

O POMIARACH ODKSZTAŁCEN WEWNĄTRZ ELEMENTÓW BETONOWYCH

ANDRZEJ BRANDT, STEFAN JENDO (WARSZAWA)

1. Wstęp

Przedmiotem artykułu jest metoda pomiaru sześciu składowych stanu odkształcenia wewnątrz elementów betonowych. Metoda ta polega na zastosowaniu tensometrów oporowych tworzących przestrzenny układ, nazwany sondą do pomiarów odkształceń wewnątrz betonu. Koncepcja sondy opracowana została przez Z. WASIUTYŃSKIEGO, który kierował realizacją opisanego poniżej programu badań.

Celem pomiarów jest wyznaczenie tensora odkształceń betonu jako funkcji następujących argumentów: współrzędnych, wielkości obciążenia, czasu trwania obciążenia, wieku betonu i innych. Następnie na drodze analitycznej można będzie opracować ogólne zależności pomiędzy stanem odkształcenia a rodzajem i wielkością obciążenia oraz innymi parametrami zagadnienia.

Pierwsze badania dotyczą elementów ściskanych osiowo. Niniejszy artykuł obejmuje opis urządzeń pomiarowych oraz zestawienie wstępnych wyników [1].

Przedmiotem przedstawionych badań są odkształcenia, bowiem tylko one mogą być bezpośrednio obserwowane na drodze doświadczalnej.

Wykorzystywanie pojęcia naprężenia w analizie stanu deformacji powoduje konieczność wprowadzenia zależności pomiędzy naprężeniami a odkształceniami do wszystkich równań i wzorów. Tymczasem w przypadku betonu taka ogólna zależność jest dotychczas nie znana, a stosowanie współczynnika Younga okazuje się zawodne. Wiadomo bowiem, że zależność pomiędzy naprężeniami a odkształceniami jest funkcją wielu argumentów, wśród których można wymienić następujące: rodzaj i wielkość obciążenia, szybkość obciążenia, wiek i jakość betonu oraz wiele innych.

W badaniach odkształceń betonu zwykle brane są pod uwagę tylko niektóre składowe tensora odkształcenia. Jest jednak niewątpliwe, że zarówno na odkształcalność jak i na wytrzymałość betonu wpływają wszystkie składowe, a w wielu przypadkach pomijanie niektórych z nich może prowadzić do błędnych wniosków.

Analiza stanu deformacji elementów betonowych jest często prowadzona na podstawie pomiarów dokonywanych na powierzchniach zewnętrznych. Wyprowadzone stąd wnioski dotyczą rozkładu odkształceń wewnątrz elementów; w wielu przypadkach budzą one poważne wątpliwości.

Wynika stąd, że stosowanie teorii sprężystości do betonu w formie klasycznej nie jest właściwe, a przy opracowywaniu metod badawczych należy przede wszystkim zwrócić uwagę na następujące kwestie:

1. W rozważaniach dotyczących odkształcalności i wytrzymałości elementów betonowych wskazane jest posługiwanie się odkształceniami jako podstawowymi miernikami.

2. Należy badać stan odkształceń w sposób kompletny, tzn. mierzyć wewnątrz betonu wszystkie sześć składowych tensora odkształceń.

Stwierdzenia przytoczone odnoszą się również do takich tworzyw, jak metale i kamienie naturalne, jednak nie dysponujemy obecnie urządzeniami do zrealizowania odpowiednich badań elementów z tych tworzyw.

2. Dotychczasowe metody pomiaru odkształceń wewnętrznych betonu

Opis istniejących obecnie sposobów pomiaru odkształceń betonu wykracza poza zakres niniejszego artykułu. Warto jednak poświęcić temu kilka zdań wyjaśniających kierunki rozwoju metod badawczych.

Wyodrębnić można trzy kierunki podstawowe, w których wykorzystywane są zjawiska akustyczne, hydrauliczne i oporności elektrycznej. Czujniki akustyczne, których pierwszą konstrukcję opracował A. COYNE we Francji, działają na zasadzie zmienności częstotliwości drgań własnych struny metalowej wraz ze zmianą jej stanu deformacji. Struna jest umieszczona w kapsułce metalowej zakotwionej w betonie, a częstotliwość jej drgań porównywana jest podczas badań z częstotliwością drgań struny wzorcowej [2, 7].

Czujniki tego rodzaju wykazują wiele zalet, m.in. są trwałe i pewne, jednak dostateczną dokładność wskazań dają dopiero duże czujniki, których zastosowanie możliwe jest tylko w elementach o dużych wymiarach. Pomiar wszystkich składowych stanu odkształcenia stwarza tu kłopoty trudne do przewyciężenia.

