították, ezt 1720-ban követte a mérnöki szervezet, a Corps des ingénieurs de ponts et chaussées megalakítása.

1729-ben jelent meg az első igazi mérnöki szakkönyv, Bernard Forest de Belidor (1697–1761) „Science des ingénieurs” című műve. Jelentősége, hogy ez volt az első olyan könyv, amely a szerkezetek méretezését tudományos alapon, a matematika és a mechanika segítségével tárgyalta. Fejezetei a támfalak, boltozatok és ellenfalak, hajlított gerendák méretezését, majd az építőanyagokat és az építmények szerkezeti kialakítását ismertetik, valamint katonai épületek tervezésének és költségvetések készítésének elveit tartalmazzák. A könyv száz éven át szolgált a mérnökök kézikönyvéül, utoljára 1830-ban adták ki.

1747-ben hozták létre az École des Ponts et Chaussées-t, az út-, híd- és vízépítő mérnökök iskoláját, melynek első igazgatója Jean Rodolphe Perronet (1708–1794), korának egyik legkiválóbb mérnöke volt. Az École Polytechnique, a magasabb mérnöki iskolák alapozó iskolája 1795-ben alakult meg. A francia műszaki oktatási rendszer mintaképül szolgált később az orosz és német iskolák szervezésénél. (A magyar mérnökképzés, az Institutum Geometrico-Hydrotechnicum hároméves mérnöki iskola európai viszonylatban is igen korán, 1782-ben indult el.)

Az első szilárdságtan könyv, P. S. Girard „Traité Analytique de la Résistance des Solids” című műve 1798-ban jelent meg. Az École des Ponts et Chaussées-n tanító Louis Marie Henri Navier (1785–1836) statika és alkalmazott mechanika előadásainak anyagát 1833-ban adták ki először nyomtatásban. Navier érdeme volt a korszerű oktatás megvalósítása, összegyűjtötte elődei munkásságának anyagát, s azokat rendszerbe foglalva építette fel előadásait. Számos, ma is használatos méretezési módszer, a mai tananyag nagy része megtalálható könyveiben.

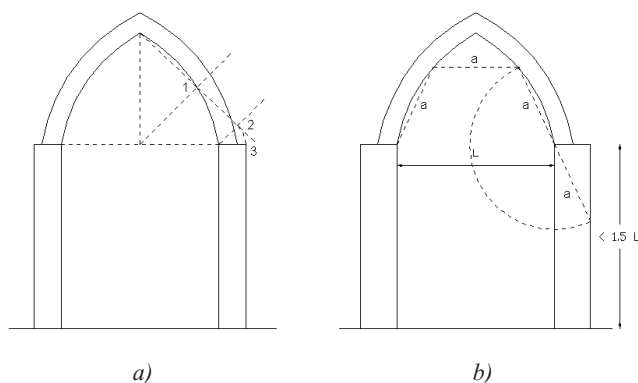
3.3. BOLTÍVEK ELMÉLETE [9], [15]

3.3.1. Empirikus szabályok

Az ókortól kezdve a középkoron át egészen a 18. század közepéig külön utakon haladt az építési gyakorlat és a mechanika tudománya. A kutatók egy része egyetemi professzor vagy szerzetes volt. Mások fejedelmek vagy városok szolgálatában

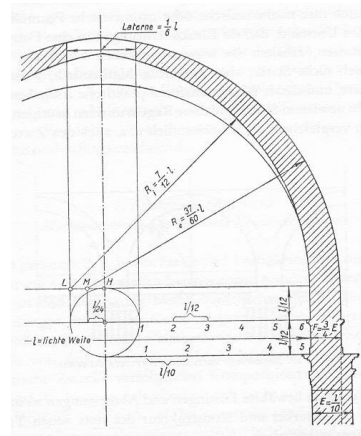
álltak, s a tudományos tevékenységen felül mérnöki feladatokat is elláttak, víz-, csatorna-, és erődítésépítéssel foglalkoztak. Az építőmesterek kiváló konstruktőrök voltak, de kevés matematikai és mechanikai tudásukat inkább az épületek kitűzéséhez, építőgépek tervezéséhez használták fel, mintsem statikai méretezéshez. A gyakran előforduló épületszerkezetek (boltozatok, pillérek, támfalak, alapozások) méretezésére régóta empirikus szabályokat használtak, melyek matematikai vagy geometriai alakban fogalmazták meg a szerkezeti méreteket.

Ismertek a későgótika idejéből Rodrigo Gil de Hontañon (1505 k.–1577) szabályai, melyek boltívek méretviszonyait határozták meg. A leghíresebb ökölszabály François Blondelről kapta nevét, akinek könyve, a „Cours d’architecture” 1683-ban jelent meg. A Blondel-szabály tetszőleges alakú boltívek támsz méretének meghatározására szolgál, amennyiben a támasz magassága nem több, mint a feszítáv másfélszerese. A boltív intradosába írható három egyenlő oldalt tartalmazó szimmetrikus trapéz ferde oldalának meghosszabbítására felmérve az oldalhosszt, megkapható a támasz szükséges szélessége. A szabály magasabb íveknél kisebb, laposabb íveknél nagyobb támsz méretet ad, ahogy ezt az oldalnyomás értéke indokolja. Félkörív esetén éppen a feszítáv negyedét kapjuk a támasz szükséges méretéül, ez volt a római hídépítés gyakorlata. A szabály alkalmazása olyan széles körben elterjedt, hogy Belidor 1729-es művébe is belekerült (8. ábra).



8. ábra. Boltívek támsz méretének meghatározása.
a) Gil de Hontañon szerint. b) Blondel szerint

Későbbiek Carlo Fontana (1634–1714) kupolák méretezésére szolgáló geometriai szabályai, melyeket az „Il Tempio Vaticano e sua origine” című könyvében tett közzé (9. ábra).



9. ábra. Kupolák méretezése
(C. Fontana)

Kisebbszámú boltozatok és boltívek tervezéséhez később is ökölszabályokat használtak, sok szerző sokféle számításmódot talált ki [16]. A fesztáv és az ívmagasság, esetleg az intrados görbületi sugara szolgál alapadatul a záradéki ívvastagság és támfalak méretének meghatározására. A képletekben a terhelés egyáltalán nem szerepel, az anyag minőségét (kő vagy tégl) is kevés veszi figyelembe, sőt némelyik az ív alakjára nézve sem tartalmaz megkötést.

Térbeli boltozatokra vonatkozóan hasonló arányokat tartalmaz Rondelet „L’art de bâtir” című műve.

3.3.2. A boltívek elméletének kezdetei

A 17. század végének boltívvel foglalkozó kutatóit kétszáz évvel megelőzte Leonardo da Vinci, akinek boltívvel kapcsolatos felismeréseit a korábbiakban ismertettük (3.1.2. fejezet).

A boltívek tudományos igényű vizsgálatának megindulásához szükséges volt a statika és szilárdságtan alapjainak ismeretére, melyek, az erők összetétele és felbontása, a statikai nyomaték fogalma a század eleje óta tisztázottak voltak.

