

ANDRZEJ BRANDT I KAZIMIERZ THIEL

ODKSZTAŁCENIA POWOLNE BETONU

ROZPRAWY  
INŻYNIERSKIE  
CLXII

TOM VIII • ZESZYT 3 • ROK 1960

## SPIS TREŚCI

1. Wstęp	465
2. Oznaczenia	468
3. Skurcz i pęcznienie betonu	470
3.1. Opis zjawiska skurczu	470
3.2. Przyczyny skurczu	471
3.3. Czynniki wpływające na skurcz betonu	472
3.3.1. Wpływ środowiska	472
3.3.2. Wpływ składników	475
3.4. Przebieg zjawiska skurczu	479
3.4.1. Skurcz w okresie początkowym	479
3.4.2. Szybkość występowania skurczu	479
3.4.3. Wysychanie betonu a skurcz	480
3.5. Próby teoretycznego ujęcia skurczu	482
4. Pelzanie betonu	485
4.1. Opis zjawiska pelzania	485
4.2. Czynniki wpływające na pelzanie betonu przy ściskaniu	486
4.2.1. Czas trwania obciążenia	486
4.2.2. Wielkość obciążenia	488
4.2.3. Wiek betonu w chwili obciążenia	488
4.2.4. Sposób konserwacji betonu	489
4.2.5. Skład betonu	491
4.2.6. Objętość betonu podlegająca pelzaniu	492
4.2.7. Odciążenie próbki betonowej	492
4.2.8. Pelzanie w kierunku poprzecznym do działania obciążenia	493
4.2.9. Wpływ pelzania na wytrzymałość i odkształcalność betonu	493
4.2.10. Pelzanie przy obciążeniach powtarzanych	494
4.3. Pelzanie przy rozciąganiu	495
4.4. Pelzanie przy zginaniu	496
4.5. Pelzanie przy obciążeniach złożonych	496
4.6. Próby teoretycznego ujęcia pelzania betonu	497
4.6.1. Przyczyny pelzania betonu	497
4.6.2. Przebieg pelzania w czasie	499
5. Literatura cytowana w tekście	502

## 1. Wstęp

Przedmiotem rozważań jest proces odkształcania się betonu, przebiegający w dłuższym okresie czasu pod wpływem działania różnych czynników. Nie rozpatrujemy przeto odkształceń natychmiastowych występujących bezpośrednio po pojawieniu się czynnika wywołującego to odkształcenie.

Odształcenia powolne betonu są obecnie tematem prac i badań wielu placówek naukowych na całym świecie. Występowanie tych zjawisk stwierdzono już na początku bieżącego stulecia; wymienić tu należy nazwiska następujących badaczy: I. H. WOOLSON (1905), W. K. HATT (1907), E. FREYSINET (1911), F. R. Mc MILLAN (1915 i 1921), A. T. GOLDBECK i E. B. SMITH (1916), O. FABER (1927). Były to jednak przeważnie tylko opisy przebiegu i wielkości odkształceń. Dopiero w roku 1925 R. E. DAVIS rozpoczął w Kalifornii systematyczne badania nad pełzaniem betonu, których wyniki opublikował w latach 1928-1937. Równocześnie i niezależnie podobne badania podjął w Anglii W. H. GLANVILLE. Istotną zasługą tych dwóch badaczy jest przeprowadzenie systematycznych badań wpływu poszczególnych składników na pełzanie betonu. W latach późniejszych odkształcenia powolne były przedmiotem prac wielu teoretyków i eksperymentatorów<sup>1</sup>.

Szczególne zainteresowanie tymi problemami w ostatnich latach jest niewątpliwie związane z kierunkiem rozwoju teorii i praktyki konstrukcji betonowych. Rozpowszechnienie się konstrukcji sprężonych oraz powstanie teorii nośności granicznej stawiają szereg pytań technologom i teoretykom odnośnie odkształceń i zachowania się betonu w czasie. Całość tych problemów stanowi przedmiot badań reologii betonu. Reologia obejmuje więc badania nad zjawiskami sprężystości, lepkości i plastyczności w ogólnym znaczeniu tych okreś-

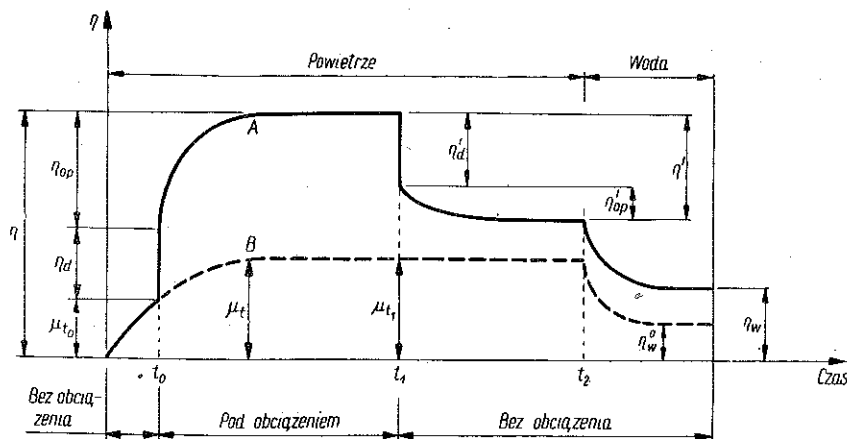
<sup>1</sup> Obaj autorzy spędzili ostatnio przeszło rok we Francji, K. THIEL w Centre Experimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTTP), zaś A. BRANDT w Centre de Hautes Etudes du Béton Armé et du Béton Précontraint (CHEBAP). CEBTTP jest ośrodkiem kierowanym przez L'HERMITE'A, który prowadzi od 15 lat badania nad odkształceniami powolnymi betonu, dysponując laboratorium dobrze wyposażonym do tego rodzaju prac. CHEBAP, obecnie przekształcony w CHEC (Centre de Hautes Etudes de la Construction), zajmuje się studiami specjalistycznymi w zakresie betonu oraz rozpowszechnianiem i wymianą wiadomości na ten temat.

A. BRANDT opracował część dotyczącą skurczu i pęcznienia, zaś K. THIEL część obejmującą pełzanie betonu.

leń. Nauka ta powstała niedawno, [48], posługuje się z jednej strony teorią sprężystości, teorią plastyczności i hydrodynamiką, z drugiej zaś badaniami doświadczalnymi. Obszerny opis różnych modeli odkształceń reologicznych betonu przedstawiono w pracy [34].

W pracy niniejszej zajmujemy się tylko dwoma rodzajami odkształceń betonu: skurczem i pełzaniem, które posiadają doniosłe znaczenie dla rozwoju wiedzy o betonie w zastosowaniu do konstrukcji. Celem pracy jest przedstawienie tych zagadnień w sposób, który uwidoczniłby z jednej strony stan obecnej wiedzy, z drugiej zaś różnorodność problemów jeszcze nie rozwiązanych<sup>2</sup>.

Na rysunku 1 pokazano wykres odkształceń powolnych betonu, zaczerpnięty z pracy [38]. Na wykresie tym widać przebieg odkształcenia dwóch próbek: próbki *A* obciążonej i próbki *B* nieobciążonej, znajdujących się początkowo w powietrzu o stałej wilgotności, później zaś w wodzie.



Rys. 1. Wykres odkształceń powolnych betonu, [38]

Początkowo próbki są nieobciążone i wykazują w chwili  $t_0$  skurcz  $\eta_{t_0}$ . Następnie próbka *A* zostaje obciążona i jej odkształcenie natychmiastowe wynosi  $\eta_a$ . W dalszym ciągu odkształcenie próbki obciążonej wzrasta, aby osiągnąć po ustabilizowaniu się w chwili  $t_1$  wielkość  $\eta$ , zaś odkształcenia próbki *B* wzrastają do wartości  $\eta_{t_1}$ . Podczas odciążenia próbki *A* w chwili  $t_1$  część odkształceń znika natychmiast, część zaś po pewnym czasie; łącznie odkształcenie przy odciążeniu w kierunku powiększenia wymiarów próbki wynosi w chwili  $t_2$

$$\eta' = \eta'_a + \eta'_{op}.$$

Na ogół stwierdzono, że  $\eta'$  osiąga większe wartości niż  $\eta_a$ . W chwili  $t_2$  obie próbki zostają umieszczone w wodzie, co powoduje dalsze odkształcenia

<sup>2</sup> ROZPRAWY INŻYNIERSKIE zamieszczają artykuły przeglądowe na szczególnie aktualne tematy. Artykuł niniejszy ma właśnie taki charakter. Przep. REDAKCJI ROZPRAW INŻYNIERSKICH.

przeciwnego znaku. Ostatecznie odkształcenie próbki  $A$  wynosi  $\eta_w$ , zaś próbki  $B$  wynosi  $\eta_w^0$ .

Skurczem i pęcznieniem nazywamy odkształcenia betonu nieobciążonego, nie związane bezpośrednio ze zmianami temperatury.

Na rysunku 1 krzywa odnosząca się do próbki  $B$  przedstawia wykres skurczu do chwili  $t_2$ , po czym zaś w wodzie następuje zjawisko pęcznienia.

Pęcznieniem betonu nazywamy różnicę pomiędzy odkształceniem powolnym betonu obciążonego, a jego skurczem.

Na rysunku 1 całkowite pęcznienie betonu wyrazi się zależnością:

$$\Delta = \eta - \eta_a - \mu_t.$$

Wykres na rysunku 1 należy traktować jako próbę poglądowego przedstawienia zjawiska, które w istocie jest bardziej skomplikowane.

Inny sposób ujęcia schematycznego poszczególnych rodzajów odkształceń przedstawia tablica 1, [35], opracowana w listopadzie 1958 r. w Monachium podczas Sympozjum RILEM na temat «Wpływ czasu na wytrzymałość i odkształcenia betonu».

Tablica 1

	Odkształcenia zależne od obciążenia		Odkształcenia niezależne od obciążenia
	natychmiastowe	opóźnione	
Odkształcenia odwracalne	Sprężyste	Sprężyste	Odkształcenia termiczne
Odkształcenia nieodwracalne	Plastyczne	Plastyczne	Skurcz

Nieuwidoczne na tablicy 1 pęcznienie jest sumą odkształceń opóźnionych, sprężystego i plastycznego, które wywołane są obciążeniem betonu.

Z powyższych schematów widać, że odkształcenie betonu jest zjawiskiem złożonym. Poszczególne odkształcenia występują w rzeczywistości często jednocześnie, a zmienność warunków zewnętrznych wpływa zasadniczo na ich przebieg. Pomiedzy betonem a otoczeniem odbywa się w jednym lub w drugim kierunku wymiana pary wodnej, wszystkie właściwości fizyczne znajdują się więc w stałej ewolucji. Niejednorodność betonu, jego składu i właściwości fizycznych i chemicznych zarówno w obrębie jednej konstrukcji jak nawet wewnątrz jednej próbki, utrudnia niezmiernie uogólnianie wniosków sformułowanych na podstawie poszczególnych badań.

Obecne prace prowadzone są przeważnie w dwóch zasadniczych kierunkach. Przede wszystkim badania doświadczalne mają za zadanie wyjaśnienie jakościowego oraz ilościowego wpływu poszczególnych czynników na odkształcenia betonu. Odbywa się to w laboratoriach, gdzie próbki betonowe znajdują się w ściśle określonych warunkach. Jednocześnie pomiary odkształceń pro-

wadzone na wykonanych konstrukcjach pozwalają na poznanie wielkości i przebiegu odkształceń w rzeczywistych warunkach.

Uogólnianie wyników badań w celu opracowania teorii odkształceń betonu, obejmującej całość związanych z tym zjawisk, napotyka na poważne trudności. Hipotezy i teorie są tylko przybliżeniami lub też obejmują jedynie wąski zakres odkształceń, ustępują więc następnym, dokładniejszym lub bardziej ogólnym. Niemniej jednak stanowią one podstawę do analizowania konkretnych problemów konstrukcyjnych oraz prowadzą do dalszych badań.

Praca niniejsza nie może wyczerpać całego obszernego tematu. Przedstawiamy tu jedynie w zarysie aktualny stan prac i badań, opracowany na podstawie licznych publikacji, dokumentacji i wiadomości zebranych na drodze kontaktów osobistych.

Zajmiemy się oddzielnie zjawiskami skurczu i pęcznienia, jak to przyjęto powszechnie, chociaż w rzeczywistości przebiegają one równocześnie i wydają się, że wpływają wzajemnie na siebie.

## 2. Oznaczenia

- $a_\mu$  współczynnik liczbowy odwrotnie proporcjonalny do ściśliwości kruszywa; w przypadku ciągłej krzywej przesiewu oraz kruszywa krzemionkowego  $a_\mu = 0,8-1,0$ ,
- $b_\mu$  współczynnik liczbowy zależny od rodzaju cementu oraz od warunków konserwacji,
- $C, C_0, C_1, C_2$  stałe określane doświadczalnie,
- $d_1, d_2, k, p, q$  stosunek ilości cementu do ilości wody,
- $c/w$  stosunek ilości cementu do ilości wody,
- $k_1, k_2, k_\mu$  stałe właściwe dla danego betonu,
- $k_0$  stała uwzględniająca wymiary próbki i wymiary zewnętrzne,
- $t$  czas,
- $x, y, z$  współrzędne prostokątne w przestrzeni,
- $D$  współczynnik charakteryzujący wymiary próbki, stosunek objętości do pola powierzchni,
- $E$  moduł sprężystości betonu,
- $K$  współczynnik przepuszczalności betonu,
- $T$  wiek betonu w dniach w chwili obciążenia,
- $P$  ogólnie ciężar,
- $\delta P_w$  przyrost ciężaru próbki w wodzie,
- $\delta P_\theta$  przyrost ciężaru próbki w atmosferze o wilgotności  $\theta$ ,
- $V$  objętość,
- $V_c$  objętość cementu w betonie,
- $V_d$  objętość najdrobniejszych ziarn w betonie,
- $V_p$  objętość powietrza w betonie,
- $V_s$  objętość części stałych betonu,

- $V_w$  objętość wody w betonie,  
 $\delta V_w$  przyrost objętości wody w betonie,  
 $V_w^t$  woda wyparowana w czasie  $t$ ,  
 $V_w^n$  całkowita ilość wody, która może wyparować,  
 $V_w'$  ilość wody, która może wyparować w atmosferze nieco suchszej niż 100%,  
 $V_w^0$  ilość wody, która może wyparować w atmosferze o wilgotności  $\theta$ ,  
 $V^H$  objętość próbki przechowywanej w wodzie,  
 $V^0$  objętość próbki przechowywanej w atmosferze o wilgotności  $\theta$ ,  
 $\alpha$  współczynnik kierunkowy prostej zawarty w granicach 1,35-1,80,  
 $\beta_1$  stosunek odkształcenia przy obciążeniu przyłożonym po czasie  $t$  do odkształcenia w przypadku obciążenia po 7 dniach,  
 $\beta_2$  stosunek pełzania przy dowolnym  $w/c$  do pełzania przy  $w/c = 0,65$ ,  
 $\Delta$  ogólnie odkształcenie pełzania w betonie,  
 $\Delta_t$  pełzanie w czasie  $t$ ,  
 $\Delta_n$  wartość końcowa pełzania,  
 $\eta$  całkowite odkształcenie przy obciążeniu,  
 $\eta_a$  całkowite odkształcenie natychmiastowe,  
 $\eta_a^{spr}$  sprężyste odkształcenie natychmiastowe,  
 $\eta_a^{pl}$  plastyczne odkształcenie natychmiastowe,  
 $\eta_{op}$  całkowite odkształcenie powolne,  
 $\eta_{op}^{spr}$  sprężyste odkształcenie powolne,  
 $\eta_{op}^{pl}$  plastyczne odkształcenie powolne,  
 $\eta'$  odkształcenie całkowite przy odciążeniu,  
 $\eta'_a$  odkształcenie natychmiastowe przy odciążeniu,  
 $\eta'_{op}$  odkształcenie powolne przy odciążeniu,  
 $\eta^*$  odkształcenie sprężyste powolne przy odciążeniu,  
 $\eta_t^*$  odkształcenie sprężyste powolne w czasie  $t$  przy odciążeniu,  
 $\eta_w$  odkształcenie końcowe próbki po obciążeniu, odciążeniu i przechowywaniu w wodzie,  
 $\eta_w^0$  odkształcenie końcowe próbki nieobciążonej przechowywanej początkowo w powietrzu, później zaś w wodzie,  
 $\eta_t$  odkształcenie termiczne,  
 $\theta$  wilgotność względna powietrza,  
 $\lambda = K/D$ , współczynnik liczbowy,  
 $\mu$  ogólnie odkształcenie skurczowe w betonie (skurcz całkowity),  
 $\mu_t$  skurcz w czasie  $t$ ,  
 $\mu_c$  skurcz zaczynu cementowego,  
 $\mu_0$  skurcz w atmosferze o wilgotności  $\theta$ ,

- $\mu_0$  skurcz w atmosferze o wilgotności  $\theta = 0$ ,
- $\mu_w$  skurcz po okresie przechowywania w wodzie,
- $\sigma$  wielkość naprężenia w betonie w  $\text{kg/cm}^2$ ,
- $\varphi(t)$  funkcja czasu, niezależna od wilgotności  $\theta$ .

### 3. Skurcz i pęcznienie betonu

#### 3.1. Opis zjawiska skurczu

Beton odkształca się bez obciążenia zewnętrznego i przy stałej temperaturze. Odkształcenia te, nazwane skurczem i pęcznieniem, związane są ze zmianami ilości wody i sposobu jej związania z betonem. Zależnie od środowiska, w jakim się znajduje, beton wysycha wyparowując wodę i zmniejszając objętość lub też pochłania wodę i pęcznieje. Zachodzące jednocześnie procesy chemiczne w betonie zmniejszają ilość wody swobodnej nie związanej chemicznie. Zjawiska te prowadzą z czasem do stanu równowagi hygrometrycznej pomiędzy betonem a otoczeniem, jeśli wilgotność tego ostatniego nie ulega zmianie.