W czujnikach hydraulicznych zbiornik z cieczą umieszczony jest w betonie. Odkształcenia betonu zmieniają ciśnienie cieczy, które jest mierzone podczas badania. Przykładem może być czujnik skonstruowany przez GLÖTZLA [3].

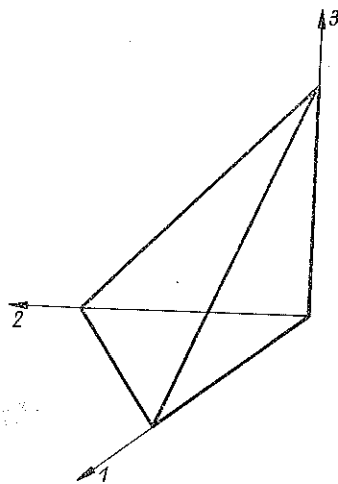
W czujnikach elektrycznych wykorzystano zmienność oporu przewodów wraz z odkształceniami. Konstrukcja ich oparta jest na zastosowaniu tensometrów oporowych w odpowiedniej osłonie, najczęściej z mas plastycznych. Zagadnienia wodoszczelności i trwałości, powstające przy zastosowaniu tego rodzaju czujników w betonie, nie zostały dotychczas całkowicie rozwiązane. Pomiar sześciu składowych stanu odkształcenia wewnątrz elementu nie były nigdzie prowadzone; ograniczono się do czujników jednoosiowych lub do płaskich układów tensometrów. Badania tego rodzaju nie wyszły jeszcze poza zakres wstępnych prób i doświadczeń [4, 5].

Badania stanu odkształcenia wewnątrz elementów betonowych podjęte zostały w wielu ośrodkach naukowych, co wskazuje na ich duże znaczenie [6]. Dotychczas jednak nie udało się opracować metody dostatecznie pewnej, dokładnej i uniwersalnej.

3. Opis sondy

Sondę do betonu (rys. 1) stanowi przestrzenny układ miedzianych blaszek w kształcie ostrosłupa foremnego. Na blaszkach są obustronnie naklejone tensometry oporowe, zabezpieczone izolacją przeciwwilgociową. Podczas opisywanych badań stosowano produkowane w kraju tensometry oporowe typu RL o długości 15 mm, oporności 120 Ω i o współczynniku $K = 2,10$.

Konstrukcja sondy (rys. 2) umożliwia włożenie jej do formy przed zabetonowaniem elementu oraz umocowanie we właściwym położeniu. Odkształcenia betonu mierzone są za pośrednictwem blaszek długości 7 i 10 cm, co eliminuje w pewnym stopniu zaburzenia wywołane przez niejednorodność betonu. Blaszkę odkształcają się wraz z otaczającym je betonem; powoduje to zmianę oporności tensometru, którą można odczytać na mostku Wheatstone (rys. 3). Dokładność pomiaru zależy od rodzaju użytego mostka; w przeprowadzonych badaniach wyniosła ona 5×10^{-6} , co odpowiada długości najmniejszego mierzonego odcinka równej 5μ przy bazie pomiarowej wynoszącej 1 m.



Rys. 1

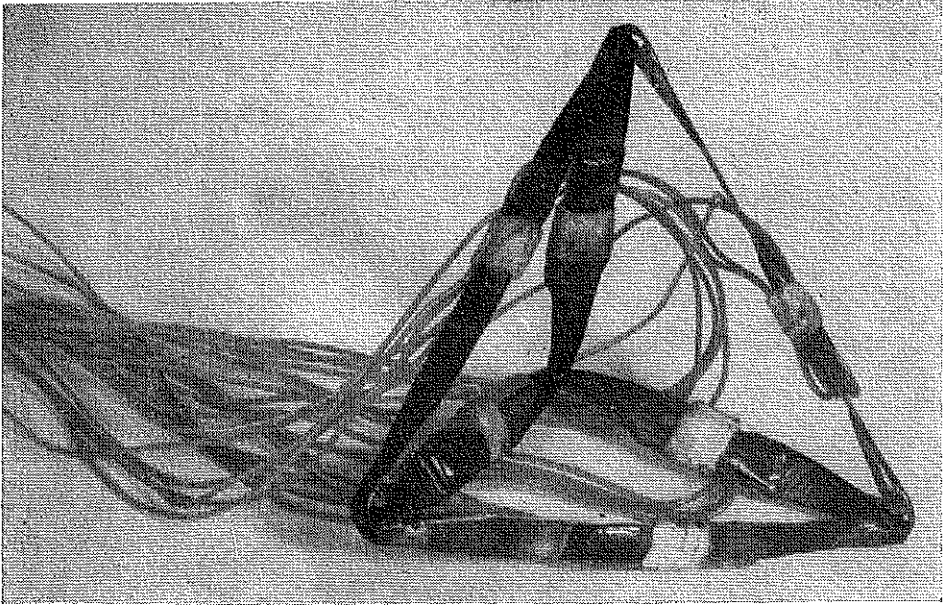
Za pomocą sondy można bezpośrednio zmierzyć składowe odkształcenia liniowych ϵ_{11} , ϵ_{22} , ϵ_{33} , natomiast pozostałe składowe odkształcenia kątowych łatwo jest obliczyć.