A 17. század végén, 18. század elején elinduló kutatás első fontos megállapításai nem a boltívben működő erőkkel vagy feszültségekkel foglalkoztak, sem a falazati anyag tulajdonságaival, hanem – ahogy minden korábbi gyakorlati szabály – a szerkezet alakjára vonatkoztak. Robert Hooke (1635–1703) 1675-ben a Royal Society előtt modellív kísérleteket mutatott be, melyekkel szemléltette, hogy a hajlékony kötéll alakja és a helyesen kialakított merev ív alakja azonos. Elméletileg helyes következtetését számításokat végzése nélkül vonta le. Hooke nem oldotta meg a statikai problémát, nem határozta meg a kötéll és az ív alakját.

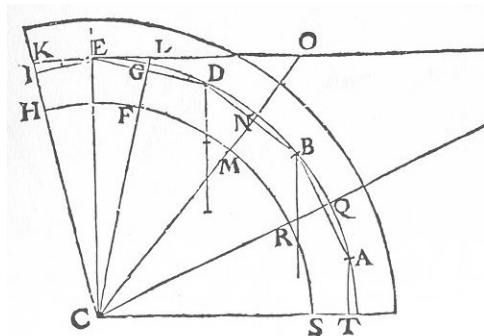
1690-ben Jakob Bernoulli a láncgörbe alakjának leírását minimumfeladatként fogalmazta meg. Állítása szerint két pont közé felfüggesztett kötél azt az alakot veszi fel, melynél a kötél súlypontja a lehető legmélyebben helyezkedik el. A feladatot Johann Bernoulli, Huygens és Leibniz is megoldották.

Tőlük függetlenül David Gregory (1661–1708) skót matematikus az ívek erőjártékának tanulmányozása során 1697-ben eljutott a kötélgörbe matematikai származtatásához (melynek egyenletét apróbb hibákkal írta fel). Gregory szerint a fordított kötélgörbe az elméletileg helyes ívforma, s más alakú ívek állékonyságát az magyarázza, hogy vastagságukba berajzolható a kötélgörbe.

Ebben az időben Franciaország fejlett úthálózattal, sok ívhíddal rendelkezett, ezért ott indult el legkorábban a falazott boltívek kutatása.

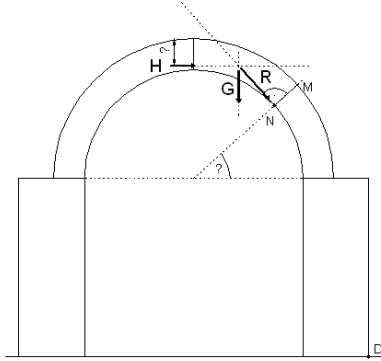
Philippe de la Hire (1640–1718) kísérlete meg elsőként a boltív elemei közti erőket és a támaszoknál fellépő oldalnyomás értékét a statika törvényeinek alkalmazásával számítani. A legegyszerűbb geometriát, a félkörívet vizsgálta. 1695-ben megjelent „Traité de Méchanique” című művében az ív elemei közt működő súrlódás létét bizonyította indirekt módon (10. ábra). Feltételezte, hogy nincs súrlódás, s az egyes elemeknek az egyensúlyhoz szükséges súlyait számítva, az utolsó elem súlya végtelen nagyra adódott. Ez a következtetés egyértelműen hamis, ami bizonyítja az elemek közötti súrlódást. La Hire szerkesztéses módszerrel dolgozott, mai módon fogalmazva kötélgörbét és erőszöveget rajzolt. A kötélgörbét az E, D, B, A, T az erőpoligont a K, L, O, P és C pontok alkotják, az egyes boltkövek súlyait az EL, LO, OP szakaszok hosszai, az elemek közti nyomóerőt pedig a CL, CO, CP szakaszok hosszai fejezik ki.

La Hire nevéhez fűződik az oldalnyomás számítása (1712), mely szintén nagy jelentőségű lépés volt az ívek elméletében (11. ábra). Tudta, hogy az ív összeomlását leggyakrabban a támpillérek gyengesége okozza. A támaszok kimozdulásával ugyanis az ív eltörik egy közbenső (NM) keresztmetszetben. A törési keresztmetszetben működő erő a felső blokk egyensúlyából számítható, azzal a feltétellezzel, hogy az erő a keresztmetszetre merőleges. Az oldalnyomás ily módon tör-



10. ábra. Félkörív elemei közti súrlódás létének bizonyítása (La Hire, 1695)

ténő meghatározásából a támfalak mérete és az egész szerkezet állékonysága számítható. A támfal külső pontjára (D) felírt nyomatéki egyenletből ugyanis megkapható a szükséges leterhelő súly, azaz a támfal szükséges mérete.



11. ábra. Félkörív oldalnyomásának meghatározása és támfalainak stabilitási vizsgálata (La Hire)

La Hire elméletében több homályos részlet is van: a törési keresztmetszet helyét nem adta meg, a záradéki vízszintes erő helyét sem határozta meg pontosan. A biztonság javára döntött azonban, amikor az erőt nem az extradósba helyezte, mert így számítása nagyobb oldalnyomást és támfalvastagságot ad. Pontatlanságai ellenére a 18. század végéig alkalmazták oldalnyomás számítását (Párizs, Panthéon).

Gyakorlati szabályok, empirikus összefüggések alkotásával ebben az időben is foglalkoztak. 1717-ben Gautier faelemekből álló ívekkel folytatott kísérleteiből hidak méretviszonyaira vont le következtetéseket. Arányokat közölt a szélső és közbenső pillérek szükséges vastagságáról, a záradéki minimális ívvastagságról, az ívek helyes alakjáról.

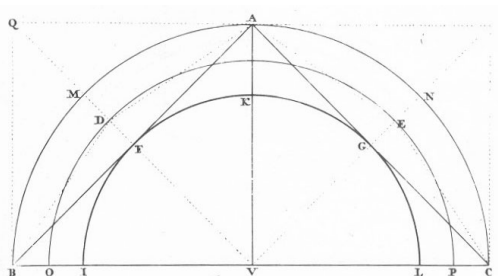
Béldidor 1729-es könyvében a boltívekkel foglalkozó fejezet La Hire munkáján alapult, annyi módosítással, hogy a törési keresztmetszetet 45° -nál rögzítette, s a záradéki erőt a keresztmetszet közepén működtette. Belidor művének érdekessége, hogy tudományos jellege ellenére megtalálható benne az inkább empirikusnak nevezhető Blondel-szabály is.

3.3.3. Az elmélet főbb megállapításainak kialakulása

A francia C. Couplet 1729-ben megjelenő első művében még La Hire súrlódásmentes íveit ismételte, a zsaluzatra ható erők számításával kiegészítve. Couplet 1730-as írásával tett hozzá különösen sokat a boltívek elméletéhez. Megállapított-

ta, hogy az ívet az elemek közti súrlódás tartja össze, de ez a boltkövek szétnyílását nem akadályozza meg. A nyomószilárdsággal nem foglalkozott, ami magába foglalja azt a feltételezést, hogy a nyomófeszültségek igen kicsik. Ezzel a hagyományos elméletnek a boltívek anyagára vonatkozó három fő feltételezését foglalta össze: 1. a nyírószilárdság végtelen (azaz elcsúszás nem jöhet létre), 2. a húzószilárdság zérus, 3. a nyomószilárdság végtelen.