W powietrzu zawierającym nienasyconą parę wodną beton wysycha, zaś w wodzie powiększa swą wilgotność. W parze bliskiej stanu nasycenia, tzn. gdy wilgotność względna wynosi niemal 100%, beton zachowuje na ogół stałą objętość.

W dalszym ciągu będziemy zajmować się bardziej skurczem betonu niż pęcznieniem ze względu na większe znaczenie tego zjawiska w praktyce inżynierskiej i powszechne występowanie w normalnych warunkach pracy konstrukcji betonowych.

Przebieg odkształceń skurczowych zaprawy cementowej lub betonu wraz z procesem wysychania podzielić można za HUMMELEM, [25], na trzy okresy: (1) od wykonania mieszanki do rozpoczęcia wiązania, (2) wiązanie betonu, (3) twardnienie betonu.

Do niedawna zajmowano się jedynie okresem twardnienia wychodząc z założenia, że skurcz w miękkiej masie betonu nie wywołuje naprężeń. Obecnie odstąpiono od tego i zaczyna się rozpatrywać odkształcenia betonu od początku, nazywając zjawisko w ciągu pierwszych 24 godzin, a więc odbywające się w dwóch pierwszych okresach, skurczem w okresie początkowym. Tym niemniej wielkości skurczu ustalone w normach i przepisach dotyczą odkształceń, które pojawiły się później, po upływie pierwszej doby jako stan wyjściowy, od którego liczy się odkształcenia skurczowe.

Skurcz betonu zależy od wielu czynników, z których najważniejsze przedstawiamy w niniejszej pracy. Wielkość odkształceń skurczowych zmienia się w szerokich granicach w poszczególnych przypadkach. Podamy tu jednak dla orientacji w tablicy 2 dane ilustrujące rząd wielkości odkształceń w betonie konstrukcyjnym średniej jakości, [49]. Dotyczą one odkształceń skurczowych



rozpoczynających się po okresie wiązania betonu, a więc po 24 godzinach, i odpowiadają zakończeniu się zjawiska skurczu. Orientacyjne dane podane przez W. OLSZAKA, [43], odpowiadają środkowym wartościom tablicy 2, a B. BUKOWSKI, [5], uważa  $1 \cdot 10^{-3}$  jako skrajną wielkość skurczu betonu konstrukcyjnego.

Tablica 2

Warunki zewnętrzne	Wielkość odkształceń skurczowych
Pęcznienie przy przechowywaniu w wodzie	$0,7-1,5 \cdot 10^{-4}$
Skurcz w klimacie wilgotnym	$2-4 \cdot 10^{-4}$
Skurcz w klimacie suchym lub wewnątrz budynków ogrzewanych	$5-7 \cdot 10^{-4}$
Skurcz w budynkach przemysłowych szczególnie ogrzewanych i narażonych na wysychanie	$1 \cdot 10^{-4}$

### 3.2. Przyczyny skurczu

Według przyjmowanych obecnie hipotez skurcz betonu jest związany z dwoma zjawiskami: z wysychaniem betonu oraz z reakcjami chemicznymi hydratacji cementu. Wysychanie betonu wpływa na ciśnienie wody w naczyniach włoskowatych. Powoduje to zmiany w meniskach oraz wielkościach sił w szkielecie betonu, związanych z istnieniem menisków. Napięcia meniskowe wzrastają i powodują wzrost naprężeń ściskających w betonie i wynikających z tego odkształceń.

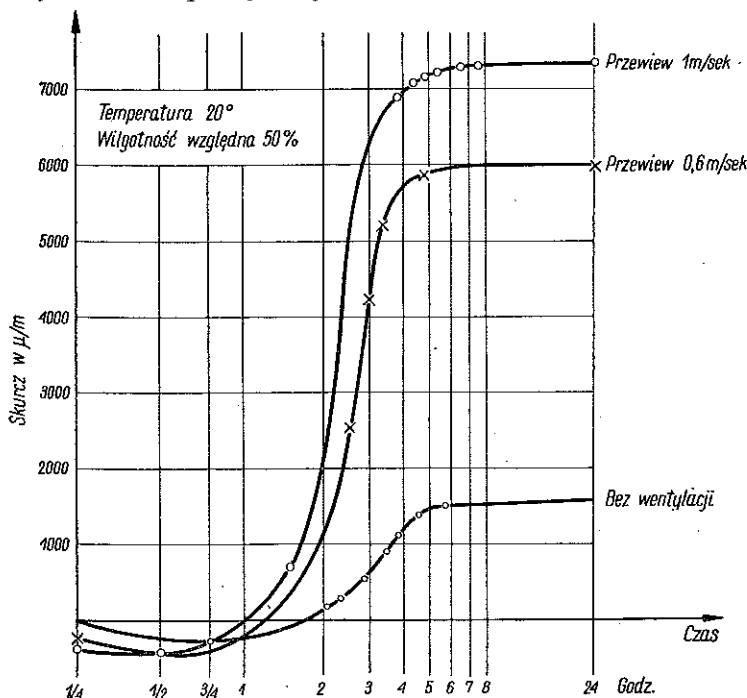
Hydratacja cementu polega na powstawaniu w zaprawie soli uwodnionych w miejsce soli bezwodnych. Otóż objętość soli uwodnionych jest mniejsza niż suma objętości soli bezwodnych oraz wody. Jest to zresztą zjawisko zachodzące powszechnie przy procesie uwadniania. W rozpatrywanym przypadku powoduje ono zmniejszenie objętości zaprawy podczas hydratacji, [12] i [33].

Skurcz wywołany hydratacją cementu stanowi część całkowitych odkształceń skurczowych, mianowicie w zaczynie cementowym ok. 30%, a w zaprawie cementowej 15-25%. W betonie procent udziału hydratacji cementu jest mniejszy. Niektóre wyniki badań próbek betonowych wskazują na większy udział hydratacji, sięgający 25-50%. Jest to zawsze poważna część skurczu, która występuje w sposób bardzo widoczny w próbkach betonowych pozbawionych możliwości utraty wody. Przed kilkunastu laty pomijano wpływ hydratacji na skurcz betonu uważając wysychanie za jedyną przyczynę.

Badania mające na celu szczegółowe analizowanie fizykochemicznych podstaw skurczu oraz sformułowanie ogólnych praw rządzących tym zjawiskiem napotykały na poważne trudności wobec znacznej ilości występujących parametrów. Szereg powstałych teorii i hipotez tłumaczy zjawisko skurczu i jego przyczyny w odniesieniu do szczególnych przypadków i warunków, w jakich zadanie to było prowadzone.

### 3.3. Czynniki wpływające na skurcz betonu

3.3.1. Wpływ środowiska. Warunki, w jakich znajduje się beton w okresie początkowym, decydują o przebiegu skurczu i jego wielkości ostatecznej. Zaprawa cementowa lub beton, przechowywane przez 24 godziny w znacznej wilgotności, nie wykażą nigdy takiego skurczu jak próbki przechowywane od początku w powietrzu suchym. Odnosi się to jednak do całkowitej wielkości skurczu wraz ze skurczem w okresie początkowym. Natomiast jeśli za punkt wyjściowy pomiar odkształceń skurczowych przyjąć wymiary próbki po 24 godzinach, to dalszy przyrost skurczu nie zależy od warunków konserwacji betonu w tym okresie początkowym, [39].



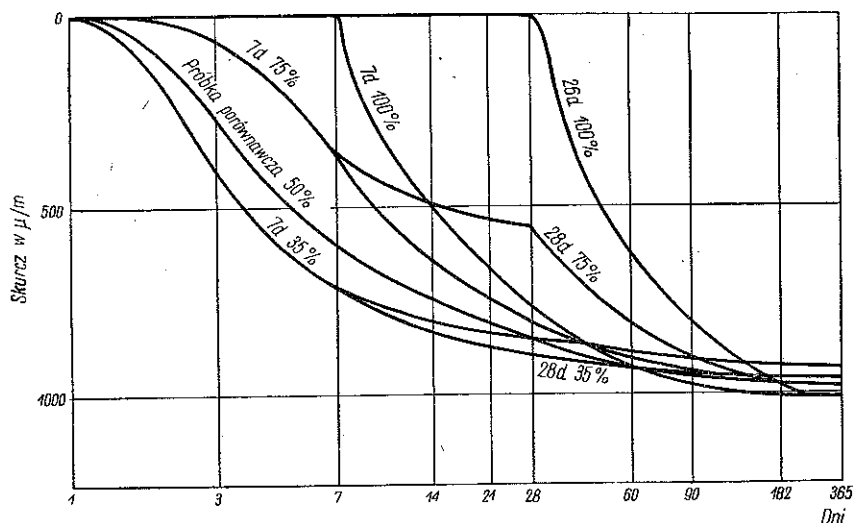
Rys. 2. Skurcz próbek przechowywanych w ciągu 24 godzin w różnych warunkach, [36]

W badaniach prowadzonych przez C. LEFEVRE'A, [36], trzy grupy próbek przechowywano w ciągu 24 godzin po wykonaniu mieszanki w następujących warunkach: (1) wilgotność 50%, przewiew o szybkości 1 m/sec, (2) wilgotność 50%, przewiew o szybkości 0,6 m/sec, (3) para nasycona, a więc wilgotność 100%, bez przewiewu.

Temperatura we wszystkich trzech wypadkach była jednakowa i wynosiła 20°C. Przebieg skurczu przedstawia wykres na rys. 2.

W dalszym ciągu doświadczenia próbki znajdowały się w jednakowych warunkach i przebieg skurczu w tym czasie był identyczny we wszystkich trzech przypadkach.

Nawet dłuższy czas przechowywania próbek w innych warunkach z wyjątkiem szczególnie suchego powietrza w okresie twardnienia betonu nie wpływa na ostateczną wielkość skurczu, która związana jest ze stałymi warunkami konserwacji betonu. Na rysunku 3 pokazano wykresy cytowane w pracy [32]. Wskazują one, że zarówno przechowywanie siedmio- jak i dwudziestoosmiodniowe w powietrzu o wilgotności względnej 35%, 75% i 100% nie zmienia wielkości skurczu tych próbek po roku w stosunku do próbki porównawczej, która znajdowała się przez cały czas w wilgotności 50%.



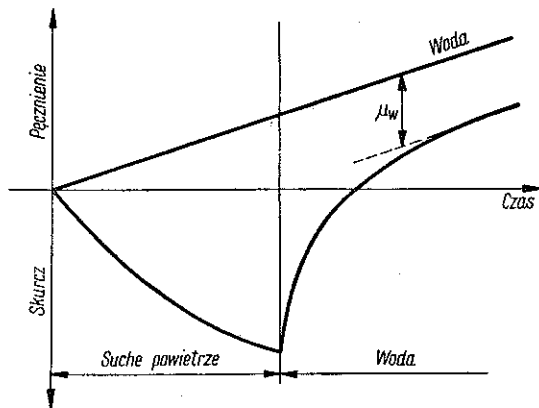
Rys. 3. Wpływ warunków przechowywania zaprawy w ciągu siedmiu i dwudziestu ośmiu dni na ostateczną wielkość skurczu, [32]

W późniejszym okresie twardnienia betonu również wilgotność środowiska decyduje o przebiegu skurczu.

Pęcznienie betonu znajdującego się w wodzie jest zjawiskiem odwracalnym. Próbka umieszczona później na czas dłuższy w powietrzu o danej wilgotności  $\theta$  osiąga skurcz, którego wielkość zależna jest jedynie od tej wilgotności.

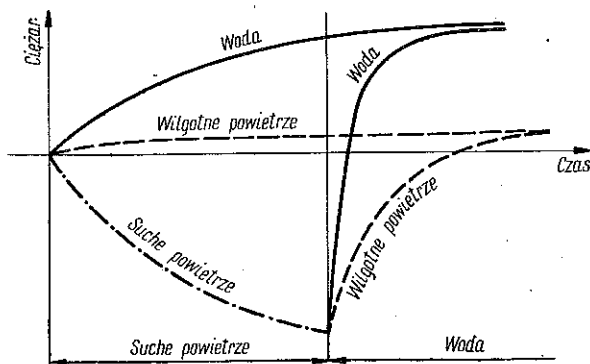
Jeżeli jednak zmienimy kolejność konserwacji próbki, tzn. najpierw pozostawimy ją w suchym powietrzu, zaś następnie umieścimy w wodzie, to okaże się, że skurcz betonu jest częściowo nieodwracalny. Nawet po dłuższym okresie pozostawania w wodzie próbka wykazuje pewien skurcz  $\mu_w$  w stosunku do próbki pozostającej w wodzie przez cały czas, przy czym stosunek  $\mu_w/\mu$  zawarty jest w przedziale (0,30, 0,60). Przebieg zjawiska pokazano na wykresie na rys. 4, gdzie odkształcenia próbki poddanej badaniu porównano z pęcznieniem próbki konserwowanej w wodzie. Zjawisko to można tłumaczyć przez opór połączeń powstałych pomiędzy poszczególnymi kryształami podczas wysychania betonu, który przeciwstawia się pęcznieniu po umieszczeniu próbki w wodzie.

Zmiany ciężaru próbki przechowywanej w różnych środowiskach widać na wykresie na rys. 5. Okazuje się, że próbka pozostająca początkowo w suchym powietrzu, później zaś w wodzie, wykazuje po pewnym czasie taki sam ciężar jak próbka pozostająca stale w wodzie.



Rys. 4. Odkształcenia próbki przechowywanej kolejno w powietrzu i w wodzie, [38]

Rozważania powyższe dowodzą, że ilość wody w betonie dąży do pewnej granicy zależnej od wilgotności otoczenia. Dlatego też nie można traktować skurczu betonu poddanego wpływom atmosferycznym jako zjawiska skończonego w czasie. Nawet po stwardnieniu betonu i stabilizacji procesu skurczu



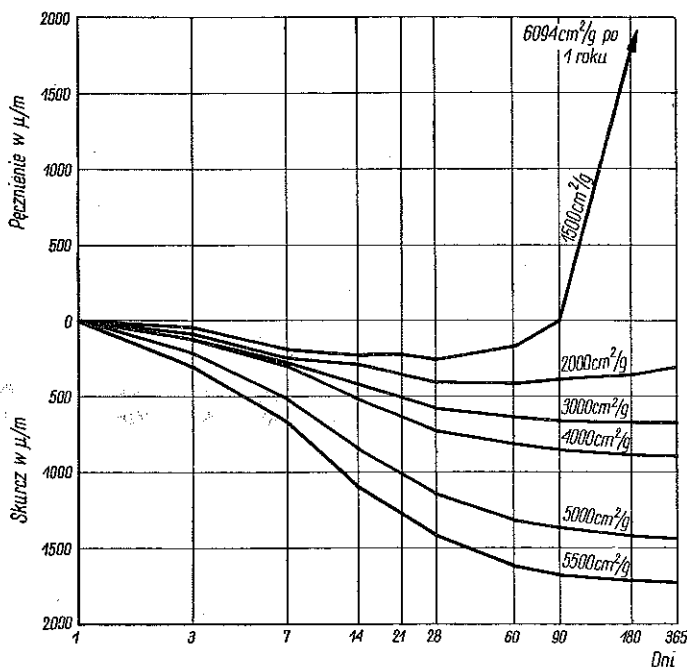
Rys. 5. Zmiany ciężaru próbek przechowywanych w powietrzu i w wodzie, [38]

w danych warunkach zewnętrznych, a więc po dojściu do wspomnianej równowagi, beton rozpocznie ponownie wyparowywanie lub pochłanianie wody w przypadku zmiany wilgotności środowiska.

Temperatura otoczenia posiada również wpływ na przebieg skurczu, ponieważ ciśnienie pary zawartej w naczyniach włoskowatych zmienia się wraz z temperaturą.

W konstrukcji betonowej poszczególne elementy znajdują się pod działaniem odmiennych czynników, takich jak deszcz, wiatr, para wodna, promienie słoneczne i temperatura. Dlatego też wpływ otoczenia na skurcz konstrukcji jest bardzo złożony, a zależności analityczne trudne do sformułowania, chociaż znany jest na ogół wpływ jakościowy poszczególnych czynników. Dotyczy to szczególnie prób przenoszenia rezultatów badań laboratoryjnych na konstrukcje betonowe, przebywające na ogół w bardzo zmiennych warunkach atmosferycznych.

**3.3.2. Wpływ składników.** Składniki betonu wpływają w sposób istotny na przebieg i ostateczną wielkość skurczu. Doniosłe znaczenie posiada rodzaj i ilość cementu, ilość wody zarobowej, a także jakość kruszywa. Inne, dodatkowe składniki betonu, jak np. chlorek wapnia lub środki pianotwórcze powiększają na ogół wielkość skurczu. Rozpatrzmy tu kolejno poszczególne składniki rozpoczynając od najważniejszych.



Rys. 6. Wpływ miąższości cementu, wyrażonej w powierzchni ziarna o wadze 1 g na przebieg skurczu czystej zaprawy, [32]

Największy wpływ ma rodzaj i ilość cementu, ponieważ skurcz zaprawy cementowej jest źródłem skurczu betonu. Beton o dużej zawartości cementu wykazuje znaczny skurcz, stąd wynika konieczność ograniczenia ilości cementu do nieodzownie potrzebnej w celu otrzymania danej wytrzymałości na ściskanie betonu. Łączy się to również z jakością cementu. Skurcz cementu port-

landzkiego jest tym większy, im drobniejsze są ziarna cementu, [2]. Tym samym skurcz cementu jest proporcjonalny do szybkości wiązania, a przede wszystkim do wytrzymałości na ściskanie. Prowadzi to często do rezygnacji ze znacznej wytrzymałości betonu, który wykonany z cementu wysokiej marki wykazałby zbyt duży skurcz.

Wykres na rys. 6 przedstawia przebieg skurczu zaczynu cementowego przy różnej mianości cementu.

