

4.43 — układy prętowe

S. Drewnowski, W. Marks,
M. Skawiński, A. Stańczyk

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE
SŁUPÓW BETONOWYCH
Z UZBROJENIEM BEZ PRZYCZEPNOŚCI

34/1985

8. 269a



WARSZAWA 1985

<http://rcin.org.pl>

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 18 marca 1985 r.

56917



N a p r a w a c h r ę k o p i s u

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 190 egz. Ark.wyd. 2,25 Ark.druk. 3,75
Oddano do drukarni we wrześniu 1985 r.
Nr zamówienia 581/85

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

Sławomir Drewnowski
Wojciech Marks
Marian Skawiński
Andrzej Stańczyk

BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE SŁUPÓW BETONOWYCH Z UZBROJENIEM BEZ PRZYCZEPNOŚCI

1. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest przedstawienie wyników badań słupów z uzbrojeniem swobodnym, których koncepcja została omówiona w pracy [1]. Badania te potwierdzają możliwość stosowania prętów ze stali wysokiej wytrzymałości odizolowanych od betonu w celu uzyskania większej nośności słupów w stosunku do słupów żelbetowych.

W trzech seriach zbadano łącznie 9 słupów z uzbrojeniem swobodnym o przekrojach $0,22 \times 0,22$ m i długościach 2,50 m i 1,00 m oraz dla porównania 2 słupy żelbetowe z uzbrojeniem klasycznym. Przeprowadzone badania obejmowały pomiary odkształceń prętów i betonu oraz określenie nośności słupów pod działaniem obciążeń doraźnych.

Badanie słupów pod działaniem obciążeń długotrwałych rzędu 3000 kN jest w warunkach laboratoryjnych trudne i kosztowne tak, że przeprowadzenie ich jest przewidywane w konstrukcji prototypowej. Prowadzone były natomiast badania długotrwałe ściskniętych prętów stalowych odizolowanych od betonu umieszczonych w belkach. Wykazały one po okresie około 1 roku spadek siły w prętach nie przekraczający paru procent [9].

Z przyczyn technicznych rysunki nr. nr.: 4, 5, 7, 8, 13, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 27, 28, 29, 35, 36, 37, 38, 39 zostały zamieszczone na końcu pracy.

2. Koncepcja słupów z uzbrojeniem swobodnym i słupów rozprężonych

2.1. Koncepcja zastosowania uzbrojenia bez przyczepności do betonu

Podstawową zasadą konstrukcji żelbetowych jest wykorzystywanie zjawiska przyczepności prętów stalowych do betonu. Jednakże w pewnych przypadkach przyczepność ta może być niepożądana. Narzuca ona bowiem warunek równych odkształceń jednostkowych betonu i stali

$$\varepsilon_b = \varepsilon_s .$$

Z warunku tego wynika stosunek naprężeń w prętach uzbrojenia do naprężeń w betonie elementu

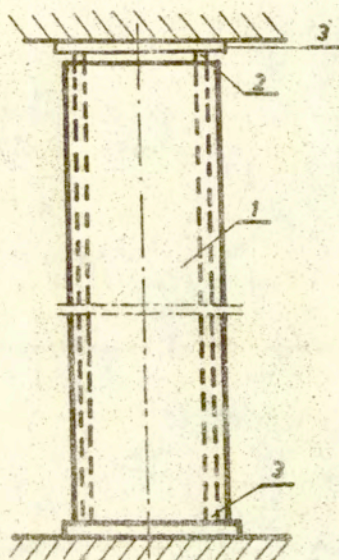
$$\sigma_s = \frac{E_s}{E_b} \sigma_b .$$

Warunki te uniemożliwiają pełne wykorzystanie stali o wysokich wytrzymałościach, których maksymalne odkształcenia jednostkowe są kilkakrotnie większe od maksymalnych odkształceń jednostkowych betonu. Przy założeniu jednakowej odkształcalności betonu i stali, wytrzymałość prętów ze stali wysokowartościowej może być wykorzystana tylko w niewielkiej części.

Powstała więc myśl wykonywania słupów betonowych, zbrojonych stalą miękką w ilości niezbędnej ze względów konstrukcyjnych i prętami stalowymi wysokiej wytrzymałości bez przyczepności do betonu. Pręty takie mogą się odkształcać niezależnie od korpusu betonowego. Umożliwia to przyłożenie takich sił do prętów uzbrojenia, aby uzyskać jednoczesne wyczerpanie nośności stali tych prętów i betonu korpusu żelbetowego.

2.2. Konstrukcja i zasada pracy słupów z uzbrojeniem swobodnym

Słup z uzbrojeniem swobodnym przedstawiono schematycznie na rys.1. Składa się on z trzech zasadniczych części: korpusu betonowego /1/, uzbrojenia swobodnego /2/ oraz płyt stalowych /3/ o dostatecznie dużej twardości. Pręty uzbrojenia swobodnego opierają się z obu stron słupa o płyty stalowe. Pręty te umieszczone są wewnątrz korpusu słupa i nie mają przyczepności do betonu, a ich długość jest większa od długości korpusu betonowego [1], [2].



Rys.1. Słup z uzbrojeniem swobodnym.

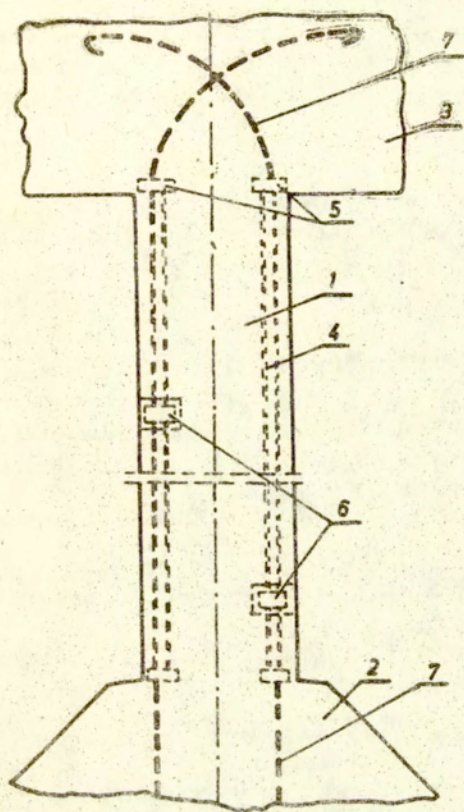
Siła ściskająca słup jest w pierwszej fazie obciążenia przenoszona tylko przez pręty swobodne, których wybieczenie jest uniemożliwione przez korpus słupa. Pod pewnym obciążeniem następuje takie skrócenie prętów, że ich długość staje się równa długości słupa betonowego. Od tego momentu obciążenie przejmie-

wane jest przez pręty uzbrojenia swobodnego i korpus betonowy. Nośność takiego elementu jest większa od nośności klasycznego słupa żelbetowego o wielkość siły, jaką przenoszą pręty uzbrojenia swobodnego w pierwszej fazie obciążenia.

Słupy z uzbrojeniem swobodnym mogą być stosowane jako dwuprzegubowe lub z jednej strony utwierdzone.

2.3. Konstrukcja i zasada pracy słupów rozprężonych

Na rys.2 przedstawiono szkic słupa z obu stron utwierdzonego. Betonowy korpus słupa /1/ utwierdzony jest za pomocą prętów stalowych o niskiej wytrzymałości /7/ w konstrukcji nośnej /3/ oraz w stopie fundamentowej /2/. Trzon słupa /1/ posiada pręty /4/ ze stali o wysokiej wytrzymałości, umieszczone w kanałach, bez przyczepności do betonu. Opierają się one o twarde płyty stalowe /5/ bądź też o urządzenia rozprężające /6/. Urządzenia rozprężające /6/ mogą mieć postać śrub, nakrętek rzymskich lub pras. Urządzenia rozprężające w postaci śrub są umieszczone na końcach prętów zamiast dolnych lub górnych płyt oporowych. Możliwe jest zastosowanie na przykład śrubowych urządzeń rozprężających według patentu Nr 106791 [3]. Nakrętki rzymskie i prasy mogą być zastosowane w dowolnym przekroju pręta. Po obciążeniu słupów ciężarem własnym konstrukcji, za pomocą urządzeń rozprężających /6/ uzyskuje się dodatkowe ściskanie prętów /4/. Powoduje to zmniejszenie lub całkowite usunięcie naprężeń ściskających w korpusie słupów /1/ w tym stanie obciążenia. Dodatkowe naprężenia ściskające powstają powtórnie w korpusie słupa pod obciążeniami użytkowymi konstrukcji. Obciążenia te są przenoszone zarówno przez pręty rozprężające jak i przez korpus słupa. Dlatego wymiary słupów i wielkości sił rozprężających muszą być tak dobrane, aby pod działaniem maksymalnych obciążeń nie były przekroczone ani naprężenia w betonie słupa, ani naprężenia w prętach rozprężających [4], [5]. Opis konstrukcji słupów rozprężonych oraz możliwości ich zastosowania przedstawił niezależnie Johns w pracy [7].



Rys.2. Słup rozprężony.

Słuszność koncepcji zastosowania w elementach ściskanych uzbrojenia bez przyczepności do betonu została wstępnie sprawdzona na modelach słupów betonowych o przekroju 50x50 mm i różnych długościach, uzbrojonych 4 prętami $\varnothing 5$ mm ze stali wysokiej wytrzymałości używanej do sprężania konstrukcji [6].

2.4. Wytrzymałość słupów z uzbrojeniem swobodnym i słupów rozprężonych

Wytrzymałość na ściskanie osiowe słupów z uzbrojeniem swobodnym i słupów rozprężonych jest równa

$$/1/ \quad N = A_b \bar{\sigma}_b + A_a \bar{\sigma}_a + A_s \bar{\sigma}_s.$$

W zależności tej oznaczono przez: A_b , A_a , A_s - pola przekrojów, a przez $\bar{\sigma}_b$, $\bar{\sigma}_a$, $\bar{\sigma}_s$ naprężenia dopuszczalne na ściskanie betonu, stali uzbrojenia miękkiego i prętów swobodnych lub rozprężających.

Zwiększenie wytrzymałości słupów na skutek zastosowania zbrojenia bez przyczepności występuje wtedy, gdy o wytrzymałości tej decyduje ściskanie a nie wyboczenie. Dodanie takiego uzbrojenia nie wpływa bowiem na wzrost siły krytycznej słupa.

Stosowanie uzbrojenia bez przyczepności jest zatem celowe wówczas gdy

$$/2/ \quad A_b \bar{\sigma}_b + A_a \bar{\sigma}_a + A_s \bar{\sigma}_s \leq \frac{\pi^2 E_b A_x}{\lambda^2},$$

gdzie:

$$A_x = A_b + \frac{E_a}{E_b} A_a,$$

$$\lambda = \frac{l_w}{i},$$

E_b, E_a - współczynniki sprężystości betonu i stali uzbrojenia miękkiego,

l_w - długość wyboczeniowa słupa,

i - promień bezwładności przekroju A_x ,

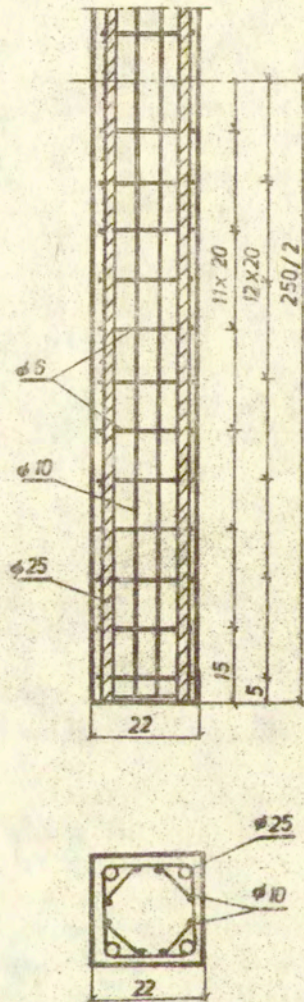
pozostałe oznaczenia jak we wzorze /1/.

Z zależności tej można wyznaczyć smukłość graniczną słupów poniżej której celowe jest stosowanie uzbrojenia bez przyczepności. Smukłość ta jest równa około 50, co w przypadku słupów prostokątnych odpowiada stosunkowi wysokości wyboczeniowej słupa do jego szerokości $\frac{l_w}{b} \approx 14$.

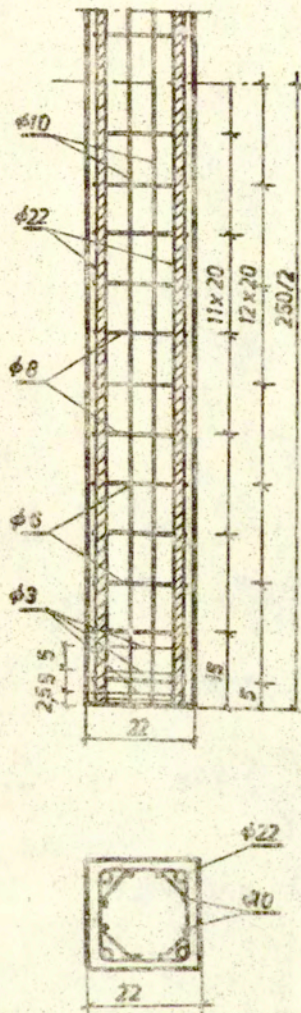
5. Badania słupów z uzbrojeniem swobodnym