Couplet először közepén koncentrált erővel terhelt félkörívet vizsgált az önsúly elhanyagolásával. Úgy találta, hogy az állékonyság feltétele, hogy a vállak és a záradék extrasdosait összekötő vonal (a koncentrált erő nyomásvonala) ne messe át az intradost (12. ábra). Ez teljesen azonos Leonardo korábbi állításával.

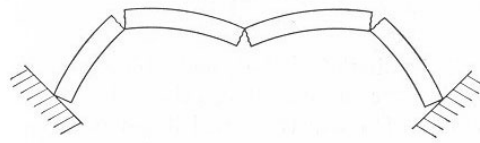


12. ábra. Középen koncentrált erővel terhelt félkörív (Couplet, 1730)

A klasszikus elmélet néhány igen fontos megállapítása rejlik ebben az ábrában. Alapvető tétel, miszerint a teherbírás elsősorban a szerkezet alakjától függ, az anyag szerepe másodlagos (a fenti feltételezésekkel). Couplet az állékonysági vizsgálatnál tulajdonképpen a geometriát, vagyis a félkörív minimális ívvastagságát határozta meg. A klasszikus elméletnek ezzel szorosan összefüggő állítása szerint, ha valamely teherkombinációra egy ív állékony, a teher bármekkora, de arányos növelésével nem tehető tönkre. Bármekkora koncentrált záradéki erő át tud adódni a húrként berajzolt egyenesek mentén. Ebből következik egy harmadik fontos megállapítás is, hogy tönkremeneteli határállapot csak akkor (olyan teherkombinációnál) jön létre, ha a nyomásvonal megfelelő számú helyen érinti a keresztmetszet széleit. Ekkor az érintési pontok keresztmetszeteiben repedések nyílnak meg, az ív csuklós mechanizmussá válik és elveszti állékonyságát (13. ábra).

Túl vékony félkörívnél a csuklók a vállaknál és a záradéknál az extrasdosban, a köztük levő negyedpontoknál az intradosban jelennek meg. Couplet felismerte, hogy a tönkremenetel ellen a támaszok feletti kellő leterheléssel lehet védekezni, mert így nem tudnak megnyílni a negyedpontok keresztmetszetei. (A vállaknál és a záradéknál, három keresztmetszetben megnyílt repedésekkel előálló három-

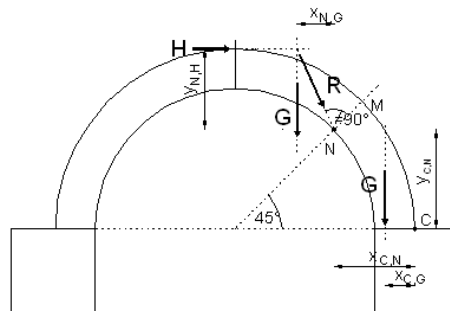
13. ábra. Boltív tönkremenetele csuklós mechanizmussá válással



csuklós tartó statikailag határozott szerkezet.) Couplet a fenti módszerrel meghatározta az önsúllyal terhelt félkörív minimális vastagságát (14. ábra). A törési keresztmetszetet 45° -nál vette fel, a záradéki erőt az extradosba helyezte. A törési keresztmetszet intradosára (N) felírt nyomatékból, a felső blokk súlyának ismeretében számította a záradékban működő vízszintes erőt: $H = G \cdot \frac{x_{N,G}}{y_{N,H}}$. Ezután az alsó

blokk egyensúlyát a váll extradosában (C) vizsgálta, a törési keresztmetszetben fellépő erő nyomatéka erre a pontra nem lehet nagyobb, mint az alsó blokk súlyának nyomatéka: $H \cdot y_{C,N} - G \cdot x_{C,N} \leq G \cdot x_{C,G}$. Így egy egyenlet numerikus megoldásával az ívvastagság és a sugár viszonyára 0,101-t kapott eredményül. Számításában a törési keresztmetszetet rosszul helyezte 45° -hoz, mert így az ott fellépő erő nem merőleges a keresztmetszetre (a nyomásvonal átmetszené az intradost). A helyes, vízszintessel 31° -os szöget bezáró törési keresztmetszethez tartozó eredmény kicsit nagyobb, 0,106 lenne.

14. ábra. Önsúllyal terhelt félkörív (Couplet, 1730)

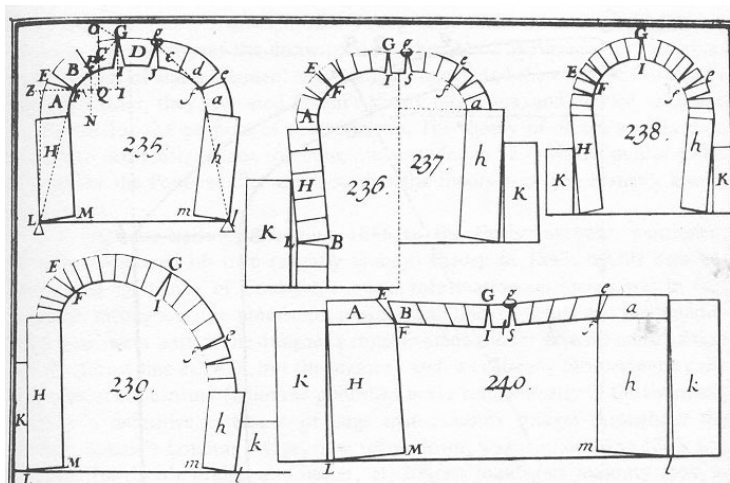


Ugyanezt a számítást elvégezte 120° -os középponti szögű szegmensívre is.

Couplet foglalkozott a támaszerő számításával és a pillérek méreteinek meghatározásával is, La Hire módszeréhez hasonlóan. A záradéki erőt és a törési keresztmetszetekben működő erőket ebben az esetben a keresztmetszetek közepére helyezte.

Bár Couplet sokat adott a boltívek elméletének fejlődéséhez, mégis feledésbe merültek eredményei; Poleni még ismerte őket, de ötven évvel később Coulomb már nem említette írásában Couplet nevét.

Ebben az időben is végeztek modellkísérleteket. Augustin Danyzy (1691–1777) kis fesztávú gipsz ívek tönkremenetelét vizsgálta 1732-ben, de eredményei csak 1778-ban jelentek meg, eltekintve Frézier korábbi művétől, melynek ábrái Danyzy munkáját mutatták be (15. ábra). Kísérleteivel a szokásos méretezési sza-



15. ábra. Boltívek vizsgálata (Frézier, 1737–39)

bályokat ellenőrizte és Couplet eredményeit erősítette meg. Megállapítása szerint a tönkremenetel a támaszok gyengesége miatt az elemek elfordulásával, az ív csuklós mechanizmussá válásával következik be.

