

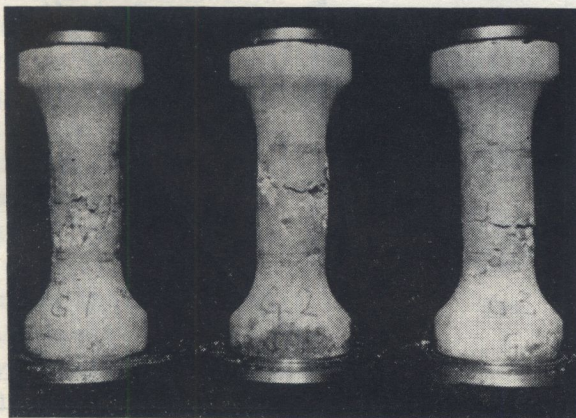
## BADANIE NOŚNOŚCI GRANICZNEJ RAM SPRĘŻONYCH

JERZY PIETRZYKOWSKI (WARSZAWA)

Praca podaje przebieg i wyniki badań doświadczalnych nad nośnością graniczną trzech zamkniętych, kablobetonowych ram modelowych, poddanych obciążeniom pionowym. Celem badań była częściowa weryfikacja zaleceń Komitetu Instytutów Badawczych w Londynie, [1], na temat projektowania statycznie niewyznaczalnych konstrukcji sprężonych. Doświadczenia przeprowadzono w Laboratorium Wydziału Inżynierii Uniwersytetu w Cambridge.

Wyniki pomiarów odkształceń, ugięć i deformacji wykazują dobrą zgodność z teoretycznymi rozważaniami zawartymi w sprawozdaniu wymienionego Komitetu. Pomimo znacznej pracochłonności zalecana przez Komitet metoda może być dobrą wskazówką przy projektowaniu sprężonych ustrojów hiperstatycznych.

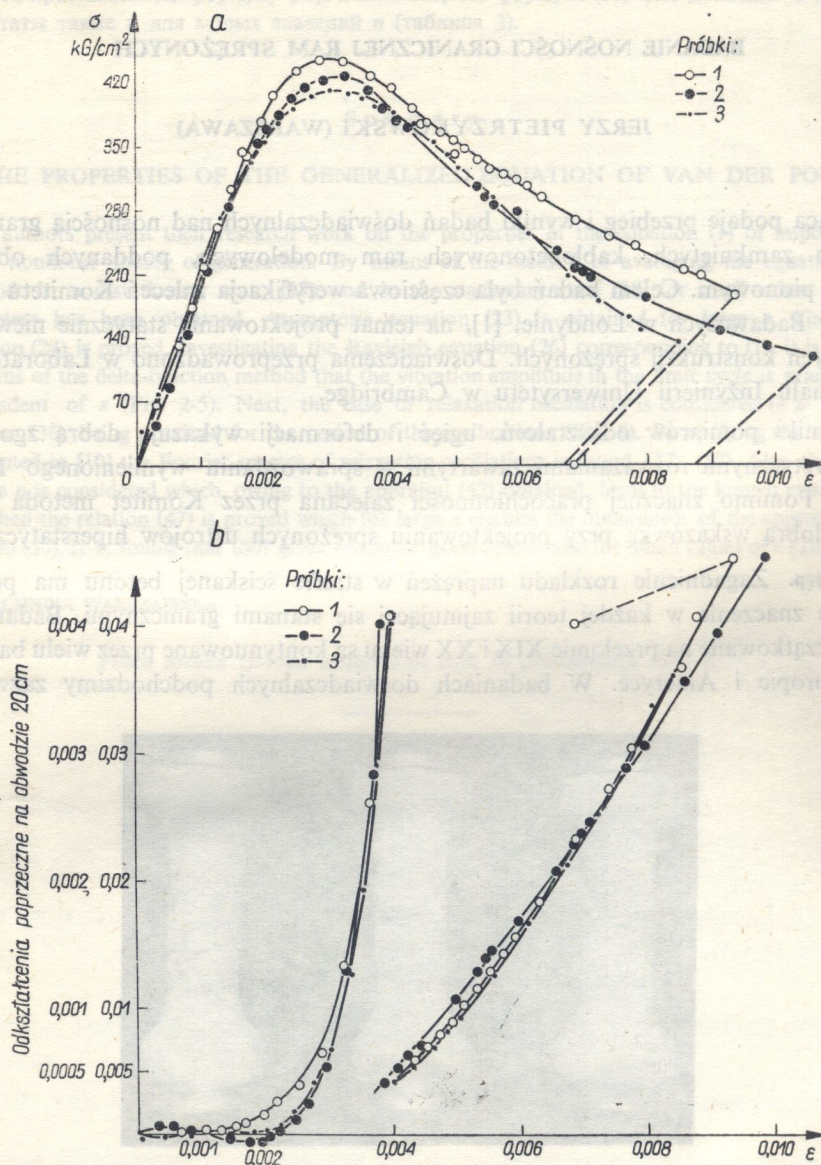
**Wstęp.** Zagadnienie rozkładu naprężeń w strefie ściskanej betonu ma podstawowe znaczenie w każdej teorii zajmującej się stanami granicznymi. Badania te zapoczątkowane na przełomie XIX i XX wieku są kontynuowane przez wielu badaczy w Europie i Ameryce. W badaniach doświadczalnych podchodzimy zazwyczaj



