

LABORATÓRIUMI KÍSÉRLETEK AZ AKNATALP CEMENTÁLÁSA SORÁN FELLÉPŐ JELENSÉGEK TANULMÁNYOZÁSÁRA

A) Bevezetés

A bányászati aknamélyítések során gyakran kell vízáadó rétegeket harántolni. Adódnak olyan esetek is, amikor szivattyúval a vízkiemelés már nem gazdaságos, vagy nem lehetséges. Ilyenkor az épülő akna adott szintjén víz alatti cementdugót képeznek ki, mely alulról a vízbeáramlást megszünteti, vagy legalább olyan mértékben lecsökkenti, hogy a víz folyamatosan kiszivattyúzható. Az aknafenéken kialakított cementdugón keresztül — annak megszilárdulása után — injektálással teszik vízzáróvá a kőzet vízvezető repedéseit. A cementdugó megfelelő szilárdsága és vízzárósága alapvetően fontos, különösen olyan esetekben, amikor a cementdugóra alulról nagy víznyomás hat.

A bányászati építés gyakorlati tapasztalatai szerint a cementdugók minősége nagyon ingadozik, ami a cementdugók szükséges vastagságának megállapítását bizonytalanná teszi, és végső soron túlméretezésre vezethet. Másrészt olyan jelenségeket is észleltek, amikor a cementdugó egyáltalán nem szilárdult meg, holott káros vízkémiai hatások nem jelentkeztek.

Mindezek szükségessé tették azoknak a körülményeknek a vizsgálatát, melyek a cementdugó készítésekor, illetve annak megszilárdulásakor fellépnek.

A kísérletek első részét a Bányászati Aknamélyítő Tröszt megbízása alapján 1964—66-ban végeztük el a Budapesti Műszaki Egyetem Vízépítési Tanszékének laboratóriumában, majd a vizsgálatokat ugyanott 1966—67-ben a kérdés további tisztázása érdekében továbbfolytattuk.

B) Az aknatalpcementálás során fellépő hatások

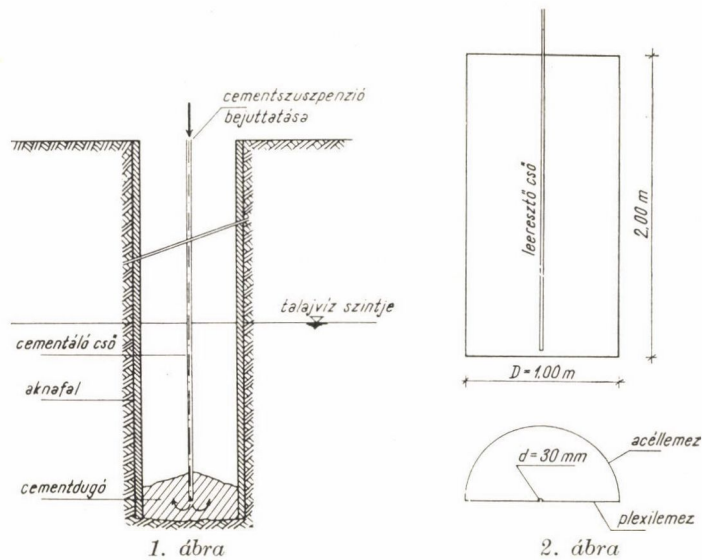
A cementdugót általában cementtejből készítik el, melyet függőleges csővezetéken keresztül nyomás alatt vagy gravitációs úton juttatnak el a víz alatti aknafenékre.

A képződő cementkő megszilárdulását és minőségét a következő tényezők befolyásolják:

a) *a leeresztő cső végén a cementtej kiömlési sebessége.* A kiömlési sebesség függvényében különböző mértékű turbulencia alakul ki, mely a kiömlő cementtej fellazulását, felhígulását eredményezi. A felhígulás mértékével a kialakuló szilárdság fordítva arányos. E mellett feltételezhető, hogy a felhígulás utáni ülepedés sebessége és a szilárdulás során esetenként tapasztalt rendellenesség között is összefüggés áll fenn. A kiömlési sebesség a cső belső átmérőjétől, a csővégnek az aknatalphoz viszonyított helyzetétől, a cementtej fajsúlyától, viszkozitásától (mely a cementtej fajsúlyának is függvénye) és az aknatalp

mélysége, a cementtej nívószintje, illetve a nyugalmi víznívó által meghatározott nyomásviszonyoktól függ (1. ábra).