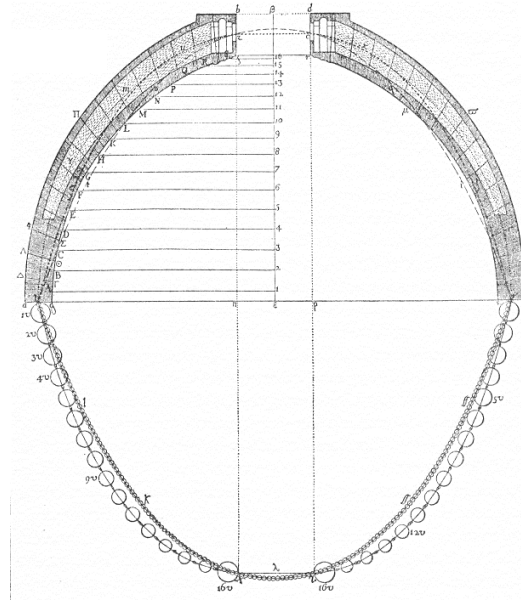
Amée-François Frézier (1682–1773) boltozatokról szóló háromkötetes műve, a „Traité de la Coupe des Pierres” 1737–39 közt jelent meg.

3.3.4. A klasszikus elmélet gyakorlattá válása

A boltívek elméletének első gyakorlati alkalmazása a római Szent Péter székes-egyház kupolájának már említett vizsgálatánál történt (3.2.3. fejezet). Giovanni Poleni 1743-ban írt szakvéleménye öt évvel később nyomtatásban is megjelent. A meridiánirányú repedésekkel károsodott szerkezetet Poleni gondolatban meridián irányú vágásokkal ötven szeletre bontotta. A kupola állékonyságát kísérlettel bizonyította, megépítette egy szelet kicsinyített, fordított modelljét. A szelet egyes részeinek súlyával terhelt láncot függesztett fel, s ennek a láncnak az alakját hasonlí-

totta össze a kupola keresztmetszetével (16. ábra). Mivel a kísérletből kapott alak tükörképe mindenütt a keresztmetszeten belül maradt, következtetése az volt, hogy a szeletek önmagukban stabilak, ezért a repedések nem veszélyesek. A boltozati oldalnyomás értékét is meghatározta, melynek felvételére ő is vasgyűrűk beépítését javasolta.

Érdekes megemlíteni, hogy a 20. század legelején hasonló módszerrel tervezett Antoni Gaudí, mikor a szerkezet alakjának meghatározásához kötélre függesztett súlyokat alkalmazott.



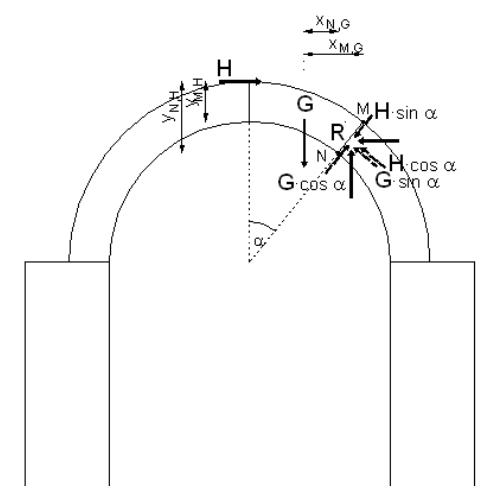
16. ábra. A római Szent Péter-bazilika kupolarepedéseinek vizsgálata (Poleni, 1743)

Coulomb, aki a statika gyakorlati alkalmazása terén tett nagy lépéseket, a főbb teherhordó szerkezetek, köztük a boltívek erőjátékát is vizsgálta 1773-as írásában. Nem kifejezetten tervezési módszert adott, hanem az oldalnyomás értékét szorította korlátok közé. A keresztmetszetekben a két tönkremeneteli módnak megfelelően a relatív elcsúszás és elfordulás lehetőségét vizsgálta (17. ábra).

Az elcsúszás megakadályozására a keresztmetszetre merőleges és keresztmetszet irányú komponensek arányát a habarcs kohéziójának (τ_0) figyelembevételével a súrlódási szöghöz (μ) viszonyította:

$$G \cdot \cos \alpha - H \cdot \sin \alpha \leq \tau_0 + \mu \cdot (H \cdot \cos \alpha + G \cdot \sin \alpha)$$

$$H \cdot \sin \alpha - G \cdot \cos \alpha \leq \tau_0 + \mu \cdot (H \cdot \cos \alpha + G \cdot \sin \alpha).$$



17. ábra. Boltív vizsgálata (Coulomb)

A két különböző irányú elcsúszásból adódik az alsó (felső blokk lefelé csúszik), illetve felső korlát (felső blokk felfelé csúszik):

$$\frac{G \cdot \cos \alpha - \mu \cdot G \cdot \sin \alpha - \tau_0}{\sin \alpha + \mu \cdot \cos \alpha} \leq H \leq \frac{G \cdot \cos \alpha + \mu \cdot G \cdot \sin \alpha + \tau_0}{\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha}.$$

Hasonlóképpen írt fel a két különböző irányú elfordulásra másik két korlátozó értéket, a záradéki erő az extrados (M), illetve az intrados (N) körüli elforduláshoz tartozó értékek közt kell legyen:

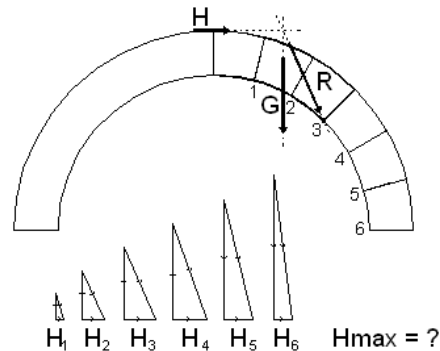
$$G \cdot \frac{x_{M,G}}{y_{MH}} \leq H \leq G \cdot \frac{x_{N,G}}{y_{NH}}.$$

A törési keresztmetszet helyét, vagyis α értékét változtatva más és más értéket kapott a záradéki erő korlátjaira, ezek közül a legszűkebb korlátokat véve kapható meg a záradéki erő lehetséges értéktartománya.

A gyakorlati esetek vizsgálatából arra a megfontolásra jutott Coulomb, hogy a súrlódás általában nagy értékű, ezért elegendő csak az elfordulási tönkremenetelt vizsgálni, mely az ív négy részre darabolódásával, csuklós mechanizmussá válásával következik be. A záradéki erő helyét az extradosban javasolta felvenni. Az α szög különböző értékeihez tartozó különböző záradéki erők közül a legnagyobbat kiválasztva kapható meg a törési keresztmetszet valódi helye.

Az 1800-as évektől a boltíveket Coulomb elmélete alapján, grafikus módszerrel vizsgálták (18. ábra). A nyomásvonalat a záradékban az extradósba, a törési keresztmetszetben az intradosba helyezték. Különböző törési keresztmetszetek felvételével, az elfordulásos tönkremenetel alapján keresték a záradéki erő maximális értékét. A számításához minden esetben szükség volt a felső blokkból származó függőleges erő helyének és nagyságának ismeretére, melyhez később táblázatokat készítettek. A gyámfalak állékonyságát a gyámfal talpának külső pontjára (A) felírt nyomatéki egyenletből számították.