3.1. Przedmiot i zakres badań

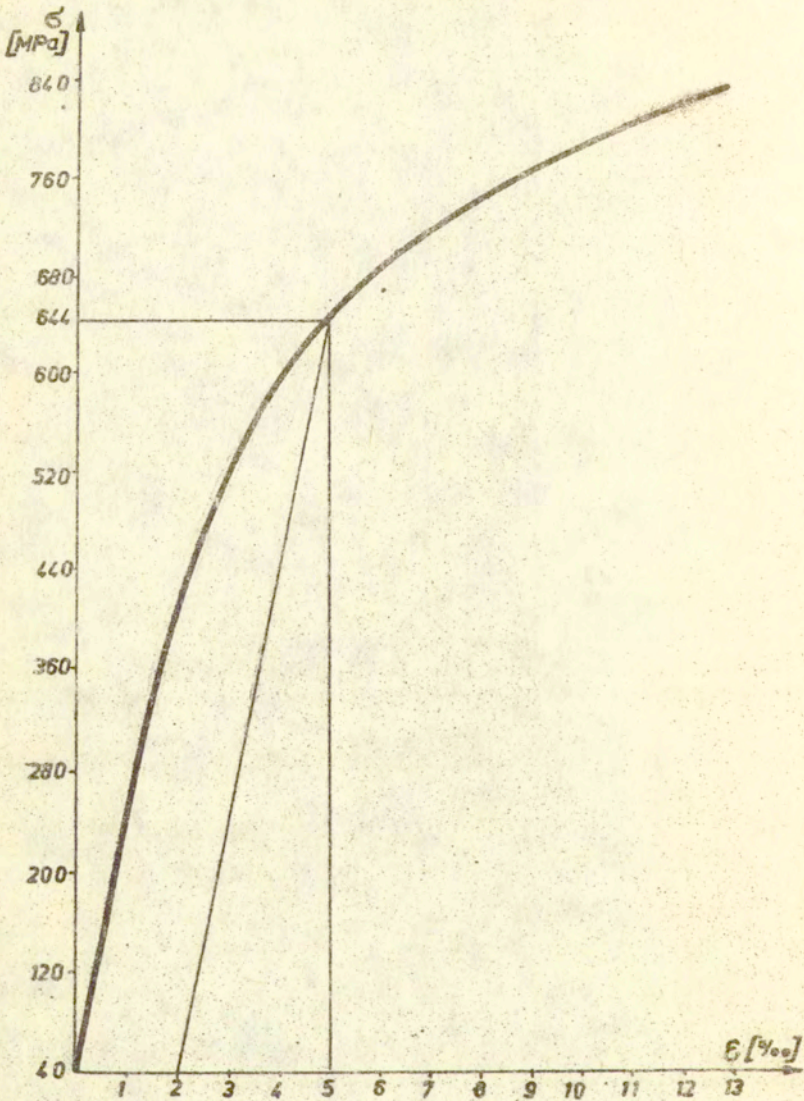
Zbadano trzy serie słupów na ściskanie osiowe. Serie oznaczono I, II i III, a poszczególne słupy 1, 2, 3.../oznaczenie słupa np. II-3/. Łącznie zbadano 11 słupów. Wszystkie słupy miały jednaki przekrój poprzeczny $0,22 \times 0,22$ m. Długość słupów serii I i II wynosiła 2,50 m, a serii III - 1,00 m. Słupy serii I i III były uzbrojone stalą ϕ 25; w serii II zastosowano uzbrojenie ϕ 22 w dwóch słupach i ϕ 25 w trzecim. Dwa słupy serii I wykonano jako żelbetowe, a pozostałe słupy serii I i II wykonane zostały z uzbrojeniem swobodnym z prętów ze stali 50 HSA /rys.3+6/. W serii III zastosowano zahartowaną stal 50 HFA, a słupy różniły się między sobą rozmieszczeniem uzbrojenia /rys.7 i 8/. W seriach II i III wzmocniono i zespawano strzemiona oraz wprowadzono siatki w głowicach słupów. Pręty ze stali wysokiej wytrzymałości owinięto dwukrotnie folią plastikową, która pozbawiała je przyczepności do korpusu betonowego. Pręty te miały długość większą o Δl od długości korpusu betonowego. Różnicę długości prętów swobodnych i korpusu słupa wyznaczono z warunku, aby w chwili osiągnięcia przez stal umownej granicy plastyczności, a przez beton naprężeń dopuszczalnych długość prętów swobodnych była równa długości słupa. W celu wyznaczenia tej długości przeprowadzono pomocnicze badania statycznego ściskania prętów. Wykonano po dwie próbki o długości 125 mm /równej pięciokrotnej średnicy prętów/ ze stali 50 HSA i 50 HFA /zahartowanej/. Na każdej z tych próbek naklejono po 3 tensometry elektrooporowe /ca 120^o/. Próbki poddano ścisłaniu osiowemu w celu określenia zależności σ, ϵ . Na rys.9 przedstawiono wykres σ, ϵ uzyskany przy ścisłaniu jednej z próbek ze stali 50 HSA, a na rys.10 - wykres uzyskany przy ścisłaniu jednej z próbek ze stali 50 HFA. W oparciu o uzyskane wykresy σ, ϵ określono jednostkowe odkształcenia odpowiadające umownej granicy plastyczności. Średnie wartości umownych granic plastyczności tych stali zestawiono w tabelicy 2.



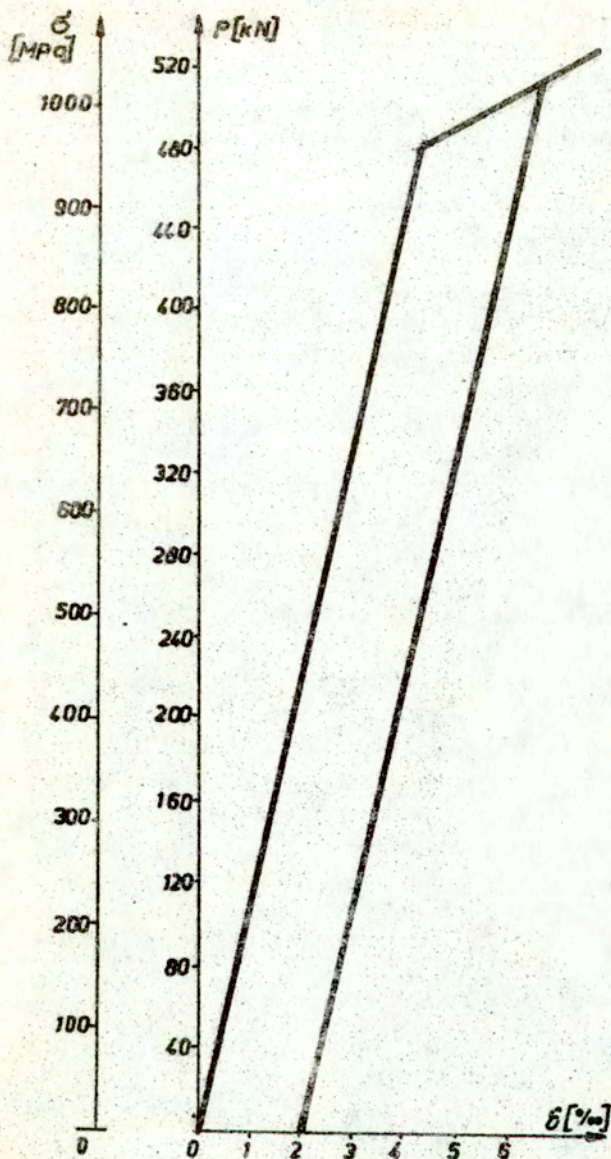
Bys.3. Konstrukcja słupów I-1 i I-2.



Rys. 6. Konstrukcja słupów II-1 i II-2.



Rys. 9. Wykres σ, ϵ przy ścisnieniu próbki pręta $\varnothing 25$ ze stali 11 50 HSA.



Rys. 10. Wykres σ, ϵ przy ścisnieniu próbki pręta $\phi 25$ ze stali 50 HFA zahartowanej.

Tensometry na prętach stalowych zabezpieczono specjalnymi osłonkami plastikowymi. Osłonki te miały na celu niedopuszczenie wilgoci do tensometrów w czasie betonowania oraz zapewnienie swobodnego odkształcania i przesuwania pręta wraz z tensometrami w betonie podczas obciążania słupów.

3.2. Przebieg i wyniki badań

Program badań poszczególnych słupów przedstawiono w tabelicy 1. Badania słupów przeprowadzono w Instytucie Techniki Budowlanej za pomocą prasy firmy Amsler 5000 kN. W dwóch pierwszych seriach badań obciążenie przekazywane na słup przez specjalnie wykonane głowice z twardej stali /rys.13 i 14/. W III serii badań pomiędzy słupem a płytkami maszyny wytrzymałościowej umieszczano blachy ze stali zwykłej o grubości 10mm, w które pręty się wgniatały. Na podstawie odrębnego badania stwierdzono, że przy sile odpowiadającej naprężeniom w stali 1000 MPa wgłębienia są równe około 3,3 mm. Zatem całkowitą różnicę długości prętów swobodnych i korpusu żelbetowego przyjęto odpowiednio większą /tablica 2/.

Do badania odkształceń betonu użyto tensometrów elektrooporowych RL-70/285, a do badania stali - tensometrów typu RL-20/120 produkcji Spółdzielni Pracy "Techno-Mechanik" w Gdańsku. Odkształcenia stali i betonu w I serii badań mierzono za pomocą mostka tensometrycznego typu T2. W pozostałych seriach czujniki podłączone do skomputeryzowanego systemu pomiarowego firmy "Solartron-Schlumberger".

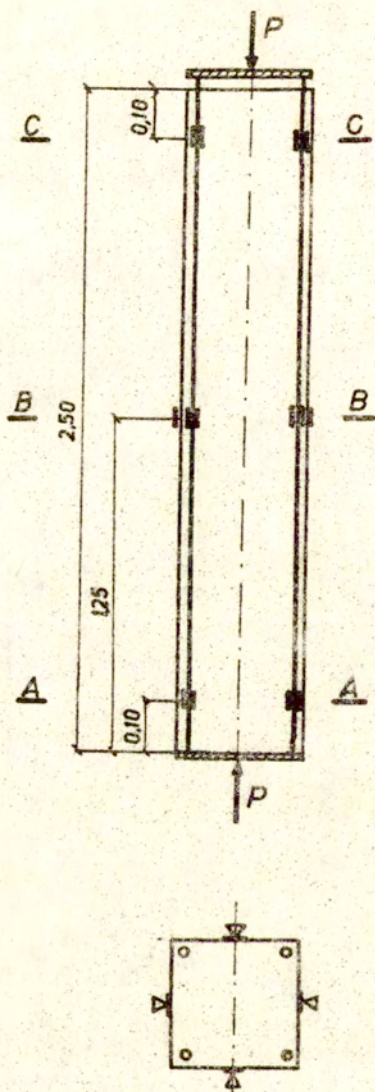
Wyniki badań słupów z uzbrojeniem swobodnym na ściskanie osiowe zestawiono w tabelicy 2. Nośność porównawczego słupa żelbetowego I-3 wynosiła 2290 kN. Nośność słupa I-2 z uzbrojeniem swobodnym wynosiła 1080 kN, a porównawczego słupa żelbetowego I-4 - 1450 kN.

Wyniki badań odkształceń stali i betonu poszczególnych słupów serii I przedstawiono na rys.15 + 18.

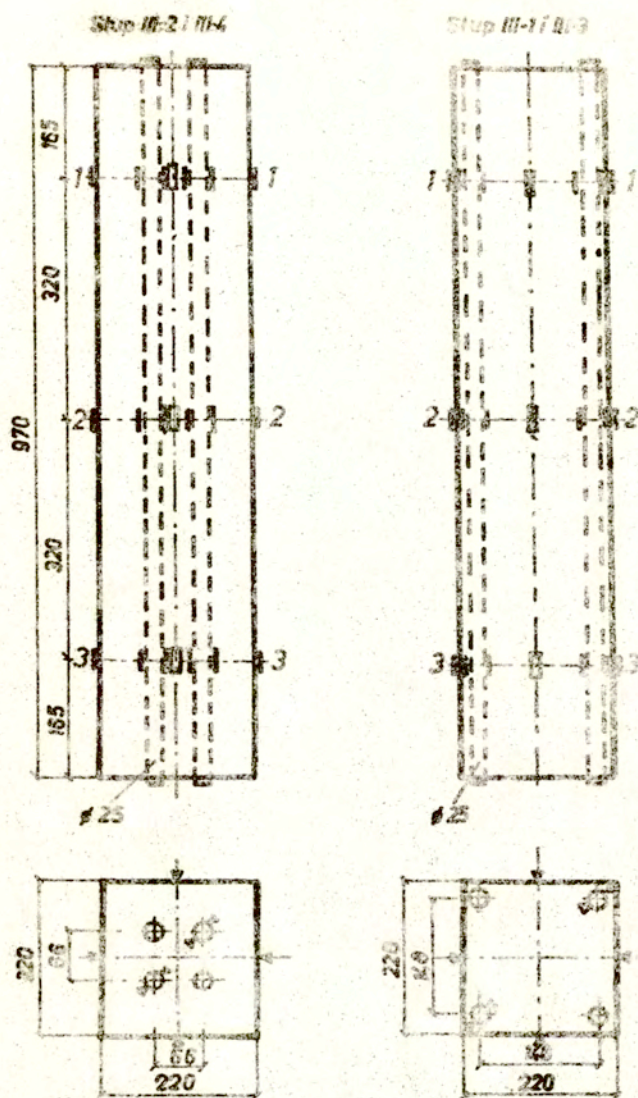
Obraz zniszczenia poszczególnych słupów przedstawiono na fotografiach 19 + 23.

Tablica 1. Program badań słupów

		S ł u p y										
		I-1	I-2	I-3	I-4	II-1	II-2	II-3	III-1	III-2	III-3	III-4
Obciążenie		siłą osiową do zniszczenia	siłą osiową w zakresie sprężystym, odciążenie, mimośrodowe /e=35mm/ do zniszczenia	siłą osiową do zniszczenia	siłą osiową w zakresie sprężystym, odciążenie, mimośrodowe /e=35mm/ do zniszczenia	siłą osiową do zniszczenia						
Pomiary odkształceń prętów		w trzech przekrojach każdego pręta /rys.11/		-	-	-	-	-	w trzech przekrojach dwóch krojów każdego pręta	-	-	-
Pomiary odkształceń betonu na powierzchni słupa		w połowie wysokości	w trzech przekrojach	w połowie wysokości				w trzech przekrojach				



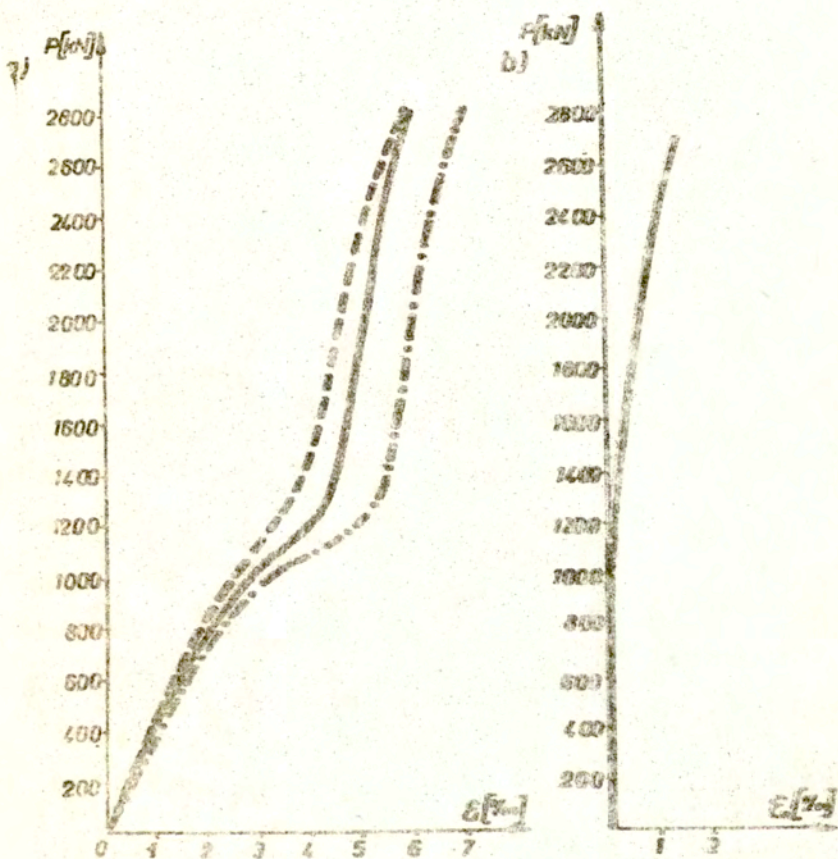
Rys.11. Rozmieszczenie tensometrów w słupach serii I i II.



rys. 12. Rozmieszczenie tensometrów w słupach serii III.