b) a cement minősége, elsősorban abból a szempontból, hogy a cementpép milyen mértékben hajlamos a vízbe juttatva további felhígulásra. Másrészt a cement „vízérzékenysége”, vagyis a v/c növekedésének hatására előálló szilárdságváltozás, továbbá a kötésidő, illetve ennek alakulása különböző vízcementtényezők mellett.



c) a kőzetben lévő víz kémiai összetétele és hőmérséklete, valamint az aknában lévő víz esetleges áramló mozgása.

d) a cementálás technológiai folyamatának időtényezője, vagyis a cementtej készítésétől a megszilárduláshoz szükséges nyugalmi állapot beálltaig eltelt idő — különös tekintettel az a) alatt ismertetett mozgásokra.

Az alább ismertetendő modellkísérletek célja a cementdugó készítése közben fellépő hatások és azok nagyságrendjének megismerése volt.

C) A modell

A laboratóriumi modellel 52 m-ig lemélyített aknát kellett vizsgálni, amelynek átmérője 5 m, a nyugalmi vízszint pedig az akna 17. méterében, tehát 35 m-rel az aknától felett helyezkedett el.

A modell méretaránya 1 : 5, kivéve az akna hosszát, melynek ilyen arányú modellezése laboratóriumi körülmények között nem lett volna lehetséges és célszerű. Így csak az akna alsó 10 méterét modelleztük, de a cementáló cső hosszát, illetve a szuszpenzió nívószintjét úgy választottuk meg, hogy a kialakuló áramlási sebesség akkora legyen, mintha a teljes hosszúságú akna-modellt készítettük volna el. A hidraulikai modellezést — a cementtej kilépési sebességére, a nyomómagasság számítására — Froude-törvény alapján végeztük el.

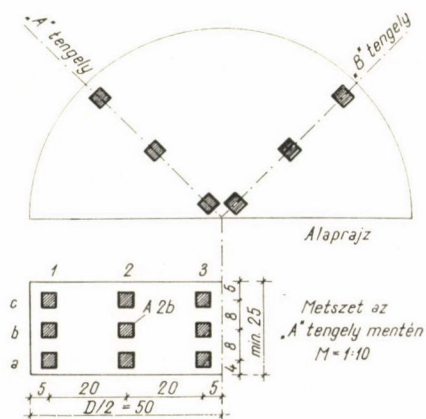
Az adatokat az I. táblázatban tüntettük fel. A modell geometriai adatai a 2. ábrán láthatók. Csak szeletmodellt készítettünk, — a sík felületet plexi-lemezzel zártuk le — ezáltal a leeresztési kísérletek közben jobban tudtuk észlelni a lejátszódó jelenségeket. A modell fenékrésze leemelhető, így a megszilárdult cementkő abból egészben vehető ki.

I. Táblázat

	A valóságban	A modellben
A valóságban az aknatalp felett 5 m magasságban elhelyezkedő csővégeknél a kilépési sebesség a nyomómagasság	6 m/s 17 m	2,66 m/s 0,56 m
A valóságban az aknatalp felett 20 cm magasságban elhelyezkedő csővégeknél a kilépési sebesség a nyomómagasság	5,75 m/s 17 m	2,55 m/s 0,93 m

D) A kísérletek menete és eredményei

A cementtejet a modell felett elhelyezett keverőtartályba készítettük el, majd innen az állandó nívósínt tartható leeresztőtartályba vezettük, és 3 cm átmérőjű csővön, gravitációs úton engedték az aknafenekre. A leeresz-



3. ábra

tett cementtej mennyiségét úgy választottuk meg, hogy az adott fajszű mellett minden esetben állandó vastagságú (kb. 25 cm) cementdugó keletkezzék. A cementtej fajszűlya és a leeresztő cső végének az aknától mért távolsága képezték azokat a paramétereket, melyeknek hatását a cementdugó szilárdságát befolyásoló tényezők szempontjából elsőként kellett megismerni.