18. ábra. Boltívek vizsgálata az 1800-as években

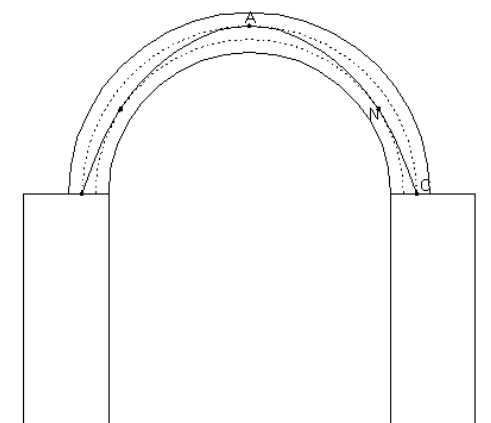


1823-ban M. G. Lamé és E. Clapeyron a szentpétervári Szent Izsák-katedrális kupolájának stabilitási vizsgálatát a fenti módszer szerint végezték. A két mérnök félkörívnél levezette a probléma analitikus megoldását és belátták, hogy sugárirányú helyett függőleges keresztmetszeteket vizsgálva a feladat sokkal egyszerűbbé válik. Bebizonyították azt is, hogy szimmetrikus íveknél számítás helyett szerkesztés is végezhető. Az oldalnyomás annál a törési keresztmetszetenél adódik maximálisnak, ahol a súlyerő és a záradéki erő metszéspontjából induló eredő éppen érintőleges az intradosra. Ez a már korábban ismert, de elfelejtett felismerés újralfedezése volt (la Hire). Ugyanezt a módszert találta ki még később, 1835-ben, tőlük függetlenül Poncelet is.

Az elmélet eredményeit összefoglaló könyvek is jelentek meg ebben az időben. A hídépítés történeti és elméleti kérdéseit feldolgozó „Traité de la Construction des Ponts” Emiland Marie Gauthey (1732–1806), francia mérnök műve, melyet halála után 1809-ben unokaöccse, Navier adatott ki.

A boltívek elméletének eredményei Navier „Leçons”-jának megjelenésével az oktatásba is bekerültek. Navier az 1800-as években alkalmazott módszer ismertetéséhez a feszültségeloszlás figyelembevételét is hozzátette. Függetlenül Young

1807-es, a külpontosan nyomott keresztmetszetek feszültségeloszlásáról való ismeréseitől, Navier háromszög alakú feszültségeloszlást használt. Ez alapján a nyomásvonalat a keresztmetszet középső harmadába korlátozta. A záradéki erő támadáspontját az extrados felé eső harmadpontba, a törési keresztmetszetben működő erőét az intrados felőli harmadpontba illesztette. Így a záradéki erő, vagyis az oldalnyomás értéke és a szükséges támfalméret kicsit nagyobbra adódik (19. ábra).



19. ábra. Boltívek vizsgálata (Navier)

Az 1800-as évek elején 2,4 m fesztávú tégláívekkel végzett modellkísérleteket Boistard (1810). Nem próbálta számítással követni eredményeit, csak megfigyeléseit írta le a különböző terhelésekre bekövetkező összeomlási módokról. Kísérleteiből a támaszok szükséges méretére és az építés közben a zsaluzatra ható erőkre kapott értékeket.

3.3.5. Módszerek az elmélet alkalmazására [16]

A boltívek klasszikus elmélete a 18. század végére kialakult. A 19. század közepéig a kutatók apróbb részletek kidolgozásával, egyes kérdésköröknek különböző hipotézisek alapján egymástól kissé eltérő megoldásával foglalkoztak.

A falazott ív statikai határozatlanságának ténye már korábban ismert volt. Ez azt jelentette, hogy a *nyomásvonal pontos helyzete* csupán egyensúlyi egyenletek alapján nem rögzíthető. Különböző feltételezések születtek a nyomásvonal helyzetéről és ezzel összefüggően a *törési keresztmetszet* (az extrados legvalószínűbb megnyílásának) *helyéről* és a *záradéki erő helyéről és nagyságáról*.

Egyik megközelítés szerint felesleges a nyomásvonal pontos helyzetének meghatározása, mert ha adott teherre található a keresztmetszet középső harmadán belüli nyomásvonal, akkor az ív stabil.

Winkler állítása szerint (1879) a valódi nyomásvonal az, amely az ív középvonalához legközelebb helyezkedik el, a legkisebb négyzetek módszerével számítva. (Eredménye a rugalmas energia minimumtételéből származik.)

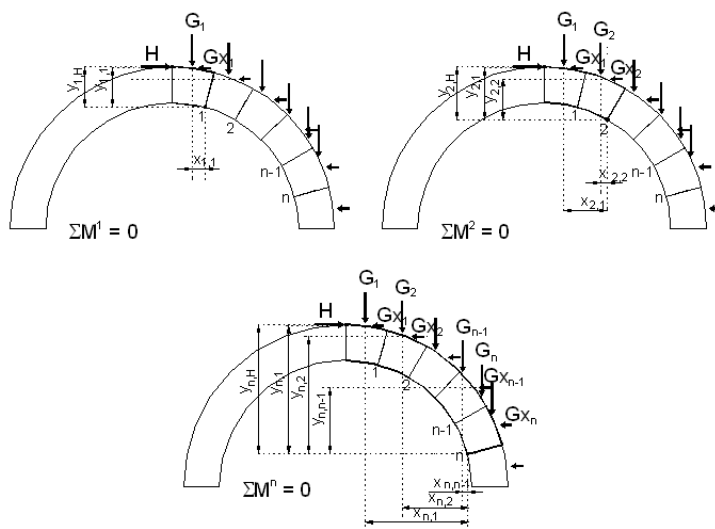
Az általánosan használt hipotézis a záradéki erő minimumán alapul, ezt Henry Moseley (1802–1872) javasolta 1837-ben. A záradéki erő helyét változtatva, értéke abból számítható, hogy a nyomásvonal épp érintőleges az intradosra a törési keresztmetszetben. A különböző helyzetű záradéki erők közül az extradosban működő a legkisebb értékű, ezért ehhez tartozik az igazi nyomásvonal. (A nyomásvonal megszerkesztésének módszere megegyezett Coulomb módszerével, amely Moseley előtt munkája befejezéséig ismeretlen volt.) Moseley nevéhez fűződik a támaszvonal fogalmának meghatározása is. (Nyomásvonalnak az erők hatásvonalait tartalmazó görbét, támaszvonalnak az erőknek az elemek csatlakozási síkjain levő támadáspontjait összekötő görbét nevezzük.) A boltívek elméletét összefoglaló könyve „On the Theory of the Arch” címmel 1839–1843 között jelent meg. Moseley érdeme volt a francia mérnöki módszerek elterjesztése Angliában.

A törési keresztmetszet számítással történő meghatározásánál minden fugához, mint törési keresztmetszethez számítandó egy-egy záradéki erő. Ez az adott keresztmetszet intradosában a felső blokkra ható erőket és a záradéki erőt tartalmazó nyomatóki egyenletből kapható meg (20. ábra).

A záradéki erők legnagyobbikához tartozik az igazi törési keresztmetszet, mert a teher növekedésével itt fog először átlépni a nyomásvonal az intradoson.

A *külső erők* figyelembevételére több megközelítést is használtak. Felismerték, hogy bár fontos lenne ismerni az összes erőhatást, pontosan nem lehet ezeket meghatározni. A hidaknál készített homlokfal, főként ha szabályos falazati sorokból áll, mindig tartalmaz önhordó részt is, nem terheli teljes súlyával az ívet, sőt valamilyen közös erőjáték valósul meg. A hátkitöltésből, a kitöltés típusától függően, kisebb-nagyobb vízszintes teher is származik, ezt általában a függőleges teher harmadaként szokták figyelembe venni.