Przy ustawieniu sondy w taki sposób, aby kierunek odkształcenia jednostkowego ϵ_{33} pokrywał się z kierunkiem działania obciążenia, tak jak to ma miejsce w opisanym badaniu, odczytujemy bezpośrednio odkształcenia główne. Można również wyznaczyć kierunki odkształceń głównych przy dowolnie ustawionej sondzie.

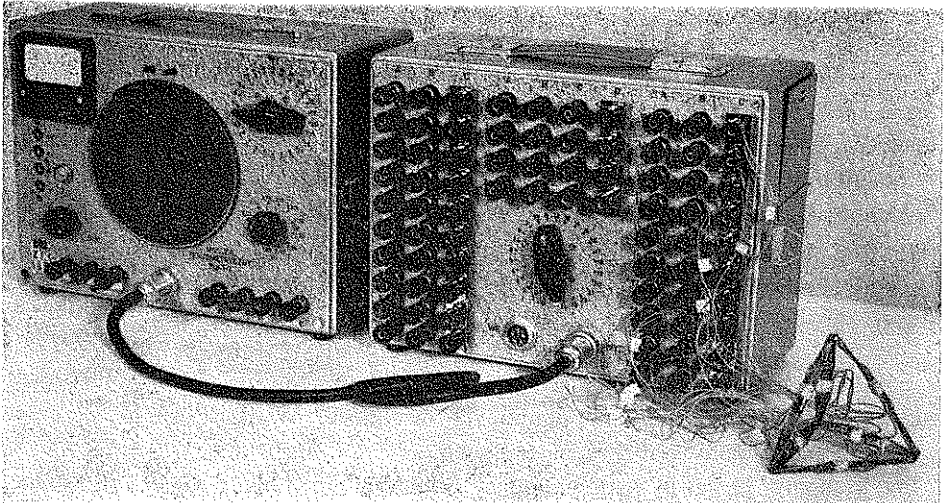
Sposób obliczenia polega na rozwiązaniu równania algebraicznego trzeciego stopnia, którego trzema pierwiastkami są odkształcenia główne. Współczynnikami tego równania są trzy niezmienniki stanu odkształcenia. Mając wielkości odkształceń głównych można określić ich kosinusy kierunkowe. Dokładny opis tego obliczenia wraz z przykładem liczbowym można znaleźć między innymi w podręczniku [8].

Obecność sondy w betonie powoduje niewątpliwie powstanie pewnych zakłóceń w polu odkształceń. Konstrukcja sondy została opracowana w ten sposób, aby zakłócenia te zmniejszyć do pomijalnych wielkości. Wielkość zakłóceń można w sposób przybliżony obliczyć następująco:

Przyjmujemy, że beton współpracujący bezpośrednio z blaszką jednego ramienia sondy można ograniczyć do walca o średnicy 2 cm (rys. 4). Maksymalne osłabienie przekroju tego walca w najszerszym miejscu otulenia tensometrów stwarza pustkę w betonie w kształcie elipsy o wymiarach 10×6 mm. W pustce tej umieszczona jest blaszka miedziana o przekroju $0,2 \times 10$ mm. Rozpatrzmy sztywność na ściskanie walca betonowego przed i po wprowadzeniu blaszki z tensometrami:



Rys. 2



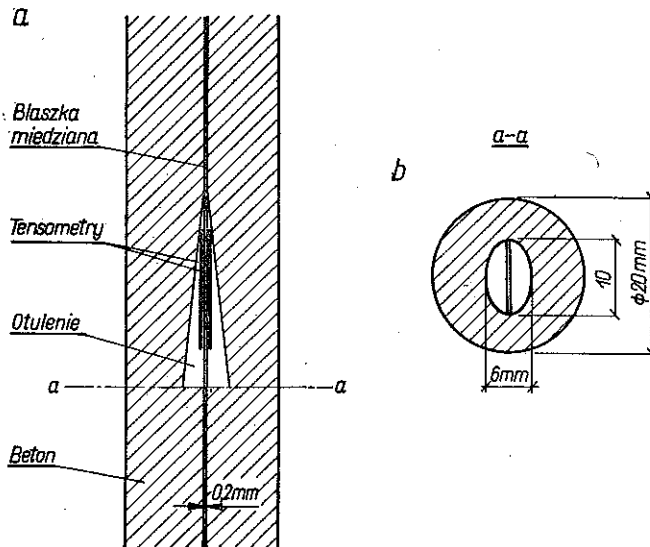
Rys. 3

walec bez tensometrów

$$A_b = 3,14 \text{ cm}^2, \quad E_b = 0,5 \times 10^6 \text{ kG/cm}^2, \quad E_b A_b = 1,57 \times 10^6 \text{ kG};$$