Cementy z żużli wielkopieczowych wywołują na ogół większy skurcz betonu niż cementy portlandzkie. Nie jest to jednak zagadnienie całkowicie wyjaśnione i istnieją na ten temat różne, niekiedy sprzeczne opinie, tym bardziej że z reguły porównywany cement żużlowy posiada mniejszą wytrzymałość od portlandzkiego, [33]. Przykłady pomiarów skurczu różnych próbek betonowych, wykonane w laboratorium w Brukseli, [13], zestawiono w tablicy 3. Wskazują one również na wpływ stosunku  $c/w$  przy stałej ilości cementu.

Pomiary przeprowadzono po 300 dniach od wykonania próbek, a więc po wystąpieniu około 0,9 całkowitych odkształceń.

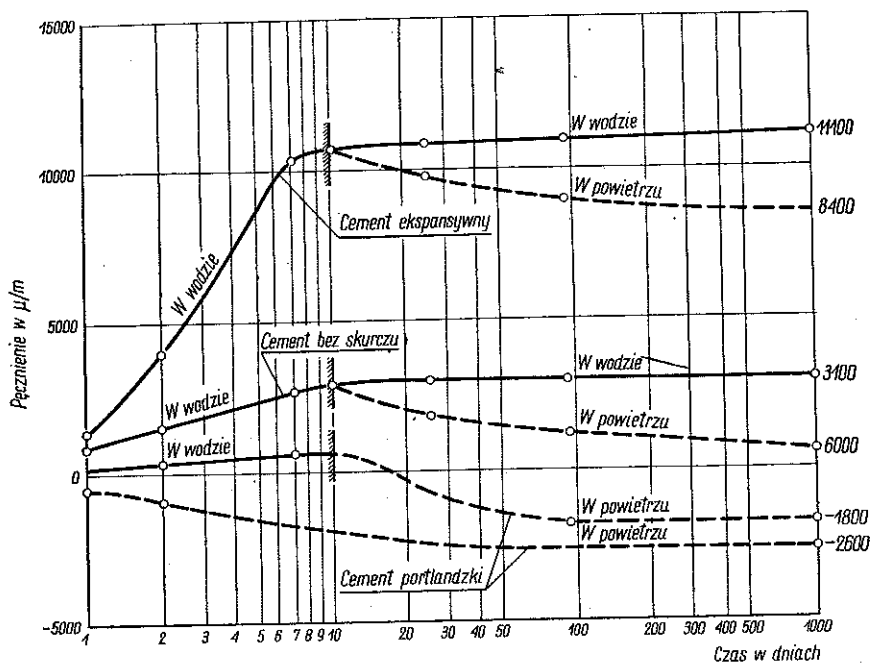
Tablica 3

Stosunek $c/w$	Rodzaj cementu	Wielkość skurczu
1,5	Cement z żużla wielkopieczowego	$8 \cdot 10^{-4}$
	Cement portlandzki	$6 \cdot 10^{-4}$
2,35	Cement z żużla wielkopieczowego	$5 \cdot 10^{-4}$
	Cement portlandzki	$3,6 \cdot 10^{-4}$

Cementy ekspansywne powodują pęcznienie zaprawy; jest to zjawisko o innym charakterze i innych przyczynach od opisywanych poprzednio. Odkształcenia betonu są sumą algebraiczną skurczu i pęcznienia. Skurcz pochodzi od zwykłego cementu portlandzkiego, który jest składnikiem cementu ekspansywnego. Wykres na rys. 7 przedstawia przebieg odkształceń próbek betonowych wykonanych z trzech rodzajów cementu: cementu ekspansywnego, cementu portlandzkiego oraz cementu otrzymanego z mieszaniny dwóch poprzednich tak dobranych, aby zachowana była stała objętość betonu.

Ilość wody, która nie może być związana z cementem z powodu swego nadmiaru i musi wyparować podczas wiązania i twardnienia betonu, decyduje w dużym stopniu o wielkości skurczu i o wytrzymałości betonu, [4]. Różnica zawartości wody pomiędzy betonem świeżym a betonem stwardniałym jest bowiem proporcjonalna do naprężeń powstających przy wysychaniu betonu. Ze względu na sposób połączenia z ziarnami cementu i tworzącymi się kryształami rozróżniamy kilka rodzajów wody w betonie.

Istnieją różne poglądy na klasyfikację wody w betonie i na wpływ poszczególnych jej rodzajów na skurcz; przedstawiamy niektóre z nich w p. 3.4.3. Zagadnienia te nie zostały jeszcze dostatecznie wyjaśnione, można jednak stwierdzić, że na wielkość skurczu ma bezpośredni wpływ ta ilość wody w betonie, która nie bierze udziału w procesach chemicznych wiązania zaprawy cementowej i ma za zadanie powiększenie urabialności betonu. Dlatego dążenie



Rys. 7. Przebieg odkształceń próbek betonowych, wykonanych z cementu ekspansywnego, cementu portlandzkiego oraz z cementu o stałej objętości, [37]

do zapewnienia urabialności betonu różnymi sposobami i przy użyciu jak najmniejszej ilości wody ma na celu nie tylko powiększenie wytrzymałości betonu, [31], ale także zmniejszenie skurczu. Wiele uwag o związanym z tym zagadnieniem projektowania betonu znajduje się w pracy [47], podającej wyniki badań Komisji Technologii Betonu PAN.

Kruszywo stanowi szkielet, który nie zmienia zasadniczo swej objętości w betonach konstrukcyjnych, przenosi natomiast skurcz zaprawy cementowej. Skurcz betonu jest więc tym mniejszy, im większą objętość zajmuje kruszywo. Betony o starannie dobranym uziarnieniu kruszywa wykazują niewielki skurcz, szczególnie zaś odporne są na powstawanie rys skurczowych. Wniosek ten całkowicie potwierdza praktyka. Obecność jednak drobnych ziarn pylistych w kruszywie powiększa objętość zaprawy i wpływa na zwiększenie skurczu.

Rozpatrzmy dwa skrajne przypadki ułożenia ziarn kruszywa w zaprawie. W pierwszym przypadku ziarna są otulone przez zaprawę, w której skurcz

przebiega powoli, a odkształcenia mogą być przeniesione dzięki sprężystości zaprawy. Zaprawa cementowa doznawać może bez rys wydłużeń jednostkowych rzędu  $1,85 \cdot 10^{-3}$ , [38]. Takiemu przebiegowi zjawiska odpowiada badanie jakości cementu za pomocą pierścienia z zaczynu cementowego z rdzeniem metalowym wewnątrz.

W drugim przypadku ziarna kruszywa utrzymują równowagę stykając się pomiędzy sobą, a zaprawa wypełnia puste przestrzenie. Zaprawa kurczy się i jest rozciągana pomiędzy przeciwległymi ściankami ziarn kruszywa; znajduje się w warunkach szczególnie sprzyjających powstawaniu rys. Pozornie beton wykazuje niewielki skurcz, który szybko zanika wobec wystąpienia mikroskopijnych rys w zaprawie. W rzeczywistości jednak beton doznaje znacznego spadku wytrzymałości, co przejawiać się może wyraźnymi pęknięciami. Odnosi się to szczególnie do betonów o nieciągłej krzywej przesiewu.

Odkształcalność ziarn ma również wpływ na skurcz betonu. Kruszywo o małej ściśliwości przenosi skurcz zaprawy cementowej przy małych odkształceniach objętościowych masy betonowej. Aby szkielet z kruszywa mógł przenosić skurcz, konieczna jest przyczepność zaprawy do ziarn, [31]. Używanie czystego kruszywa bez domieszek ilastych, o chropowatej powierzchni, otrzymanej często sztucznie przez mieszanie kruszywa w wodzie bieżącej, zmniejsza wyraźnie skurcz betonu.

Wszystkie drugorzędne składniki betonu i dodatki w mniejszym lub w większym stopniu powiększają zjawisko skurczu. Na przykład według badań Erika V. MEYERA, cytowanych w pracy [37], środki pianotwórcze dodawane do zaprawy przy produkcji betonu porowatego powodują dwu- lub trzykrotne powiększenie skurczu.

Często stosowany chlorek wapnia, który przyspiesza wiązanie i twardnienie betonu i ułatwia betonowanie przy niskiej temperaturze, powiększa znacznie skurcz. Kilka cyfr zaczerpniętych z pracy [49], wskazujących na wpływ chlorku wapnia w betonie o zawartości 300 kg cementu na  $1 \text{ m}^3$ , zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4

Ilość chlorku wapnia w stosunku do cementu	1,5%	2%	3%
Powiększenie skurczu betonu	20%	40%	60%

Przyjmuje się na ogół, że ilość chlorku wapnia nie powinna przekraczać 1,5-2,0% wagi cementu. Dodatkowe niebezpieczeństwo stosowania tego środka wynika z faktu, że jest on niekiedy dodawany fabrycznie do cementu lub do plastyfikatorów. W takim przypadku dodatek nawet 1,5% chlorku wapnia pociągnąć może za sobą znaczne zwiększenie skurczu betonu.



### 3.4. Przebieg zjawiska skurczu

**3.4.1. Skurcz w okresie początkowym.** W pierwszym okresie czasu po wykonaniu mieszanki beton podlega znacznemu skurczowi. Okres ten przyjmuje się na ogół równy 24 godzinom. Zjawisko skurczu w okresie początkowym zostało zaobserwowane w ostatnich latach na konstrukcjach betonowych, co spowodowało zapoczątkowanie prac doświadczalnych w tym zakresie. Dotychczas badania zjawiska skurczu rozpoczynały się z reguły po upływie doby od wykonania mieszanki, a więc nie obejmowały zupełnie zjawiska w okresie początkowym.

Przeprowadzone doświadczenia cytowane w pracy [49] wykazały, że wielkości skurczu badanych próbek po 3, 6 i 48 godzinach wynosiły odpowiednio  $3 \cdot 10^{-4}$ ,  $4,5 \cdot 10^{-4}$  oraz  $4,8 \cdot 10^{-4}$ .

Przyczyny tak znacznych odkształceń w okresie początkowym nie zostały jeszcze ostatecznie wyjaśnione. Początkowo szukano uzasadnienia w czynnikach odmiennych od tych, które powodują skurcz w okresie późniejszym. Obecnie jednak dominuje pogląd, że oba zjawiska związane są ściśle z wysychaniem betonu i hydratacją cementu.

Procesy te zachodzą intensywnie w początkach wiązania i twardnienia betonu, a jednocześnie świeży beton odkształca się łatwo pod wpływem naprężeń pochodzących od naczyń włoskowatych. Wytrzymałość świeżych połączeń pomiędzy kryształami jest nieznaczna i zmiana objętości następuje swobodnie. Przebieg skurczu jest zakłócony przez równoczesne odkształcenia termiczne wobec ogrzewania się betonu w okresie wiązania oraz późniejszego stygnięcia. Wielkość tych odkształceń zależy od rodzaju cementu.

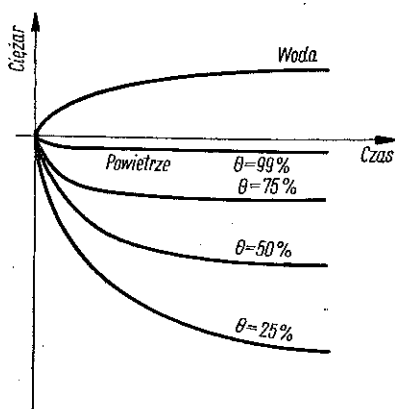
**3.4.2. Szybkość występowania skurczu.** Szybkość występowania skurczu jest proporcjonalna do szybkości wysychania betonu, a ta z kolei zależy od różnicy wilgotności betonu i otaczającej atmosfery. Szybkość skurczu dąży do zera w miarę ustalania się równowagi hygrometrycznej pomiędzy betonem a środowiskiem. Wymiary elementów betonowych mają wpływ na szybkość odkształceń skurczowych, która jest w przybliżeniu odwrotnie proporcjonalna do grubości elementu. W konstrukcji złożonej z elementów o różnej grubości powstają naprężenia wskutek różnej intensywności skurczu. Naprężenia te osiągają swoje maksymalne wartości stosunkowo wcześniej, są bowiem uzależnione od przebiegu skurczu w tych elementach, w których szybkość skurczu jest największa, bądź też powstają wskutek różnych odkształceń zewnętrznej warstwy i wnętrza elementu. Szybkość pojawiania się tych naprężeń jest znacznie większa od przebiegu pełzania betonu. Dlatego też pełzanie wywołane powstającymi naprężeniami może tylko częściowo ułatwić ich przeniesienie bez pęknięć dzięki współpracy betonu sąsiadującego, [5]. Wszystko to powoduje nieuniknione powstawanie rys i pęknięć w betonie, który nie zdążył jeszcze osiągnąć pełnej wytrzymałości.

Do obliczeń przyjmuje się przybliżone liczby wskazujące, jaka część całkowitych odkształceń skurczowych wystąpiła w betonie o określonym wieku. Dane te zestawione w tablicy 5 pomierzone były w przeciętnych warunkach i w elementach o średnich wymiarach, [23].

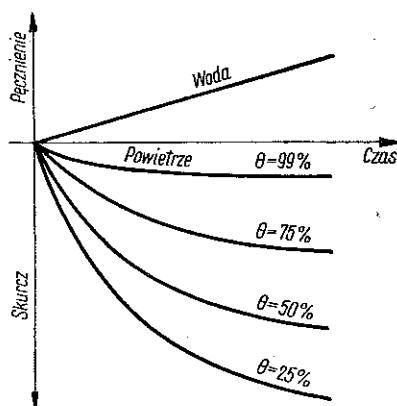
Tablica 5

Wiek betonu	Procent całkowitych odkształceń skurczowych
10 dni	33
1 miesiąc	50
1 rok	90
2-3 lata	100

3.4.3. Wysychanie betonu a skurcz. Związek pomiędzy utratą wody przez beton a skurczem jest bardzo wyraźny. Widać to z wykresów na rys. 8 i 9, na których przedstawiono wyniki pomiarów przeprowadzonych na próbkach wykonanych z jednakowego betonu i przechowywanych w wodzie lub powietrzu o różnej wilgotności względnej.



Rys. 8. Wpływ wilgotności otoczenia na zmianę ciężaru próbki betonowej, [38]



Rys. 9. Wpływ wilgotności otoczenia na skurcz lub pęcznienie próbki betonowej, [38]

Jeżeli oznaczymy przez  $\delta P_w$  przyrost ciężaru próbki po przechowywaniu w wodzie, przez  $\delta P_\theta$  przyrost ciężaru próbki po przechowywaniu w powietrzu o wilgotności względnej  $\theta$ ,  $V^w$  objętość próbki przechowywanej w wodzie,  $V^\theta$  objętość próbki przechowywanej w powietrzu o wilgotności względnej  $\theta$ , to strata wody w próbce wyrazi się zależnością

$$\delta V_w = \delta P_w - \delta P_\theta.$$

Skurcz próbki może być przedstawiony jako różnica

$$\mu = V^w - V^\theta.$$

W zależnościach tych przyjęto ciężar i objętość próbki przechowywanej w wodzie jako układ wyjściowy.

Jeżeli rozpatrujemy zmiany wielkości  $\delta V_w$  i  $\mu$ , to okazuje się, że skurcz próbki  $A$  w wilgotności  $\theta$  w stosunku do próbki  $B$  przechowywanej w wodzie jest proporcjonalny do ilości wody wyparowanej przez próbkę  $A$  w porównaniu z próbką  $B$  (rys. 10).

Stosunek  $\mu/\delta V_w$  wzrasta z wiekiem betonu. Oznacza to, że taka sama objętość wody wyparowanej powoduje większy skurcz betonu starszego niż młodszego.

Powyższe rozważania oparte na badaniach laboratoryjnych rzucają nieco światła na przebieg zjawisk skurczu betonu, ale nie wyjaśniają ich całkowicie. Powodem tego jest zarówno niejednorodność badanego materiału, jak i znaczna ilość czynników wpływających na wielkość skurczu. Woda w betonie jest w różny sposób związana ze strukturą materiału. Dokładna jej klasyfikacja w zależności od sposobu występowania w betonie jest trudna do przeprowadzenia, bowiem sprecyzowanie kryteriów zależne jest od wielu okoliczności. Szczegółowy opis tego zagadnienia wykraczałby poza ramy niniejszej pracy, gdyż należałoby uwzględnić szereg procesów fizycznych i chemicznych przebiegających w betonie. Jest ono starannie opracowane w książce Henri LAFUMA «Liants Hydrauliques» wydanej w roku 1952 w Paryżu przez Dunod. Wymienimy tu najważniejsze rodzaje wody w betonie podając zarys klasyfikacji:

(1) woda w naczyniach włoskowatych — podlega łatwo wyparowaniu, co pociąga za sobą bezpośrednio zmianę ciśnienia w tych naczyniach, [19];

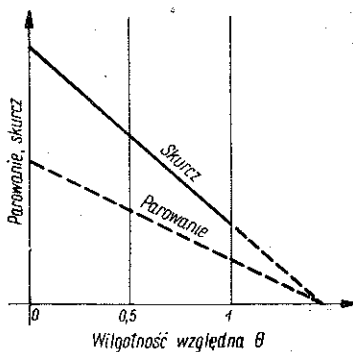
(2) woda adsorbcyjna, nie wchodzi do reakcji chemicznych, podlega wyparowaniu w atmosferze suchej;

(3) woda zeolityczna, związana w uwodnionych glino-krzemianach; odparowanie tej wody nie zmienia właściwości kryształów, natomiast cechy fizyczne ulegają zmianie;

(4) woda hydratacyjna, związana z krystalizacją, usunięcie jej niszczy strukturę utworzonych soli. Może być odparowana łatwo w atmosferze suchej.

Rozpatrzmy dwa skrajne przypadki betonu znajdującego się w atmosferze a więc podlegającego wysychaniu.

1. W betonie ścisłym i zwartym oraz w zaprawie cementowej wysychanie przebiega w sposób ciągły. Proces ten jest analogiczny do utraty ciepła przez ciało ogrzane i umieszczone w chłodniejszym otoczeniu. Istnieją próby, [45].