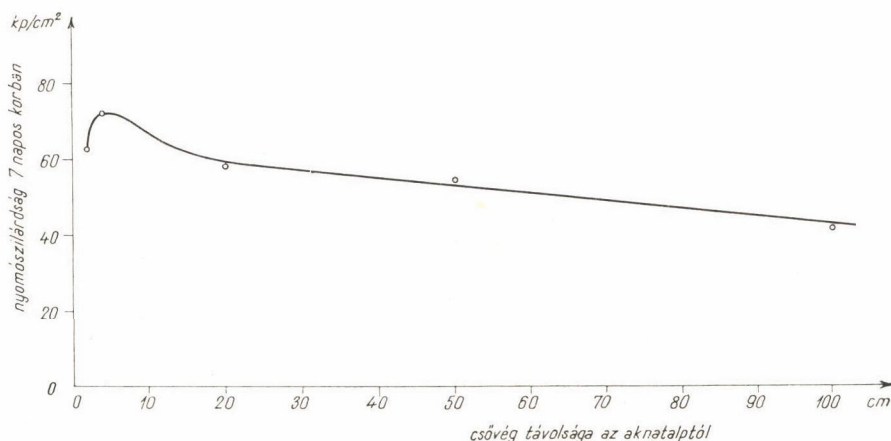
A szilárdsági vizsgálatokat kísérletenként a cementdugó 18 helyén végeztük el, a 3. ábra szerint vett minták alapján. A mintavétel a következőképpen történt: a cementtej leeresztése után 1 óra múlva 0,5 mm vastag hornganylemezről készült $25 \times 4 \times 4$ cm méretű hasábpalástokat süllyesztettünk be a már leülepedett, de még meg nem kötött cementtejbe a 3. ábrán megjelölt helyeken. Megszilárdulás után a sablonokból kiemelt mintákat 3 db $4 \times 4 \times 4$ cm méretű kockává fűrészeltük el, eredeti helyzetük megjelölésével. A kockák törését 7 napos korban végeztük el. Tekintve, hogy a mintavétel tengelyszimmetrikus volt (3. ábra), az eredményeket csak egyik oldalra vonatkoztatva közöljük, megjegyezve, hogy a közölt eredmények a két oldalon nyert szilárdságok átlagértékei. A szilárdsági vizsgálaton túl a modell plexi-falán keresztül minden kísérletnél megfigyeltük a leeresztés okozta turbulencia hatását, azaz a cementtej felkavarodásának magassági terjedését.

1. A csővég aknától való távolságának és a cementtej fajsúlyának hatása

A kísérletek első részét tatai 600-as cementtel végeztük el. A cementszuszpenzió fajsúlya $1,6 \text{ gr/cm}^3$ volt, míg a csővégnek az aknától való távolsága változott. Az eredményeket a II. táblázatban és a 4. ábrán tüntettük fel. A feltüntetett szilárdsági értékek (7 napos) a talpdugók átlagszilárdságai.

II. Táblázat

Kísérlet jele	Cementtej fajsúlya ρ/cm^3	Csővég távolsága az aknától cm	Nyomószilárdság kp/cm^2	Felkeveredés magassága az aknától felett cm
2.1	1,6	2,0	62,4	35
2.2	1,6	4,0	72,2	31
2.3	1,6	20,0	58,2	37
2.4	1,6	50,0	54,7	53,5
2.5	1,6	100,0	41,7	95



4. ábra

Megállapítható, hogy a leeresztő csővég helyzete befolyásolja a talpdugók szilárdságát. A 4. ábra szerint a modellben az optimális távolság az aknafenek-től 3—10 cm között van. A legnagyobb szilárdság a legkisebbnek 1,73-szorosa.

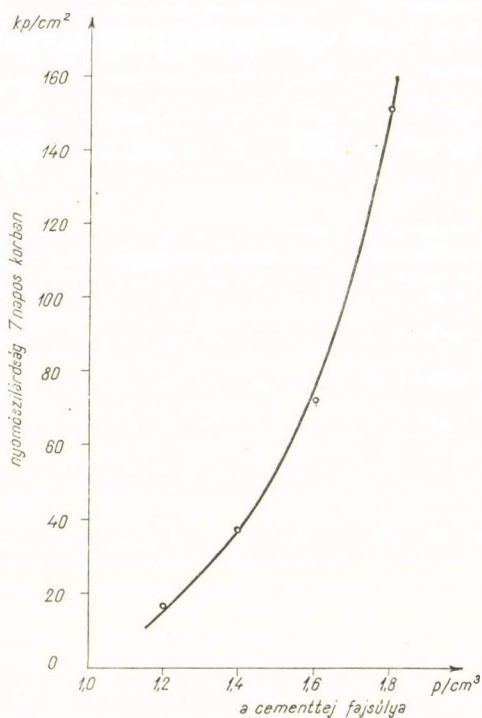
A III. táblázatban és az 5. ábrán a különféle fajsúlyú cementszuszpenziókkal végzett kísérletek eredményeit tüntettük fel. A cement szintén tatai 600-as

III. Táblázat

Kísérlet jele	Cementtej fajsúlya ρ/cm^3	Csővég távolsága az aknatalptól cm	Nyomószilárdság kp/cm^2	Felkeveredés magassága az aknatalp felett cm
3.1	1,0	4,0	(víz)	200
3.21	1,2	4,0	16,4	76
3.22	1,4	4,0	37,1	48
3.23	1,6	4,0	72,2	31
3.24	1,8	4,0	151,8	26

minőségű. A csővég távolsága az aknatalptól 4 cm volt — az előbbi kísérleti eredményeket figyelembevéve. A feltüntetett szilárdsági értékek 7 napos törési átlagszilárdságok.