beton usunięty z walca

$$A_0 = 2/3 \times 1,0 \times 0,6 = 0,4 \text{ cm}^2, \quad E_b A_0 = 0,2 \times 10^6 \text{ kG};$$



Rys. 4

blaszka miedziana

$$A_m = 1 \times 0,02 = 0,02 \text{ cm}^2, \quad E_m = 1 \times 10^6, \quad E_m A_m = 0,02 \times 10^6 \text{ kG};$$

walec z tensometrami

$$EA = E_b A_b + E_m A_m - E_b A_0 = (1,57 + 0,02 - 0,20) \times 10^6 = 1,39 \times 10^6 \text{ kG};$$

procentowe osłabienie

$$\frac{1,57 - 1,39}{1,57} \cdot 100 = 11,5\%.$$

Rozpatrując przekrój z największym zakłóceniem widać, że osłabienie walca betonowego nie przekracza 12%. W rzeczywistości zakłócenie wyników pomiarów jest znacznie mniejsze, ponieważ

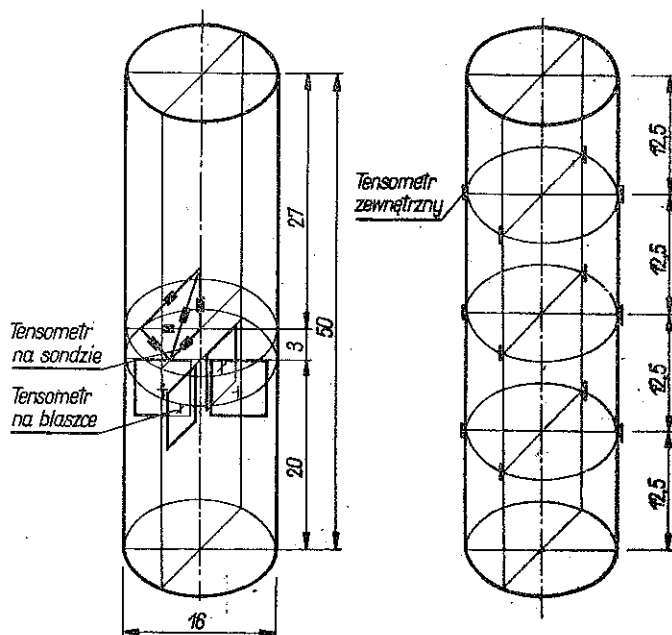
1) można przypuszczać, że średnica walca betonu współpracującego z ramieniem sondy jest większa niż 2 cm,

2) w pozostałych przekrojach maleje pustka w betonie, spowodowana otulaniem tensometrów,

3) osłabienie (lub wzmocnienie) jest jednakowe przy wszystkich ramionach sondy.