Rys. 10. Skurcz próbki betonowej oraz utrata wody jako funkcja wilgotności otoczenia, [38]

[46] i [27], posługiwania się w tym przypadku prawem FOURIERA przedstawiającym rozchodzenie się ciepła. Wspominamy o tym w p. 3.5.

2. W betonie porowatym zjawisko ma charakter nieciągły. W pobliżu powierzchni tworzy się warstwa wysuszona, która izoluje część środkową próbki, zmniejszając się z biegiem czasu.

W rzeczywistości wysychanie betonu przebiega w sposób pośredni pomiędzy dwoma opisanymi przypadkami. Jednak wilgotność otoczenia ulega zmianom, które wpływają na przebieg zjawiska z opóźnieniem związanym z bezwładnością elementu betonowego. Podczas badań laboratoryjnych ten czynnik jest z reguły wyeliminowany, a próbki przebywają w atmosferze o stałej wilgotności przez czas wystarczająco długi, aby bezwładność nie odgrywała żadnej roli. Nawet jednak i w tych przypadkach rozmiary elementu betonowego wpływają poważnie na przebieg skurczu.

### 3.5. Próby teoretycznego ujęcia skurczu

Rozważania teoretyczne dotyczące odkształceń skurczowych mają na celu rozwiązanie dwóch zagadnień. Pierwsze, to wyjaśnienie przebiegu zjawiska skurczu w czasie, a więc opracowanie teorii umożliwiającej wnioskowanie o końcowej wielkości skurczu na podstawie obserwacji przebiegu procesu w fazie początkowej. Drugie zagadnienie polega na wyjaśnieniu wpływu składników betonu i warunków zewnętrznych, a więc na wykryciu praw rządzących zjawiskiem skurczu.

Dotychczasowe próby wyjaśnienia tych zagadnień obejmowały tylko pomiary laboratoryjne odkształceń próbek betonowych o niewielkich na ogół rozmiarach. Wnioskowanie o skurczu konstrukcji betonowej na podstawie badania próbek jest oddzielnym zagadnieniem, które, o ile nam wiadomo, nie zostało jeszcze nigdzie przeprowadzone na szerszą skalę. Fragmentaryczne badania na ten temat przeprowadzono przy okazji konstrukcji hali wystawowej CNIT w Paryżu, [16].

Wyjaśnienie istotnych przyczyn skurczu proponowane pierwotnie przez FREYSSINETA, [19], okazało się niewystarczające. Według tej hipotezy odkształcenia skurczowe są wynikiem ściskania szkieletu betonu, pochodzącego z naprężeń w naczyniach włoskowatych. Puste przestrzenie w betonie wypełnione są częściowo przez wodę, częściowo zaś przez powietrze. Woda tworzy meniski o znacznych napięciach powierzchniowych, przekazujących się na szkielet betonu.

Wielkość skurczu wyraża zależność, [23], wyprowadzoną z prawa KELVINA,

$$\mu = \frac{1300}{V_s} \frac{V_w}{E} \log \theta,$$

gdzie  $V_w$  oznacza objętość wody w betonie,  $V_s$  objętość części stałej betonu,  $E$  moduł YOUNGA oraz  $\theta$  wilgotność względną atmosfery.

Dokładne badania i pomiary wykazały jednak, że naprężenia kapilarne powodują odkształcenia znacznie mniejsze od rzeczywistych wielkości skurczu. Hipoteza FREYSSINETA tłumaczy przeto jedynie część odkształceń skurczowych. Tym niemniej uważa się za stwierdzone, że ruchy wody w betonie mają tu zasadnicze znaczenie.

Analiza skurczu betonu przyjmuje za podstawę widoczny związek skurczu z wysychaniem betonu. Początkowo przyjęto hipotezę liniowego przebiegu tego zjawiska, przy czym zależność przedstawiono następująco, [38]:

$$V_w^t = V_w^n(1-\theta)\varphi(t),$$

gdzie  $V_w^t$  oznacza wodę wyparowaną w czasie  $t$ ,  $V_w^n$  całkowitą ilość wody, która musi być wyparowana,  $\theta$  wilgotność względną otoczenia,  $\varphi(t)$  funkcję czasu niezależną od wilgotności  $\theta$ , przyjmującą wartości graniczne  $\varphi(t) = 0$ , gdy  $t = 0$ , oraz  $\varphi(t) \rightarrow 1$ , gdy  $t \rightarrow \infty$ .

Wkrótce okazało się, że betony słabe oraz wykonane z cementu żuźlowego cechuje większa utrata wody niż to wynika z powyższej zależności. Traktując beton jako ciało porowate można wyrazić utratę wody za pomocą wzoru FOURIERA, analogicznego do znanego równania utraty ciepła przez ciało ogrzane równomiernie i znajdujące się w chłodnym otoczeniu,

$$\frac{dV_w^t}{dt} = \lambda \left( \frac{\partial^2 V_w^t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_w^t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_w^t}{\partial z^2} \right) = \lambda \nabla_{xyz}^2 V_w^t,$$

gdzie  $x$ ,  $y$ ,  $z$  są współrzędnymi przestrzennymi badanego sześcianu elementarnego.

Funkcję empiryczną, określającą ilość wody wyparowanej, podaje L'HERMITE, [38]; funkcja ta jest bliska całce powyższego równania FOURIERA,

$$V_w^t = V_w^n \left( 1 - e^{-\frac{K}{D} V_w^t} \right),$$

gdzie  $K$  jest współczynnikiem przepuszczalności betonu, a  $D$  charakteryzuje kształt próbki i jest stosunkiem objętości do pola powierzchni.

Funkcja uwzględniająca wilgotność względną otoczenia jest bardziej złożona,

$$V_w^t = V_w^n \left( 1 - e^{-\lambda_L V_w^t} \right) + (1-\theta) \left( 1 - e^{-\lambda_\theta V_w^t} \right),$$

gdzie  $\lambda_L$  i  $\lambda_\theta$  są współczynnikami. Rozróznilo tu dwa rodzaje wody w betonie:  $V_w^n$  jest to woda, która może być wyparowana w atmosferze nieco tylko suchszej niż 100% wilgotności względnej, a którą odzyskać można przez przechowywanie w wodzie. Natomiast  $V_w^\theta = V_w^t - V_w^n$  określa tę ilość wody, która może wyparować w otoczeniu o wilgotności  $\theta$  i która będzie absorbowana ponownie przez beton z wilgotnego powietrza. W tym wzorze współczynniki mogą być wyznaczone doświadczalnie. W pracy [38] L'HERMITE stwierdza zgodność zależności z badaniami próbek z zaczynu cementowego, prowadzonymi w ciągu 1500 dni.

Interesującą teorię opracował G. PICKETT, [45], ujmując bezpośrednio zjawisko skurczu według równania FOURIERA. W pracy [46] podaje on rozwinięcie teorii oraz wartości liczbowe skurczu elementów betonowych zależnie od sposobu wysychania w poszczególnych przypadkach. Badania doświadczalne potwierdziły w pewnym stopniu słuszność teorii PICKETTA. Wykazały jednak, że stałe występujące w wyprowadzonych wzorach powinny być zastąpione funkcjami zależnymi od wilgotności betonu lub wymiarów próbek, [27].

Przyrost skurczu w czasie proponuje L'HERMITE wyrazić zależnością analogiczną do poprzedniego równania utraty wody:

$$\mu_t = \mu(1 - e^{-K_\mu \sqrt{t}}),$$

gdzie  $K_\mu$  oznacza stałą wyznaczoną doświadczalnie oraz  $\mu$  końcową wartość skurczu.

Przytoczone zależności opisujące parowanie i skurcz betonu są wyprowadzone empirycznie. Celem ich jest nie tyle wyjaśnienie zjawiska jako funkcji wszystkich parametrów, ile możliwie dokładne przedstawienie przebiegu w czasie. Dlatego też wzory mają tu znaczenie jedynie jako kolejne etapy poznania skomplikowanych procesów przebiegających w betonie.

Końcowa wielkość skurczu może być uzależniona od struktury betonu oraz skurczu zaczynu cementowego. Najprostsza zależność empiryczna wygląda następująco:

$$\mu = \frac{\mu_c}{\frac{2800}{V_c} - 1,3},$$

gdzie  $\mu_c$  jest skurczem zaczynu cementowego,  $V_c$  ilością cementu na 1 m<sup>3</sup> betonu.

Wzór proponowany przez L'HERMITE'A, [38], i wyprowadzony teoretycznie ma postać:

$$\mu = \mu_c \frac{V_c}{V_c + [1 - (V_c + V_w + V_p + V_a)] a_\mu},$$

gdzie przyjęto następujące oznaczenia:  $\mu$  skurcz betonu,  $\mu_c$  skurcz zaczynu cementowego,  $V_c$  objętość betonu,  $V_w$  objętość wody zarobowej,  $V_p$  objętość powietrza w betonie,  $V_a$  objętość najdrobniejszych ziarn oraz  $a_\mu$  współczynnik, którego wartość zmniejsza się, gdy wzrasta ściśliwość kruszywa,  $a_\mu$  waha się w granicach 0,8-1,0 w przypadku ciągłej krzywej przesiewu oraz kruszywa krzemionkowego.

Okazuje się, że rezultaty otrzymane z powyższego wzoru odnośnie betonów o zawartości 300-400 kg cementu na m<sup>3</sup> są dostatecznie bliskie znanej krzywej empirycznej o równaniu

$$\mu = b_\mu (V_w + V_c + V_p + V_a)^{3/2},$$

gdzie współczynnik  $b_\mu$  jest zależny od rodzaju cementu oraz warunków zewnętrznych. U różnych autorów wykładnik potęgi zmienia się w granicach 1,32-1,52.

Rozważania na temat teorii skurczu można zakończyć następującymi ogólnymi stwierdzeniami:

- (1) istnieje szereg teorii, sprawdzonych doświadczalnie, jednak odnoszących się do skurczu próbek badanych w laboratorium;
- (2) ustalenie teoretyczne przebiegu i wielkości skurczu na podstawie znajomości składu betonu i warunków zewnętrznych konstrukcji napotyka na poważne trudności;
- (3) nie udało się dotychczas ustalić zależności pomiędzy skurczem próbek a zachowaniem się betonu w konstrukcji;
- (4) opisane powyżej wzory powinny być traktowane jako przybliżone, i wskazujące jedynie wpływ poszczególnych parametrów.

#### 4. Pełzanie betonu

##### 4.1. Opis zjawiska pełzania

Beton poddany działaniu sił zewnętrznych podlega najpierw odkształceniom natychmiastowym, a w miarę trwania obciążenia odkształceniom powolnym (rys. 1). Część tych odkształceń ma charakter sprężysty, część zaś plastyczny. Odkształcenia plastyczne i nieodwracalne istnieją już przy obciążeniach niewielkich w porównaniu z niszczącymi. Równocześnie jednak beton wykazuje odkształcenia skurczowe, tak jak beton nieobciążony.

Przez pojęcie pełzania rozumiemy, tak jak to już we wstępie zaznaczono, różnicę pomiędzy całkowitymi odkształceniami powolnymi a odkształceniami skurczowymi betonu.

Pełzanie betonu jest zjawiskiem bardzo złożonym, co wynika z różnorodności materiałów wchodzących w skład betonu oraz ze zmian, jakim może on podlegać w zależności od warunków zewnętrznych. Przebieg pełzania jest więc wynikiem superpozycji zjawisk, które wymienimy tu kolejno:

- (1) pełzanie «czyste» jest to odkształcenie plastyczne, całkowicie nieodwracalne, wynikające ze zjawiska wiskozy;
- (2) pełzanie konsolidacyjne powstaje z wyeliminowania części wody przez ściskanie i formowanie się naczyń włoskowatych; z tego właśnie względu pełzanie jest związane ze skurczem zależnym od ilości wody włoskowatej;
- (3) pełzanie pozorne. Składają się na nie odkształcenia sprężyste opóźnione, związane z odkształceniami sprężystymi natychmiastowymi, występującymi po wprowadzeniu obciążenia. Odkształcenia te znikają po usunięciu siły, która je wywołała. O ile odkształcenia sprężyste natychmiastowe ustępują bezzwłocznie, to odkształcenia sprężyste opóźnione ustępują po upływie pewnego czasu, bowiem odzyskanie stanu pierwotnego wymaga przewyciężenia zjawiska wiskozy, które je opóźnia.

Istnieje wiele czynników wpływających na wielkość i przebieg pełzania. Najważniejsze z nich zostaną opisane w dalszej części pracy.

## 4.2. Czynniki wpływające na pełzanie betonu przy ściskaniu

**4.2.1. Czas trwania obciążenia.** Przedmiotem rozważań będą odkształcenia opóźnione, rozpoczynające się po upływie pewnego czasu od momentu obciążenia, co odróżnia je od odkształceń natychmiastowych. Czas ten przyjmujemy w podanych zależnościach w granicach jednej godziny, zgodnie z opinią większości badaczy. Nieliczni tylko autorzy mianem odkształceń natychmiastowych określają odkształcenia występujące po upływie jednego dnia.

Na podstawie licznych badań doświadczalnych stwierdzono, że odkształcenia wzrastają asymptotycznie do wartości maksymalnej  $\Delta_n$ , osiąganey w przybliżeniu po upływie 2-3 lat. Istnieje szereg prób przedstawienia analitycznego tej zmienności, np. według L'HERMITE'A, [39], odkształcenia przebiegają zgodnie z prawem wiskozy, określonym równaniem

$$\frac{d\Delta}{dt} = k(\Delta_n - \Delta_t),$$

gdzie  $k$  jest stałą,  $t$  czasem obciążenia,  $\Delta_n$  wartością końcową pełzania,  $\Delta_t$  pełzaniem w czasie  $t$ .

Z równania tego wynika, że wzrost odkształcenia w czasie  $t$  jest proporcjonalny do różnicy między odkształceniem końcowym a odkształceniem dotychczasowym, a więc do odkształcenia, które wystąpi po czasie  $t$ . Całka tego równania posiada postać następującą:

$$\Delta = \Delta_n(1 - e^{-kt}).$$

L'HERMITE proponuje poza tym równanie, różniące się od poprzedniego jedynie zastąpieniem stałej  $k$  przez funkcję czasu, wieku betonu i innych stałych,

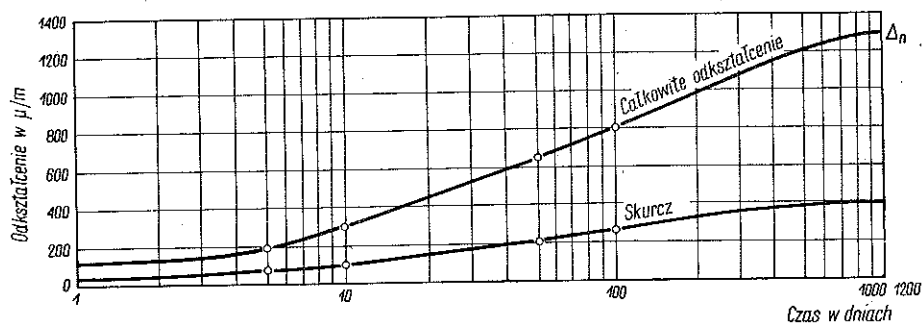
$$\frac{d\Delta}{dt} = (\Delta_n - \Delta_t) \left( \frac{k_1}{T+t} + k_2 \right),$$

gdzie  $T$  oznacza wiek betonu w chwili obciążenia, liczony w dniach,  $k_1$  i  $k_2$  stałe właściwe dla danego betonu, a  $[k_1/(T+t)] + k_2$  przedstawia odwrotność współczynnika wiskozy; wyraz ten zmniejsza się w miarę wzrostu wieku betonu.

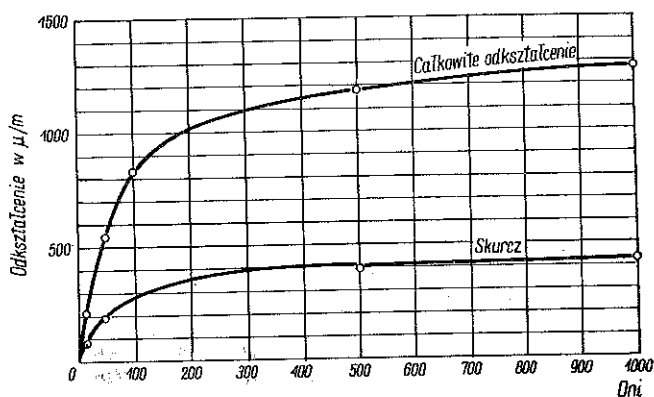
Powyższe równania określają również końcową wartość pełzania na podstawie znajomości przebiegu tego zjawiska w czasie pewnego okresu obserwacji. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, [40], że wielkość pełzania próbek betonowych zdąża do pewnej wartości końcowej, którą można ustalić z 15% dokładnością na podstawie sześciomiesięcznej obserwacji tego zjawiska. Wykresy podane na rys. 11 i 12, [39], ilustrują przykładowo w różnych układach współrzędnych przebieg pełzania betonu w czasie. Przedstawiają one wyniki badań Le CAMUSA i odnoszą się do próbek betonu o wytrzymałości 350 kG/cm<sup>2</sup>, obciążonego naprężeniem 126 kG/cm<sup>2</sup> po 30 dniach. Próbki te o średnicy 9 cm przechowywane były w atmosferze o 75% wilgotności względnej.