Mint az várható volt, a cementszuszpenzió fajsúlyának növelésével nagymértékben növekedett a megszilárdult cementkő szilárdsága is. A fajsúly további növelésének a cementszuszpenzió viszkozitása szab határt.



5. ábra

A II. és III. táblázatban feltüntettük a cementszuszpenziók felkeveredésének magasságát is az aknatalp felett. A különböző fajsúlyú cementszuszpenziók felkeveredési magassága változó és ez szorosan összefügg a cementkő szilárdságával is.

2. A cementfajta hatása és a szilárdság alakulása a keresztmetszeten belül

Az alább ismertetett kísérleti eredmények a D. pont elején leírt módon kerültek végrehajtásra.

Három fajta cementtel — váci 700-as és két fajta tatai 600-as — végeztünk kísérleteket, annak megállapítására, hogy melyik cementfajta ad jobb szilárdsági értékeket laboratóriumi talpdugó készítés esetén. Az eredmények

IV. Táblázat

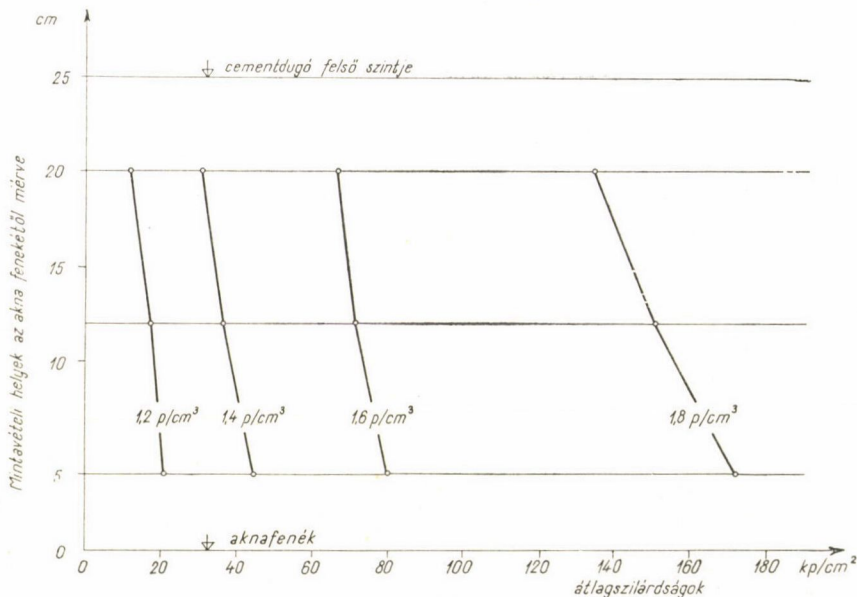
Kísérlet jele	Cementtej fajsúlya p/cm ³	Minta magassági helyzete (3. ábra)	Nyomószilárdság 7 napos korban A két tengely átlagértéke kp/cm ²				% -os érték („a” sor értékeit 100-nak véve)
			A minta vízszintes helyzete			átlag	
			1	2	3		
3.21	1,2	c	13,1	11,0	10,2	11,4	54,9
		b	15,2	17,4	18,3	17,0	81,8
		a	19,8	20,7	21,9	20,8	100,0
		átlag	16,0	16,4	16,8	16,4	—
3.22	1,4	c	33,6	29,2	29,0	30,6	68,7
		b	37,7	32,8	38,5	36,3	81,5
		a	43,7	45,1	44,7	44,5	100,0
		átlag	38,3	35,7	37,4	37,1	—
3.23	1,6	c	65,8	66,4	65,9	66,0	81,9
		b	70,4	75,5	66,6	70,8	87,8
		a	74,2	84,0	83,5	80,6	100,0
		átlag	70,1	75,3	72,0	72,5	—
3.24	1,8	c	124,0	146,0	132,0	134,0	78,3
		b	147,8	166,2	136,6	150,2	87,7
		a	161,3	185,6	167,2	171,4	100,0
		átlag	144,3	165,9	145,5	151,9	—