4. Opis badań

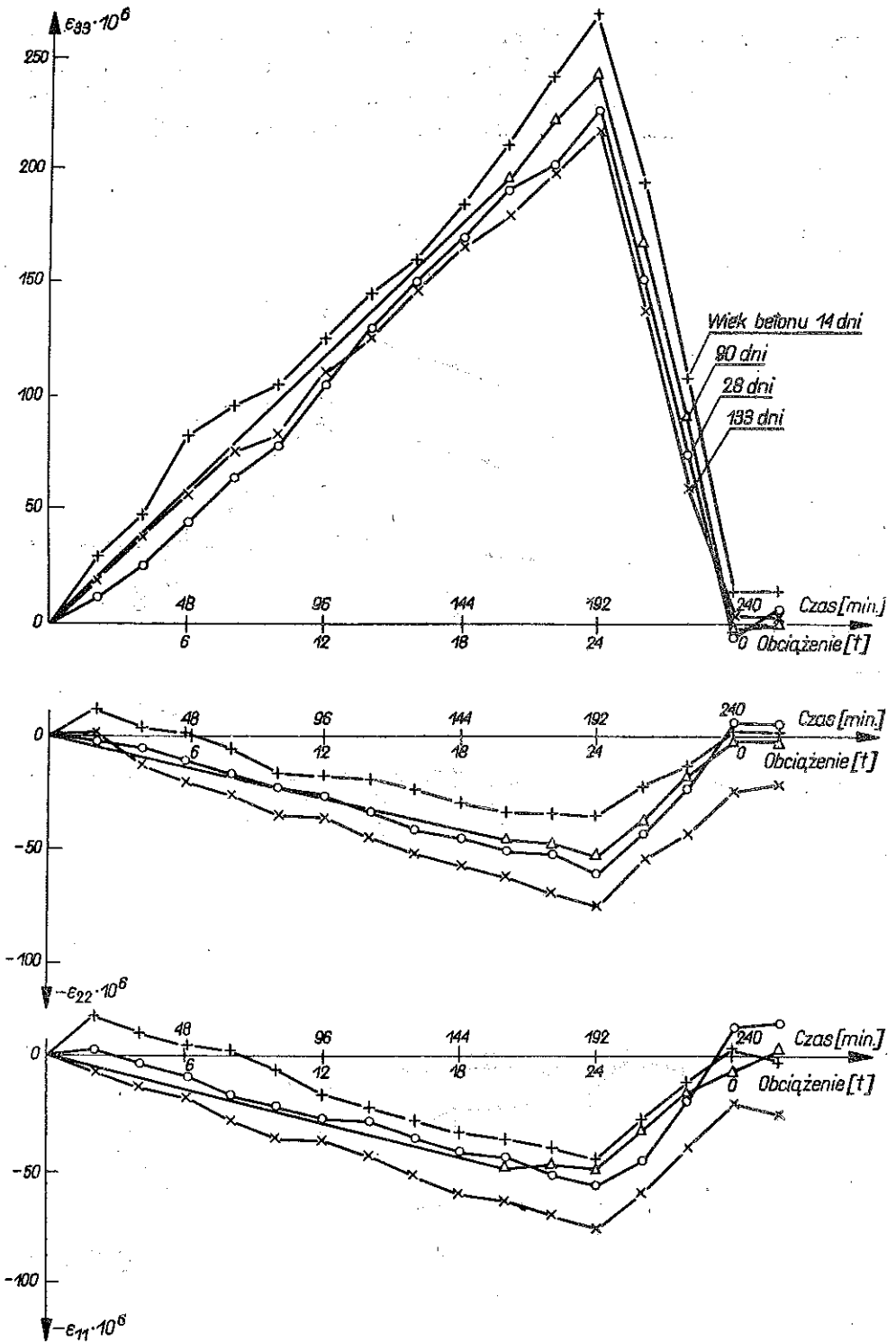
1. Przygotowanie betonu. Badanie przeprowadzono na walcu betonowym o średnicy 16 cm i wysokości 50 cm. Beton marki 400 wykonany został z kruszywa bazaltowego, którego krawędzie złagodzone przez oszlifowanie w bębnach Devala. Średnica ziaren kruszywa nie przekraczała 20 mm; ograniczenie to wynikało z długości ramion sondy i ma na celu uniknięcie nadmiernego rozrzutu wyników pomiarów spowodowanego niejednorodnością betonu [9]. Mieszanie przeprowadzono ręcznie otrzymując beton o dostatecznej jednorodności i niewielkiej plastyczności; opad stożka Abramsa nie przekraczał 0,5 cm. Próbkę wibrowano na stole wibracyjnym, a następnie była ona przechowywana w temperaturze pokojowej w granicach 21° do 22°C . Wilgotność powietrza zmieniała się od 55 do 65% wilgotności względnej. W okresie pierwszego tygodnia próbki były intensywnie nawilżane. Wytrzymałość betonu po 28 dniach (badana na walcach normowych) wynosiła 400 kG/cm^2 .