Na podstawie szczegółowej analizy opisów badań wielu autorów WAGNER, [61], stwierdził, że większość tych badań prowadzona była w tych samych warunkach, tzn. przy użyciu cementu portlandzkiego w pomieszczeniach o 50-70% wilgotności względnej i przy obciążeniu próbek po 28 dniach. Wobec



Rys. 11. Wpływ czasu obciążenia na pełzanie betonu, [39]



Rys. 12. Wpływ czasu obciążenia na pełzanie betonu, [39]

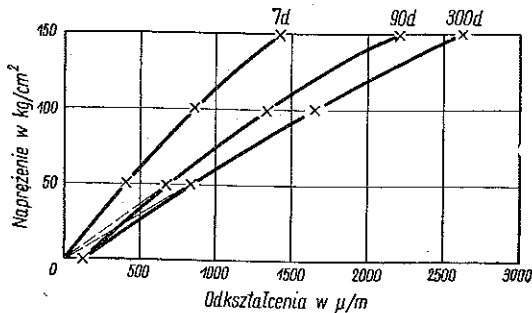
tego można było dokonać procentowego określenia wielkości odkształceń pełzania w czasie w stosunku do jego ostatecznych wartości biorąc wyniki z prac różnych badaczy. Zestawienie takie przedstawia tablica 6.

Tablica 6

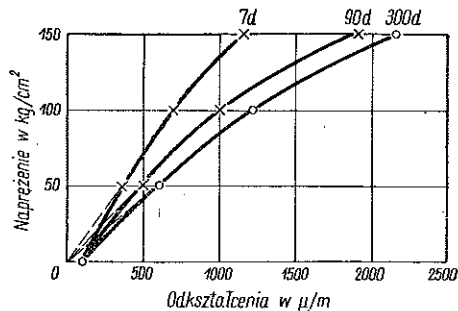
Czas trwania obciążenia	% pełzania betonu w stosunku do wartości końcowej
14 dni	25
28 dni	35
6 miesięcy	70
12 miesięcy	82
36 miesięcy	93

4.2.2. **Wielkość obciążenia.** Wielkość obciążenia jest jednym z najważniejszych czynników wpływających na pełzanie betonu. Istnieją różne opinie co do charakteru zależności wiążącej wielkość odkształceń z naprężeniami, jednak niewątpliwie w pewnym zakresie naprężeń jest to zależność liniowa, [39]. Przy niskich naprężeniach odkształcenia całkowite zbliżają się do wartości skurczu, zaś pełzanie zanika. Natomiast przy wysokich naprężeniach bliskich wytrzymałości betonu zależność ma charakter wyraźnie nieliniowy.

Wyniki badań pełzania betonu marki «200» przeprowadzonych przez MAMILLANA, [40], wykazały, że proporcjonalność zachodziła przy naprężeniach wynoszących 50-100 kG/cm<sup>2</sup>. Wykresy na rys. 13 i 14 pokazują wyniki tych badań.



Rys. 13. Wpływ wielkości obciążenia na pełzanie betonu. Beton obciążony po 7 dniach, [40]



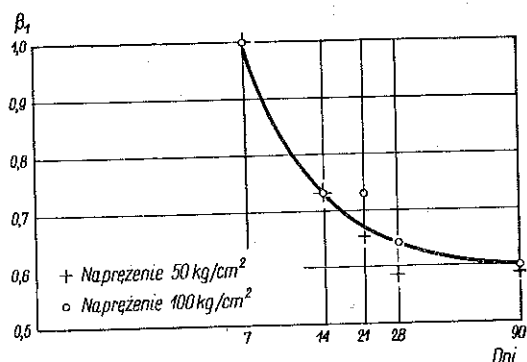
Rys. 14. Wpływ wielkości obciążenia na pełzanie betonu. Beton obciążony po 28 dniach, [40]

Przy wzroście naprężeń do 150 kG/cm<sup>2</sup> zależność staje się nieliniowa, jednak beton osiągnął już w tym przypadku 75% swej wytrzymałości. Naprężenie 100 kG/cm<sup>2</sup> odpowiada natomiast tylko 50% wytrzymałości i znajduje się wewnątrz zakresu zmian liniowych odkształceń. Również W. OLSZAK, [43], przyjmuje 50% wytrzymałości jako wartość graniczną liniowości odkształceń. To samo zjawisko zaobserwowano w próbkach poddawanych obciążeniu po 7 dniach i po 28 dniach.

4.2.3. **Wiek betonu w chwili obciążenia.** Beton starszy wykazuje mniejsze pełzanie niż beton młodszy, poddany działaniu takiego samego obciążenia. Decydujący wpływ ma tu zapewne stwardnienie betonu i jego wytrzymałość w chwili przyłożenia obciążenia.

Wyniki pomiarów odkształceń próbek obciążonych po upływie różnego okresu czasu (od 7 do 270 dni) po wykonaniu betonu zestawiono w pracy [39]. Pochodzą one z niezależnych badań prowadzonych przez kilku badaczy, przy czym próbki przechowywane były w atmosferze o wilgotności względnej wynoszącej 75%. Wyniki te wskazują na liniową zależność pomiędzy całkowitym odkształceniem razem ze skurczem, a wiekiem betonu w chwili obciążenia.

Badania prowadzone specjalnie w celu wyjaśnienia tego zagadnienia przez MAMILLANA, [40], dowodzą, że w atmosferze o wilgotności 50%, a więc w powietrzu suchym czas przyłożenia obciążenia ma tylko znaczenie w okresie do 28 dni. W okresie późniejszym końcowe wielkości pełzania betonu są już w bardzo małym stopniu uwarunkowane czasem obciążenia.



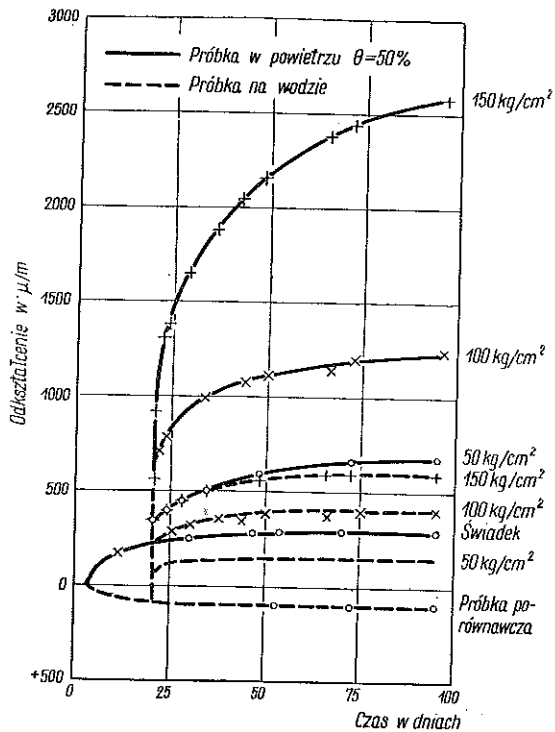
Rys. 15. Wpływ czasu przyłożenia obciążenia na pełzanie betonu, [40]. Stosunek odkształcenia przy obciążeniu przyłożonym po czasie  $t$  do odkształcenia w przypadku obciążenia po 7 dniach

Na rys. 15 pokazano wyniki prac doświadczalnych przeprowadzonych w CEBTP; krzywa wykreślona pomiędzy punktami odpowiadającymi poszczególnym pomiarom ma za zadanie przedstawić ciągle przebieg zależności.

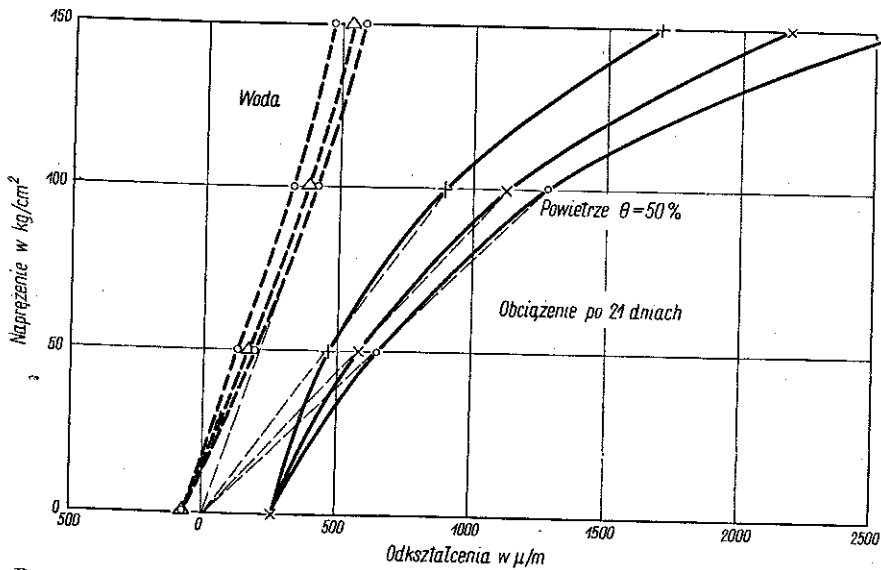
Do takich samych stwierdzeń doszły również wielu innych autorów, m.in. A. D. Ross, [50].

**4.2.4. Sposób konserwacji betonu.** Warunki konserwacji, a w szczególności wilgotność otoczenia wpływają na wielkość pełzania betonu. Pierwsza wiadomość o tym pochodzi od R. E. DAVISA, który przeprowadził badania trwające 4,5 lat na próbkach przechowywanych w różnych warunkach. Okazało się, że odkształcenia są tym mniejsze, im więcej wilgoci znajduje się w otoczeniu betonu. Pełzanie betonu przebywającego w wodzie osiąga wartość kilkakrotnie mniejszą niż betonu w atmosferze o 50% wilgotności względnej. Pokazuje to wyraźnie wykres na rys. 16, na którym zestawiono przebieg odkształceń w ciągu 100 dni próbek betonowych, poddanych działaniu różnych naprężeń ściskających.

Badania przeprowadzone przez M. MAMILLANA, [40], miały na celu wyjaśnienie wpływu sposobu konserwacji próbek na stosunek wielkości odkształceń do obciążenia. Okazało się, że proporcjonalność pomiędzy naprężeniem a pełzaniem występuje tylko przy konserwacji w wodzie, natomiast próbki przechowywane w powietrzu suchym wykazywały znacznie większe odkształcenia. Przebieg zjawiska w obu przypadkach pokazuje wykres na rys. 17. Ten wzrost

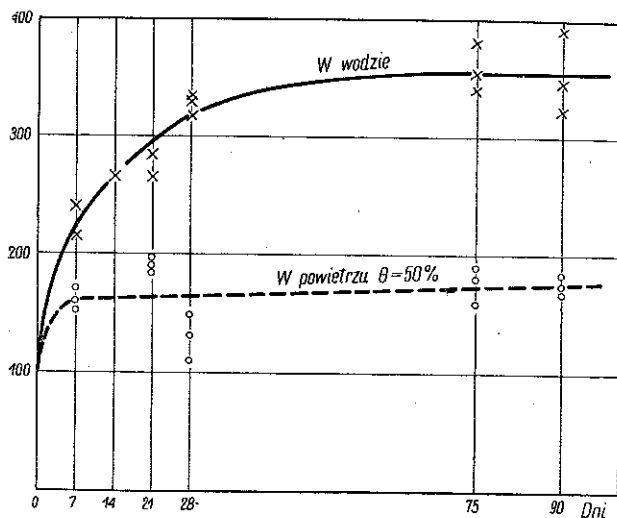


Rys. 16. Wpływ sposobu konserwacji na pęczanie betonu, [40]



Rys. 17. Stosunek wielkości obciążenia i pęczania przy różnych sposobach konserwacji, [40]

pełzania wyjaśnić można zmianą wytrzymałości próbek w czasie. Przy przechowywaniu w wodzie wytrzymałość stale wzrasta, podczas gdy w atmosferze o 50% wilgotności praktycznie stabilizuje się już po 7 dniach. Przebieg tych

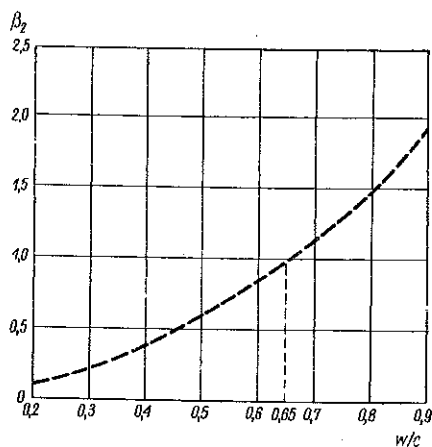


Rys. 18. Zmienność wytrzymałości betonu w zależności od sposobu konserwacji, [40]

zmian badano na takich samych próbkach i otrzymano wyniki pokazane na rys. 18. Wskutek tego próbki przechowywane w powietrzu znajdowały się pod działaniem naprężenia wynoszącego blisko 80% wytrzymałości betonu. Przy takich naprężeniach proporcjonalność już nie zachodzi.

**4.2.5. Skład betonu.** Wartość ostateczna pełzania zależy w dużym stopniu od składu betonu, w szczególności od stosunku ilości cementu do wody oraz do rodzaju kruszywa.

Wyniki badań w tym zakresie przeprowadzonych m. in. przez R. E. DAVIS, W. H. GLANVILLE'A, E. GIAN-GRECO, R. L.'HERMITE'A i Le CAMUSA zestawione w pracy [39] wskazują, że wzrost ilości cementu wpływa na zmniejszenie pełzania wobec powiększania wytrzymałości betonu, powodując jednak równocześnie wzrost skurczu, [28]. Stwierdzono jednak wzrost pełzania w betonach o nadmiernej zawartości cementu. Istnieje więc w każ-



Rys. 19. Wpływ współczynnika wodno-cementowego na wielkość pełzania, [61].  $\beta_2$  – stosunek pełzania przy dowolnym  $w/c$  do pełzania przy  $w/c = 0,65$

dym przypadku taki skład betonu, który odpowiada najmniejszym wartościom pelzania.

Wzrost wartości współczynnika wodno-cementowego na skutek bądź zmniejszenia ilości cementu, bądź powiększenia ilości wody, wiąże się ze wzrostem pelzania. Charakter tej zależności pokazuje wykres na rys. 19, na którym wszystkie wyniki odniesiono do stosunku  $w/c = 0,65$  jako do wartości podstawowej.

Rodzaj kruszywa posiada istotny wpływ na pelzanie jedynie w przypadku, gdy posiada ono niski moduł sprężystości albo gdy samo wykazuje własne odkształcenie plastyczne, [39].

**4.2.6. Objętość betonu podlegająca pelzaniu.** Wymiary poprzeczne próbki betonowej wpływają na szybkość i wielkość ostateczną skurczu betonu nieobciążonego. Ponieważ pelzanie betonu wykazuje współzależność ze skurczem, przeto wymiary próbki wpływają również i na przebieg pelzania.

Szybkość pelzania jest tym mniejsza, im większy jest stosunek objętości próbki do jej powierzchni.

Badania R. E. DAVIS, [9], wskazują na zmniejszenie się wielkości pelzania wraz ze wzrostem wielkości próbki. Próbki walcowe o średnicy 15 cm wykazały po 500 dniach 275  $\mu/m$  pelzania, o średnicy 20 cm — 245  $\mu/m$ , o średnicy 25 cm — 170  $\mu/m$ . Jednakże trudno jest wobec braku dostatecznej ilości danych stwierdzić wpływ wielkości próbek na ostateczne odkształcenie. Wiadomo bowiem, że elementy o znacznych wymiarach wykazują odkształcenia jeszcze po wielu latach, podczas gdy zjawiska te zanikały już w elementach małych. Pomiar prowadzone na moście Angerman w Sandö w Szwecji dowodzą istnienia pelzania po upływie 13 lat w elementach o wymiarach rzędu 1 metra.

Badania A. A. GWOZDIEWA, [24], przeprowadzono na próbkach sześciennych o wymiarach od  $3,60 \times 1,60 \times 0,80$  m do  $0,45 \times 0,20 \times 0,10$ , stosunek wymiarów był więc w skrajnym przypadku jak 8 : 1. Próbki obciążono siłą równą połowie siły niszczącej. Wielkości odkształceń betonu najmniejszej próbki były prawie 3-krotnie większe od odkształceń największej próbki.

**4.2.7. Odciążenie próbki betonowej.** Przy odciążeniu próbki betonowej podanej przez pewien czas stałemu naciskowi występują odkształcenia odwrotne, które dzielimy na dwa rodzaje: natychmiastowe, w ciągu 1 godziny, oraz opóźnione, w ciągu kilku dni. Wielkość odkształceń opóźnionych równa się około 20% wielkości odkształceń natychmiastowych, zaś przy niskich obciążeniach procent ten jest jeszcze mniejszy. Przebieg odkształceń opóźnionych przy odciążeniu wskazuje na ich charakter lepko-sprężysty. L'HERMITE proponuje w pracy [39] następujące równanie w celu przedstawienia zmienności w czasie odkształceń opóźnionych

$$\eta_i^* = \eta^*(1 - e^{-at})$$

lub

$$\log(\eta^*) - \log(\eta^* - \eta_t^*) = -at,$$

gdzie  $\eta_t^*$  oznacza odkształcenie sprężyste opóźnione przy odciążaniu w czasie  $t$ ,  $\eta^*$  odkształcenie sprężyste opóźnione całkowite oraz  $a$  pochylenie prostej, wynoszące 1,35-1,80.

Beton odciążony przechowywany w wodzie pęcznieje bardziej niż beton, który nie był nigdy obciążony a umieszczony jest w tych samych warunkach. Próbki betonowe obciążone do 50% wytrzymałości na zniszczenie, a następnie odciążone i umieszczone w wodzie pęcznią proporcjonalnie do wielkości zastosowanego obciążenia. Również końcowa wielkość odkształceń powolnych betonu, pęcznienia i skurczu, jest związana z zastosowanym obciążeniem, przy czym minimum tych odkształceń odpowiada stanowi nieobciążonemu, a więc odkształceniom skurczowym.

**4.2.8. Pęcznienie w kierunku poprzecznym do działania obciążenia.** Próbką betonową poddana ścisłaniu ulega skróceniu podłużnemu oraz równoczesnemu odkształceniu poprzecznemu o znaku przeciwnym. Stosunek odkształcenia poprzecznego do podłużnego, zwany współczynnikiem POISSONA, przyjęto zakładać w zakresie sprężystym od 0,18 do 0,22, zaś w zakresie plastycznym około 0,5.

