

## POMIARY SZEŚCIU SKŁADOWYCH ODKSZTAŁCENIA W ŚCISKANYM<sup>1</sup> WALCU BETONOWYM

ZBIGNIEW W ASIUTYŃSKI, ANDRZEJ BRANDT (WARSZAWA)

**1. Uwagi wstępne** Wyznaczenie pól odkształceń w elementach betonowych przyjęto dotychczas opierać na rozwiązaniach teorii sprężystości i na uproszczonych wzorach wytrzymałościowych, wynikających z tych rozwiązań. Ten sposób postępowania zawiera supozycje oparte na obserwacji szczególnych przypadków, rozciągnięte następnie na inne stany deformacji bez sprawdzenia doświadczalnego. Do tych supozycji należą: założenie o zachowaniu płaskości przekrojów po odkształceniu i założenie o niezależności współczynników odkształcalności od wielkości obciążeń, współrzędnych punktów, wieku materiału, kształtów i wymiarów elementów.

Założeń tych dotychczas nie sprawdzono doświadczalnie w sposób szczegółowy, to jest przez pomiar wszystkich składowych deformacji, lecz zadowalano się sprawdzeniami przez pomiar skróceń, wydłużeń, ugięć, pochyłeń oraz odkształceń jednostkowych na powierzchniach badanych elementów. W niektórych przypadkach mierzone poszczególne składowe odkształcenia wewnątrz elementów. Nie sprawdzono jednak przez pomiar doświadczalny wielkości wszystkich składowych odkształceń w sposób umożliwiający wyczerpujące stwierdzenie przydatności stosowanych wzorów.

W pracy tej pomiar pola odkształceń ograniczono do przedziału odkształceń dozwolonych podczas użytkowania konstrukcji. W odniesieniu do betonów przedział ten obejmuje, oprócz odkształceń sprężystych, odkształcenie natychmiastowe i powolne, odwracalne i trwałe. Odkształcenia te bowiem wskazują najlepiej stan bezpieczeństwa i są łatwiejsze do zbadania od odkształceń wykraczających poza ten przedział, którym towarzyszą zjawiska bardziej złożone, jak na przykład powstawanie dużych rys, utrata przyczepności uzbrojenia, tarcie wewnętrzne i dezagregacja betonu.

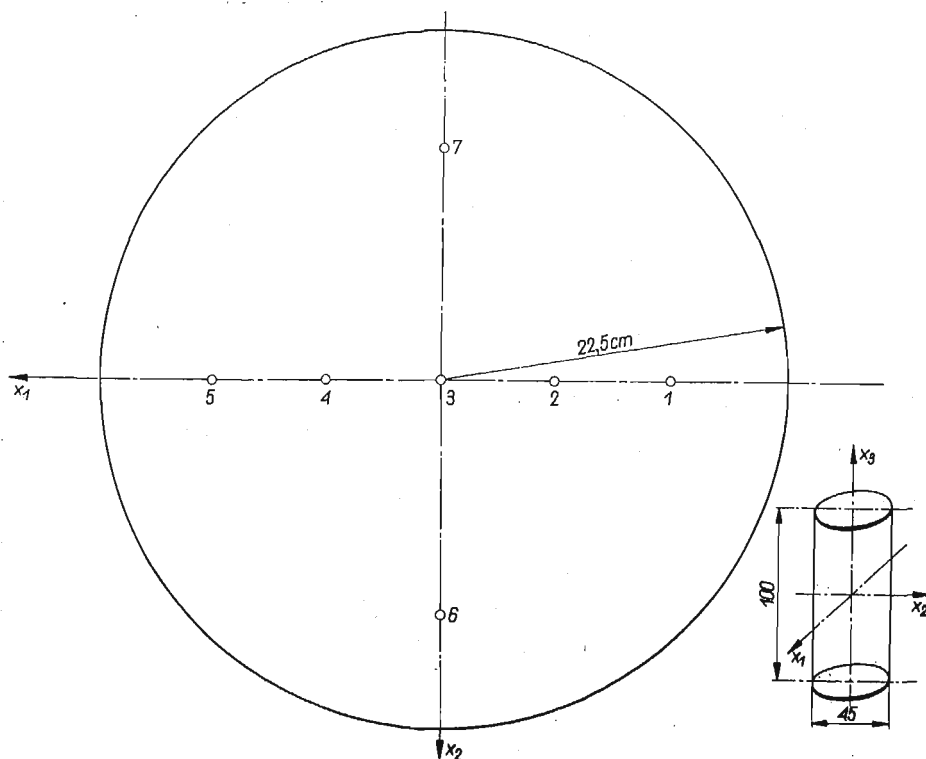
Pomiary odkształceń wewnątrz elementów betonowych były tematem niewielu prac zawierających głównie dane technologiczne odnośnie przygotowania i przeprowadzenia badań (kilka ważniejszych pozycji wymieniono na końcu pracy).