Rys. 5

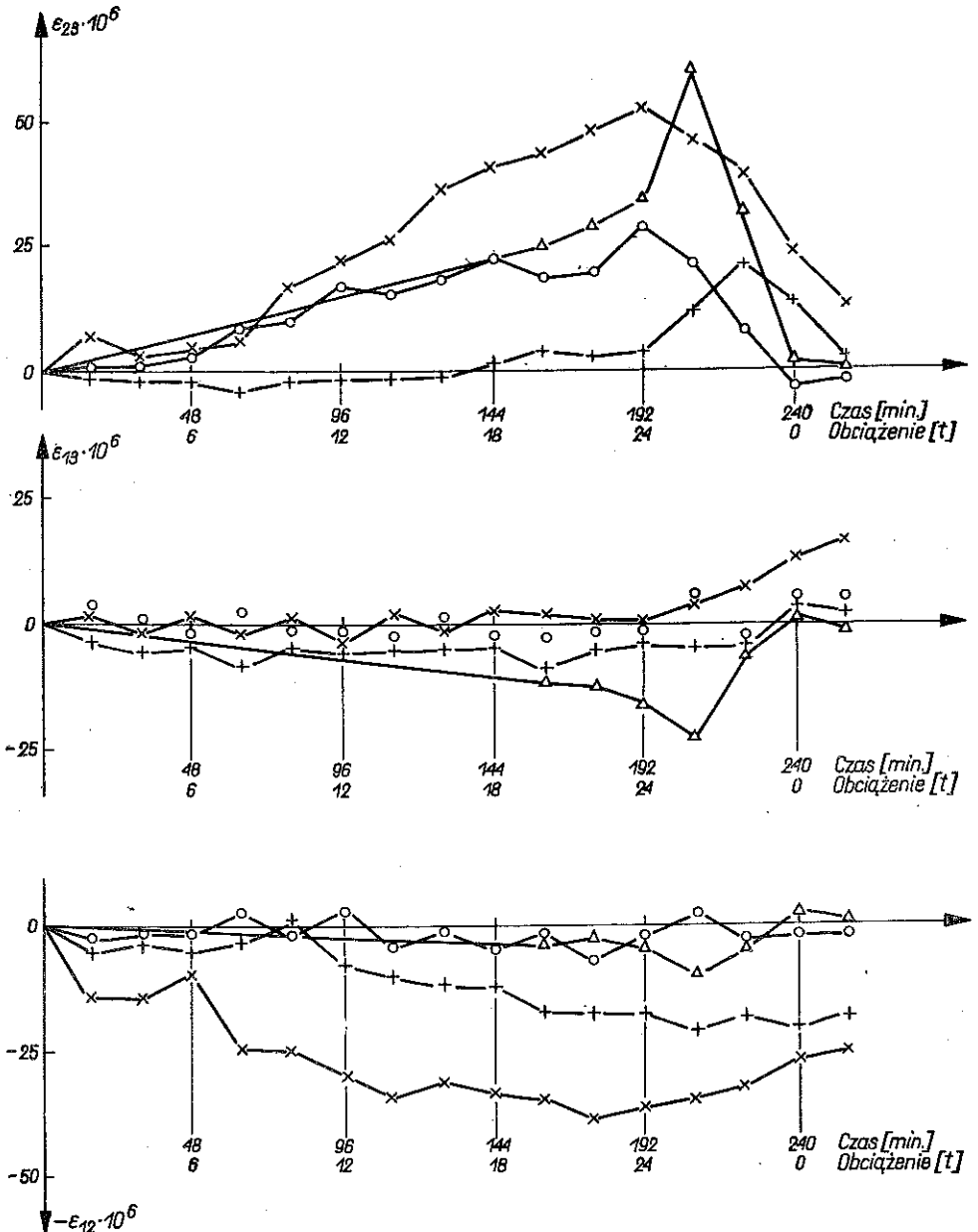
2. Urządzenia pomiarowe. Do pomiaru odkształceń wewnątrz walca zastosowano sondę z tensometrami, umieszczoną w środku walca i tak położoną, aby jej trzy ramiona wyznaczały kierunki główne. Dodatkowo wewnątrz walca zabetonowano 8 tensometrów naklejonych na cztery blaszki pionowe. Odkształcenia zewnętrzne betonu mierzono za pomocą 12 tensometrów naklejonych na tworzących walca za pośrednictwem cienkiej folii miedzianej. Na rysunku 5 pokazano rozmieszczenie wszystkich elementów pomiarowych. Wskazania tensometrów odczytywane były za pomocą mostku Wheatstone produkcji krajowej, typ T-2.

Maksymalne obciążenie wynosiło 24 t; odpowiada to średniemu naprężeniu 120 kG/cm^2 przy wytrzymałości betonu rzędu 400 kG/cm^2 . Ograniczenie średnich



Rys. 6

naprężeń prawie do 1/3 wytrzymałości miało na celu zmniejszenie odkształceń trwałych. Obciążenie powiększono co 15 min. o 2 t, co odpowiadało wzrostowi naprężeń o 10 kG/cm². Po każdorazowym wzroście obciążenia odczekiwano 5 min. i prowadzono pomiary odkształceń jednostkowych. Walec był badany po 14, 28, 90 i 133 dniach.



Rys. 7.

5. Wyniki pomiarów

Badania opisane w p. 4 powtórzono na innych walcach o tych samych wymiarach. Ponieważ drugie badanie potwierdziło wyniki otrzymane poprzednio nie wnosząc nic nowego, przeto w opisie ograniczymy się do omówienia pierwszego badania.