Wyniki badań prowadzonych w tej dziedzinie przez R. L'HERMITE'A, [39], wskazują na błędność tej opinii. Okazało się, że odkształcenia poprzeczne pęcznienia przy ścisłaniu były bliskie zeru w przypadku, gdy naprężenia były mniejsze od połowy wytrzymałości na zniszczenie. W tym przypadku więc pęcznienie betonu w kierunku działania obciążenia było związane ze zmniejszeniem objętości próbek. Doświadczenia te jednak są niezmiernie trudne do przeprowadzenia ze względu na konieczność dużej dokładności pomiarów i uwzględniania skurczu. Powyższy wniosek sformułowano więc na podstawie identyczności odkształceń poprzecznych próbek obciążonych i nieobciążonych. Podobne badania prowadzone w Lizbonie potwierdzają ten wniosek, natomiast pomiary próbek dokonane w Monachium wykazały istnienie pęcznienia poprzecznego.

Wobec rozbieżności opinii różnych badaczy trzeba uznać zagadnienie pęcznienia poprzecznego za nierozwiązane<sup>3</sup>.

**4.2.9. Wpływ pęcznienia na wytrzymałość i odkształcalność betonu.** Pęcznienie betonu nie posiada widocznego wpływu na wytrzymałość betonu, natomiast zmniejsza jego odkształcalność. Badania prowadzone były przez WASHA i FLUCKA, [62], na próbkach obciążonych po 28 dniach siłą równą 25% siły niszczącej. Próbki znajdowały się pod obciążeniem 10,5 lat, po czym porównywano ich odkształcalność i wytrzymałość z nieobciążonymi próbkami przebywającymi w tych samych warunkach.

<sup>3</sup> Zagadnienie pęcznienia w kierunku poprzecznym do działania obciążenia oraz wpływ wielkości próbki podlegającej pęcznieniu jest przedmiotem badań prowadzonych przez K. THIELA w CEBTP.

Okazało się, że beton obciążony wykazywał wzrost wytrzymałości o 5% w stosunku do betonu nieobciążonego; jest to wielkość nieznaczna w badaniach wytrzymałości. Natomiast moduł sprężystości wzrósł o 20% w próbkach z betonu wibrowanego i o 30% w próbkach mniej zwartych, wzrost ten występuje również w stosunku do próbek nieobciążonych.

Badania prowadzone w CEBTP w Paryżu, [39], przez ponad 5 lat nie wykazały również istotnych zmian w wytrzymałościach betonów obciążonych.

**4.2.10. Pełzanie przy obciążeniach powtarzanych.** Przy obciążeniu powtarzanym wielokrotnie z częstotliwością kilku okresów na minutę występuje przyspieszenie odkształceń plastycznych w stosunku do obciążenia statycznego.

W tablicy 7 pokazano wyniki badań przeprowadzonych w CEBTP, [39]. Przedmiotem badań były dwie serie próbek znajdujących się w tych samych warunkach i poddane naprężeniu ściskającemu równemu  $126 \text{ kG/cm}^2$ . Jedna seria była obciążona w sposób statyczny, druga zaś przenosiła obciążenie pulsujące tej samej wielkości z częstotliwością 500 cykli/min. W poziomych wierszach tablicy zestawiono dane odpowiadające jednakowym odkształceniom trwałym obu serii.

Tablica 7

Obciążenie statyczne czas trwania obciążenia	Obciążenie dynamiczne	
	Czas trwania obciążenia	Ilość cykli
24 dni	1 dzień (24 godz.)	720 000
180 dni	5 dni	3 600 000
600 dni	14 dni	10 100 000

Przyspieszenie jest tym większe, im wyższe naprężenie zastosowano w próbkach betonowych. W tablicy 8 zestawiono czas trwania obciążenia stałego, przy którym otrzymano te same odkształcenia co przy obciążeniu dynamicznym o różnej wielkości i stałej ilości cykli.

Tablica 8

Obciążenia statyczne Czas trwania obciążenia	Obciążenie dynamiczne	
	Procent obciążenia w stosunku do naprężenia granicznego	Ilość cykli
60 dni	30 %	1 000 000
27 dni	22 %	1 000 000
2 dni	15 %	1 000 000

Powodem przyspieszenia odkształceń plastycznych pod obciążeniem dynamicznym jest fakt, że beton zachowuje się jak materiał podlegający w małym tylko stopniu procesowi utwardzenia. Po każdym cyklu przyrasta pewna część



odkształceń plastycznych aż do momentu zniszczenia. W materiale idealnie podatnym na utwardzenie po pierwszym cyklu wystąpiłaby całkowita wartość odkształcenia plastycznego, następne zaś cykle powodowałyby jedynie odkształcenia sprężyste.

Zdolność betonu do odkształceń trwałych w krótszym czasie pod obciążeniem dynamicznym niż pod statycznym może być jednak wykorzystywana w procesach częściowego utwardzenia.

Podczas badań w CEBTP przeprowadzono jeszcze inną serię doświadczeń. Próbki betonowe pozostające pod obciążeniem w ciągu 1000 dni zostały odciążone i poddane obciążeniom powtarzanym. Po upływie 3 000 000 cykli odkształcenia plastyczne zwiększyły się zaledwie o 6%. Wyniki te uzyskano przy dwóch wielkościach obciążeń: 50 i 100 kG/cm<sup>2</sup>.

Okazuje się, że odkształcenia plastyczne powstałe przy obciążeniu stałym i powtarzalnym nie sumują się. Beton, w którym nastąpiły odkształcenia plastyczne pod wpływem obciążenia stałego, nie odkształca się już pod wpływem obciążeń powtarzanych.

#### 4.3. Pełzanie przy rozciąganiu

Większość dotychczasowych prac badawczych na temat pełzania betonu prowadzona była przy obciążeniu próbki betonowej siłą ściskającą. Badania na temat pełzania betonu przy rozciąganiu są jeszcze nieliczne. Można już jednak na ich podstawie sformułować pewne stwierdzenia.

Próbka betonowa obciążona siłą rozciągającą w okresie początkowym wydłuża się. Jest rzeczą oczywistą, że w tym samym czasie próbka ta podlega działaniu skurczu. Odkształcenia próbki są sumą algebraiczną odkształceń pochodzących od rozciągania i od skurczu, tak jak gdyby te czynniki działały niezależnie od siebie. Początkowo odkształcenia skurczowe są mniejsze od odkształceń powstałych na skutek pełzania, jednak później przewyższają te ostatnie i po pewnym okresie czasu, zależnym głównie od wielkości zastosowanej siły rozciągającej, próbka zaczyna ulegać skróceniu. Jest rzeczą charakterystyczną, iż krzywa pełzania ma podobny kształt co krzywa skurczu próbki nieobciążonej.

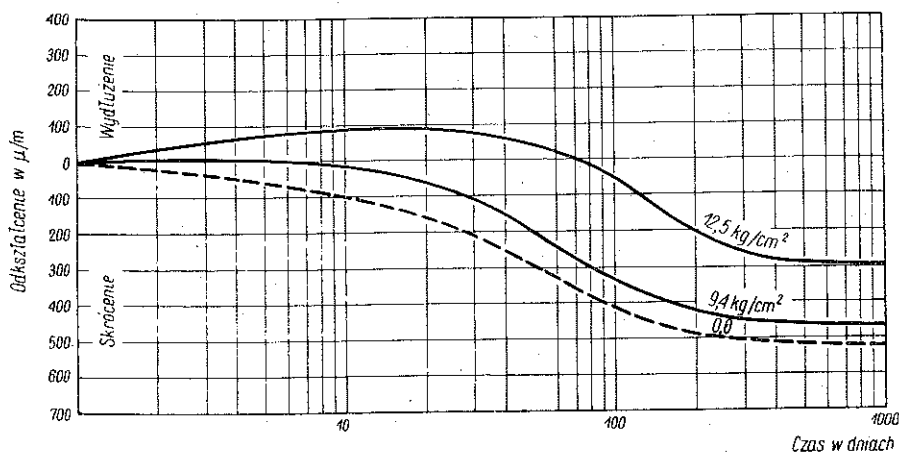
Rysunek 20 zaczerpnięty z pracy [39] przedstawia przebieg pełzania betonu o zawartości 350 kg cementu na 1 m<sup>3</sup> betonu w ciągu 3 lat.

GLANVILLE, [2] i [22], przeprowadził badania na trzech seriach próbek betonowych, z których jedna była poddana naprężeniu rozciągającemu o wielkości 10,5 kG/cm<sup>2</sup>, druga sile ściskającej, a trzecia była nieobciążona. Po upływie 6 miesięcy wielkości odkształceń przy rozciąganiu i ściskaniu były praktycznie jednakowe w wartościach bezwzględnych.

W badaniach R. E. DAVISA, [8], przeprowadzonych w podobnych założeniach, na podstawie 4-ro miesięcznych wyników stwierdzono, że wartości

pełzania przy rozciąganiu znacznie przekraczają wartości przy ściskaniu. Jest to wniosek przeciwny do wyników badań GLANVILLE'A.

Badania zapraw i betonów przy rozciąganiu nabierają coraz większego znaczenia, szczególnie ze względu na związane z tym zagadnieniem powsta-



Rys. 20. Pełzanie betonu przy rozciąganiu, [39]

wania rys. W roku 1959 w CEBTP w Paryżu rozpoczęto serję badań próbek z zaprawy cementowej, których wstępne wyniki opisane są w pracy [26].

#### 4.4. Pełzanie przy zginaniu

Prace dotyczące pełzania przy zginaniu są liczne ze względu na łatwość przeprowadzenia badań wobec dużych odkształceń oraz jednakowego działania skurczu betonu na obie krawędzie badanego elementu.

Według GLANVILLE'A odkształcenia plastyczne po 65 dniach były proporcjonalne do wielkości obciążenia.

Pełzanie przy rozciąganiu jest szybsze niż przy ściskaniu. Wskutek tego położenie osi obojętnej w elemencie zginanym ulega zmianie, [34]. W okresie pierwszych 50 dni następuje podniesienie się osi w kierunku strefy ściskanej. Później po wyrównaniu się pełzania na obu krawędziach oś powraca do poprzedniego położenia. Podobne zjawisko zaobserwował DAVIS, [8].

G. OBERTI przeprowadził badania pełzania przy zginaniu w betonie z cementu pucolanowego pochodzenia wulkanicznego, [42]. Badania te związane z występującymi w okolicy skałami używanymi do produkcji cementu wskazywały na bardzo długi przebieg pełzania. Po upływie 4 lat odkształcenia nie ustabilizowały się.

#### 4.5. Pełzanie przy obciążeniach złożonych

Badania nad pełzaniem betonu przy skręcaniu prowadził Le CAMUS, [34]. W wyniku 400-dniowych obserwacji stwierdzono, że odkształcenia są propor-

cjonalne do zastosowanych sił skręcających. W okresie tym odkształcenia jeszcze się nie ustabilizowały. Zauważono również, że wartość skurczu podłużnego była jednakowa na próbkach obciążonych jak i nieobciążonych. Okazuje się więc, że próbka nie uległa żadnemu odkształceniu podłużnemu, a wartości pełzania przy ściskaniu i rozciąganiu wzajemnie się zrównoważyły.

Pełzanie przy ściskaniu trójosiowym badane było na próbkach walcowych ściskanych wzdłuż osi i poddanych parciu hydrostatycznemu, [11]. Stwierdzono, że odkształcenie podłużne jest proporcjonalne do różnicy naprężeń głównych. Odkształcenia poprzeczne przy naprężeniu osiowym  $40 \text{ kG/cm}^2$  i parciu bocznym  $20 \text{ kG/cm}^2$  wykazywały zmniejszenie średnicy walca. Badania te nie pozwoliły jednak na określenie wartości współczynnika POISSONA w betonie.

Ciekawe badania przeprowadził A. D. Ross, [54], stosując dwuosiowe obciążenie. Stwierdził on zależność liniową między obciążeniem a odkształceniem oraz wartość współczynnika POISSONA równą zeru przy dwuosiowym stanie naprężeń.

#### 4.6. Próby teoretycznego ujęcia pełzania betonu

**4.6.1. Przyczyny pełzania betonu.** Pełzanie betonu jak widać z poprzednich rozważań jest zjawiskiem bardzo złożonym. Pomimo wielu przeprowadzonych badań wpływ niektórych czynników na przebieg zjawiska lub też wartość ostateczną odkształceń nie został wyjaśniony w sposób wyczerpujący.

Dotychczasowe rozważania dotyczyły pełzania przy różnych obciążeniach oraz w różnych warunkach i były wynikiem badań doświadczalnych w wielu placówkach na całym świecie.

Równocześnie z pracami laboratoryjnymi prowadzone są od wielu lat próby opracowania teorii pełzania. Mają one na celu w pierwszym rzędzie wyjaśnienie przyczyn pełzania, a ponadto określenie przebiegu pełzania jako funkcji najważniejszych parametrów. Pozwoliłoby to na przewidywanie wielkości pełzania w elementach betonowych bądź po obserwacji zjawiska w okresie początkowym, bądź też na podstawie znajomości warunków zewnętrznych, jakości betonu, wielkości obciążenia i innych parametrów.

Warto zaznaczyć, że dotychczasowe prace dotyczą niemal wyłącznie przebiegu pełzania próbek betonowych. Przenoszenie płynących stąd wniosków na obiekty betonowe stanowi oddzielne i nierozwiązane jeszcze zagadnienie. Jest ono niewątpliwie celem prac U. FINSTERWALDERA, który prowadzi od roku 1952 pomiary odkształceń na jedenastu mostach i na dwóch innych konstrukcjach oraz porównuje je z teoretycznie obliczonymi wielkościami, przyjętymi do projektowania, [17].

Zupełnie odmienna grupa badaczy zajmuje się rozkładem naprężeń w różnych konstrukcjach, wywołanych pełzaniem betonu. Wymienić tu można

prace [1], [43], [6], [7] i [14]. Przeważa tu ujęcie matematyczne wobec braku danych o rzeczywistym przebiegu zjawiska w konstrukcjach.

Na ogół uważa się, że zjawisko pełzania polega na konsolidacji betonu pod obciążeniem. Obciążenie początkowe przekazuje się na wodę i szkielet betonu, jednak wobec filtracji wody naprężenia i odkształcenia w szkielecie powiększają się w miarę upływu czasu, [19], [63]. Powoduje to przyspieszenie wydzielania się wody znajdującej się w naczyniach włoskowatych na zewnątrz. W tym samym czasie kryształy i gel odkształcają się plastycznie. Zjawisko stabilizuje się w miarę zmniejszania się udziału wody w przenoszeniu obciążenia. Nie mówimy tu o części pełzania obejmującej odkształcenia sprężyste, która nie przynosi widocznych zmian strukturalnych.

Powiązanie zjawiska pełzania z przyspieszeniem wyciskania wody z naczyń włoskowatych prowadzi w konsekwencji do zagadnienia związku między pełzaniem a skurczem betonu. Jest bowiem rzeczą wiadomą, że skurcz betonu przebiega w głównej mierze wskutek wydzielania się wody z masy betonowej.

Istnieje kilka przesłanek wynikających z przeprowadzonych doświadczeń, [39], które przemawiają za powiązaniem tych dwóch zjawisk:

(1) pełzanie betonu jest proporcjonalne do obciążenia, ale dopiero przy odkształceniach przekraczających odkształcenia skurczowe;

(2) pełzanie pod stałym obciążeniem jest tym większe, im bardziej sucha jest atmosfera, w której przechowywane są próbki; to samo zjawisko obserwuje się przy skurczu;

(3) porównanie obciążonych próbek różnych betonów znajdujących się w jednakowych warunkach wskazuje, że pełzanie jest tym większe, im większy jest skurcz betonu nieobciążonego;

(4) po odciążeniu próbka betonowa umieszczona w wodzie pęcznieje w znacznie większym stopniu niż próbka nie obciążona, pozostająca w identycznych warunkach wilgotnościowych; pęcznienie to wydaje się proporcjonalne do wysokości zastosowanego obciążenia.

Powyższe przesłanki prowadzą do wniosku, że skurcz i pełzanie betonu są od siebie zależne i że wartości ich sumują się częściowo. Natomiast pełzanie wywołane naprężeniami skurczowymi w betonie zmniejsza wpływ skurczu i możliwość powstawania rys., (por. 2.4.3).

Okazuje się jednak, że część pełzania przebiega niezależnie od skurczu i występuje w próbkach przechowywanych w wodzie.

Opinie badaczy na temat przyczyn pełzania betonu, a więc i związku pełzania ze skurczem betonu są różne, a tym samym zagadnienie to trzeba uznać za nierozwiązane.

L'HERMITE, [39], zaproponował powiązanie tych dwóch zjawisk następującym równaniem:

$$\eta_{0p} = \Delta \left( 1 + a_{\Delta} \frac{\mu_0}{\mu_0} \right),$$

gdzie  $\eta_{op}$  oznacza całkowite odkształcenie opóźnione,  $\Delta$  pelzanie bez skurczu,  $a_d$  stałą właściwą dla danego betonu,  $\mu_0$  skurcz teoretyczny przy wilgotności względnej równej zero,  $\mu_0^r$  skurcz przy rzeczywistej wilgotności.

Pelzanie betonu może być związane z odkształceniami trwałymi, spowodowanymi wzajemnymi przesunięciami poszczególnych ziarn kruszywa i kryształów uwodnionych podczas wyciskania wody na zewnątrz przez obciążenie.

F. VOGT, [60], tłumaczy w swej teorii, że skurcz współdziała z pelzaniem wskutek naprężeń wewnętrznych, jakie wywołuje. Powierzchnia próbki prędzej wysycha niż wnętrze, powstaje więc stan napięcia wywołujący naprężenia ściskające. Do tych naprężeń dołączają się naprężenia wywołane obciążeniem. Wreszcie pod wpływem pelzania każdej warstwy środek jest rozciągany, a zewnętrzna powierzchnia ściskana. W ten sposób naprężenia wewnętrzne i wywołane z nich odkształcenia wykazują współzależność skurczu i pelzania w każdym razie przy niskich obciążeniach.