azt mutatták, hogy a magas vízcementtényező mellett megszilárdult cement jósági sorrendje nem követi a szabványos vizsgálatokkal nyert minősítést. Ezt mutatja, hogy a szabványos vizsgálatokkal „legjobb” minősített tatai 600-as cement rosszabb eredményt adott, mint a „legrosszabbnak” minősített tatai 600-as. A vizsgált három cementfajta nem teszi lehetővé, hogy a cementek közötti alkalmassági sorrendet felállítsuk, azonban egyértelműen arra figyelmeztet, hogy az aknatalp cementálása során nagy vízcementtényezőjű cementtejek szilárdsági vizsgálata alapján kell az alkalmazandó cementet kiválasztani.

A IV. táblázatban, valamint a 6—7. ábrán a különböző helyekről (3. ábra) vett próbakockák szilárdsági eredményeit tüntettük fel a cementszuszpenzió fajsúlyának függvényében. A felhasznált cement tatai 600-as, a csővég a fenéktől 4 cm-re volt. Minthogy minden kísérletet háromszor ismételtünk, így a táblázatban megadott szilárdsági értékek összesen hat tengely mentén meghatározott szilárdságok átlagértékei.

Az eredmények azt mutatják, hogy a kivett mintáknak a leeresztő cső tengelyétől mért vízszintes távolsága és a kapott szilárdsága között nincs lényegesebb összefüggés.

A cementdugó szilárdsága a vastagság mentén változik (6—7. ábra), és pedig a szilárdság a cementdugó felszínétől az aknafenékig a mélység függ-



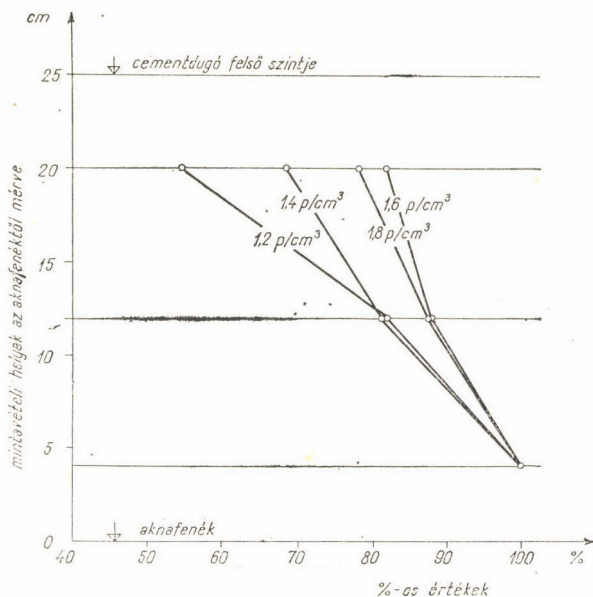
6. ábra

vényében nő. A 7. ábráról az is megállapítható, hogy minél kisebb fajsúlyú cementszuszpenzióval készítjük a talpdugót, annál nagyobb mértékű lesz a szilárdságváltozás a mélység függvényében.

A jelenség a leeresztés közben bekövetkező felhígulással magyarázható. A meghatározott sebességgel leérkező cementtej a leeresztő csőből történő kilépésekor vízzel érintkezik. Az aknafenéktől történő visszaverődés a vízzel való felhígulást elősegíti. A cement egy része lebegő állapotba kerül, ezzel egy időben az ülepedés folyamata is megindul. Azok a cementszemcsék, amelyek utoljára ülepednek le, és a dugó felszínének közelében kerülnek végső helyzetükbe, lényegesen lazább struktúrát képeznek, mint azok a cementszemcsék, amelyek korábban leülepedtek, és a ráülepedő cementszemcsék súlya folytán tömörödtek, illetve a ráülepedett rész a turbulens lazulást is gátolta.

A későbbiekben ismertetett kísérletek alapján a jelenség nemcsak bizo-

nyitható, de a zavart szilárdulás időtartamának és az ülepedési sebességnek figyelembevételével a cementdugó magassági függvényében szinte számítással nyomon követhető a szilárdság alakulása.