Tablica 2. Porównanie nośności rzeczywistej i obliczeniowej słupów ściskanych osiowo

	S ł u p							
	I-1	II-1	II-2	II-3	III-1	III-3	III-2	III-4
Wytrzymałość gwarantowana betonu na ściskanie R_b [MPa]	35	35	35	35	69,6	69,6	69,6	69,6
Wytrzymałość obliczeniowa betonu R_s [MPa]	21,8	21,6	21,8	21,8	36,6	36,6	36,6	36,6
Umowna granica plastyczności prętów $R_{0,2}$ [MPa]	625	625	625	625	1037	1037	1037	1037
Długość słupa l [m]	2,50	2,50	2,50	2,50	1,00	1,00	1,00	1,00
Różnica długości prętów i korpusu słupa Δl [mm]	12	20	20	20	6,2/9,5/	6,2/9,5/	6,2/9,5/	6,2/9,5/
Pole przekroju prętów A_s [cm ²]	19,63	15,20	15,20	19,83	19,63	19,63	19,63	19,63
Nośność obliczeniowa słupa żelbetowego N_z [kN]	2010	1833	1833	2010	2726	2726	2726	2726
Nośność obliczeniowa żelbet. powiększona o 14% N'_z [kN]	2290	2090	2090	2290	3108	3108	3108	3108
Nośność oblicz. słupa z uzbrojeniem swobodnym N_{sw} [kN]	2452	2175	2175	2452	3977	3977	3977	3977
Nośność słupa z ubrojem swobod. wyznaczona doświadcz. N_{sw}^d [kN]	2800	3500	3180	1240	4010	4840	4990	5130
$\frac{N_{sw}^d}{N_z}$	1,14	1,54	0,51	1,11	1,27	1,76	1,42	1,63
$\frac{N_{sw}^d}{N'_z}$	1,22	1,60	0,54	1,42	1,52	1,76	1,42	1,63
$\frac{N_{sw}^d}{N_z}$			1,25					



Bys. 15. a/ Średnie odkształcenia prętów w trzech przekrojach
 słupa 1x1,
 b/ średnie odkształcenia betonu w połowie wysokości
 słupa.

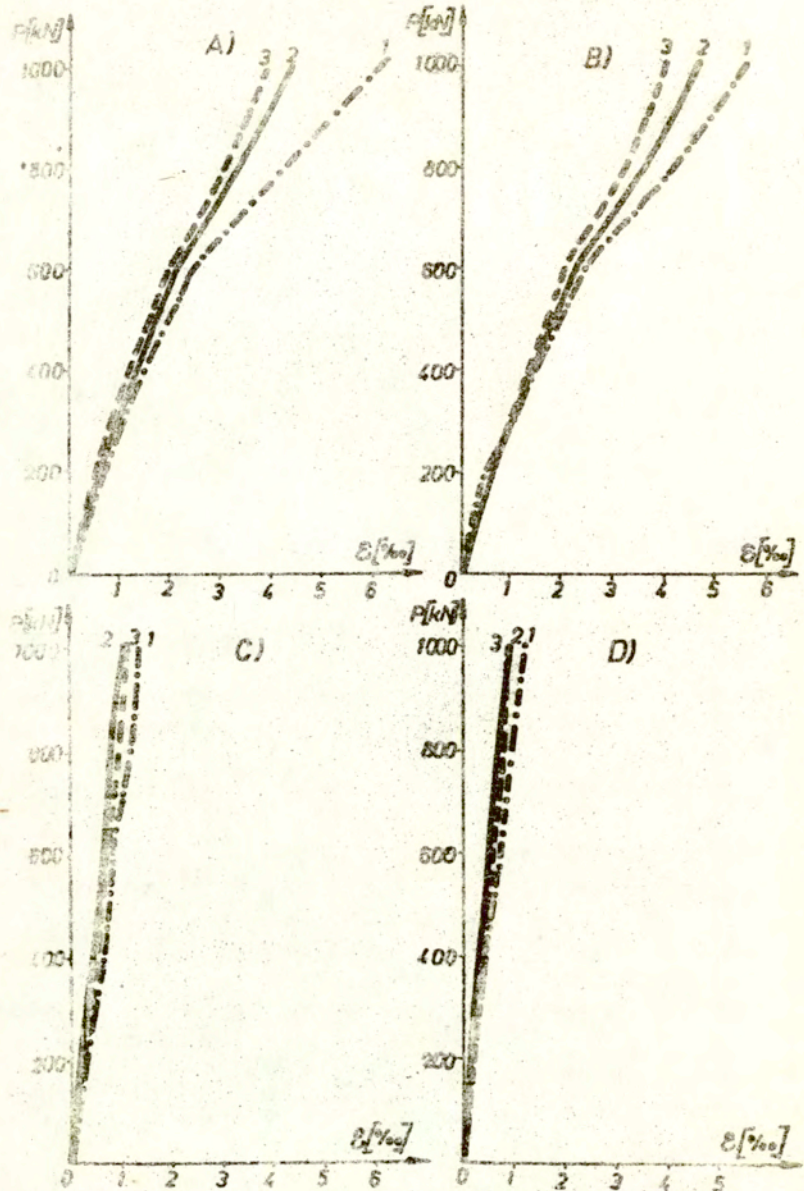
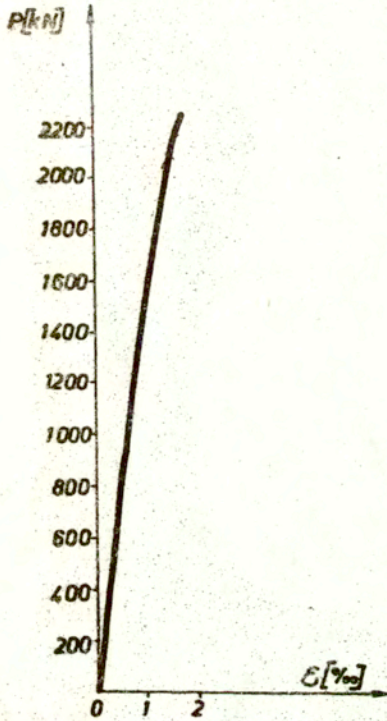
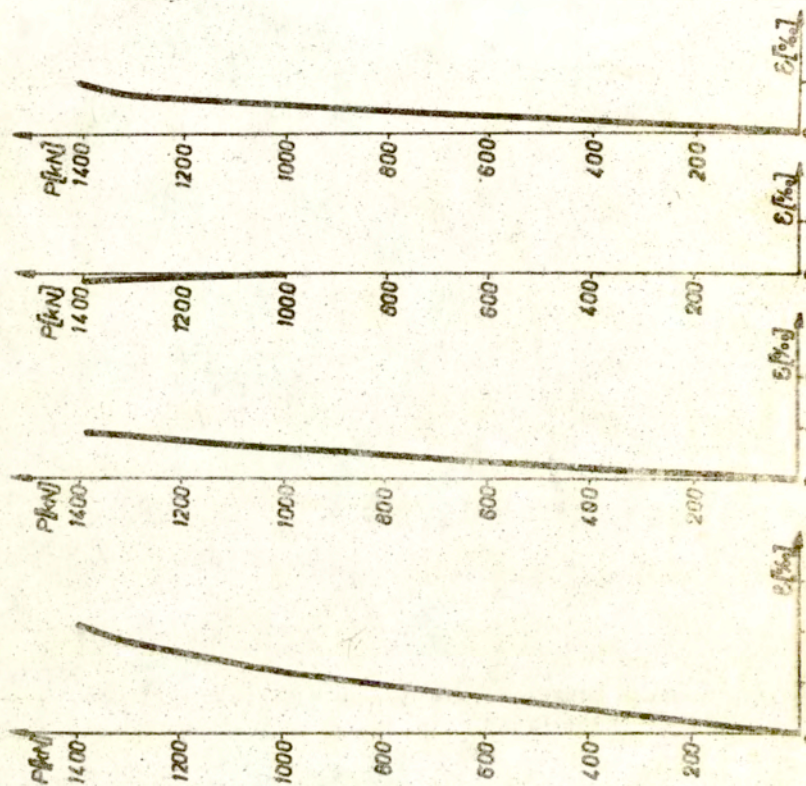


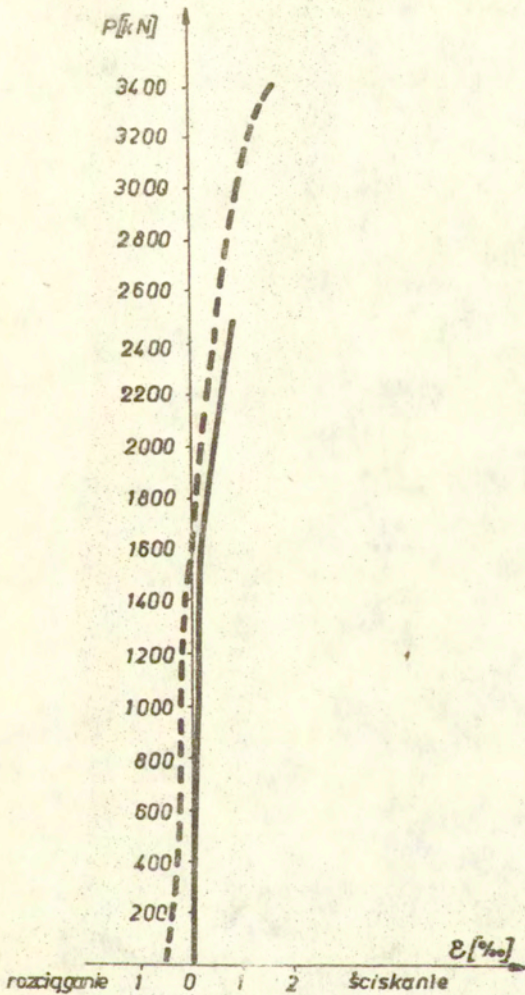
Fig. 16. Odkształcenia w trzech przekrojach poszczególnych prętów słupa I-2.



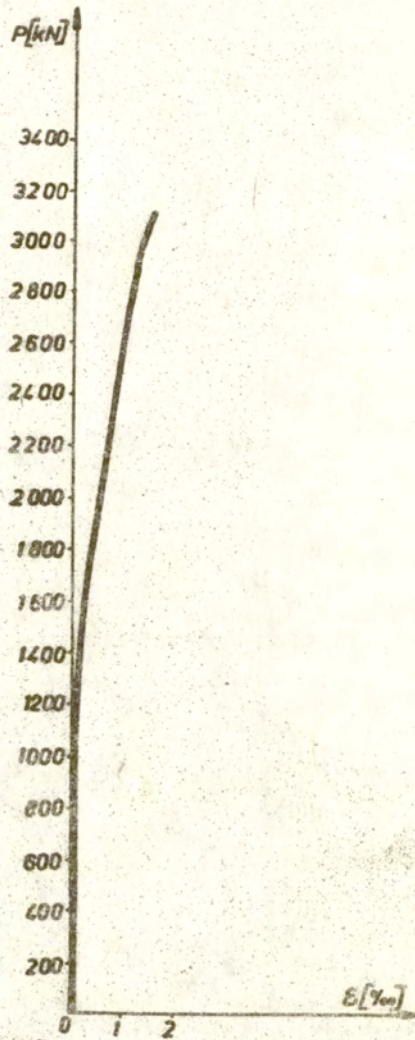
Wys.17. Średnie odkształcenia betonu w połowie wysokości słupa żelbetowego I-3.



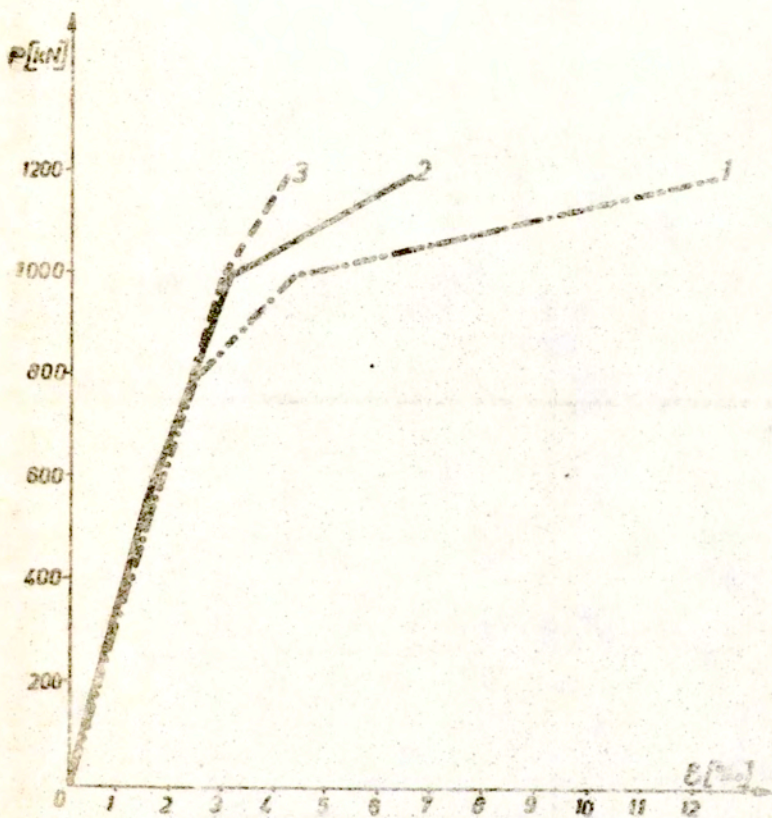
rys. 16. Odkształcenia betonu w połowie wysokości każdej ze ścian słupa żelbetowego I-4.