**2. Cel i przedmiot pomiarów.** Celem pomiarów było wyznaczenie wszystkich składowych tensora odkształcenia betonu wewnątrz walca ściskanego. Składowe te zmie-

<sup>1</sup> Praca niniejsza została nagrodzona na konkursie Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej w 1964 r.

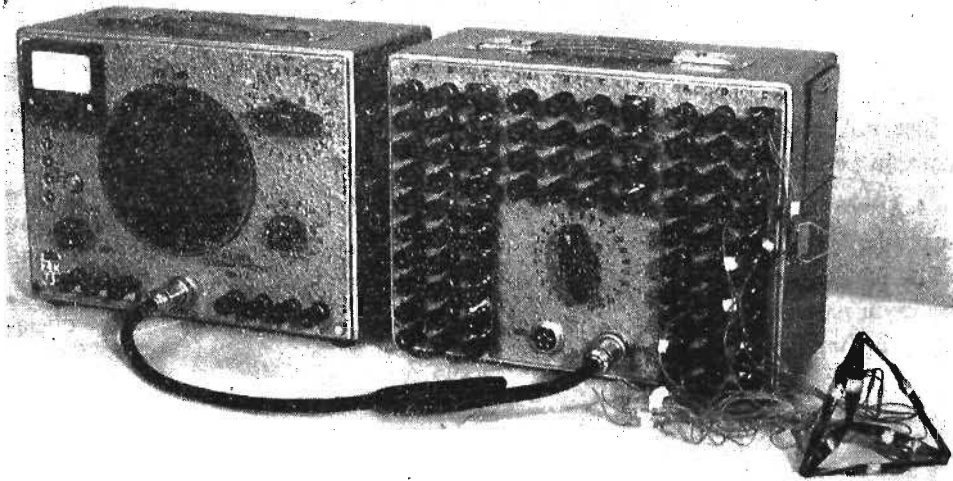
rzono w siedmiu punktach rozmieszczonych w przekroju poprzecznym w połowie wysokości walca w funkcji obciążenia pionowego.

Wymiary walca oraz układ osi obrany do oznaczania odkształceń pokazano na rys. 1. Walec wykonano z betonu z kruszywa bazaltowego o największym wymiarze ziaren nie przekraczającym 20 mm. Wytrzymałość betonu na ściskanie po 28 dniach wynosiła około 600 kG/cm<sup>2</sup>.