7. ábra

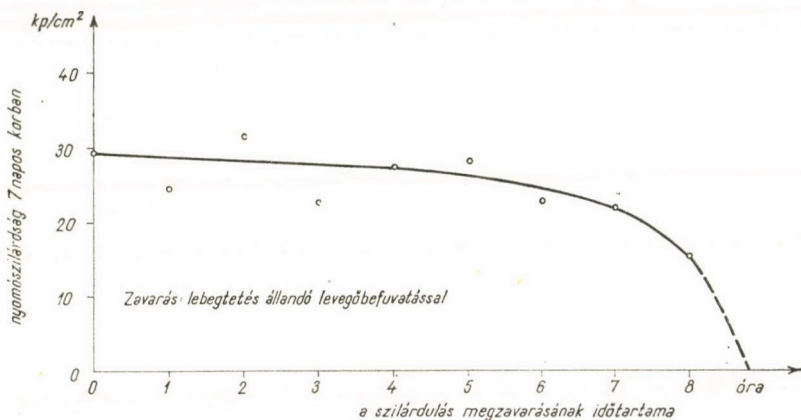
3. A leeresztés időtartamának hatása

Többször észlelték a gyakorlatban olyan jelenséget, hogy az aknafenekre leeresztett cementtej egyáltalán nem szilárdult meg. A jelenséget a leeresztés közbeni turbulencia fellépésével magyarázzuk. A különböző leeresztéseknél különböző mértékű felkeveredés áll elő. A cementszuszpenzió leeresztésének befejeztével viszonylagos nyugalmi állapot következik be. Megindul a felkeveredett cementszemcsék ülepedése. Ha az ülepedési hossz, illetve idő elég nagy, bekövetkezhet az egyes cementszemcsék hidratálódása anélkül, hogy az egyes szemcsék érintkeznének egymással. Ilyenkor nem alakul ki összefüggő cementkő, hanem hidratált cementszemcsékből álló cementiszap képződik.

A jelenség tanulmányozására a modellben olyan leeresztést végeztünk, 1,4 gr/cm^3 fajsúlyú C. 600-ból készült cementtejjel, amelynél a cementtejet 4 órán át lebegésben tartottuk, sűrített levegő befúvatása segítségével. A lebegtetés befejezése után a leülepedett cement felső, kb. 2/3 része egyáltalán nem szilárdult meg. Ezután kismodellkísérletet végeztünk a jelenség pontosabb megismerésére.

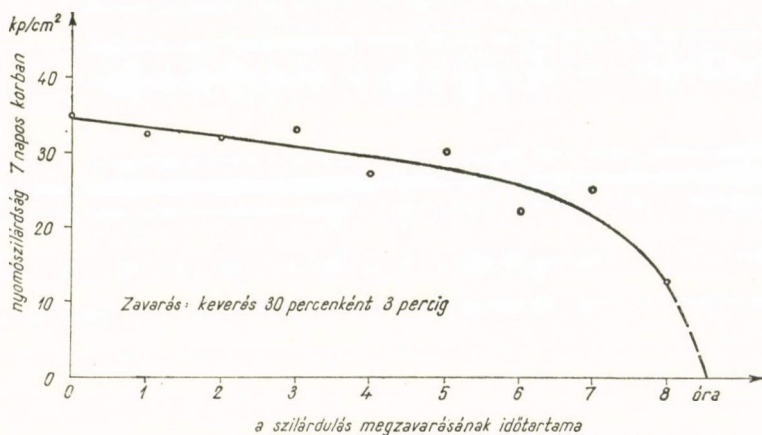
Tatai 600-as cementből 1,2 gr/cm^3 fajsúlyú cementpépet készítettünk, melyet sűrített levegő segítségével lebegésben tartottunk 8 órán keresztül. A cementpéből óránként mintákat vettünk, és 7,07 cm élhosszúságú kockákon határoztuk meg a 7 napos nyomószilárdságokat. A vizsgálat eredménye a 8. ábrán látható.

A kísérlet eredménye azt mutatta, hogy a 8 óránál hosszabb lebegtetés meggátolta a cementpép összefüggő tömbben való megszilárdulását. Feltehető, hogy a cementszemcsék egyedi hidratációjaként a cementkő helyett laza cementiszap keletkezett.