A feszültségek számításának bevonásával a *tönkremenetel három módját* különböztették meg: az ív elvesztheti állékonyságát a boltkövek törése vagy a boltkövek egymáson való elcsúszása következtében vagy több fugában nagy relatív szögelfordulás létrejöttével. Ennek megfelelően minden fugában teljesülnie kell az alábbi követelményeknek: 1. a nyomásvonal elég messze legyen az extradostól és az intradostól, vagyis a maximális nyomófeszültségek ne lépjék túl a törőszilárdságot, 2. a felületirányú és arra merőleges erők aránya kisebb legyen egy adott értéknél, vagyis a nyomásvonal és a felületi normális szöge kisebb legyen, mint a súrlódási szög, 3. az elfordulás elleni stabilitás biztosítására a nyomásvonal az ív középső harmadában maradjon.



20. ábra. A törési keresztmetszet helyének számítása

$$H \cdot y_{nH} \geq G_{n-1} \cdot x_{n,n-1} + Gx_{n-1} \cdot y_{n,n-1} + \dots + G_2 \cdot x_{n,2} + Gx_2 \cdot y_{n,2} + G_1 \cdot x_{n,1} + Gx_1 \cdot y_{n,3}$$

$$H \cdot y_{2H} \geq G_2 \cdot x_{2,2} + Gx_2 \cdot y_{2,2} + G_1 \cdot x_{2,1} + Gx_1 \cdot y_{2,1}$$

$$H \cdot y_{1H} \geq G_1 \cdot x_{1,1} + Gx_1 \cdot y_{1,1}$$

Az adott geometriájú boltíveknek adott terhelésre való ellenőrzése mellett más megközelítést is alkalmaztak, tudván, hogy a statikai határozatlanság miatt végtelen számú egyensúlyi megoldás létezik. Ezekkel a módszerekkel nem a nyomásvonalat, hanem a megfelelő *tengelyvonalat* akarták meghatározni.

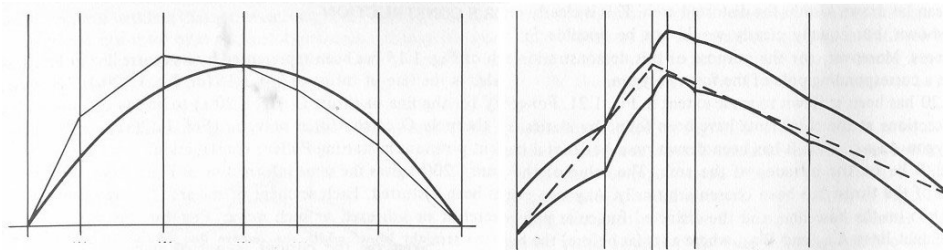
F. J. Gerstner azt vizsgálta, hogy félkör vagy félellipszis alakú ívek tengelyvonala milyen tehereloszlás esetén esik egybe a nyomásvonallal (1830).

Nagyobb gyakorlati hatása volt Yvon Villarceau (1813–1883) elméletének, aki egy biztonságos tervezési módszert fejlesztett ki (1854). Az eljárás lényege az ív középvonalának oly módon történő megválasztása volt, hogy az megegyezzen a nyomásvonal egy lehetséges helyzetével. Teherként az ív önsúlyát és a külső erőkből az extradusra merőlegesen működő nyomást vette figyelembe, s eredményhez differenciálegyenletek numerikus megoldásával jutott. A gyakorlati alkalmazás megkönnyítésére az ív középvonalának pontjait és az ív vastagság értékeit tartalmazó táblázatokat állított elő. A síkfödémek mai túlelemelésének megfelelően ő is előírta, hogy építéskor kissé magasabbra kell készíteni az ív zsaluzatát. Így a rugalmas deformációk lejátszódása után a boltív éppen a kívánt alakot éri el.

1846-ban falazott ívekkel végzett modellkísérleteket W. Henry Barlow (1812–1902), aki épületeit már az új szerkezeti anyaggal tervezte (London: St. Pancras pályaudvar).

A *grafikus módszerek* alkalmazása a mérnöki gyakorlatban a 19. század második felétől vált igazán elterjedtté, bár azelőtt is használtak szerkesztéses eljárásokat. Varignon óta az erő- és kötélpoligon fogalmai ismertek voltak, de Karl Cullmann (1821–1881) nevéhez fűződik a grafikus módszerek rendszerezése, s ezek bevezetése a mechanikai feladatok megoldásába. Cullmann záróvonal szerkesztésével (1866) vált egyszerűen végrehajthatóvá a nyomásvonal meghatározása. A boltkövek közti húzás kizárásával, a záradékbán a felső harmadpont és a törési keresztmetszeteknél a belső harmadpontok közé szerkesztette a nyomásvonalat.

1875-ben Fuller érdekes grafikus eljárást dolgozott ki az ívek ellenőrzésére. A módszer a több teherből származó poligonális nyomásvonalnak az ív vastagságon belüli elhelyezése helyett a nyomásvonalat két egyenessé alakítja, s ennek megfelelően torzítja az ív alakját (21. ábra). Ezután már könnyen eldönthető, hogy az így előállított ívalakba a nyomásvonalat reprezentáló két egyenes beírható-e, vagyis az ív megfelel-e az adott teherre.



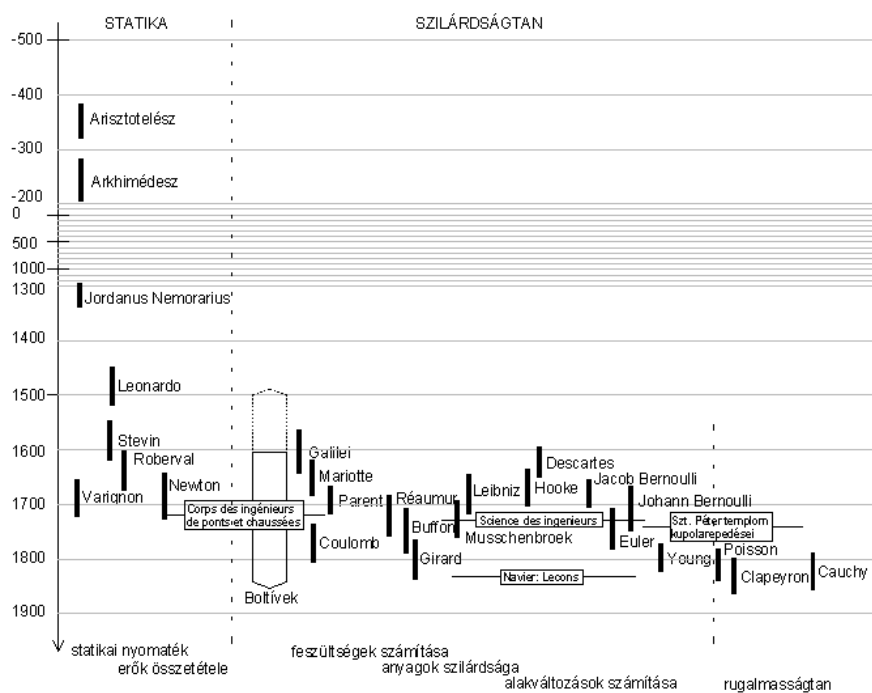
21. ábra. Boltív ellenőrzése (Fuller, 1875)