G. PICKETT, [44], sugeruje związek między skurczem i pelzaniem betonu a nieliniowością odkształceń betonu powyżej pewnej granicy naprężeń.

A. D. ROSS, [53], i H. B. SEED, [55], wskazują, że ciśnienie pary gelu koloidalnego wzrasta przy obciążeniu. Dla wprowadzenia równowagi woda wyciskana jest z gelu. Hipoteza ta zgadza się z hipotezą FREYSSINETA o naczyniach włoskowatych i odkształceniach menisków, pozwalająca na wprowadzenie równowagi przez wyparowanie. Podobna również jest opinia R. E. DAVIS, H. E. DAVIS, HAMILTONA i LYNAMA.

Wszystkie powyższe hipotezy powstały w założeniu, że z pelzaniem betonu związana jest zmiana ilości wody zawartej w betonie. Na potwierdzenie tej tezy nie ma jeszcze obecnie dostatecznych wyników doświadczalnych, a badania G. A. MANEYA dowiodły, [42], że próbki obciążone przy naprężeniu  $80 \text{ kg/cm}^2$  wykazują taki sam ubytek na wadze, jak próbki nie obciążone.

W celu wytłumaczenia przebiegu pelzania A. D. ROSS oraz E. TORROJA i A. PAEZ przeprowadzili ciekawe badania na modelach reologicznych. Modele te miały odtwarzać zjawiska zachodzące w czasie pelzania betonu za pomocą odpowiednio ustawionych układów tłoków w cylindrach oraz sprężyn, przekazujących odkształcenia. Model ROSSA jest bardzo uproszczony i nie przedstawia wiernie zachodzących zjawisk. Model TORROJA i PAEZA, bardziej skomplikowany, uwzględnia sprężystość natychmiastową, sprężystość na skutek wiskozy, tarcie oraz odkształcenia stałe. Szczegółowy opis doświadczalnych modeli reologicznych podany jest w pracach [51], [59] i [34].

**4.6.2. Przebieg pelzania w czasie.** Wielu badaczy zajmowało się tym zagadnieniem i próbowało przedstawić przebieg pelzania w formie funkcji matematycznej.

L. G. STRAUB, [53], był pierwszym, który taką funkcję wyprowadził. Ma ona następującą formę:

$$\Delta_t = k\sigma^n t^a,$$

gdzie  $\Delta_t$  oznacza wielkość pełzania w czasie  $t$ ,  $\sigma$  wielkość naprężenia w  $\text{kg/cm}^2$ ,  $t$  czas w dniach,  $k$ ,  $p$ ,  $q$  stałe, zależne od warunków badań i określane doświadczalnie.

Wyrażenie  $\sigma^p$  w powyższym wzorze świadczy o tym, że STRAUB nie uznawał proporcjonalności między obciążeniem a odkształceniem.

I. R. SHANK, [56], przedstawił przebieg pełzania betonu w następującej postaci:

$$\Delta_t = c_1 \sqrt[c_2]{t},$$

gdzie  $c_1$  i  $c_2$  oznaczają stałe, określane doświadczalnie.

A. D. ROSS, [52], zaproponował następujące równanie:

$$\Delta_t = \frac{t}{d_1 + d_2 t},$$

gdzie  $d_1$  i  $d_2$  są to stałe, określane doświadczalnie.

Szerokie studia w celu przedstawienia pełzania w postaci funkcji wykładniczej przeprowadził THOMAS, [58], i ustalił następującą zależność:

$$\Delta_t = \Delta \sigma (1 - e^{-k[(t+k_2)/k_3 - k_1]}),$$

gdzie  $\Delta$  oznacza pełzanie końcowe,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  stałe, określane doświadczalnie.

Funkcja F. DISCHINGERA, [10], posiada podobną postać

$$\Delta_t = A(1 - e^{-ct}).$$

Również wielu innych badaczy, jak Mc HENRY, W. H. GLANVILLE, KORNBER, W. OLSZAK, FRIEDRICH i LORMAN ujęło przebieg pełzania w formie zależności funkcyjnych. Ciekawe porównanie różnych funkcji pełzania z krzywą przebiegu pełzania, zaczerpniętą z badań GLANVILLE'A, [21], przeprowadził O. WAGNER, [52]. Wykresy funkcji pokazano na rys. 21.

Jak wynika z poniższych wykresów funkcja SHANKA daje wartości bliskie pomiarom próbek jedynie w ciągu pierwszych kilku miesięcy, hiperbola ROSSA i LORMANA, szczególnie w czasie długiego okresu obciążenia, dobrze zgadza się z punktami ustalonymi drogą prób. Szczególnie dobrze z punktami krzywej badań GLANVILLE'A zgadza się funkcja THOMASA. Funkcje DISCHINGERA i FRIEDRICH, aczkolwiek posiadają bardzo regularny przebieg, jednak znacznie odbiegają od pozostałych.

Współczynniki występujące w poszczególnych funkcjach uważane są za stałe. Jak jednak z powyższych wykresów wynika, nie są to wartości stałe, lecz współczynniki zmienne dla każdego badania.

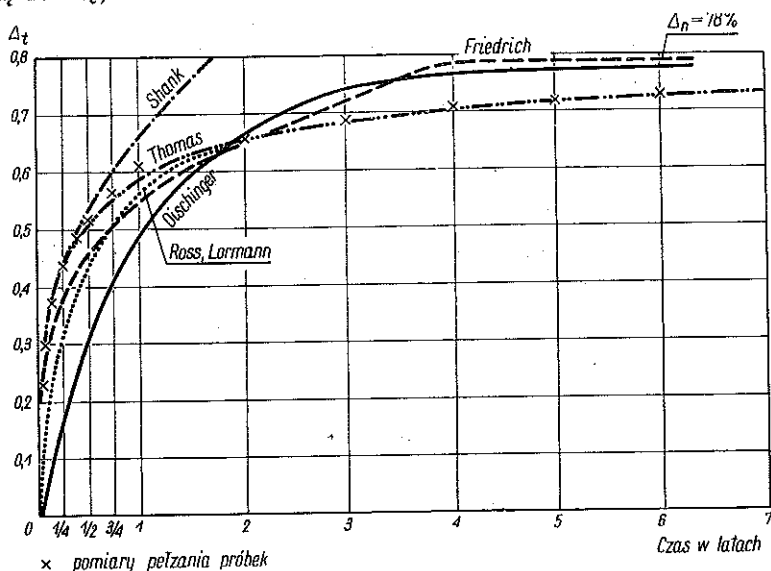
I. R. SHANK, A. D. ROSS i LORMAN próbowali określić zależność współczynników pełzania od własności betonu i warunków badań, lecz prace te nie dały zadowalających wyników.

O. WAGNER, [61], dokonał prób określenia jakościowego wpływu poszczególnych czynników: wielkości obciążenia, sposobu konserwacji, stosunku

cementowo-wodnego itp., branych pod uwagę przy badaniach nad przebiegiem pelzania. Dla każdego z tych czynników wykreślił krzywe przebiegu pelzania opierając się na wynikach wielu prac badawczych.

Z porównania tego można wyciągnąć dwa zasadnicze wnioski:

(1) zmienne wartości poszczególnych czynników nie mają w zasadzie wpływu na krzywą przebiegu pelzania w czasie i wszystkie krzywe mają bardzo zbliżoną formę;



Rys. 21. Porównanie różnych funkcji pelzania, [61]; pomiary pelzania próbek

(2) niektóre czynniki przyspieszają lub opóźniają przebieg zjawiska i wystąpienie ostatecznych wartości odkształceń wykazuje to, iż jest rzeczą niemożliwą ujęcie pelzania w ścisłej formie funkcji matematycznych.

Szereg badaczy radzieckich (STOLIAROW, FREIFELD, SZEJKIN, ULICKI i inni) ujęło przebieg pelzania betonu w formie analitycznej. Ograniczymy się tutaj do podania funkcji, która została przyjęta jako podstawowa w pracy ARUTJUNIANA na temat zastosowania teorii pelzania, [1]:

$$\Delta(t, T) = \varphi(T)[1 - e^{-c(t-T)}], \quad \varphi(t) = \Delta_n + \frac{c_2}{T},$$

gdzie  $t$  oznacza czas,  $T$  wiek betonu w chwili obciążenia,  $c_1$  i  $c_2$  stałe, określane doświadczalnie, zależne od jakości betonu i sposobu konserwacji,  $\Delta_n$  pelzanie ostateczne.

Należy tu wreszcie przypomnieć (por. p. 4.2.1) funkcję zaproponowaną przez L'HERMITE'A:

$$\frac{d\Delta}{dt} = (\Delta_n - \Delta_t) \left( \frac{k_1}{T+t} + k_2 \right).$$

gdzie  $\Delta_t$  oznacza wielkość pełzania w czasie  $t$ ,  $\sigma$  wielkość naprężenia w  $\text{kG/cm}^2$ ,  $t$  czas w dniach,  $k$ ,  $p$ ,  $q$  stałe, zależne od warunków badań i określane doświadczalnie.

Wyrażenie  $\sigma^p$  w powyższym wzorze świadczy o tym, że STRAUB nie uznawał proporcjonalności między obciążeniem a odkształceniem.

I. R. SHANK, [56], przedstawił przebieg pełzania betonu w następującej postaci:

$$\Delta_t = c_1 \sqrt[p]{t},$$

gdzie  $c_1$  i  $c_2$  oznaczają stałe, określane doświadczalnie.

A. D. Ross, [52], zaproponował następujące równanie:

$$\Delta_t = \frac{t}{d_1 + d_2 t},$$

gdzie  $d_1$  i  $d_2$  są to stałe, określane doświadczalnie.

Szerokie studia w celu przedstawienia pełzania w postaci funkcji wykładniczej przeprowadził THOMAS, [58], i ustalił następującą zależność:

$$\Delta_t = \Delta \sigma (1 - e^{-k[(t+k_1)^{k_2} - k_3]}),$$

gdzie  $\Delta$  oznacza pełzanie końcowe,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  stałe, określane doświadczalnie.

Funkcja F. DISCHINGERA, [10], posiada podobną postać

$$\Delta_t = \Delta (1 - e^{-ct}).$$

Również wielu innych badaczy, jak Mc HENRY, W. H. GLANVILLE, KORNER, W. OLSZAK, FRIEDRICH i LORMAN ujęło przebieg pełzania w formie zależności funkcyjnych. Ciekawe porównanie różnych funkcji pełzania z krzywą przebiegu pełzania, zaczerpniętą z badań GLANVILLE'A, [21], przeprowadził O. WAGNER, [52]. Wykresy funkcji pokazano na rys. 21.

Jak wynika z poniższych wykresów funkcja SHANKA daje wartości bliskie pomiarom próbek jedynie w ciągu pierwszych kilku miesięcy, hiperbola ROSA i LORMANA, szczególnie w czasie długiego okresu obciążenia, dobrze zgadza się z punktami ustalonymi drogą prób. Szczególnie dobrze z punktami krzywej badań GLANVILLE'A zgadza się funkcja THOMASA. Funkcje DISCHINGERA i FRIEDRICH, aczkolwiek posiadają bardzo regularny przebieg, jednak znacznie odbiegają od pozostałych.

Współczynniki występujące w poszczególnych funkcjach uważane są za stałe. Jak jednak z powyższych wykresów wynika, nie są to wartości stałe, lecz współczynniki zmienne dla każdego badania.

I. R. SHANK, A. D. ROSS i LORMAN próbowali określić zależność współczynników pełzania od własności betonu i warunków badań, lecz prace te nie dały zadowalających wyników.

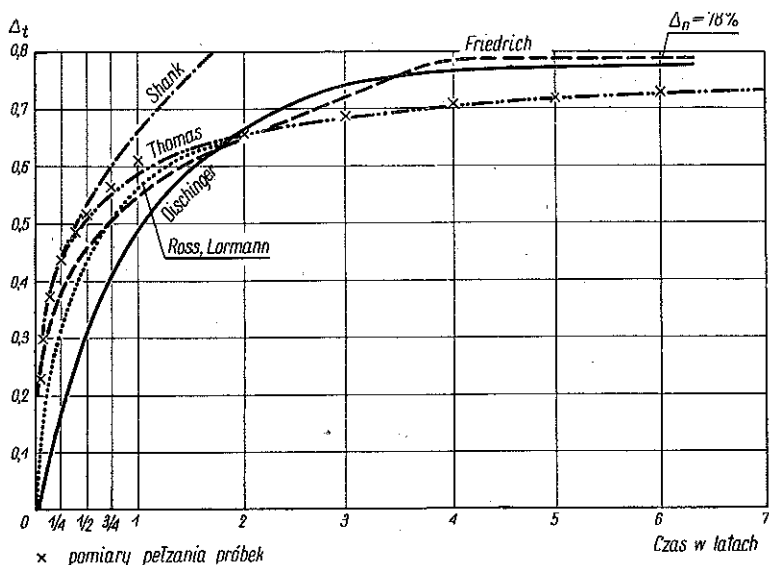
O. WAGNER, [61], dokonał prób określenia jakościowego wpływu poszczególnych czynników: wielkości obciążenia, sposobu konserwacji, stosunku



cementowo-wodnego itp., branych pod uwagę przy badaniach nad przebiegiem pełzania. Dla każdego z tych czynników wykreślił krzywe przebiegu pełzania opierając się na wynikach wielu prac badawczych.

Z porównania tego można wyciągnąć dwa zasadnicze wnioski:

(1) zmienne wartości poszczególnych czynników nie mają w zasadzie wpływu na krzywą przebiegu pełzania w czasie i wszystkie krzywe mają bardzo zbliżoną formę;



Rys. 21. Porównanie różnych funkcji pełzania, [61]; pomiary pełzania próbek

(2) niektóre czynniki przyspieszają lub opóźniają przebieg zjawiska i wstąpienie ostatecznych wartości odkształceń wykazuje to, iż jest rzeczą niemożliwą ujęcie pełzania w ścisłej formie funkcji matematycznych.

Szereg badaczy radzieckich (STOLIAROW, FREIFELD, SZEJKIN, ULICKI i inni) ujęło przebieg pełzania betonu w formie analitycznej. Ograniczymy się tutaj do podania funkcji, która została przyjęta jako podstawowa w pracy ARUTUNIANA na temat zastosowania teorii pełzania, [1]:

$$\Delta(t, T) = \varphi(T)[1 - e^{-c(t-T)}], \quad \varphi(t) = \Delta_n + \frac{c_2}{T},$$

gdzie  $t$  oznacza czas,  $T$  wiek betonu w chwili obciążenia,  $c_1$  i  $c_2$  stałe, określane doświadczalnie, zależne od jakości betonu i sposobu konserwacji,  $\Delta_n$  pełzanie ostateczne.

Należy tu wreszcie przypomnieć (por. p. 4.2.1) funkcję zaproponowaną przez L'HERMITE'A:

$$\frac{d\Delta}{dt} = (\Delta_n - \Delta_t) \left( \frac{k_1}{T+t} + k_2 \right).$$

Może być ona również przedstawiona w postaci:

$$\log(\Delta_n + \Delta_t) = \log \Delta_n - k_1 \log \frac{T+t}{T} - k_2 t,$$

lub

$$\Delta_t = \Delta_n \left[ 1 - e^{-\left(k_1 \log \frac{T+t}{T} + k_2 t\right)} \right].$$

Funkcja ta została sprawdzona badaniami Le CAMUSA, GLANVILLE'A i DAVISA i wykazała dobre odzwierciedlenie przebiegu pełzania betonu. Stałe w tej funkcji miały następujące wartości: w badaniach GLANVILLE'A  $k_1 = 0,62$ ,  $k_2 = 0,30$ , zaś w badaniach Le CAMUSA  $k_1 = 0,75$ ,  $k_2 = 0,28$ .

DELARUE sprawdził powyższą funkcję na wynikach badań przeprowadzonych w Casablance, [64], i stwierdził, że funkcja ta jest zupełnie poprawna w późniejszych okresach obciążenia. Dla początkowej fazy pełzania proponuje on wprowadzenie do wzoru obok stałych  $k_1$  i  $k_2$ , określających jakość betonu, również stałej  $k_0$ , uwzględniającej wymiary próbki i warunki zewnętrzne. Postać funkcji pełzania przedstawia się następująco:

$$\Delta_t = k_0 f(\sqrt{t}) + C_0 \left[ 1 - e^{-\left(k_1 \log \frac{T+t}{T} + k_2 t\right)} \right].$$

Okazuje się więc, że trudne jest ustalenie ogólnej funkcji pełzania pomimo wielu badań i prób czynionych w tym celu. Krzywe pełzania dla różnych badań różnią się poważnie. Warunki, w jakich prowadzone są badania, wpływają zasadniczo nie tylko na ostateczną wielkość pełzania, lecz również i na przebieg w czasie. Zjawisko pełzania betonu jeszcze w większym stopniu niż skurcz zależne jest od wielu różnych parametrów, z których najtrudniejszymi do ujęcia teoretycznego są warunki zewnętrzne. Pomimo to przebieg i wielkość pełzania w próbkach betonowych ściskanych mogą być określone z dostateczną dla praktyki dokładnością. Opracowanie tych zagadnień natomiast w odniesieniu do konstrukcji betonowych nie jest jeszcze wystarczające.

#### Literatura cytowana w tekście

- [1] Н. X. АРУТЮНЯН, *Некоторые вопросы теории ползучести*, Москва-Ленинград 1952.
- [2] H. W. BREWER i R. W. BURROWS, *Le ciment grossierement broyé fournit un béton plus durable*, 1951.
- [3] B. BUKOWSKI, *Technologia betonów i zapraw*, ITB, Warszawa 1953.
- [4] B. BUKOWSKI, *Szczelność kruszywa w obszarze między optymalnym i granicznym w/c*, Arch. Inżyn. ląd., 1-2, 1957.
- [5] B. BUKOWSKI, *Morfologia rys w konstrukcjach żelbetowych i betonowych*, Arch. Inżyn. ląd., 4, 1957.
- [6] Z. BYCHAWSKI, *Resolving Kernel of the Volterra Equation in the Case of the Generalized Creep Function*, Arch. Mech. stos., 2, 9 (1957).
- [7] Z. BYCHAWSKI, *Odkształcenia opóźnione w betonie*, Arch. Inżyn. lądow., 2 (1956).