Wynikiem pomiarów były odkształcenia liniowe i kątowe w ściskany walcu betonowym. Odkształcenia liniowe ε_{11} , ε_{22} , ε_{33} jako funkcje obciążenia i czasu przedstawiono na rys. 6; były one bezpośrednio odczytywane z aparatury pomiarowej.

Wykresy te wskazują na występowanie odkształceń dodatnich w kierunkach równoległych do osi pionowej 3 i odpowiadają ściskaniu walca. W kierunkach 1 i 2 zanotowano odkształcenia ujemne, wskazujące na rozciąganie betonu. Wszystkie te odkształcenia zależą liniowo od obciążenia zarówno przy obciążaniu jak i przy odciążaniu. Wyniki kolejnych badań, oznaczone na wykresach (rys. 6), wskazują poza tym na zmniejszanie odkształceń w miarę upływu czasu i twardnienia betonu. Odkształcenia ε_{11} i ε_{22} są zbliżone, a różnica jest spowodowana mimośrodowym ustawieniem walca względem osi prasy.

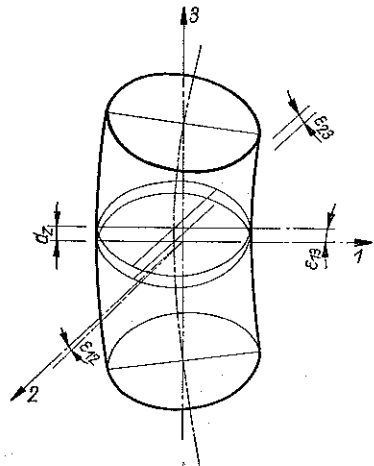
Odkształcenia kątowe, obliczone na podstawie odkształceń liniowych ε_{ii} oraz wskazań tensometrów na pozostałych ramionach sondy, przedstawiono na rys. 7. Wskazują one na występowanie mimośrodów przy ściskaniu, a więc na występowanie zginania. Zjawisko to staje się widoczniejsze wraz ze wzrostem siły obciążającej oraz upływem czasu, co można wytłumaczyć powstaniem pewnych odkształceń trwałych podczas pierwszych badań. Wywołały one w następstwie wzrost mimośrodów.

Odkształcenie ε_{13} pozostało równe zeru w granicach dokładności pomiarów, skąd wiadomo, że płaszczyzna 13 była prawie normalna do płaszczyzny symetrii odkształceń trwałych.

Nie przewidywano na początku wystąpienia odkształceń kątowych, bowiem sonda położona była tak, że trzy prostopadłe jej ramiona skierowane były wzdłuż osi odkształceń głównych. W takim przypadku odkształcenia kątowe powinny być oczywiście równe zeru. Wobec jednak niemożności idealnego ustawienia walca w prasie wystąpił mimośród i odkształcenia trwały. Pozwoliło to niejako na sprawdzenie przydatności sondy do badania ogólnego przypadku stanu odkształcenia, kiedy kierunki odkształceń głównych nie są znane i nie pokrywają się z kierunkami ramion sondy.

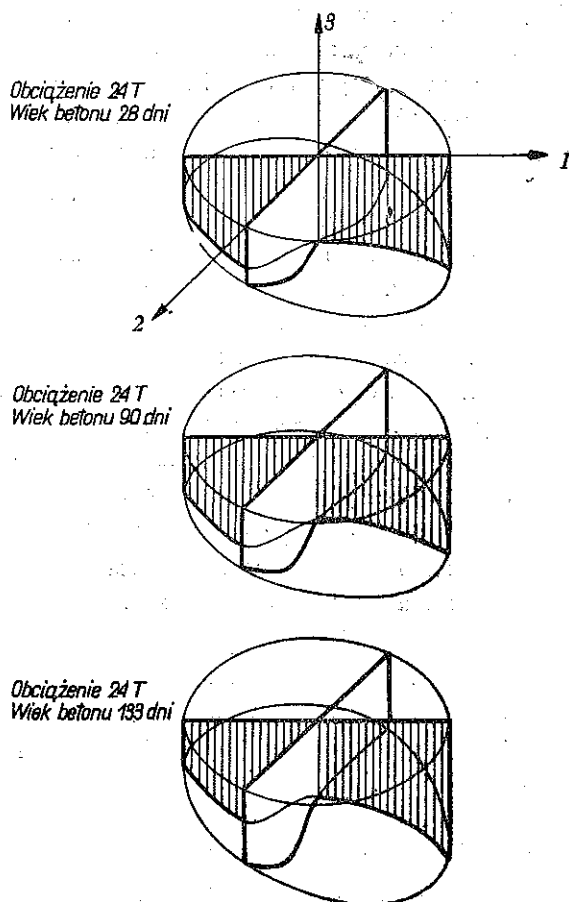
Na rysunku 8 pokazano w sposób szkicowy wałek po odkształceniu. Widać tu narysowane przesadnie wygięcie walca oraz odpowiednie odkształcenia kątowe.