8. ábra

Még arra a kérdésre kellett választ keresni, hogy az észlelt jelenséget csak a lebegtetés ténye idézi-e elő, vagy más módon is meggátolható a cementkő kialakulása? Ennek kimutatására további vizsgálatot végeztünk az előbbi-



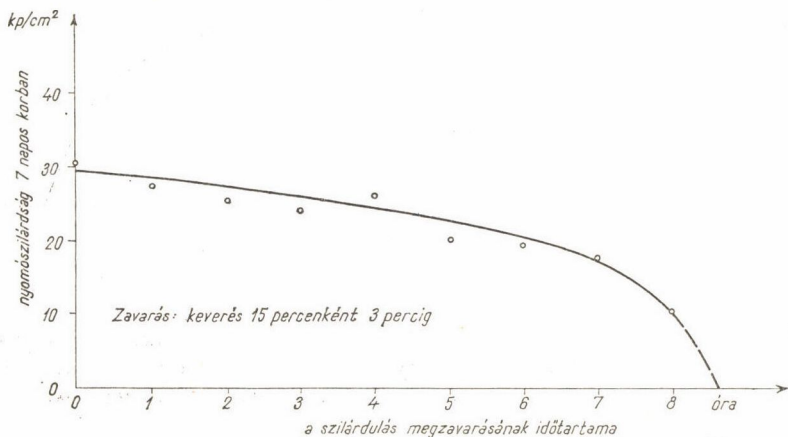
9. ábra

vel azonos összetételű cementpéppel, azonban a hidratációt nem lebegtetéssel, hanem időszakos átkeveréssel zavartuk meg. A 9. ábrán feltüntetett kísérlet-sorozatnál 30 percenként, a 10. ábrán bemutatottnál pedig 15 percenként 3 percen keresztül átkevertük a cementpépet és óránként vett mintákon meghatároztuk a nyomószilárdságot 7 napos korban.

A kapott eredmények közel megegyeznek azzal a hatással, amelyet az állandó lebegtetés váltott ki. Eszerint megállapítható, hogy a cementpép hidratá-

ciójának 8 órát meghaladó zavarása a szilárdulás elmaradásához vezethet, és a szilárdság csökken már 8 óránál rövidebb zavarás esetén is.

A gyakorlatban több tényező is előidézhetheti az aknacementálás során előállítandó cementdugó megszilárdulásának elmaradását a fent említett jelenség kapcsán. Eltekintve attól a ritka esettől, amikor alulról feltörő gázok okozta lebegtetés áll elő, elsősorban az aknacementálás technológiai folyamatában kell keresni a kiváltó okokat. Ezek közül a cementtej bejuttatásánál, illetve a cementáló csővezetékéből történő kilépésnél előálló turbulenciára kell figyelni; ha a magas kilépési sebesség következtében fellépő turbulencia a cementszem-



10. ábra

csék nagymértékű felkavarodásához vezet, a szilárdulás elmaradása várható. Pl. ha a felkavarodás eléri a 35 méteres magasságot, a legfelülre kerülő finomabb cementszemcsék leülepedési ideje — átlagosan 30μ szemcseátmérővel számolva — Stokes-törvénye alapján 12 óra. Belátható, hogy az ülepedési folyamat a cement nagy részének egyedi hidratációját és laza cementiszapként történő leülepedését eredményezi.

Hasonló eredményre vezet a hosszú időn át, szüneteltetés nélkül végrehajtott cementálás; a cementtej leeresztése maga is mozgásban tartja a már leeresztett cementtej tömegét, és amíg a folyamat tart, a hidratáció zavartnak tekinthető.

A leírt káros jelenségek elkerülésére a cementtej leeresztését szakaszosan célszerű elvégezni, kivárva a kötés végéhez tartozó időket. Egy-egy szakasz időtartamát úgy célszerű meghatározni, hogy az elkerülhetetlenül előálló felkeveredés miatti ülepedés idejét is figyelembe vesszük. Mindez akkor lehet eredményes, ha a leeresztő cső helyzetét helyesen határozzuk meg, és ezzel a turbulens keveredés mértékét minimálisra csökkentjük.

Az ülepedés mint a szilárdulást zavaró folyamat bővebb magyarázatot ad a III. táblázatban bemutatott kísérleti eredményekre is. Ha ugyanis a megszilárdult cementdugót úgy tekintjük, mint a lebegésből leülepedett rendszert, akkor a két jelenség együttes hatása alapján világossá válik a szilárdság és a magassági helyzet összefüggése:

a) az ülepedés sebessége Stokes szerint egyenesen arányos az ülepedő szemcsék átmérőjének négyzetével, azaz:

$$v = \frac{\gamma \text{ szemcse} - \gamma \text{ víz}}{18\eta} D^2.$$

Ebből következik, hogy a leülepedett rendszernél a cement szétosztályozódása következik be. Ez — amellett, hogy az egész rendszer szilárdságát csökkenti — az alsó zónába elhelyezkedő durvább szemcséktől a felső részen leülepedett finomabb szemcsék felé eltérő szilárdságot eredményez.

b) A felsőbb zónába leülő finomabb szemcsék szilárdulásának zavartatási időtartama a kisebb szemcseméret miatti lassú ülepedés következtében is hosszabb. Nagyobb turbulencia mellett, ha a felkavarodás túl magas, a hosszú ülepedési idő a kritikus időtartamot elérheti — ilyenkor egyáltalán nem következik be szilárdulás — vagy csökkent szilárdulás lép fel.