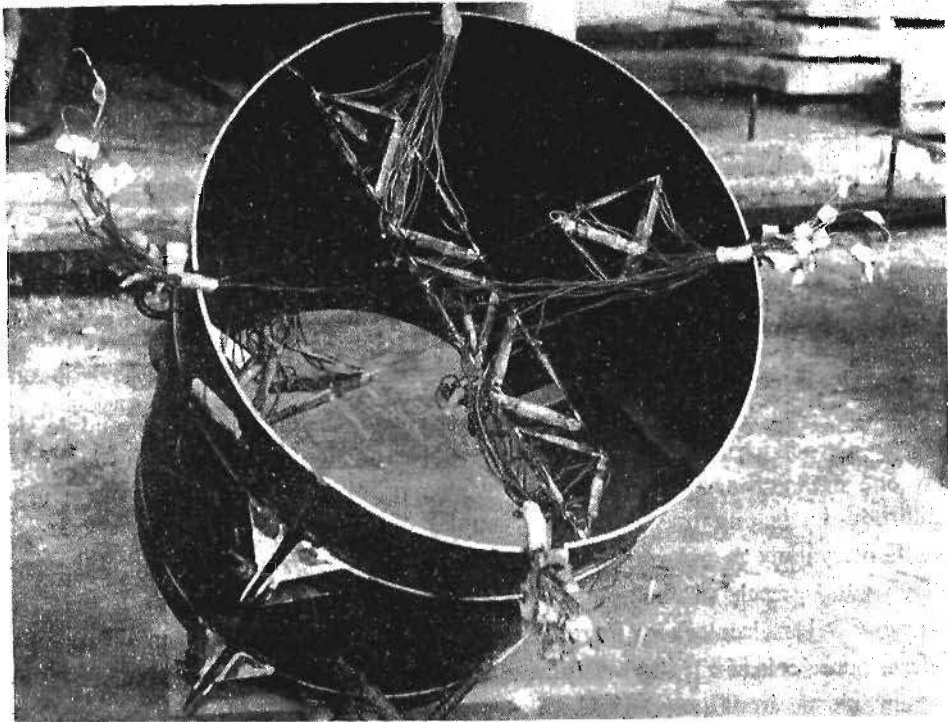


1. Wymiary próbki walcowej, przyjęty układ osi współrzędnych oraz rozmieszczenie sond w przekroju poprzecznym

**3. Opis urządzeń pomiarowych.** Pomiaru składowych stanu odkształcenia przeprowadzone zostały za pomocą siedmiu sond, z których jedna pokazana jest na rys. 2. Sonda jest zbudowana z pasków blachy miedzianej o grubości 0,2 mm, ułożonych wzdłuż krawędzi czworoboku o narożu prostokątnym. Długość krawędzi przyprostokątnych wynosi 7 cm, a przeciwprostokątnych 10 cm. Na każdej krawędzi z obu stron paska blachy naklejono dwa tensometry oporowe. Odkształcenia betonu powodują odkształcenia pasków blachy i zmieniają oporność tensometrów, mierzoną za pomocą mostka Wheatstone'a. W ten sposób tensometry umożliwiają pomiar średnich odkształceń betonu wzdłuż krawędzi sondy, co pozwala na uniknięcie wpływów niejednorodności betonu. Cechy tensometrów były następujące: typ RL, długość pomiarowa 15 mm, oporność 120 $\Omega$ , współczynnik  $K = 2,10$ , rzeczywista dokładność pomiaru  $5 \cdot 10^{-6}$ . Rozmieszczenie sond w przekroju jest pokazane na rys. 1 i 3.



Rys. 2. Widok sondy do pomiaru sześciu składowych stanu deformacji w betonie

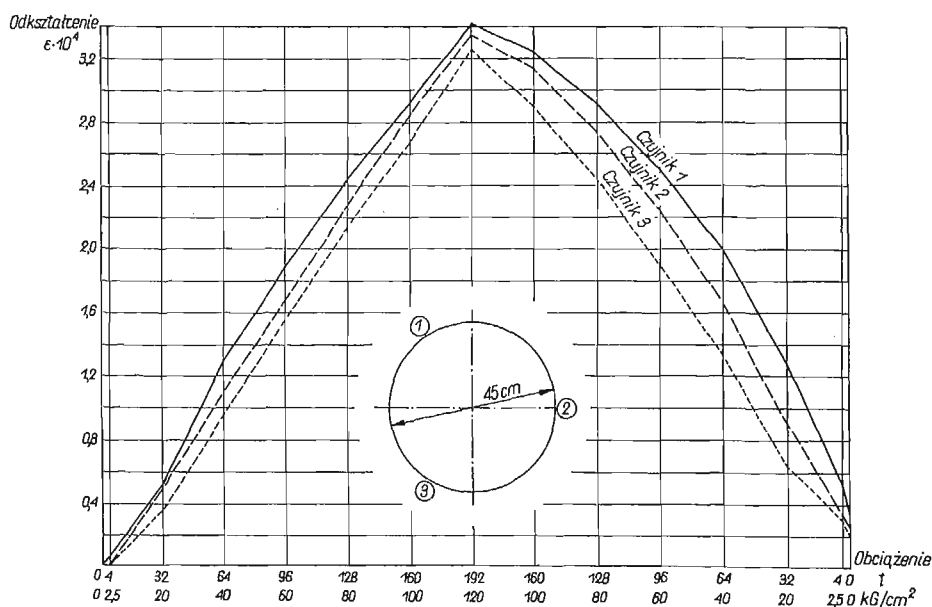


3. Widok części formy do betonowania badanych walców wraz z przygotowanym układem sond

Wskazania sondy dają bezpośrednio odkształcenia liniowe  $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$ ,  $\varepsilon_{33}$ , odkształcenia zaś kątowe  $\varepsilon_{12}$ ,  $\varepsilon_{23}$  i  $\varepsilon_{31}$  mogą być łatwo obliczone.