Odkształcenia pionowe mierzone były dodatkowo również w czterech punktach wewnątrz walca oraz na powierzchni zewnętrznej. Wyniki tych pomiarów trudno jest zestawiać i porównywać ze wskazaniami sondy, bowiem tensometry działały



Rys. 8

w każdym przypadku w innych nieco warunkach. Jednakże celem porównania różnych wyników oraz zorientowania się w przydatności poszczególnych metod wykonano wykresy na rys. 9. Pokazują one odkształcenie pionowe betonu walca mierzone w połowie jego wysokości przy obciążeniu wynoszącym 24 tony. Pomiarów dokonano trzykrotnie przy różnym wieku betonu. Zestawione wyniki



Rys. 9

wskazują na charakterystyczne zmiany zachodzące w miarę upływu czasu i obserwowane podczas kolejnych badań. Zmiany te i kształt wykresów odkształceń, narysowanych wzdłuż obu średnic, są zgodne z poprzednio określonym wygięciem walca.

6. Zakończenie

Przedstawione wyniki badań potwierdziły przydatność sondy do pomiaru wszystkich składowych stanu odkształcenia wewnątrz elementu betonowego i w ten sposób program badań został zrealizowany. Poza tym uzyskano szereg wartościowych

informacji o odkształcalności betonu oraz wiele wskazówek technicznych do dalszego prowadzenia badań, których przedstawienie przekracza ramy niniejszego artykułu.

Dalsze etapy pracy obejmować będą badania walców o większych średnicach poddanych ścisaniu, a następnie pomiary odkształceń przy innych stanach obciążenia.

Literatura cytowana w tekście

1. Z. WASIUTYŃSKI, A. BRANDT, *Sondy do wyznaczania odkształceń w betonie i w gruntach*, Wybrane materiały III Krajowej Konferencji Wytrzymałościowej, SIMP-WAT, czerwiec 1963.
2. *Télémesures Acoustiques*, Télémac, wydawnictwa informacyjne, 1959.
3. GLÖTZL, *Ventilgeber für den Bauherrn, die Aufrichtsbehörde und den Statiken*, wydawnictwa informacyjne, 1963.
4. Y. C. LOH, *Internal stress gauges for cementitious materials*, Proc. Soc. Experimental Stress Analysis, 2, 11 (1954), 13-28.
5. В. М. СЕМЕНИСТЫЙ, *Объемные розетки датчиков*, Докл. Львовского политехнического института, 1, 5 (1962).
6. K. E. C. NIELSEN, *Internal stresses in concrete*, Bull. Rilem no 1, 11-20, March 1959.
7. A. U. HUGGENBERGER, *Talsperren-Messtechnik*, Berlin 1951.
8. W. KRZYŚ i M. ŻYCZKOWSKI, *Sprężystość i plastyczność. Wybór zadań i przykładów*, PWN, Warszawa 1962, 18-44.
9. R. W. COOKE, A. E. SEDDON, *The laboratory use of bonded-wire electrical-resistance strain gauges on concrete at the Building Research Station*, Magazine of Concrete Research, 22, 8 (1956), 31-38.

Резюме

ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ ДЕФОРМАЦИЙ ВНУТРИ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Даются результаты измерений деформаций внутри бетонного цилиндра диаметром 16 см и высотой 50 см, подверженного осевому сжатию. Измерения проводились с помощью пространственной системы тензометров омического сопротивления, забетонированных внутри цилиндра. Запись наблюдений тензометров дает возможность определить все шесть составляющих тензора деформаций. Результаты измерений представлены в виде диаграмм зависимостей отдельных составляющих деформации как функции нагрузки. Диаграммы изготовлены принимая во внимание различный возраст бетона. Диаграммы, не исследуемых до сих пор угловых, деформаций указывают на то, что величины этих деформаций не равны нулю, в случае осевой нагрузки, установленной с технической точностью.

Summary

MEASUREMENT OF STRAINS INSIDE CONCRETE ELEMENTS

The paper represents measurement results of strain inside a concrete cylinder of 16 cm in dia., 50 cm high, subjected to axial load. The measurement was performed by means of a three-dimensional set of resistance strain gauges included in the cylinder. The indications of the strain gauges

enable the determination of all the six components of the strain tensor. The measurement results are represented in the form of diagrams of the strain components in function of the load, for various ages of the concrete. The diagrams of the distortions, which have not yet been investigated, show that these quantities are different from zero in the case of axial load applied with engineering accuracy.

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGLYCH
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 4 sierpnia 1964 r.