A szilárdságtan tudományának további alakulása során a 19. században a rugalmasságtan elmélete fejlődött ki, az anyagok belső feszültségeinek és deformációinak vizsgálatával. Ez a boltívek elméletében is új megközelítéshez vezetett, mely először 1852-ben Ponceletnél merült fel. Bresse 1865-ben kidolgozta a rugalmas anyagú görbe rudak elméletét, s javasolta ennek alkalmazását boltívek tervezésére. Ez a megközelítés pontosabb eredményt ígért, mint a klasszikus elmélet, mert az anyagtulajdonságok figyelembevételével dolgozott. Mégis, a falazati anyagban lévő bizonytalanságok és az anyagról való kevés elméleti tudás miatt alkalmazása kő- és téglanyagú ívekre erősen korlátozott. Az ívek rugalmas elméletét Winkler és Mohr vezették be a méretezésbe, mely elmélet ismertetése már nem képezi e cikk tárgyát.

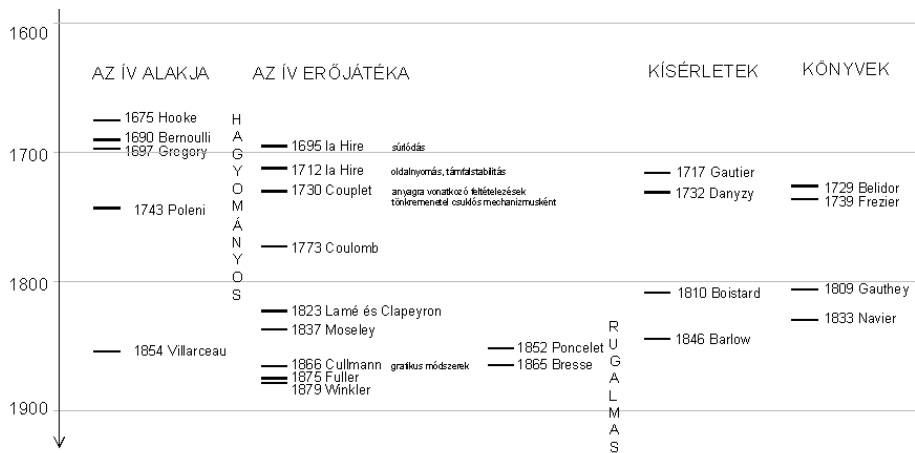
4. ÖSSZEFOGLALÁS

4.1. AZ ELMÉLET FEJLŐDÉSE

Az építési mechanika 19. század elejéig tartó fejlődését ábrában foglaltuk össze, mely a jelentős tudósok neveit tartalmazza az idő függvényében (22. ábra). A nagyobb témakörök szerint elrendezve minden név csak egyszer szerepel, bár sokan több területen is elérték eredményeket. A statika és szilárdságtan tudományának fejlődését ábrázoló diagram 17. század végétől 19. század elejéig terjedő szakaszát kinagyítottuk, s ebben helyeztük el a falazott ívek elméletének kutatóit (23. ábra). Az ív alakjának helyes kialakításával főleg a 17. század végének tudósai foglalkoztak, bár később is előfordult ennek az elvnek az alkalmazása, mind az ellenőrzésben, mind a tervezésben. A boltívek klasszikus elmélete az adott alakú ív erőjátékának kutatása során fejlődött ki, lépésről lépésre a 18. század végére. Ezután a hagyományos elmélet továbbfejlesztőinek, majd egy gyökeresen más megközelítés, a rugalmas elmélet kutatóinak nevei következnek. A diagram külön oszlopban tünteti fel a csak kísérletező tudósok neveit, valamint a falazott ívekkel kapcsolatos fontosabb művek szerzőit.



22. ábra. Az építési mechanika fejlődéstörténete



23. ábra. A falazott boltívek elméletének fejlődéstörténete

4.2. A FALAZOTT BOLTÍVEK KLASSZIKUS ELMÉLETE

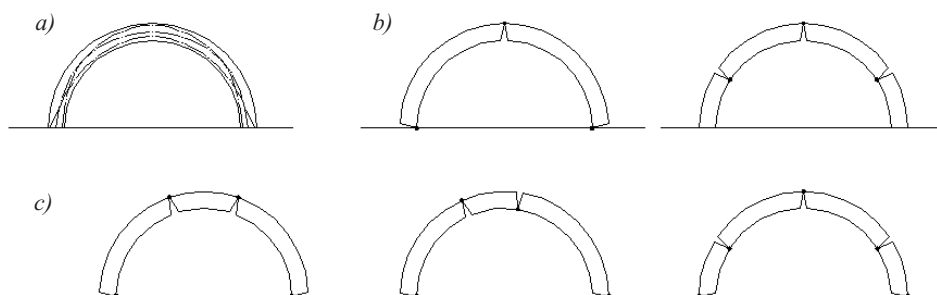
A boltívek hagyományos elmélete az erőjáték vizsgálatánál a statikai egyensúlyi egyenleteket veszi alapul. A közelítés elsőrendű, a deformációkat nem számítja. Legfontosabb eszköze a nyomásvonal, mely nem más, mint a nyomóerők terjedésének útja a szerkezetben. A boltív anyagára vonatkozó feltételezések a következők:

- elcsúszás nem jön létre a boltkövek között,
- húzószilárdság nincs,
- a nyomószilárdság végtelen nagy.

A vizsgálat a nyomásvonal és az ív geometriájának összehasonlításával történik. A tervezés is tulajdonképpen ellenőrzésből áll: A felvett ívalak (tengelyvonal és ívvastagság) belsejébe szerkeszthető nyomásvonal biztosítja a szerkezet megfelelőségét.

Adott teherre a statikailag lehetséges nyomásvonalak száma általában végtelen, mivel a falazott boltív statikailag (háromszorosan) határozatlan szerkezet. Teherbírási határállapot akkor lép fel, ha a nyomásvonal négy helyen (szimmetrikus esetben esetleg öt helyen) érinti a keresztmetszet széleit. Három érintési pont nem teszi tönkre az ívet, a létrejövő háromcsuklós tartó statikailag határozott szerkezet (24. ábra). A nyomásvonal érintési helyein repedések kialakulásával csuklós mechanizmussá válik az ív. Ezt általában a támaszok elmozdulása vagy a vállak nem megfelelő leterhelése teszi lehetővé. Állékony az ív, amennyiben legalább egy, a

keresztmetszeten belüli nyomásvonal található. Ekkor a teher arányos növelésével sem tehető tönkre.



24. ábra. Ívek egyensúlyi és tönkremeneteli helyzetei: a) a nyomásvonal lehetséges pozíciói; b) háromcsuklós tartók; c) négycsuklós (ötcsuklós) mechanizmusok

Az ív tervezése a hagyományos elmélet szerint alapvetően a jó geometria meghatározását jelenti. A csupán statikai egyensúly alapján dolgozó ívelmélet geometriai úton, a nyomásvonal és az ívalak összevetésével igazolja az állékonyt (hallgatólagosan belefoglalva az anyagra vonatkozó feltételezésekkel). Később az ívek elméletében is megjelent a feszültségek fogalma, ekkortól a nyomásvonal pozíciójából feszültségeket számoltak, s ezeket vetették össze a határértékekkel.