Rys. 24. Średnie odkształcenia betonu w połowie wysokości słupa II-1; słup obciążono do 2500 kN/linia ciągła/, odciążono i obciążono ponownie aż do zniszczenia /linia przerywana/.



rys.25. Średnie odkształcenia betonu w połowie wysokości słupa II-2.



Rys. 26. Średnie odkształcenia prętów stalowych w trzech przekrojach słupa II-3,

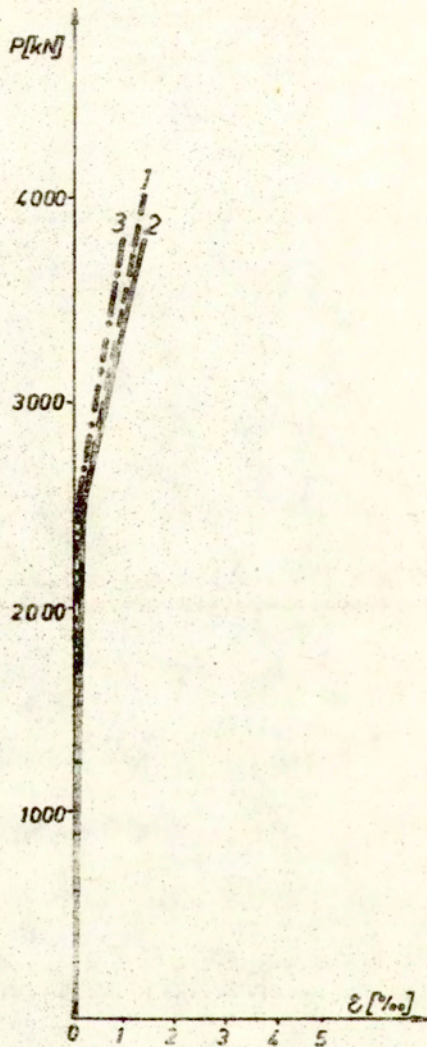
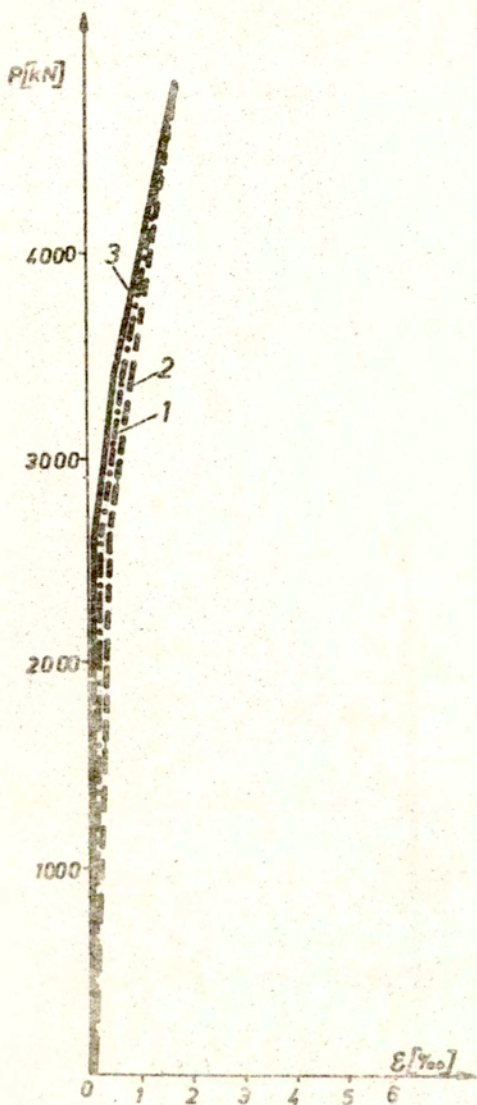
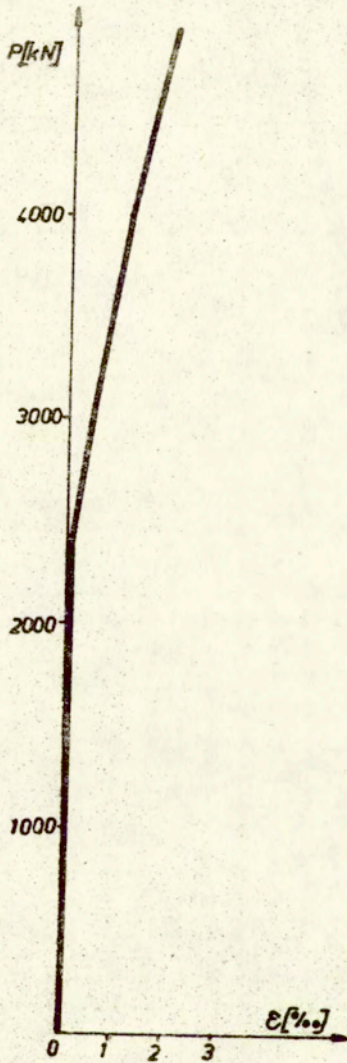


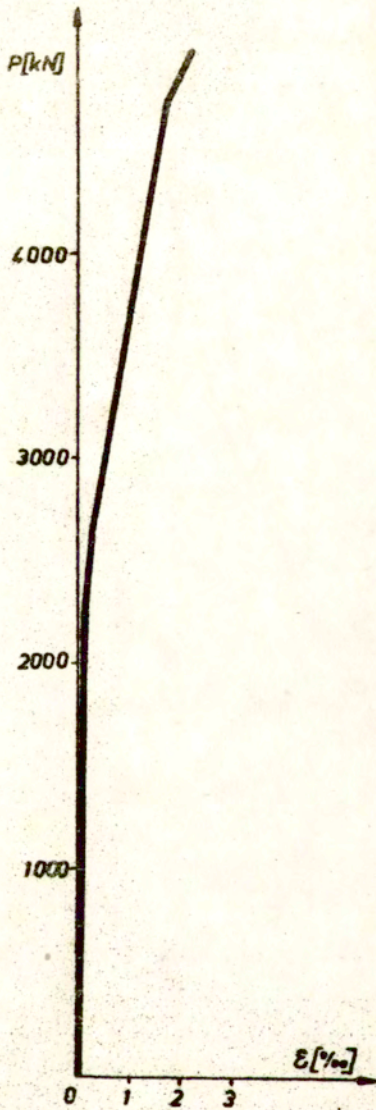
Fig. 30. Odkształcenia betonu w trzech przekrojach słupa III-1.



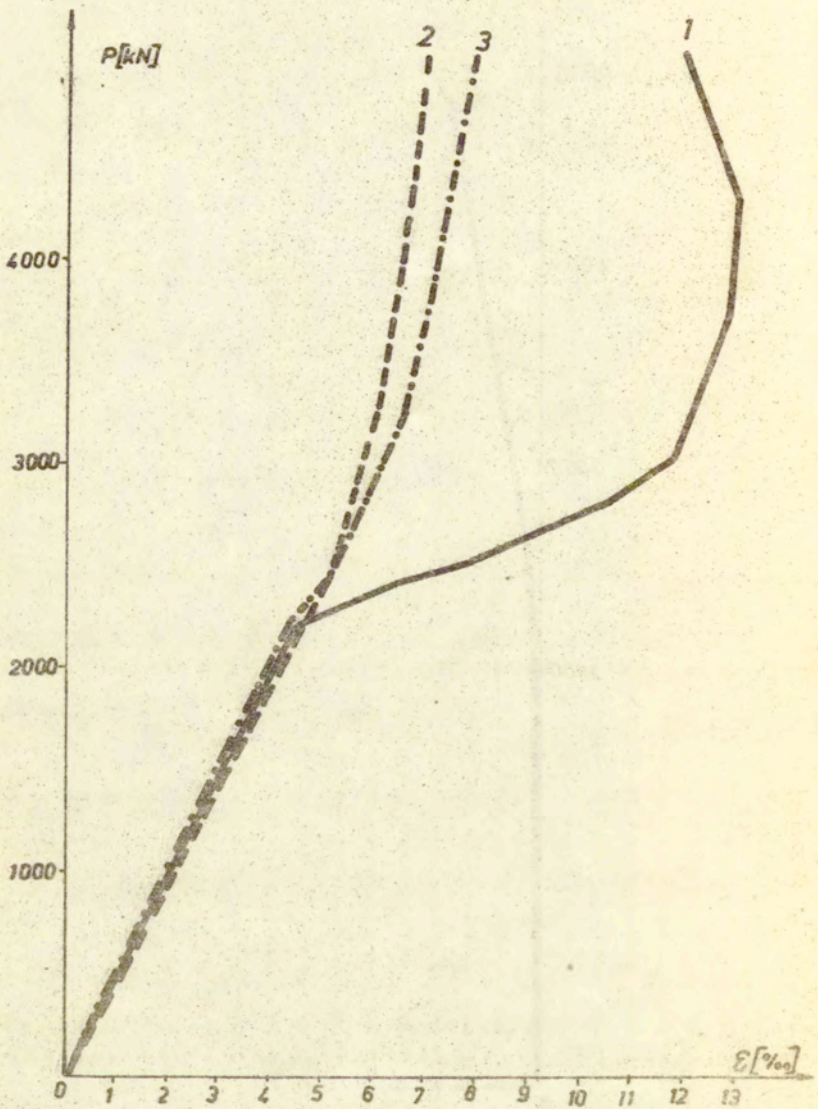
Rys. 31. Odształcenia betonu w trzech przekrojach słupa III-2.



Rys.32. Odkształcenia betonu w połowie wysokości słupa III-3.



Rys.33. Odształcenia betonu w połowie wysokości słupa III-4.



Rys.34. Średnie odkształcenia prętów w trzech przekrojach słupa III-2.

Wyniki badań odkształceń stali i betonu poszczególnych słupów serii II przedstawiono na rys.24 + 26.

Zniszczenie słupów nastąpiło przy obciążeniach podanych w tabelicy 2.

Charakter zniszczenia poszczególnych słupów pokazano na fotografiach 27 + 29.

Nośność słupa II-3 była tak niska dlatego, że jego zniszczenie nastąpiło wskutek lokalnego wyboczenia jednego pręta.

Wyniki badań odkształceń w poszczególnych słupach serii III przedstawiono na rys.30 + 33, a wyniki odkształceń stali w słupie III-2 na rys.34. Zniszczenie słupów nastąpiło przy obciążeniach podanych w tabelicy 2.

Charakter zniszczenia poszczególnych słupów pokazano na fotografiach 35 + 38. Na rys.29 pokazano odkute uzbrojenie słupa po zniszczeniu.

3.3. Porównanie wyników badań słupów ściskanych osiowo z wynikami analizy teoretycznej

Dla porównania obliczono nośność słupa żelbetowego na podstawie podręcznika L. Suwalskiego [10] i słupa z uzbrojeniem swobodnym.

Nośność słupa żelbetowego wynosi

$$/3/ \quad N = A_b R_s + \sum_{i=1}^n A_{a1} \sigma_{a1}$$

gdzie:

A_b - pole przekroju betonu,

A_a - pole przekroju stali,

R_s - wytrzymałość obliczeniowa betonu,

σ_a - granica plastyczności prętów uzbrojenia.

Przewidywana w obliczeniach nośność słupa żelbetowego poddanego badaniom ma wartość:

$$N_d = 0,0484 \times 21800 + 0,001963 \times 400000 + 0,000628 \times \\ \times 270000 = 1055 + 785 + 170 = 2010 \text{ kN.}$$

Rzeczywista nośność określona doświadczalnie była większa o około 14% i wynosiła 2290 kN.

Nośność słupów z uzbrojeniem swobodnym obliczono według tego samego wzoru, przyjmując zamiast granicy plastyczności Q_s , umowną granicę plastyczności $R_{0,2}$.

W tabelicy 2 zestawiono nośności obliczeniowe ściskanych osiowo słupów z uzbrojeniem swobodnym i nośności analogicznych słupów żelbetowych i porównano je z wynikami doświadczeń.

W pierwszej serii badań nośność słupa ściskanego osiowo z uzbrojeniem swobodnym była o 22% większa od nośności słupa żelbetowego. Warto przy tym zauważyć, że zniszczenie słupa nastąpiło na skutek wyciągnięcia strzemion i wybożenia lokalnego prętów /rys.19 i 20/. Wynika stąd, że wzmocnienie strzemion może spowodować zwiększenie nośności słupa.

W drugiej serii badań zniszczenie słupów II-1 i II-2 nastąpiło wskutek wyczerpania ich nośności /rys.27 i 28/. Nośność ich była większa od nośności słupa żelbetowego uzbrojonego klasycznie o 60%. Zniszczenie słupa II-3 nastąpiło wskutek wybożenia lokalnego jednego z prętów /rys.29/ i dlatego siła niszcząca była tak niewielka.

Zniszczenie słupów w trzeciej serii badań nastąpiło wskutek wyczerpania ich nośności. Jedynie w słupie III-1 zaobserwowano wcześniejsze lokalne wybożenie jednego pręta /rys.35/. Wzrost nośności tych słupów w stosunku do klasycznych żelbetowych wyniósł 52%, a w słupach o uzbrojeniu rozmieszczonym bliżej środka słupa nawet 63%.

W przypadku ściskania mimośrodowego nośność słupa z uzbrojeniem swobodnym była mniejsza niż nośność słupa żelbetowego. Wynikło to stąd, że obciążenie wystających prętów swobodnych było nierównomierne. Skrócenie dwóch z nich było na tyle duże w porównaniu ze skróceniem pozostałych, że górna głowica maszyny wytrzymałościowej oparła się o jedną krawędź korpusu betonowego słupa. Nastąpiło znaczne powiększenie mimośrodu i silne zginanie słupa /rys.21/.

4. Odkształcalność ściskanych prętów stalowych w osłonkach i obudowie betonowej

4.1. Cel i zakres badań

Istotne znaczenie ma znajomość odkształcalności prętów znajdujących się w osłonkach i obudowie betonowej pod działaniem sił ściskających oraz strat tych sił wzdłuż osi prętów. Informacje takie są konieczne do projektowania konstrukcji sprężono-rozprężonych [6]. Z tego względu zostały przedstawione wyniki badań odkształceń czterech prętów ze stali B50 o średnicy 25 mm do momentu, gdy długość ich stała się równa długości korpusu betonowego słupa. Do tego momentu badania dotyczyły ściskania prętów stalowych w osłonkach z folią płaskową umieszczonych w obudowie betonowej. Pręty wystawały z obudowy o około 12 mm. Rozmieszczenie tensometrów pokazano na rys.11.