E) Összefoglalás

A kísérletek során a hagyományos, egyszerű cementtej használatán alapuló aknacementálás alapjelenségeit vizsgáltuk. Ennek keretén belül az alábbi következtetésekre jutottunk:

1. A cementdugó szilárdsága a felhasznált cementtej fajsúlyának növekedésével nagymértékben nő. Célszerű tehát minél nagyobb fajsúlyú cementtejet használni. (A szivattyúzhatóság határa közönséges cementtejnél kb. 1,8—1,9 gr/cm³ fajsúly között van.)

2. A leeresztő cső végének az aknától mért helyzete is befolyásolja a cement szilárdságát; a kedvező eredmények akkor mutatkoznak, ha a leeresztő cső a modellben 3—10 cm távolságban helyezkedik el az aknafenéktől.

3. A szilárdság a cementdugó keresztmetszetén belül is változik; a cementdugó felszínétől az alsó síkig a szilárdság nő, illetve a felszín közvetlen közelében igen kis szilárdság adódik. A leeresztő csőtől való vízszintes vetületi távolság a szilárdságra nincs érezhető befolyással.

4. Az alkalmas cementfajta kiválasztásához a szabványos cementvizsgálatok nem nyújtanak biztos támpontot. Az aknacementáláshoz használt cementet nagy vízcementtényezőn alapuló vizsgálatokkal kell kiegészíteni, illetve minősíteni.

5. A cementtej leeresztésekor fellépő turbulencia jelensége rövidebb-hosszabb ideig lebegésben tartja a cementszemcséket. Ha vastag cementdugó folyamatos készítése hosszabb ideig tartó leeresztést eredményez, a tartós lebegés miatt a cementszemcsék egyedi hidratálódása a cementkő-képződés elmaradásához vezethet. Ezért a cementdugó előállítását célszerű szakaszosan végezni, (vízszintes rétegekből való felépítés) az egyes szakaszok szilárdulásának kiváráásával.

6. A vizsgált jelenségek és az azokból levont következtetések azt mutatják, hogy egyazon folyamat — a cementtej zavart szilárdulása — technológiai összetevőinek megismerése folytán az aknacementálásnál észlelt káros jelenségek kiküszöbölhetők.

IRODALOM

- J. Agroszkin—G. Dmitrijev—F. Pikalov*: Hidraulika (Tankönyvkiadó Budapest, 1952.)
Dr. Boldizsár T.: Bányászati Kézikönyv, IV. (Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1965.)
Dr. Jávor A.: A közönséges aknamélyítés korszerű módszerei (MTI jegyzet, Tankönyvkiadó, Bp. 1964.)
Dr. Karsai F.: Mélyfúrások (MTI jegyzet, Tankönyvkiadó, Bp. 1962.)
Lampl H.: A cementhabarcs besajtolási eljárás (MTI jegyzet, Tankönyvkiadó, Bp. 1947.)
Litvai E.: Válogatott fejezetek az áramlástan köréből, (MTI jegyzet, Tankönyvkiadó, Bp. 1965.)
Nagypál S.: Mélyépítési betonozás különleges kérdései, (MTI jegyzet, Tankönyvkiadó Bp. 1965.)
Dr. Németh E.: Hidromechanika (Tankönyvkiadó, Bp. 1963.)
Dr. Palotás L.: Építőanyagok II. (Akadémiai Kiadó, Bp. 1961.)
Dr. Palotás L.—Dr. Balázs J.—Dr. Kilián J.: Építőanyag praktikum (Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Bp. 1965.)
Trupak N. A.: Repedezett kőzetek cementálása (Nehézipari Könyvkiadó, Bp. 1963.)
Dr. Zámbo J.: Bányaművelés (Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1957.) A magyar aknamélyítés és bányászati mélyépítés 10 éve (Bányászati Aknamélyítő Tröszt Kiadványa, Bp. 1962.)
Műszaki előírások betonok és habarcsok készítéséhez (ÉDOK. Bp. 1962.)