A hagyományos elmélet korlátai éppen az alapfeltételezéseiből adódnak, a nyomó-, nyíró- és húzószilárdság feltételezett értékei, a deformációk elhanyagolása, az elsőrendű közelítés, a csatlakozó szerkezetek (hátkitöltés, homlokfal stb.) hatásának kiiktatása mind a számítás pontosságát csökkentik, legtöbbször a biztonság kárára.

4.3. A FALAZOTT BOLTÍVEK MAI KUTATÁSA

A 19. században lezárult kutatás után a 20. század második felében újra érdeklődés ébredt a falazott ívek erőtékának megismerésére. A cél már nem méretezési módszer kidolgozása volt, bár ekkor is épültek még falazott hidak. Kínában az 50-es évektől többszáz kőhidat emeltek, az 1972-ben elkészült Chiuhsikou híd 116 méteres nyílásközével a világ legnagyobb fesztávú falazott ívhídja [17].

A kutatás egyik célja a múlt megismerése, a történeti szerkezetek tanulmányozásán keresztül régi korok építésmódjára, technikai ismereteire, gondolkodásmódjára is vonhatunk le következtetéseket.

A kutatás legfontosabb törekvése az, hogy a meglévő szerkezeteket ellenőrizni lehessen. Az idő múlása, a környezeti viszonyok megváltozása sokszor kárt okoz

az épületekben, építményekben. A szerkezeti anyagok öregedése, karbantartás hiánya vagy környezetszennyezés okozta károsodása gyengíti a konstrukciót. A megépítés óta történt átépítések, bővítések megváltoztatják a geometriát. Legfontosabb tényezőként a terhelés változása befolyásolja a szerkezetek működését. Hidak megnövekedett forgalma, a modern közlekedésből adódó rezgések, funkcióváltás miatti átépítések átrendezik az eredeti terhelési viszonyokat. A boltozat gyámfalainak elmozdulása, mint kinematikai teher lehet a fedélszék szétcsúszásának vagy az épület környezetében történt mélyépítési munkáknak a következménye. Mindezekhez hozzájárulhat az esetleg eredetileg is hibás konstrukció.

Meglevő boltozott szerkezeteinket, melyek koruknál fogva gyakran műemléki védelem alatt állnak, ellenőrizni kell mindezekre a változásokra, meg kell állapítani biztonságukat, dönteni kell a szükséges beavatkozásokról. Ritkább, hogy mindezeket megelőző intézkedésként hajtják végre (pl. híd tervezett forgalomnövekedése, alagútépítés, épület átépítése), sajnos általában csak a károsodás megtörténte után kerül erre sor.

Mindezek megvalósításához szükséges a boltívek, boltozatok mechanikai működésének minél pontosabb ismerete. Történeti falazott szerkezetek esetében hangsúlyt kell fektetni arra, hogy a szerkezet egyes elemeinek külön-külön való vizsgálata alapján téves következtetéseket vonhatunk le. Az összefalazás során egybeépített szerkezeti elemek együttdolgoznak (legnyilvánvalóbb példa a boltozat és gyámfalának viszonya) sokkal inkább, mint modern épületek egymásra helyezett, tartószerkezeti funkció szerint különválasztott elemei. Ezért sokszor nehezebb feladatot jelent az egész szerkezet komplex analízise.

A boltívek mai vizsgálatához olyan elméleti ismeretekkel, technikai eszközökkel is rendelkezünk, melyek a 19. században még nem álltak a kutatók rendelkezésére. Ma az anyagjellemzők, a geometria (csatlakozó szerkezetek) és a terhek pontosabb figyelembevételével részletesebb vizsgálat válik lehetővé, mód nyílik a deformációk számítására, a szerkezetek biztonságának becslésére.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Andai Pál: *A mérnöki alkotás története*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1959.
- [2] Cowan, Henry J.: *The Master Builders*. Malabar, Robert E. Krieger Publishing Company, 1977.
- [3] Straub, Hans: *Die Geschichte der Bauingenieurkunst*. Basel, Birkhäuser Verlag, 1949.
- [4] Hart, Franz: *Kunst und Technik der Wölbung*. München, Verlag Georg D. W. Callwey, 1965.
- [5] Kollár Lajos – Vámosy Ferenc: *Mérnöki alkotások esztétikája*. Budapest, Akadémiai Kiadó, 1996.
- [6] Kollár Lajos (szerk.): *Mérnöki építmények és szerkezetek tervezése*. Budapest, Akadémiai Kiadó, 2000.
- [7] Büttner, O. – Hampe, E.: *Bauwerk, Tragwerk, Tragstruktur*. Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1977.

- [8] Mainstone, Rowland: *Developments in Structural Form*. London, Allen Lane, 1975.
- [9] Timoshenko, S. P.: *History of Strength of Materials*. London, McGraw-Hill Publishing Company, 1953.
- [10] Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*. Budapest, Gondolat, 1978.
- [11] Rossi, P.: *A filozófusok és a gépek*. Budapest, Kossuth, 1975.
- [12] Parsons, W. B.: *Engineers and Engineering in the Renaissance*. Cambridge, MIT Press, 1939.
- [13] Gilyén Nándor: *A statika szerepe az építészettörténeti formák kialakulásában*. Műszaki doktori értekezés, Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetem, Budapest 1963.
- [14] Heyman, Jacques: „Gothic” construction in Ancient Greece. *Journal of the Society of Architectural Historians*, Vol. 31. 1972. 3–9.
- [15] Heyman, Jacques: *The Masonry Arch*. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1982.
- [16] Baker, I. O.: *A Treatise on Masonry Construction*. New York, John Wiley & Sons, 1889.
- [17] Mao Yi-sheng: *Bridges in China, Old and New*. Peking, Languages Press, 1978.
- [18] Kaliszky Sándor: Kő-, tégl- és betonboltozatok vizsgálata a törési elmélet szerint. *Mély-építéstudományi Szemle* XI. évf. 1961. 10. sz. 469–474.

THE CLASSICAL THEORY OF THE MASONRY ARCH

Summary

Masonry arches and vaults are one of the main types of load-bearing structures in historical construction. This paper gives a survey of the theory of masonry arches. The development of the theory is an inherent part of the history of building mechanics.

The design method in historical ages involved mostly empirical rules based on experience. The theory of arches initiated at the end of the 17th century, after elaborating the fundamental elements of statics. Initially, researchers were concerned with the correct shape of arches, prior to dealing with the forces between the voussoires or at the springings. It was an early recognition that the safety of an arch depends mainly on the stability of the supporting walls, which led to the investigation of the horizontal thrust. In the 19th century researchers elaborated further minor details of the theory.

The classical theory of the masonry arch was developed in the 18th century. It applies equilibrium conditions and checks the structure by means of the thrust line. It emphasises the importance of the structural shape rather than the material or loading.

What makes a research on masonry arches topical today is, beyond learning about our past, the reconstruction and protection of historic buildings.

Keywords: masonry arch, history of building mechanics, theory of arches