Celem badań było:

- określenie sztywności na ściskanie prętów znajdujących się w osłonie i obudowie betonowej,
- określenie strat sił w prętach na ich długości.

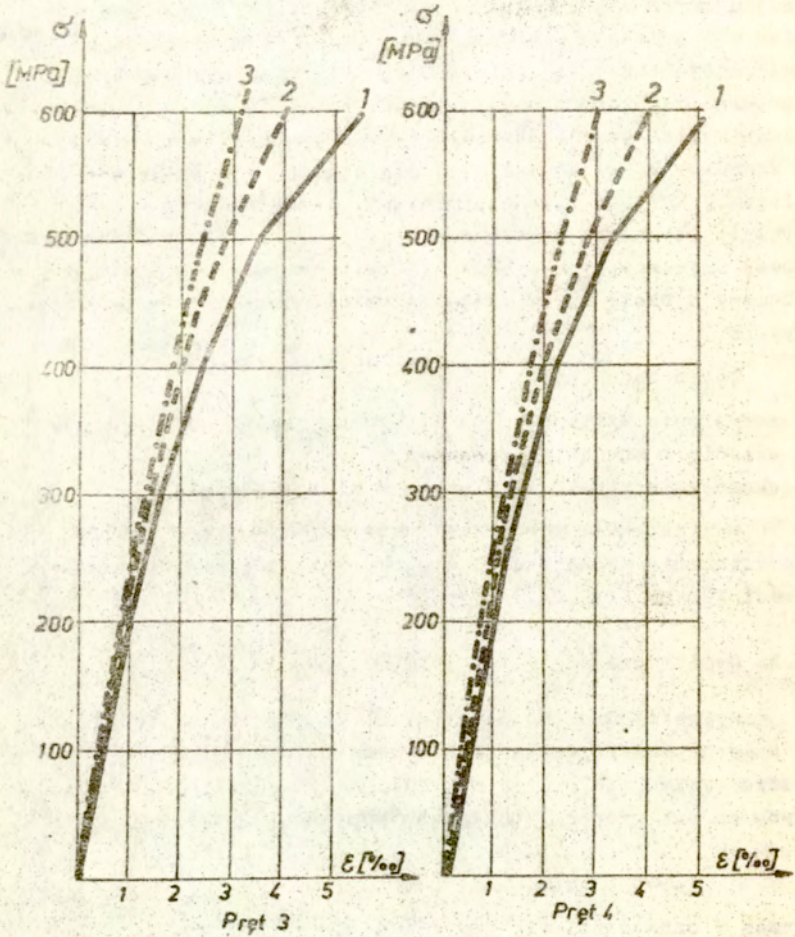
Wyniki badań porównano z omawianym poprzednio badaniem na ściskanie dwóch próbek stalowych z tych samych prętów o długości 125 mm /rys.9/.

4.2. Wyniki badań

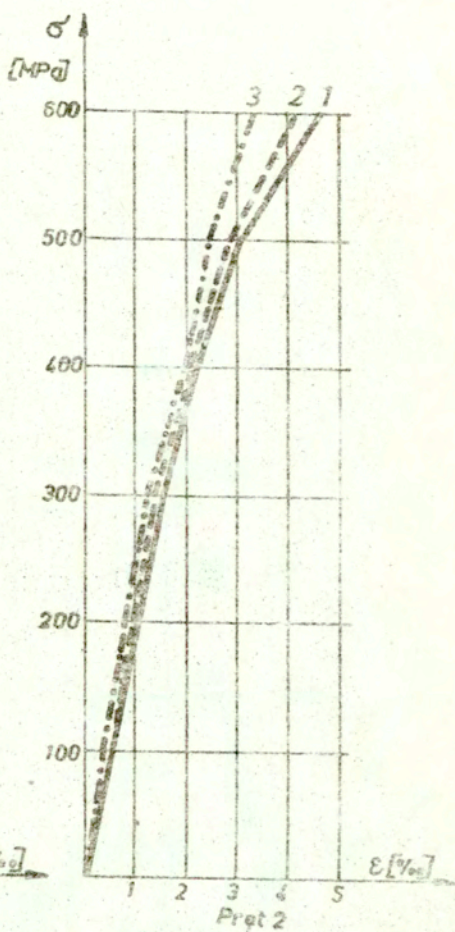
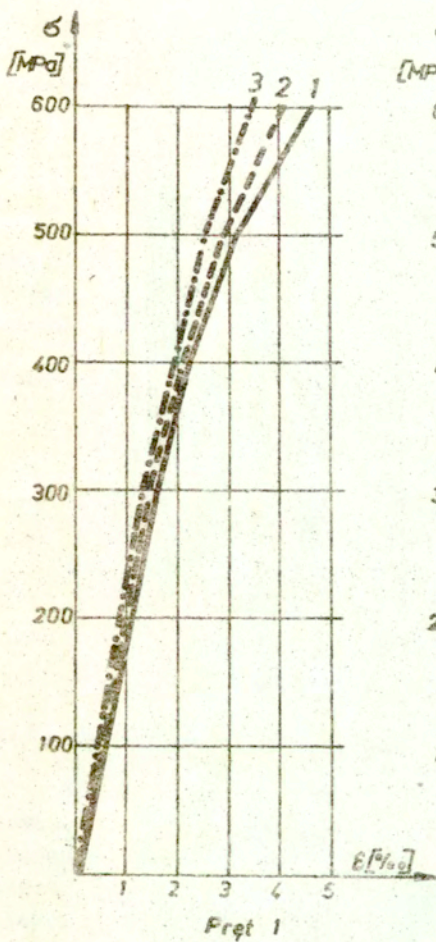
Wykresy odkształceń czterech prętów stalowych zamierzonych w trzech przekrojach przedstawione na rys.40. Średnie odkształcenia wszystkich prętów wykreślono na rys.41. Na rysunkach tych na osi pionowej odkładano naprężenia zastępcze

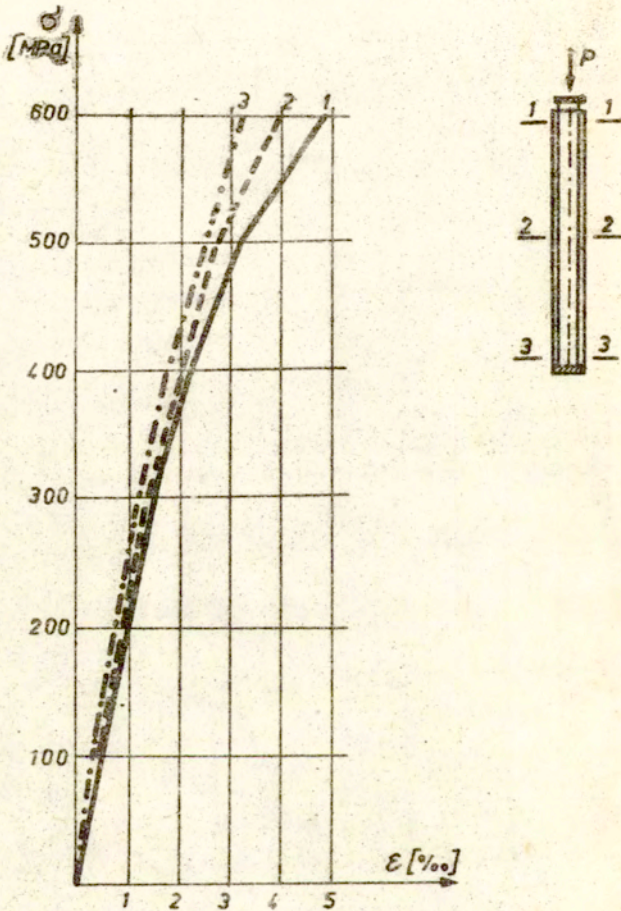
$$\sigma = \frac{P}{A}.$$

Przez P oznaczono siłę przyłożoną do górnej głowicy słupa, a przez A sumę pól przekrojów czterech prętów. Naprężenia rzeczywiste w poszczególnych przekrojach są mniejsze ze względu na



Rys.40. Wykresy odkształceń czterech prętów stalowych.





Rys. 41. Średnie odkształcenia prętów stalowych.

straty występujące wzdłuż osi prętów.

Na rys.42 pokazane zmniejszenie odkształceń w przekrojach 2 i 3 w stosunku do odkształceń w przekrojach 1 przy różnych naprężeniach. Dotyczy to średnich odkształceń czterech prętów.

W każdym przekroju pręta naklejone były po 2 tensometry. Różnice w odkształceniach są wynikiem lokalnych wygięć prętów. Przyjęto następującą miarę nierównomierności odkształceń w przekrojach prętów

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{2|\varepsilon_I^{(j)} - \varepsilon_{II}^{(j)}|}{\varepsilon_I^{(j)} + \varepsilon_{II}^{(j)}}$$

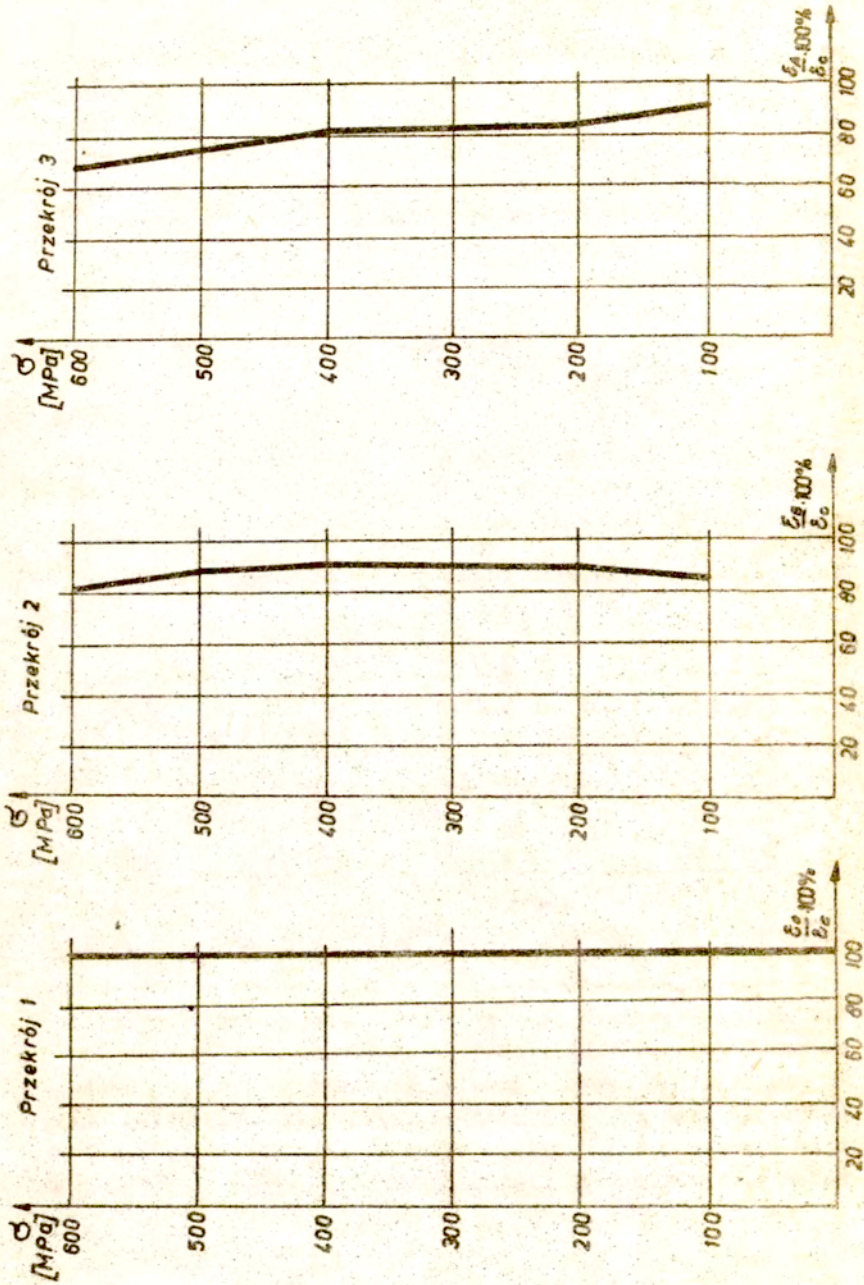
przez ε_I i ε_{II} oznaczono odkształcenia na dwóch bokach pręta; j - odpowiada kolejnym obciążeniom, a n jest liczbą poziomów obciążenia. Wielkości α zestawione w tabelicy 3.

Tabela 3. Współczynniki nierównomierności odkształceń α w przekrojach prętów

Przekrój	P r ę t			
	1	2	3	4
1	0,388	0,500	0,473	0,439
2	0,022	0,054	0,019	0,005
3	0,100	0,298	0,034	0,065

4.3. Omówienie uzyskanych wyników i wnioski

Szttywność na ściskanie prętów stalowych w rozpatrywanym zakresie odkształceń jest zmienna i maleje wraz ze wzrostem obciążeń /rys.40 i 41/. Przy wzroście naprężeń od 0 do 600 MPa odpowiadających umownej granicy plastyczności $R_{c 0,2}$ średnia sztywność tych prętów wynosi około 123 GN/m². Wielkość ta wynika zarówno z badań prętów w osłonkach /122,9 GN/m²/ jak i z badań próbek krótkich /123,5 GN/m²/.



rys. 49. Zmniejszenie średnich naprężeń wzdłuż długości przekrojów.

Zmniejszenie sztywności na ściskanie prętów w stosunku do współczynnika sprężystości stali $E = 210 \text{ GN/m}^2$ wynika z nieliniowego wykresu σ, ϵ i ze "zwięźkowania" prętów.

Przy obliczaniu skrócenia prętów rozprężających potrzebnego do uzyskania żądanej siły należy korzystać z wykresów odkształceń otrzymanych z badań stali o tej samej średnicy w czasie ścisłej próby statycznego ściskania i odpowiedniego współczynnika charakteryzującego warunki pracy tych prętów. Współczynnik ten zależny jest przede wszystkim od rodzaju osłonek. W przypadku opisywanych badań był on bliski jedności.

Średnie zmniejszenie odkształceń w poszczególnych przekrojach badanych prętów wynosiło:

- w odległości 1,15 m - 13%,
- w odległości 2,30 m - 19%.

Interpolując liniowo można przyjąć, że zmniejszenie to na pierwszym metrze wynosi 11%, a na drugim tylko 6%.