Drugi wałek, wykonany równocześnie z pierwszym, zawierał sondy z tensometrami kompensacyjnymi, a następnie posłużył do powtórzenia pomiarów. Oba walce pokazane są na rys. 5; były one identyczne co do rozmieszczenia sond, rodzaju betonu i sposobu przechowywania.

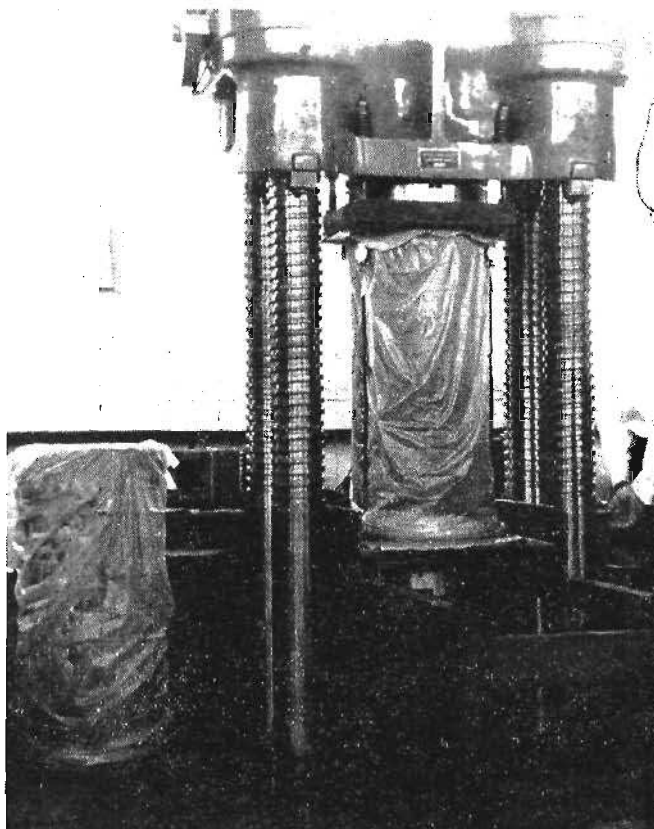
4. Sposób obciążenia i przeprowadzenia pomiarów. Badany wałek obciążono siłą osiową w prasie 500-tonowej. Obciążenie wprowadzono kolejnymi przyrostami po  $20 \text{ kg/cm}^2$  aż do uzyskania naprężenia średniego w przekroju próbki, wynoszącego  $120 \text{ kg/cm}^2$ , po czym następowało odciążenie. Zachowano przy tym równe czasy cykli obciążenia i pomiarów, wynoszące 15 min.



Rys. 4. Wykres odkształceń średnich, mierzonych przez czujniki zegarowe wzdłuż tworzących walca

Osiowość obciążenia walca uzyskano drogą kolejnych prób, jednak nie udało się uniknąć niewielkich mimośrodów i wygięć próbki pod obciążeniem. Spowodowane były one ograniczoną dokładnością ustawienia próbki w prasie oraz zmianą niejednorodności betonu przy wzroście i spadku obciążenia. Ilustruje to wykres na rys. 4, otrzymany ze wskazań czujników zegarowych mierzących średnie odkształcenia wzdłuż trzech tworzących walca. Przy największym obciążeniu  $P = 192 \text{ t}$  różnice w odkształceniach nie przekraczały  $16 \cdot 10^{-6}$ , zaś przy obciążeniu  $P = 64 \text{ t}$  podczas odciążenia różnica ta była przeszło 4-rorotnie większa i wynosiła  $67 \cdot 10^{-6}$ . Przesuwanie się środka ciężkości przekrojów ściskanych jest widoczne i uniemożliwia osiowe obciążenie badanych elementów.

Badanie walca wykonano po upływie 11 tygodni od betonowania, przechowując walce w powietrzu o wilgotności względnej 100% i o temperaturze zmiennej w granicach 18–20 °C. Warunki te zachowane były również podczas pomiarów.