- [8] R. E. DAVIS, H. E. DAVIS, E. H. BROWN, *Plastic Flow and Volume Changes of Concrete*, Proc. ASTM, **37** (1937), s. 317.
- [9] R. E. DAVIS, H. E. DAVIS, J. S. HAMILTON, *Plastic Flow of Concrete under Sustained Stress*, Proc. ASTM, **34** (1934), s. 354.
- [10] F. DISCHINGER, *Untersuchungen über die Knicksicherheit, die elastische Verformung und das Kriechen des Betons bei Bogenbrücken*, Bauingenieur **33/34**, **35/36**, **39/40**, **18** (1937).
- [11] C. M. DUKES, H. E. DAVIS, *Some Properties of Concrete under Sustained Combined Stresses*, Proc. Amer. Soc. Testing Materials, **44** (1944), s. 888.
- [12] M. DURIEZ, *Traité de matériaux de construction*, Dunod 1950.
- [13] R. DUTRON, *Le retrait des ciments, mortiers et bétons*, Bull. Tech. Nr 23 Labor. Rech. Contr. Group. Profes. Fabr. Ciment de Belgique, Bruksela 1934.
- [14] C. EIMER, *Podstawy teorii pelzania ustrojów hyperstatycznych wstępnie sprężonych*, Rozpr. inżyn., **3**, **5** (1957).
- [15] C. EIMER, *Obliczenia reologiczne konstrukcji sprężonych*, Arch. Inżyn. ląd., **3**, 1958.
- [16] N. ESQUILLAN, G. LACOMBE, P. FAESSEL, R. PERZO, *La construction du Palais des Expositions du Centre National des Industries et Techniques au Rond Point de la Défense*, Annales ITBTP, **137**, 1959.
- [17] U. FINSTERWALDER, *Ergebnisse von Kriech- und Schwindmessungen an Spannbetonbauten*, Beton- und Stahlbetonbau, **5**, 1958.
- [18] E. FREYSSINET, *Etudes sur les déformations lentes des ciments en retrait*, Congr. Int. Béton, Béton Armé, Liège 1930.
- [19] E. FREYSSINET, *Une révolution dans les techniques du béton*, Eyrolles, 1936.
- [20] E. GIANGRECO, *Recherches expérimentales sur le fluage des ciments*, Ann. ITBTP, 1954.
- [21] W. H. GLANVILLE, *Creep of Concrete under Load*, The Structural Engineer, 1933.
- [22] W. H. GLANVILLE, F. G. THOMAS, *Further Investigation on the Creep or Flow of Concrete under Load*, Building Res. Tech. Pap. Nr 21, 1929.
- [23] Y. GUYON, *Béton Précontraint*, wyd. 3, Eyrolles 1958.
- [24] А.А. ГВОЗДЕВ, *Ползучесть бетона и пути его исследования*, в книге «Исследование прочности и ползучесть строительных материалов», Москва 1955.
- [25] H. HUMMEL, *Von Schwinden Zementgebundener Massen, seiner Messung und seinen Auswirkungen*, Zement-Kalk-Gips, **8**, 1954.
- [26] A. ILANTZIS, *La résistance en traction et la fissuration des pâtes pures de ciment*, Ann. ITBTP, 1958, 131.
- [27] A. ILANTZIS, *Sur l'évaporation de l'eau dans les prismes de mortier — détermination des coefficients de diffusivité*, Cahiers Rech. Théor. Expér. Matér. Struct., Paryż 1960.
- [28] Г. В. КИЗИРИЯ, *Определение усилий от усадки бетона в статически неопределимых бетонных конструкциях с учетом деформации ползучести*, Автом. Дороги, **2**, 1958.
- [29] A. KOBYLIŃSKI, *Technologia betonów i zapraw*, Warszawa 1949.
- [30] T. KLUZ, *Betony o wysokiej wytrzymałości*, Inżyn. Budów., **12**, 1953.
- [31] W. KUCZYŃSKI, *Betony konstrukcyjne projektowane metodą kolejnych przybliżeń (iteracji)*, Bud. i Arch., Warszawa 1956.
- [32] H. LAFUMA, *Retrait et fissuration des ciments, mortiers et bétons*, Ann. ITBTP, 1956.
- [33] H. LAFUMA, *Les Ciments*, Centre Haut. Etud. Bét., Bét. Armé, Bét. Précontr., 1958/59.
- [34] Le SAMUS, *Recherches expérimentales sur la déformation du béton et du béton armé*, Ann. ITBTP, **32**, **33**, **34**, 1957.
- [35] F. LÉVI, *Le Fluage*, Centre Haut. Etud. Constr., 1959.
- [36] J. LEFÈVRE, *Mesure des variations linéaires d'une pâte pure de ciment ou d'une béton à partir de sa mise en place*, Lab. Bât. Trav. Publ., Paryż 1959.
- [37] R. L'HERMITE, *Le retrait des ciments, mortiers et bétons*, Ann. ITBTP, **37**, 1947.
- [38] R. L'HERMITE, *Idées actuelles sur la technologie du béton*, Docum. Tech. Bât. Trav. Publ., Paryż 1955.

- [39] R. L'HERMITE, *Que savons-nous de la déformation plastique et du fluage du béton*, Ann. ITBTP, 1957.
- [40] M. MAMILLAN, *Etude sur le fluage de béton*, Ann. ITBTP, 134, 1959.
- [41] G. A. MANEY, *Concrete under Sustained Working Loads; Evidence that shrinkage dominates time yield*, Proc. Amer. Soc. Test. Mater., Vol. 40, 1941, s. 1021.
- [42] G. OBERTI, *Deformazioni anelastische del calcestruzzo della diga di Ozighetta*, Giorn. Gen. Civ., 1946.
- [43] W. OLSZAK, *Konstrukcje wstępne sprężone*, PWN 1955.
- [44] G. PICKETT, *The Effect of Change in Moisture Content of the Creep of Concrete under a Sustained Load*, Proc. Amer. Concrete Inst., 38, 1942, s. 333.
- [45] G. PICKETT, *Shrinkage Stresses in Concrete*, cz. 1, J. Amer. Concrete Inst., 3, 17 (1946).
- [46] G. PICKETT, *Shrinkage Stresses in Concrete*, cz. 2, J. Amer. Concrete Inst., 4, 17 (1946).
- [47] J. PIETRZYKOWSKI, *W poszukiwaniu najwłaściwszej metody projektowania mieszanki betonowej*, Inżyn. Budow., 12, 1955 i 1, 1965.
- [48] M. REINER, *Twelve Lectures on Theoretical Rheology*, wyd. 2, 1949.
- [49] J. R. ROBINSON, *Cours de béton armé*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1958/59.
- [50] M. ROŠ, *Vorgespannter Beton*, EMPA-Bericht, 155, 1946.
- [51] A. D. ROSS, *Creep and Shrinkage in Plain, Reinforced and Prestressed Concrete*, J. Inst. Civ. Eng., 1943.
- [52] A. D. ROSS, *Concrete Creep Data*, The Struct. Eng., 1937, s. 314, 1946 i 1947.
- [53] A. D. ROSS, *The Creep of Portland Blast Furnace Concrete*, J. Inst. Civ. Eng., 8 (1948), 34.
- [54] A. D. ROSS, *Experiments on the Creep of Concrete under Two-dimensional Stressing*, Mag. Concrete Res., 16, 6 (1954).
- [55] H. B. SEED, *Creep and Shrinkage in Reinforced Concrete Structures*, Engineering, 1947.
- [56] I. R. SHANK, *The Mechanics of Plastic Flow of Concrete*, Proc. ACI, 1936.
- [57] L. G. STRAUB, *Plastic Flow in Concrete Arches*, Proc. ASCE, 1930.
- [58] F. G. THOMAS, *A Conception of the Creep of Unreinforced Concrete and an Estimation of the Limiting Values*, Struct. Eng., 2, 1933, s. 69.
- [59] E. TORROJA, A. PAEZ, *Set Concrete and Reinforced Concrete*, w zbiorze pod redakcją A. REINERA «Building Materials», Amsterdam 1954.
- [60] F. VOGT, *Notes on the Effect of Shrinkage on the Deformation of Concrete under Sustained Loads*, Oslo 1949.
- [61] O. WAGNER, *Das Kriechen*, Ernst und Sohn, Berlin 1958.
- [62] G. WASHA i G. FLUCK, *Effect of Sustained Loading on Compressive Strength and Modulus of Elasticity of Concrete*, J. Amer. Concrete Inst., 1950.
- [63] Z. WASIUTYŃSKI, *O Odształceniach betonu*, Prace Katedry Budowy Mostów Politechniki Warszawskiej, 1958.
- [64] *Seminarium, Que savont-nous de la deformation plastique et du fluage du béton*, Ann. ITBTP, 1959,
- [65] C. LEFEVRE, *Retrait et fissuration des enduits*, Ann. ITBTP, 132, 1958.
- [66] C. LEFEVRE, *Méthod d'essai de fissuration du béton*, Ann. ITBTP, 132, 1958.
- [67] J. DELARUE, *Fluage et béton précontraint*, Ann. ITBTP, 149, 1960.

## МЕДЛЕННАЯ ДЕФОРМАЦИЯ БЕТОНА

В работе проводится обзор современных взглядов и результатов исследований, касающихся медленных деформаций бетона. Это определение охватывает усадку и разбухание ненагруженного бетона, приведенное в главе 3, ползучесть бетона, описанную в главе 4, и термические деформации, которые не были учтены в работе. Обращая внимание на медленный процесс описываемых явлений различаем медленные и мгновенные деформации, выступающие непосредственно после приложения нагрузки.

Изменение объема ненагруженного бетона начинается тотчас же после изготовления бетонной смеси. После нагрузки скорость деформаций является большой, а по мере истечения времени, при постоянных наружных условиях, эта скорость уменьшается и процесс стремится к стабилизации. На таблице 5 сопоставляются приближенные процентные значения, изображающие процесс усадки во времени, а на табл. 2 — ориентировочные данные о полных величинах усадочных деформаций в различных условиях.

Согласно принятым до настоящего времени гипотезам, усадка бетона связана с двумя процессами: (а) — высыханием бетона и (б) — гидратацией цемента. Высыхание бетона вызывает изменение напряжений в капиллярах выполненных частично водой, и постепенный рост действительных напряжений постоянного остова бетона. Гидратация безводных солей входящих в состав цемента связана с уменьшением объема цементного раствора.

На процесс усадки и разбухания бетона влияют условия консервации и подбор ингредиентов бетона. Бетон дает усадку высыхая и разбухает поглощая воду из окружающей среды. Особенную роль играют условия в начальный период твердения бетона, так как усадка возникшая тогда имеет частично необратимый характер. Однако, кроме того, бетон приспосабливается к окружающей среде, независимо от своего возраста, вследствие выпаривания воды и связанного с этим явлением изменения объема.

Процесс усадки в течение первых 24 часов после его изготовления представлен на рис. 2. Это является весьма существенной частью явления, наблюдаемой и исследованной с недавних пор; до сих пор ввиду затруднений, с которыми встречались измерения свежей массы бетона, деформации измерялись по истечении 12-18 часов.

Усадочные деформации увеличиваются с количеством цемента и с тем объемом воды, который не является необходимым для процесса гидратации и подвергается выпариванию. Заполнитель бетона, обладающий малой деформируемостью и с тщательно подобранной зернистостью составляет жесткий остов, проявляющий небольшие деформации под влиянием усадочных напряжений, источниками которых является цементный раствор.

В заключении главы 5 приводится ряд теоретических попыток предвидения процесса и величины конечных усадочных деформаций.

Ползучестью бетона называем разницу между полными замедленными деформациями и усадкой бетона, находящегося под влиянием нагрузки. Процесс ползучести имеет характер подобный к усадке, при чем деформации нарастают скорее; приближенные значения сопоставлены на табл. 6.

Явление ползучести состоит в консолидации бетона под нагрузкой. Начальная нагрузка воспринимается водой и остовом бетона, однако, в виду фильтрации воды, напряжения и деформации в остовах постепенно увеличиваются. Процесс стабилизируется по мере уменьшения участия воды в восприятии нагрузки. Доказанная экспериментально зависимость между усадкой и ползучестью еще не совсем выяснена, хотя взаимозависимость этих двух явлений не подлежит сомнению.

Решающим фактором, влияющим на ползучесть бетона является способ нагрузки. Небольшие напряжения в бетоне не вызывают ползучести, при росте напряжений до 50% прочности бетона зависимости между напряжением и ползучестью принимают линейный характер и дальнейший рост напряжений связан с быстрым увеличением замедленных деформаций. Старший бетон, обладающий достаточной прочностью по сравнению с более молодым, при одинаковой нагрузке, проявляет меньшую ползучесть.

Ползучесть является тем меньше, чем больше влаги находится в окружающей среде (рис. 16).

Бетоны с малым содержанием цемента и обладающие небольшой прочностью, а также бетоны с чрезмерным количеством цемента — проявляют значительную ползучесть. Влияние водно-цементного коэффициента показано на рис. 19.

Далее, описывается кратко влияние размеров элемента на величину ползучести и на процесс явлений при разгрузке бетона и при сложных состояниях нагрузки.

В конце главы, в которой рассматривается ползучесть бетона, дается ряд попыток математического представления процесса явлений.

Испытания, проводимые в области медленных деформаций бетона можно сгруппировать в следующих главных направлениях: 1 — лабораторные испытания бетонных образцов, 2 — измерение действительных деформаций конструкций и 3 — чисто теоретические исследовательские работы. Обобщение результатов этих работ имеет целью разработку теории деформаций бетона и проводится во многих научных центрах, но ввиду большого количества и разнообразия, выступающих параметров встречается с большими затруднениями. Гипотезы и теории являются, таким образом, только последовательными приближениями и уступают место следующим, более точным и более общим.

## Summary

### SLOW DEFORMATIONS OF CONCRETE

This is a survey of modern theories and of results of investigations concerning the problem of slow deformations of concrete. This definition contains the shrinkage and swelling of unloaded concrete, described in Sec. 3, the creep under a load described in Sec. 4 and the thermal deformations not treated in the present paper. The word «slow» is used to distinguish the processes described from instant deformations appearing immediately after the load is applied.

Volume changes of unloaded concrete start instantly after the concrete mixture is prepared. First, the rate of deformation is high, then it decreases under invariable external conditions and tends to stabilization. In Table 5 approximate values are presented, illustrating the shrinkage process in time and in Table 2 approximate data are given for total shrinkage deformations under various conditions.

According to the hypotheses now in use, the shrinkage of concrete is connected with two processes: the drying of concrete and the hydration of cement. The drying of concrete results in changes of tension in capillaries partially filled with water and a gradual increase of the real stresses and strains of the rigid «framework» of concrete. The hydration of the anhydrous salts contained in the cement is connected with a reduction of the volume of cement mortar.

The shrinkage and swelling processes is influenced by the curing conditions and the choice of components of the concrete. The concrete shrinks when drying out, and swells if water is absorbed from the ambient medium. The conditions of the initial period of concrete maturing are of particular importance, the shrinkage being of partially irreversible nature. In other cases, the concrete, independently of its age, is adjusted to the ambient conditions by absorbing or evaporating water and the volume changes involved.

For the first 24 hours the shrinkage is represented at Fig. 2. This is a very important part of the process, observed and considered since recently. Before, the deformations were measured first after more than ten hours due to the difficulty of measuring fresh concrete mass.

The shrinkage deformations increase with the quantity of cement and with the volume of water exceeding that necessary for the hydration process which has to be evaporated. An aggregate of low deformability and of carefully chosen grain size constitutes a rigid framework showing small deformations under the action of shrinkage stresses due to the cement mortar.

Finally, a number of tentative forecasts of the process and the final values of shrinkage are given in Sec. 3.

By the name of concrete creep we understand the difference between the total slow deformation and the shrinkage in a loaded concrete. The creep

process has a character approaching that of shrinkage but the deformations grow more rapidly. Approximate values are collated in Table 6.

The creep phenomena consists in concrete consolidation under load. First, the load is taken up by water and the «framework» of the concrete, but the stresses and strains in the framework grow progressively due to water filtration. As the share of water decreases the process becomes stabilized. The experimental relation between the shrinkage and the creep is not yet entirely explained although the dependence of these two phenomena is doubtless. The decisive factor for creep is the way in which the concrete is loaded. Small stresses in the concrete do not cause creep. If they increase up to 50% of the strength of concrete the stress-strain relation has a linear character. Further increase of stress is connected with a rapid increase of retarded deformations. Concrete after a long curing period reaches sufficient strength and shows smaller creep than a younger one subjected to the same load. The creep decreases if more moisture is contained in the ambient medium (Fig. 16). Concretes of small cement content and small strength and also those with too high cement content show considerable creep. The influence of the water-cement ratio is shown at Fig. 19.

Next, the influence of the size of the element on the creep is mentioned. The phenomena during the unloading process of the concrete and for combined states of load are described in brief.

Sec. 4, dealing with creep, ends with some tentative mathematical functions describing these phenomena.

The following principal directions may be discerned in the investigations of slow deformations of concrete: laboratory tests of concrete specimens, measurements of deformations of real structures and pure theoretical work. The object of generalization of these works is to elaborate a theory of concrete deformations. They are continued in many scientific centres. It encounters, however, considerable difficulties due to the number and variety of intervening parameters. The hypotheses and the theories created constitute therefore successive approximations, each of them yielding to the next one, more accurate or more general.

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGLYCH  
IPPT PAN

*Praca została złożona w Redakcji dnia 27 lutego 1960 r.*

---