Na podstawie badań odkształceń trzech prętów w koszulkach plastikowych wykonanych poprzednio [6] stwierdzono, że przy odkształceniach rzędu 0,001 na długości 6,00 m zmniejszenie odkształceń wynosiło 27,5%. Przy tym samym poziomie odkształceń zmniejszenie to w obecnie omawianym badaniu wyniosło 10% po 1 m i 14% po 2 m.

Na podstawie powyższych wyników można stwierdzić, że straty odkształceń spowodowanych rozprężaniem są największe w pobliżu urządzenia rozprężająco-kotwiącego, a następnie maleją. W zakresie naprężeń użytkowych /do umownej granicy plastyczności/ wielkości strat można przyjmować równe 10% na pierwszym metrze i po 4% na metr na dalszym odcinku pręta.

Dość znaczne straty występujące natychmiastowo po obciążeniu prętów rozprężających spowodowane są przede wszystkim "zwięźkowaniem" prętów. Przy czym największe "zwięźkowanie" występuje w pobliżu przekrojów, w których przyłożona jest siła. Dotyczy to również reakcji wywołanej podparciem prętów. Stwierdzenie takie wynika z wielkości współczynników α zestawionych w tabelicy 3. "Zwięźkowanie" prętów uzbrojenia swobodnego i rozprężającego jest efektem wybooczenia sprężystego pod

działaniem siły ściskającej /rys.43/.



Rys.43. "Zwężykowanie" pręta w obudowie betonowej.

Długość wyboczeniowa pręta w zależności od jego odkształceń osiowych wynosi

$$l_w = \frac{\pi i}{\sqrt{\epsilon}}$$

przez i oznaczono promień bezwładności przekroju pręta.

W przypadku prętów o średnicy 25 mm i przy odkształceniach $\epsilon = 0,005$ długość wyboczeniowa wynosi 277 mm. Wynika stąd, że przy długości pręta około 2,50 m powstaje 9 fal.

"Zwężykowanie" prętów poza zwiększaniem strat nie wpływa ujemnie na pracę konstrukcji z uzbrojeniem swobodnym lub rozprężającym, gdyż pręty znajdują się w fazie sprężystej i zapewniają trwałe oddziaływanie na urządzenia rozprężająco-kotwiące wywołując żądane siły wewnętrzne.

Wielkość strat zależy od rodzaju osłonek, gatunku stali oraz naprężeń panujących w prętach.

5. Wymiarowanie słupów ściskanych osiowo z uzbrojeniem bez przyczepności

Na podstawie dotychczasowych rozważań i badań doświadczalnych zaproponowano następujące zasady wymiarowania słupów z uzbrojeniem bez przyczepności.

1. Słupy z uzbrojeniem bez przyczepności mogą być stosowane jako słupy ściskane osiowo o takiej smukłości, aby nie powstała możliwość ich wyboczenia, tzn.

$$\frac{l_w}{i} \leq 50.$$

Przez l_w oznaczono tu długość wyboczeniową słupa, a przez i - promień bezwładności przekroju.

W przypadku słupów prostokątnych warunek ten można przedstawić w postaci

$$\frac{l_w}{b} \leq 14,$$

b - oznacza mniejszy wymiar przekroju słupa.

2. Słupy z uzbrojeniem bez przyczepności mogą być projektowane na przeniesienie siły osiowej

$$P = A_b \bar{\sigma}_b + A_a \bar{\sigma}_a + A_s \bar{\sigma}_s.$$

We wzorze tym przyjęto oznaczenia analogicznie jak we wzorze /1/. Naprężenie dopuszczalne w uzbrojeniu bez przyczepności można przyjmować równe $0,55 R_r$.

Mogą być one również projektowane metodą nośności granicznej według wzoru

$$P = \frac{N}{S},$$

w którym nośność N obliczana jest z zależności /3/, a S oznacza współczynnik bezpieczeństwa.

3. Bardzo istotną sprawą przy projektowaniu słupów z uzbrojeniem bez przyczepności jest zabezpieczenie słupów przed zniszczeniem na skutek lokalnego wyboczenia pręta. Zabezpieczenie to polega na zaprojektowaniu dostatecznie gęstego rozstawu strzemion. Rozstaw strzemion wyznaczyć można na podstawie porównania naprężeń krytycznych powodujących wyboczenie pręta z naprężeniami niszczącymi pręt. W przypadku prętów okrągłych

$$\bar{\sigma}_{kr} = \frac{\pi^2 E d^2}{16 l_w^2}$$

i warunek pozwalający na wyznaczenie rozstawu strzemion ma postać

$$\frac{\pi^2 E d^2}{16 l_w^2} \geq R_r,$$

stąd

$$l_w \leq \frac{\pi d}{4} \sqrt{\frac{E}{R_r}}.$$

4. Różnica długości prętów swobodnych i korpusu betonowego słupa powinna być określona z warunku, aby jednocześnie były osiągnięte naprężenia dopuszczalne w betonie $\bar{\sigma}_b$ i naprężenia dopuszczalne w prętach uzbrojenia $\bar{\sigma}_s$

$$\Delta l = l \left(\varepsilon_s - \frac{\bar{\sigma}_b}{E_b} \right).$$

W stali odkształcenia ε_s odpowiadające naprężeniom $\bar{\sigma}_s$ powinny być określone na podstawie wykresu $\bar{\sigma}, \varepsilon$ analogicznych prętów w osłonkach i obudowie betonowej, albo na podstawie ścisłej próby statycznego ściskania tych prętów. W przypadku możliwości wgniatania prętów w płyty stalowe należy odpowiednio zwiększyć długość tych prętów.

6. Wnioski

Z rozważań teoretycznych potwierdzonych badaniami wynikają następujące wnioski.

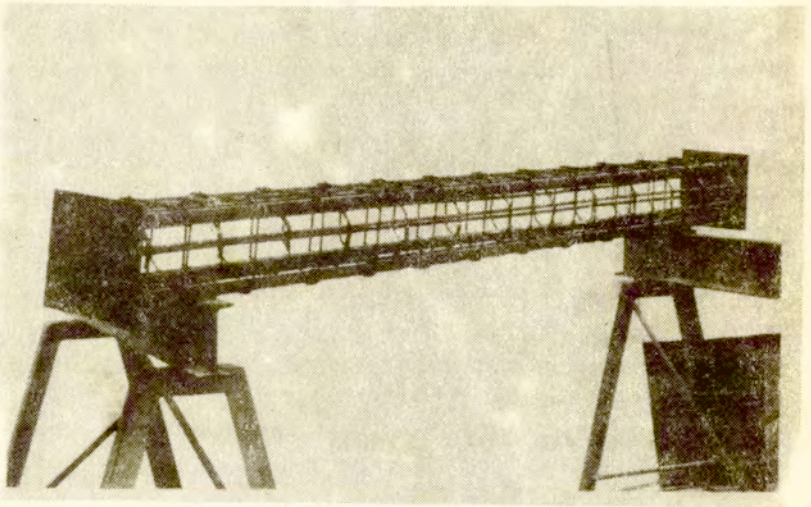
1. Stosowanie uzbrojenia bez przyczepności do betonu w słupach ściskanych osiowo jest celowe, gdyż powoduje znaczne zwiększenie ich nośności. Zwiększenie nośności jest tym większe im większą wytrzymałość ma stal prętów tego uzbrojenia. Zwiększenie nośności zależy też od wytrzymałości betonu i od stosunku pól przekrojów stali i betonu.
W przypadku zastosowania prętów ze stali 50 HFA zahartowanych uzyskano wzrost nośności słupa w stosunku do słupa żelbetowego klasycznego o takim samym przekroju wynoszący 52% pomimo użycia betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 75,7 MPa.
Wniosek powyższy dotyczy słupów ściskanych osiowo w sensie technicznym, tzn. dopuszczalne są niewielkie mimośrodowość spowodowane niedokładnym przyłożeniem obciążenia, czy też niejednorodnością słupa.
2. Stosowanie uzbrojenia bez przyczepności zwiększa nośność słupów tylko wtedy, gdy o nośności decyduje ściskanie a nie wyboczenie, to znaczy zwiększa nośność słupów o dostatecznie małej smukłości.
3. Słupy z uzbrojeniem swobodnym powinny być stosowane w przypadku ściskania osiowego. W przypadku ściskania mimośrodowego /z małym mimośrodem/ można stosować słupy rozprężone, przy czym pręty powinny być rozprężone niejednakowo. Dotyczy to przypadku, gdy moment zginający ma stały zwrot. W przypadku momentów o zmiennych zwrotach nie należy stosować uzbrojenia bez przyczepności.
4. Istotne znaczenie dla nośności słupów z uzbrojeniem bez przyczepności ma także zaprojektowanie strzemion, aby nie mogło nastąpić zniszczenie słupa spowodowane lokalnym wyboczeniem prętów.

5. Nośność słupa zależy również od rozmieszczenia prętów swobodnych lub rozprężających w przekroju poprzecznym słupa. Umieszczenie prętów w środkowej części przekroju utrudnia zniszczenie słupa przez wyboczenie prętów i odłupanie otuliny betonowej. W trzeciej serii badań słupy III-2 i III-4 o prętach umieszczonych bliżej środka słupa /rys.7/ miały nośność o 14% większą od nośności słupów III-1 i III-3 o prętach umieszczonych w narożach /rys.8/.
6. Różnica długości prętów swobodnych i betonowego korpusu słupa musi być właściwie dobrana. Zbyt duża może doprowadzić do przekroczenia umownej granicy plastyczności w stali przed włączeniem się betonu do współpracy; zbyt mała - prowadzi do niewykorzystania stali i zmniejszenia efektów stosowania uzbrojenia swobodnego.
7. Przeprowadzone badania pozwalają również na określenie sztywności na ściskanie prętów swobodnych lub rozprężających znajdujących się w osłonkach i obudowie betonowej, co jest konieczne przy projektowaniu konstrukcji sprężono-rozprężonych. Badania te umożliwiły określenie wielkości strat siły rozprężającej wzdłuż osi pręta.

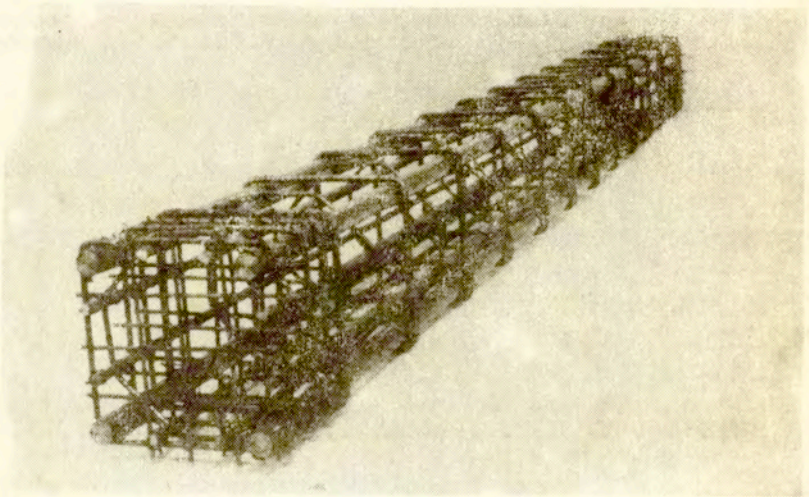
Literatura cytowana w tekście

1. Drewnowski S., Marks W., Koncepcja słupów z uzbrojeniem swobodnym, Inżyn. i Budow., 6, 1977.
2. Drewnowski S., Marks W., Grzebieniowski J., Skawiński M., Karwowski J., Słupy żelbetowe z uzbrojeniem swobodnym, Patent PRL 114899.
3. Drewnowski S., Marks W., Kapel J., Kowalski L., Skawiński M., Szwejkowski W., Zakotwienie śrubowe do rozprężania elementów konstrukcji betonowych, Patent PRL 106791.
4. Drewnowski S., Marks W., Słupy z uzbrojeniem rozprężającym, Mat. Konf. Nauk. Wydz. Inż. Łąd. Pol.Warsz., Warszawa 1977.

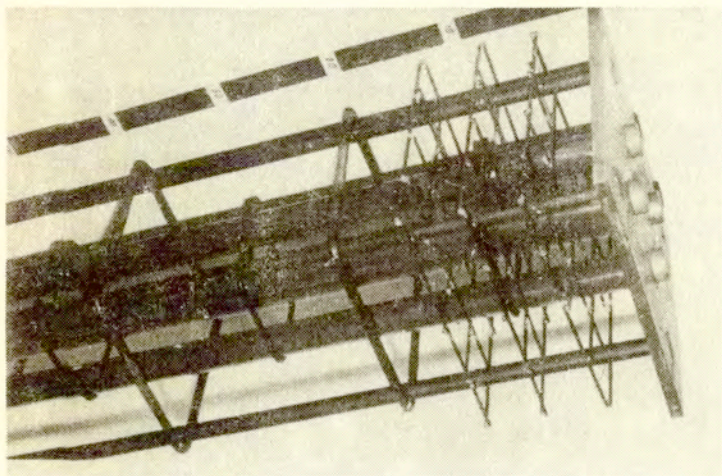
5. Drewnowski S., Marks W., Grzebieniowski J., Skawiński M.,
Słupy żelbetowe z uzbrojeniem aktywnym, Patent PRL 135754.
6. Drewnowski S., Betonowe konstrukcje mostowe sprężono-roz-
prężone, Studia z Zakresu Inżynierii Nr 17, PWN 1978.
7. Johns M., Post compression prestressing techniques,
Civil Engineering, 11, 1976.
8. Marks W., Skawiński M., Stańczyk A., Okształcalność ści-
skanych prętów stalowych w osłonkach i obudowie betonowej,
Inżyn. i Budow., 5, 1981.
9. Marks W., Stańczyk A., Doświadczenia nad zastosowaniem
techniki sprężanie z jednoczesnym rozprężaniem, Prace IBDM,
1-2, 1982.
10. Suwalski L., Żelbet, Arkady 1963.



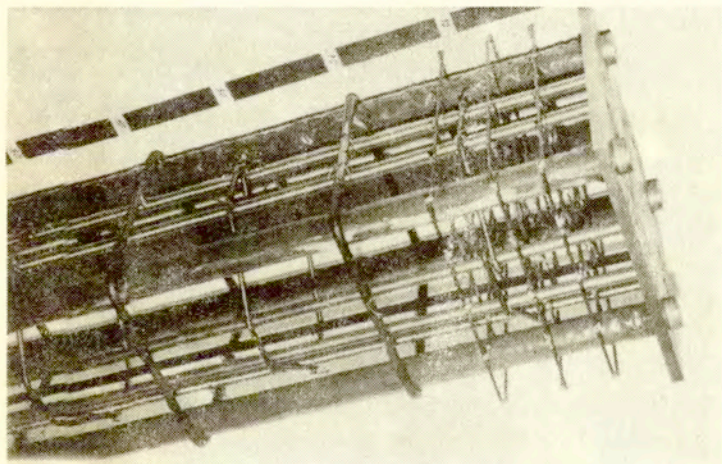
Rys.4. Uzbrojenie słupów I-1 i I-2.