Rys. 5. Widok walców badanego i kompensacyjnego podczas badania

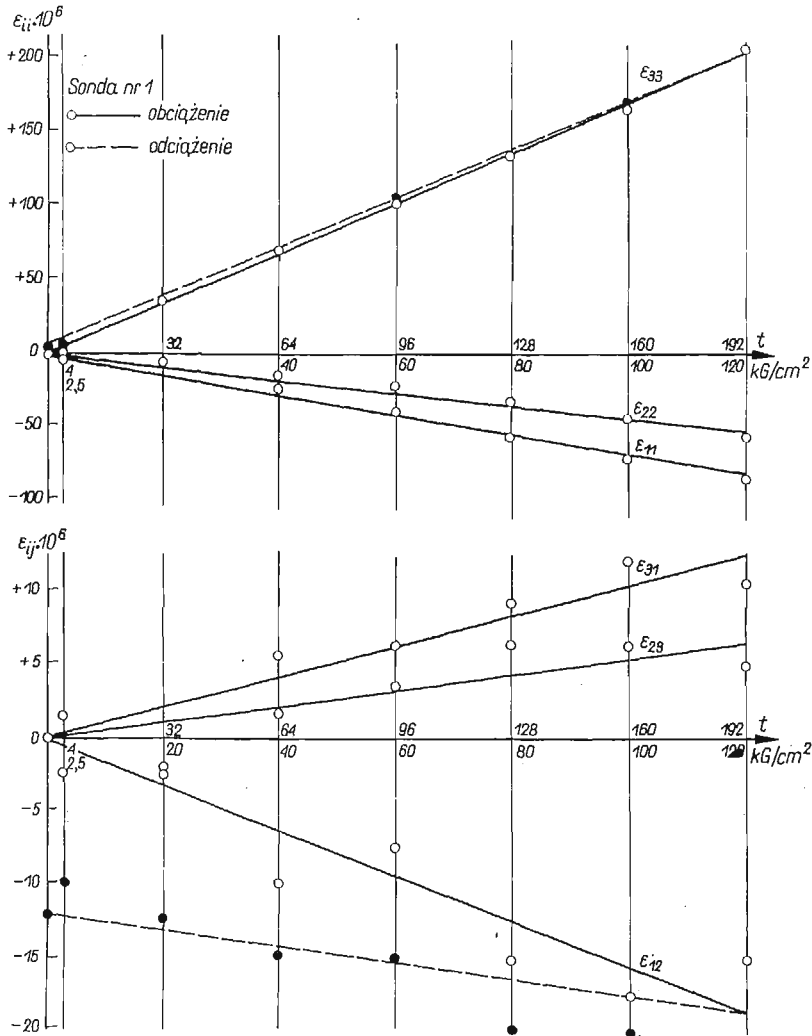
**5. Wyniki badań.** W celu oszczędności miejsca na rys. 6 przedstawiono wykresy składowych stanu odkształcenia, zmierzonych za pomocą tylko jednej z sond użytych w czasie badań. Wskazania tej sondy, oznaczonej numerem 1 na rys. 1, zostały porównane ze wskazaniami innych i stwierdzono zbliżony kształt otrzymanych wykresów.

Rozmieszczenie pionowych odkształceń  $\epsilon_{33}$  w przekroju poprzecznym walca pokazano na rys. 7. Wykres ten jest oparty na wskazaniach wszystkich sond.

Na rysunkach 8 i 9 widać części wykresów pochodnych  $\partial\epsilon_{33}/\partial r$  i  $\partial\epsilon_{33}/\partial s$  w funkcji współrzędnych biegunowych. Wykreślono je tylko przy dwóch wielkościach promienia  $r$ , ponieważ przedstawienie pełnych wykresów przestrzennych nastęrczało trudności techniczne. Wykresy te wskazują na możliwość doświadczalnego wyznaczenia pochodnych składowych odkształceń względem parametrów, występujących w badanych zjawiskach.

Traktując wykresy odkształceń przedstawione na rys. 6 i 7 jako dobrze charakteryzujące stan odkształcenia w środkowym przekroju poprzecznym badanego walca ściskanego, można sformułować na podstawie ich przebiegu następujące uwagi:

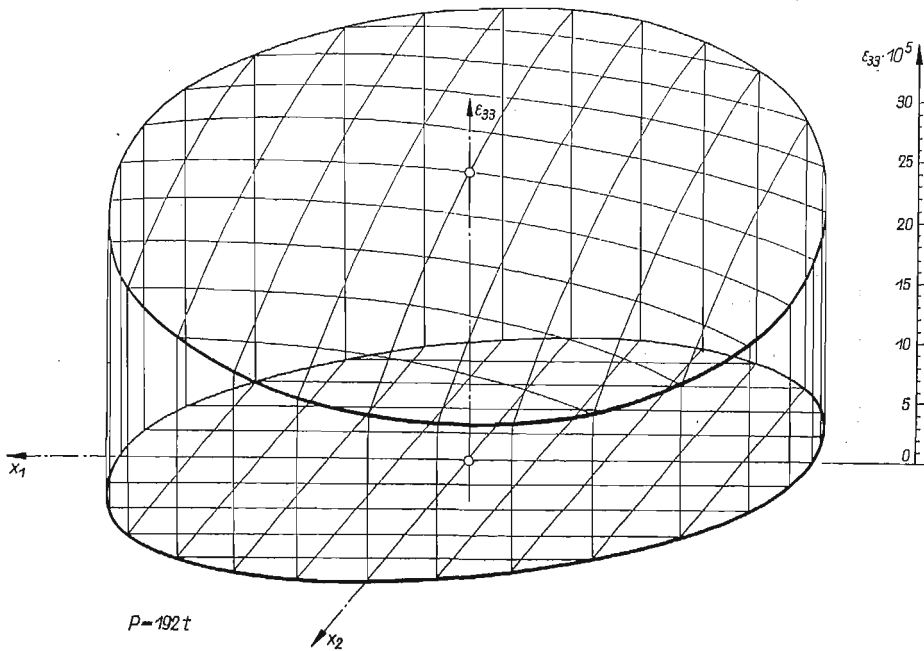
1. W zakresie stosowanych naprężeń składowe odkształceń liniowych zmieniają się proporcjonalnie do obciążeń z błędami nie przekraczającymi dokładności pomiaru. Proporcjonalność potwierdza istnienie między tymi składowymi zależności liniowych o postaci niezależnej od obciążenia.



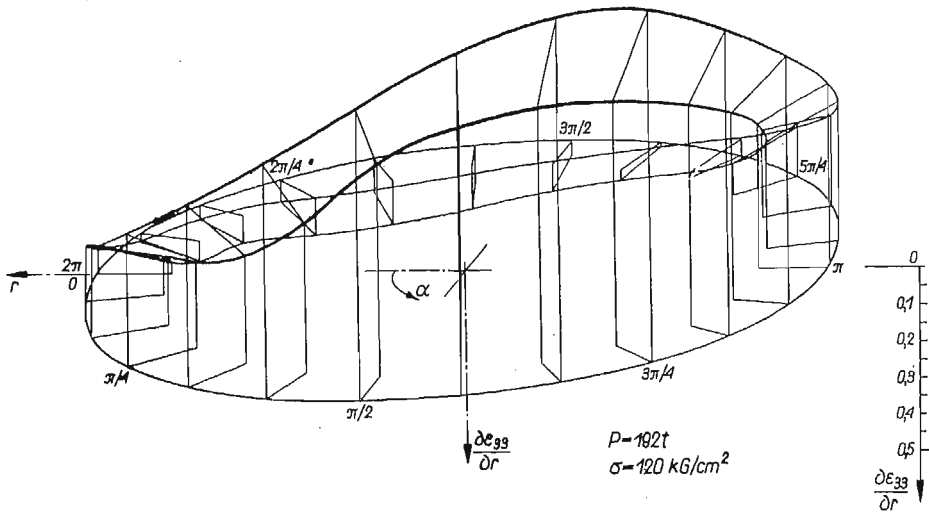
Rys. 6. Wykresy składowych odkształceń, pomierzonych za pomocą sondy

Na pierwszym wykresie pokazano odkształcenia liniowe w funkcji obciążenia:  $\epsilon_{33}$  — odkształcenia pionowe,  $\epsilon_{22}$  — odkształcenia poziome skierowane wzdłuż promienia,  $\epsilon_{11}$  — odkształcenia poziome, skierowane prostopadłe do promienia.

Na drugim wykresie pokazano odkształcenia kątowe:  $\epsilon_{31}$  — zmiana kąta pomiędzy osiami 1 i 3,  $\epsilon_{23}$  — zmiana kąta pomiędzy osiami 1 i 2,  $\epsilon_{12}$  — zmiana kąta pomiędzy osiami 2 i 3