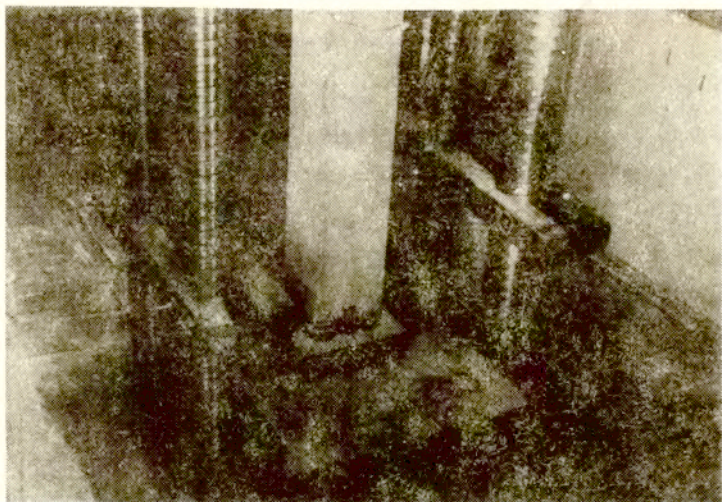
Rys.5. Uzbrojenie słupów serii II.



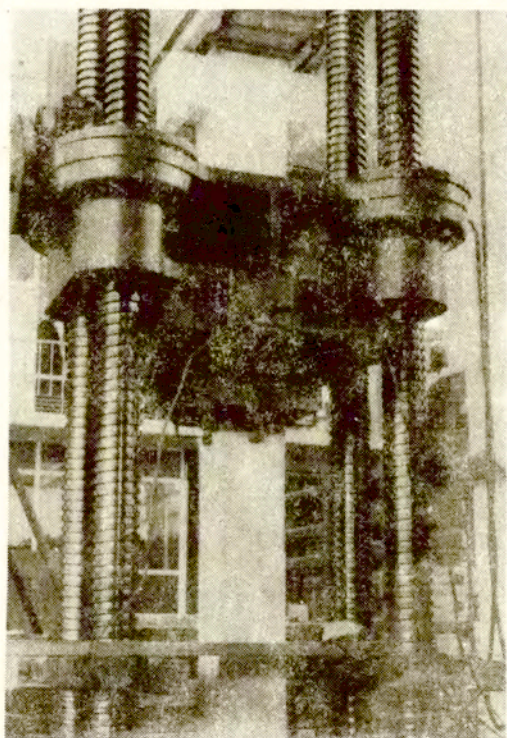
Rys. 8. Uzbrojenie słupów III-2 i III-4.



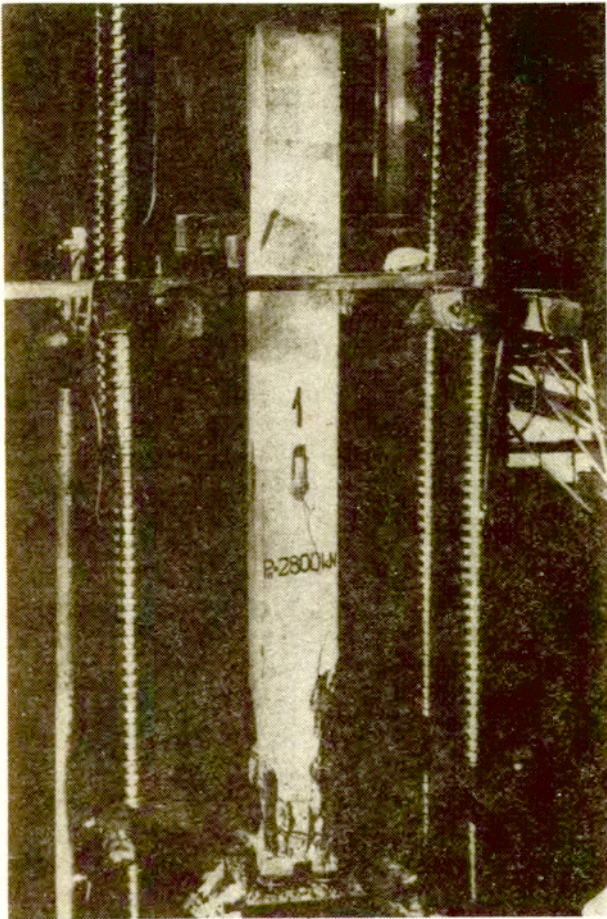
Rys. 7. Uzbrojenie słupów III-1 i III-3.



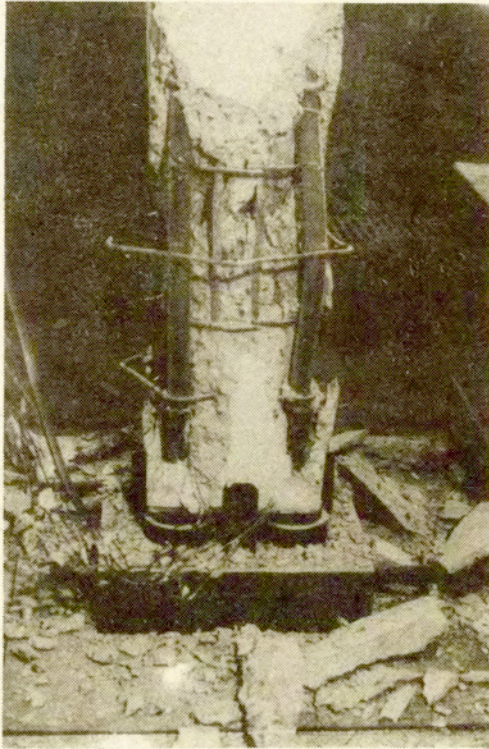
Rys.13. Głowica dolna do przekazywania obciążenia na słup.



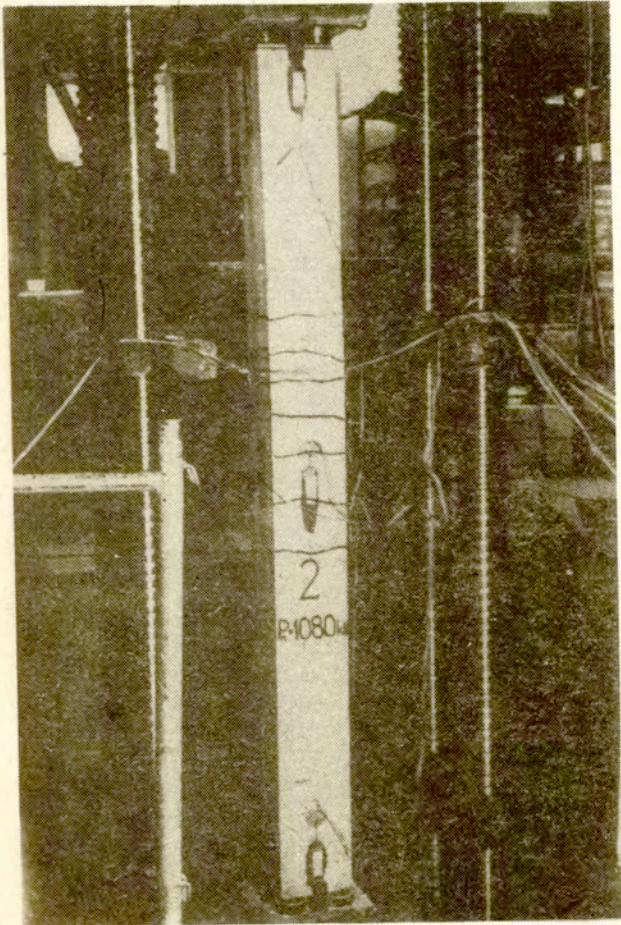
Rys.14. Głowica górna do przekazywania obciążenia na słup.



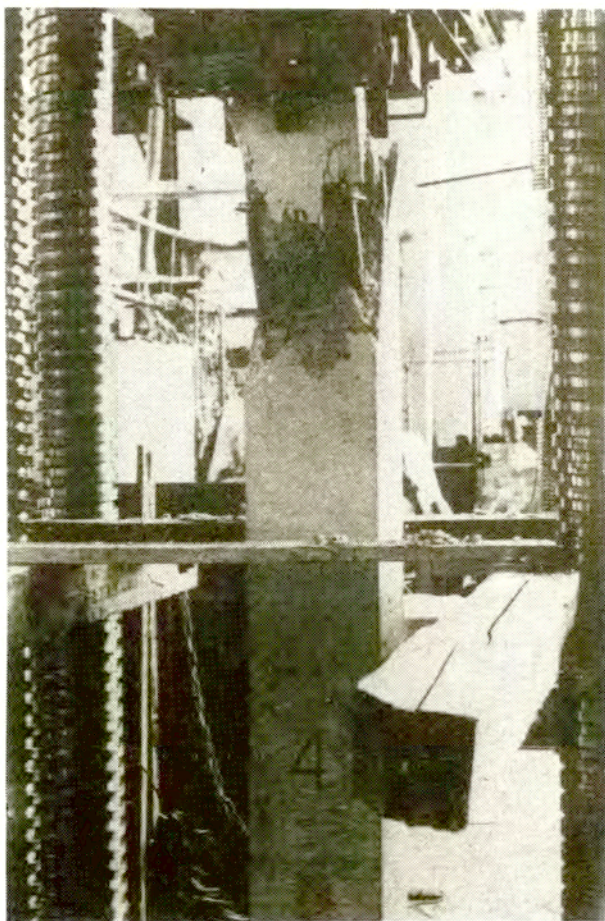
Rys.19. Słup I-1 po zniszczeniu.



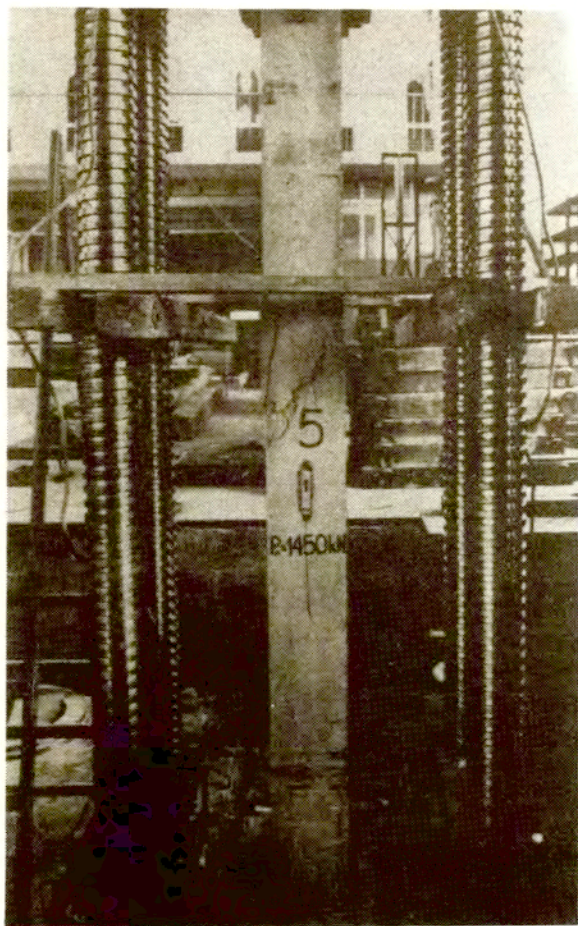
Rys.20. Fragment słupa I-1 po zniszczeniu; widoczne wyciągnięte strzemiona.



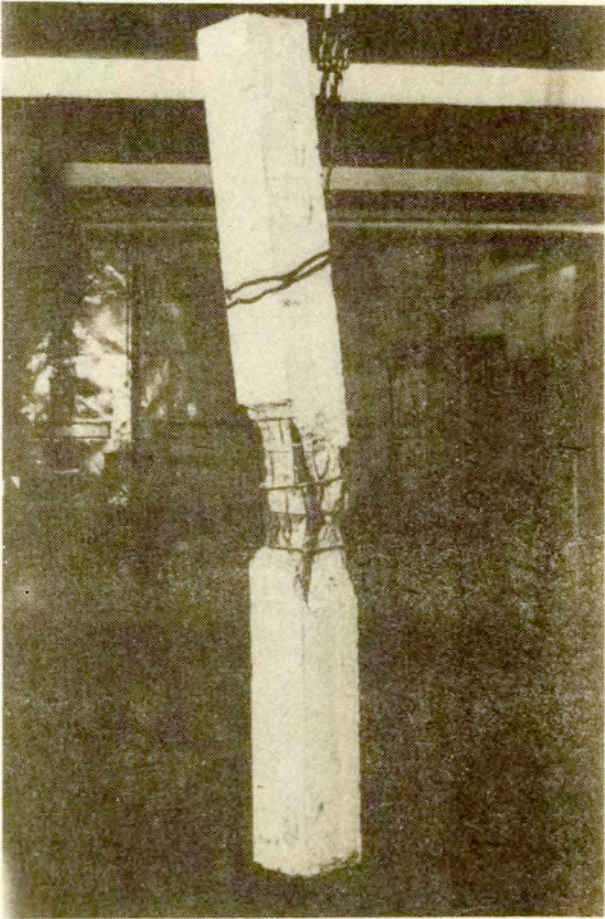
Rys. 21. Słup I-2 po zniszczeniu.



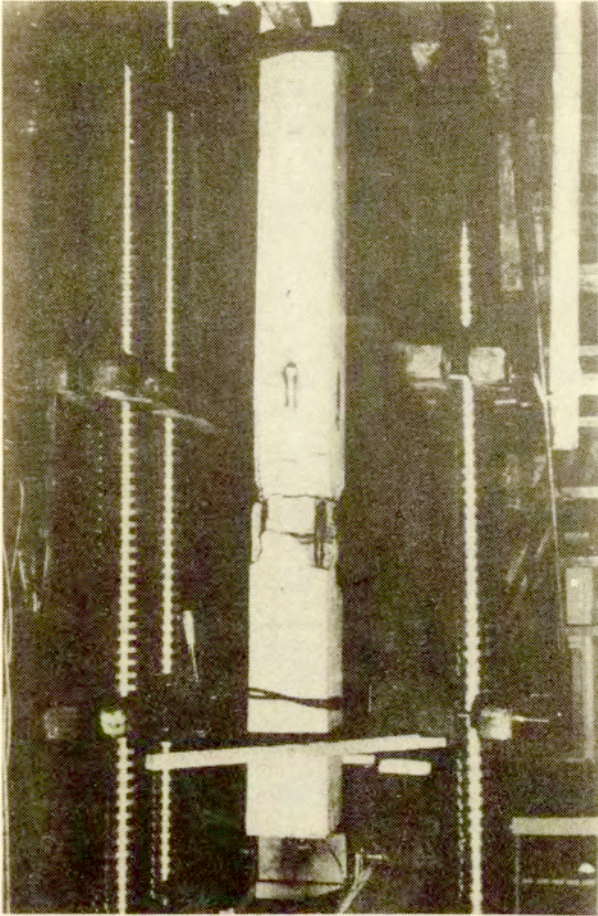
Rys.22. Słup I-3 /numer roboczy 4/ po zniszczeniu



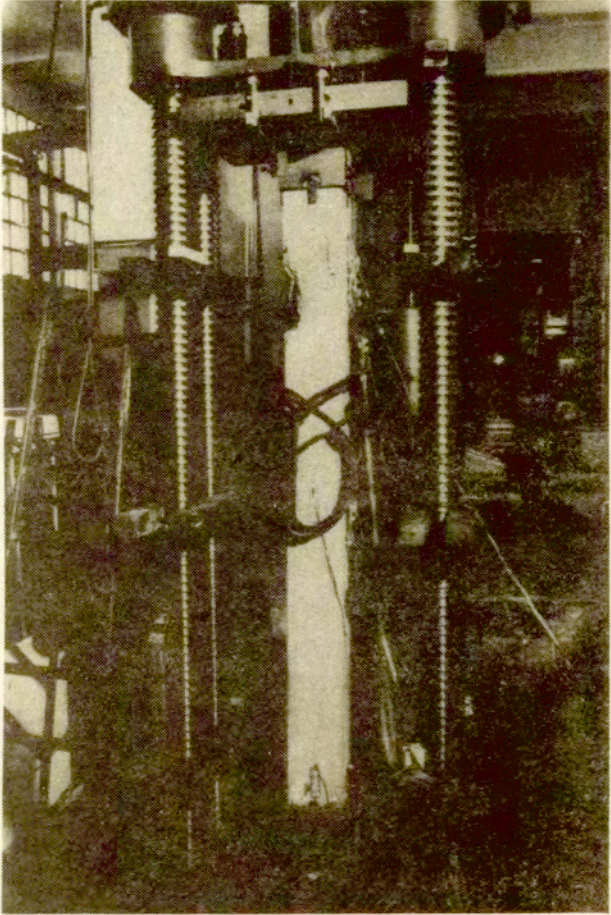
Rys. 23. Słup I-4 /numer roboczy 5/ po zniszczeniu.



Rys.27. Słup II-1 po zniszczeniu.

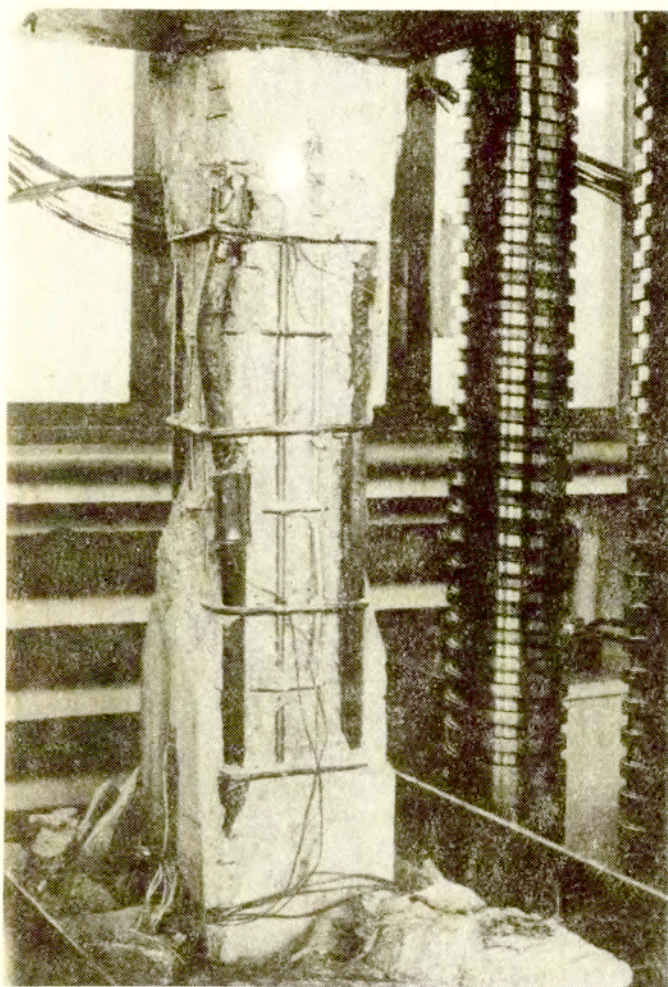


Rys.28. Słup II-2 po zniszczeniu.

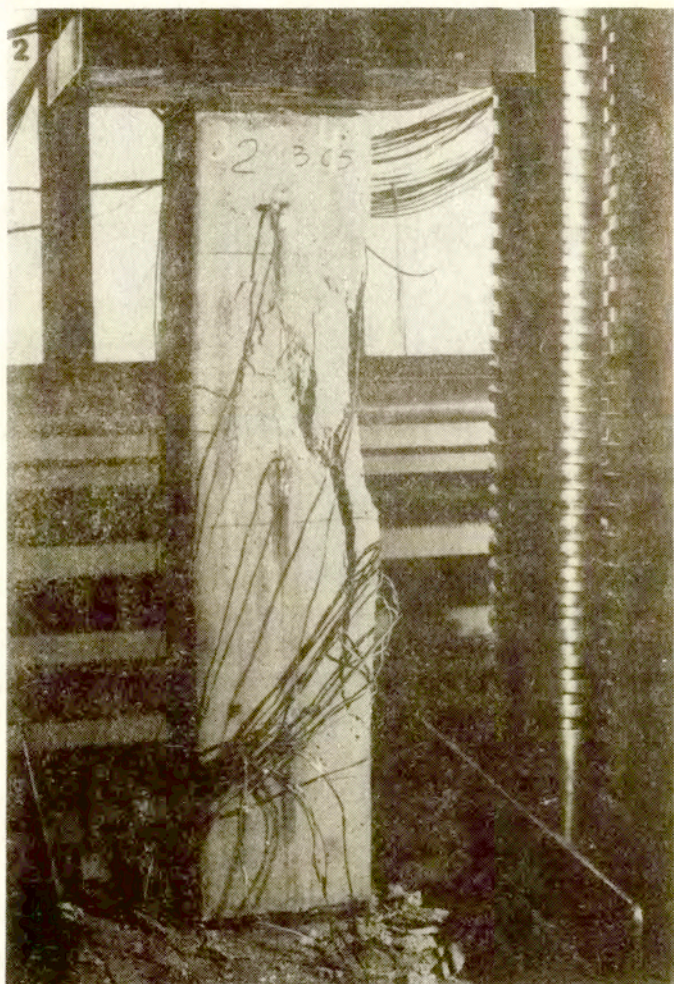


Rys.29. Słup II-3, po zniszczeniu.

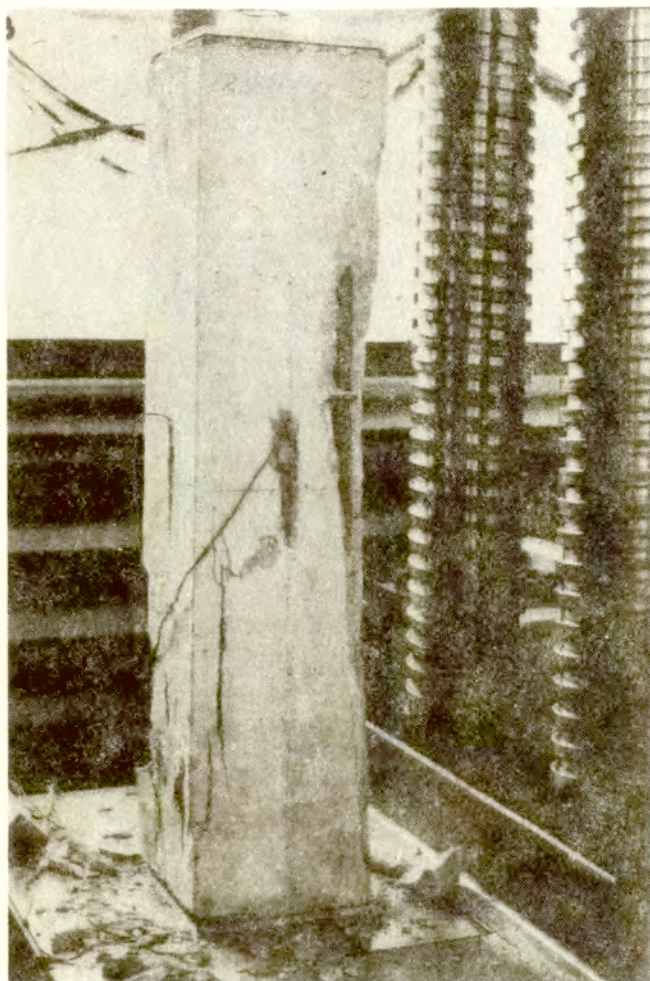
<http://rcin.org.pl>



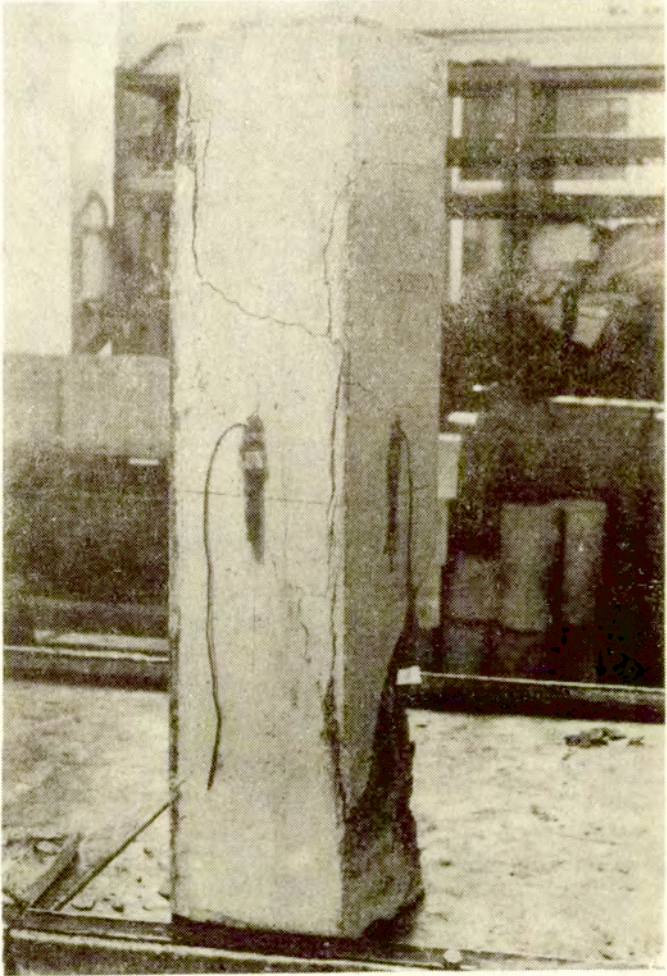
Rys. 35. Słup III-1 po zniszczeniu.



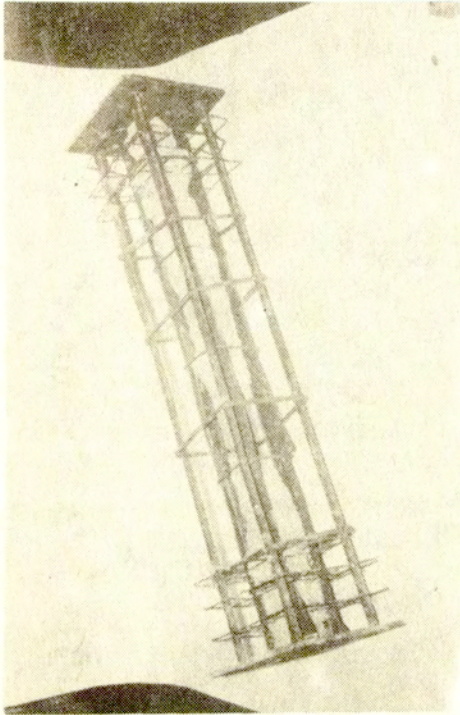
Rys.36. Słup III-2 po zniszczeniu.



Rys.37. Słup III-3 po zniszczeniu.



Rys.38. Słup III-4 po zniszczeniu.



Rys.39. Uzbrojenie słupa po zniszczeniu.

Badania wytrzymałościowe słupów
betonowych z uzbrojeniem bez
przyczepności

S t r e s z c z e n i e

W pracy przedstawiono koncepcję i wyniki badań nośności słupów betonowych z uzbrojeniem głównym bez przyczepności do betonu.

Zastosowanie uzbrojenia bez przyczepności do betonu umożliwia pełne wykorzystanie naprężeń w stali wysokiej wytrzymałości i przez to pozwala na znaczne zwiększenie nośności słupów w stosunku do klasycznych słupów żelbetowych o takim samym przekroju uzbrojenia. Jako uzbrojenie bez przyczepności do betonu mogą być stosowane pręty swobodne, o większej długości niż korpus betonowy słupa i pręty rozprężające.

W pracy przedstawiono wyniki trzech serii badań słupów z uzbrojeniem swobodnym o wymiarach $0,22 \times 0,22 \times 2,50$ m. Uzbrojenie swobodne każdego ze słupów stanowiły cztery pręty o średnicy 25 lub 22 mm ze stali 50 HSA owinięte dwukrotnie folią plastikową. Stwierdzono wzrost nośności słupów o około 60%. Wzrost ten występuje wtedy, gdy o nośności słupów decyduje ściskanie, a nie wyboczenie. Istotne znaczenie ma także wykonanie strzemion, aby nie mogło nastąpić lokalne wyboczenie prętów.

Opisano również badanie odkształceń prętów stalowych w osłonkach i obudowie betonowej i podano sposób obliczania różnicy długości prętów swobodnych i korpusu betonowego słupa.