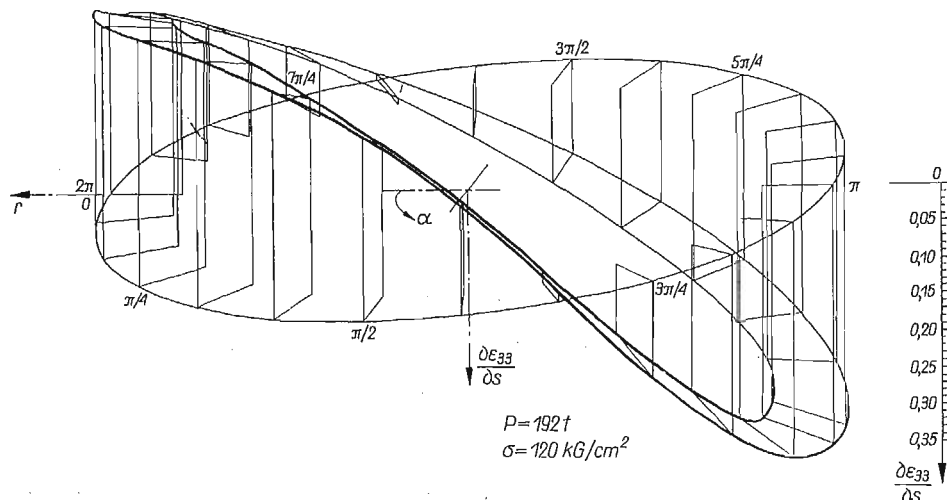
Rys. 7. Wykres odkształceń pionowych  $\epsilon_{33}$  w przekroju poprzecznym walca pod obciążeniem 120 kG/cm<sup>2</sup>



Rys. 8. Wykres pochodnych  $\frac{\partial \epsilon_{33}}{\partial r}$  odkształceń pionowych  $\epsilon_{33}$  względem promienia  $r$

2. Odkształcenia  $\epsilon_{11}$  wzdłuż promienia przekroju walca są wydłużeniami, stosunek  $\epsilon_{11}/\epsilon_{33}$  jest równy około  $-0,43$ .
3. Odkształcenia  $\epsilon_{22}$  wzdłuż stycznej do okręgu, przechodzącego przez punkt oznaczający położenie sondy nr 1, są wydłużeniami, stosunek  $\epsilon_{22}/\epsilon_{33}$  jest równy około  $-0,28$ .

4. Różnice wielkości odkształceń  $\varepsilon_{11}$  i  $\varepsilon_{22}$ , zaobserwowane zarówno w punkcie I jak i w niektórych pozostałych punktach pomiarowych, wskazują na zależność wielkości odkształceń od ich kierunku w płaszczyźnie prostopadłej do działania obciążenia. Różnice te występują w zakresie proporcjonalności składowych odkształceń do obciążeń i nie mogły być przewidziane teoretycznie.



Rys. 9. Wykres pochodnych  $\partial\varepsilon_{33}/\partial s$  odkształceń pionowych  $\varepsilon_{33}$  względem łuku  $s$

5. Różne od zera wielkości  $\varepsilon_{12}$ ,  $\varepsilon_{23}$ ,  $\varepsilon_{31}$  wskazują na istnienie tych składowych tensora odkształcenia w przypadkach ściskania elementów betonowych obciążeniem ustawionym osiowo z techniczną dokładnością. Składowe  $\varepsilon_{ij}(i \neq j)$  były dotychczas całkowicie pomijane w znanych przykładach analizy odkształcalności i wytrzymałości elementów betonowych. Biorąc pod uwagę mniejsze wartości bezwzględne odkształceń  $\varepsilon_{ij}(i \neq j)$  niż  $\varepsilon_{ii}$  i związane z tym większe względne błędy pomiarów, można składowe  $\varepsilon_{ij}(i \neq j)$  traktować również jako funkcje liniowe obciążeń.

6. Większe odkształcenia kątowe  $\varepsilon_{31}$  niż  $\varepsilon_{23}$  odpowiadają odkształceniom liniowym  $\varepsilon_{11}$  większym co do bezwzględnych wartości niż odkształcenia  $\varepsilon_{22}$ .

7. Wykres zmienności składowej  $\varepsilon_{33}$  w polu przekroju walca przedstawiony na rys. 7 wskazuje, że odkształcenia te nie są zmienne liniowo wraz ze współrzędnymi, a więc że założenie zachowania płaskich przekrojów po odkształceniu nie jest spełnione. Beton ulega większym odkształceniom w pobliżu środka przekroju walca, a mniejszym na obwodzie.

8. Przy odciążeniu wykres składowej  $\varepsilon_{33}$  jest niemal identyczny z wykresem przy obciążeniu, a odkształcenie trwałe jest bardzo małe. Natomiast w przypadku składowej  $\varepsilon_{12}$  odkształcenie trwałe po odciążeniu jest bliskie połowie odkształcenia przy największym obciążeniu.

Przedstawione wyniki wskazują na przydatność zastosowanej metody pomiarowej do analizy stanu odkształcenia rzeczywistych elementów przez pomiar wszystkich składowych stanu odkształcenia. Daje ona nowe informacje o rozmieszczeniu



складовых одкшталеца вевнэтрэ валца шцисканого з бетону и о пропорцах помидэу тими складовыми. Информэце те в дэлшых бадэних могоэ позволит на докэднеише вышэние зэховэния сие элементов бетонowych под обциэением и служитэ зэ подстэвэ до коректы подстэвовых зэлеэности. Прэз помiar вшэсткых складовых стэну одкшталеца уникэмы гипотетичных модели одкшталецэности и выникэющих з них зэлоэений о зэлеэности нэпрэжений од одкшталецэ.

#### Литерэтурэ цитовэна в текэциэ

1. Y. C. LOH, *Internal stress gauges for cementitious materials*, Proc. Soc. Experim. Stress Analysis, Cambridge Mass., 2, 11 (1954), 13-28.
2. G. MORAVIA, *Misure estensimetriche all'interno di getti di calcestruzzo*, La Ricerca Scientifica, 8, 25 (1955).
3. G. HONDROS, *The protection and manipulation of electrical strain gauges of the bonded wire type for use in concrete, particularly for internal stress measurements*, Mag. Concr. Research, London, 27, 9 (1957), 173-180.
4. K. E. C. NIELSEN, *Internal stress in concrete*, Bull. RILEM nr 1, Paris 1959, 11-20.
5. В. М. СЕМЕНИСТЫЙ, *Объемные розетки датчиков*, Доклады Львовского Политехнического Института, 1, 5 (1962), 40-45.
6. И. Л. ПИМЕНОВ, *Опыт применения гидроизолированных глубинных датчиков сопротивления для измерения напряжений в бетоне*, Изв. Выс. Учебных Зав., Строительство и Архитектура, № 2, Новосибирск 1963, 146-151.
7. Z. WASIUTYŃSKI, A. BRANDT, *Sondy do wyznaczania odkształceń w betonie i w gruntach*, Wybrane Materiały III Krajowej Konferencji Wytrzymałościowej SIMP-WAT, Warszawa 1963, 125-130.
8. I. MAJCHROWICZ, I. WESELI, *Przystosowanie tensometrycznych czujników do pomiarów wewnętrznych*, Zesz. Nauk. Pol. Śl., Budownictwo, z. 14, Gliwice 1964, 137-139.
9. Z. WASIUTYŃSKI, A. BRANDT, *Measurements of six components of the strain tensor in a compressed concrete cylinder*, Bull. Acad. Polon. Sci., 12, 12 (1964).
10. A. BRANDT, *Études préliminaires des déformations internes du béton*, Ass. Fr. Ponts et Charp., Bull. 85, 1965, 36-40.

#### Резюме

#### ИЗМЕРЕНИЕ ШЕСТИ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЕФОРМАЦИИ В СЖИМАЕМОМ БЕТОННОМ ЦИЛИНДРЕ

В работе обсуждаются результаты измерений шести составляющих деформированного состояния внутри бетонного цилиндра, подверженного сжатию. Измерения проводились с помощью пространственной системы электрических датчиков омического сопротивления, забетонированных вблизи срединного поперечного сечения цилиндра. В результате исследований получены диаграммы изменения всех составляющих деформации в функции нагрузки. В выводах отмечены расхождения существующие между измеренным деформированным состоянием и состоянием определяемым на основании обще принятых гипотез. Это касается появления угловых деформаций при сжатии осевой нагрузкой расположенной с технической точностью, а также изменчивости в плоскости исследуемого поперечного сечения, линейных деформаций, параллельных и перпендикулярных направлению действия нагрузки.

## S u m m a r y

MEASUREMENTS OF SIX STRAIN-COMPONENTS  
IN THE COMPRESSED CONCRETE CYLINDER

The paper deals with measurements of the six strain-components inside a concrete cylinder loaded by axial compression. The measurements have been performed by means of a spatial system of electrical strain-gauges, located in the vicinity of the mid-length cross-section of the cylinder. As a result of investigation, the diagrams of all strain-components as a function of applied load are obtained. In conclusion, attention is drawn to the fact that the existing state of strain differs from that obtained on the basis of usual hypothesis. This fact concerns the shearing strains which appeared during the axial compression arranged with technical accuracy, and the variability in the investigated cross-section of longitudinal strains parallel and perpendicular to the direction of loading.

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGLYCH  
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

*Praca została złożona w Redakcji dnia 11 stycznia 1965 r.*

---