Rys. 1

do tego problemu od strony granicznych odkształceń, które są łatwiejsze do zmierzenia. Przeprowadzone doświadczenia oparto na metodzie projektowania konstrukcji żelbetowych według teorii nośności granicznej oraz teorii przegubów plastycznych

podanej przez A. L. L. BAKERA, [2]. Wielkości stałych związanych z blokiem naprężeń dla odkształceń granicznych przyjęto zgodnie z pracą E. HOGNESTAD, N. W. HANSON i D. MCHENRY, [3]. Przy zarysowaniu odkształcenia w stali są większe od wartości średnich (w przekroju zarysowanym), ponieważ wskutek nagłego



Rys. 2

utracenia przyczepności stal przejmuje naprężenia przenoszone przez beton. Dla ujęcia tych zjawisk w obliczeniach należy zastosować współczynnik proporcjonalności pomiędzy odkształceniami w stali a odkształceniami w betonie.

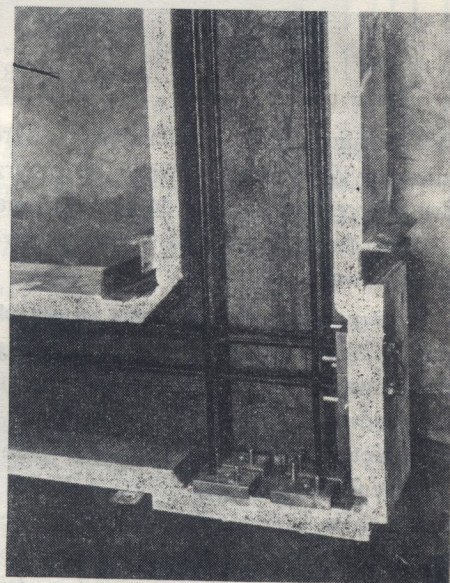
Wielkość obciążenia niszczonego statycznie niewyznaczalnej ramy sprężonej przyjęto według obliczeń podanych w pracy A. MOSS-MORRISA, [4]. Przeprowadzono niezależne obliczenia odkształceń dla betonu i stali. W ujęciu teorii plastyczności niezmiernie istotne jest w pierwszym rzędzie ustalenie definicji zniszczenia. W badaniach przyjęto sformułowanie podane przez J. F. BAKERA, [5].

Celem badań było wyjaśnienie rzeczywistego procesu towarzyszącego obciążeniu aż do zniszczenia sprężonej ramy żelbetowej i skonfrontowanie wyników doświadczalnych z teorią nośności granicznej zalecaną dla projektowania.

**Materiały i system sprężania.** Badania przeprowadzono przy użyciu normowanych materiałów (według standartów angielskich). Zastosowano cement portlandzki szybko wiążący. Mieszanke zaprojektowano według typowych dla betonu sprężonego rozwiązań przy współczynniku cementowo-wodnym 0,45 oraz stosunku wagowym kruszywa do cementu równym 5,0. Przyjęta wytrzymałość kostkowa betonu po 28 dniach wynosiła  $460 \text{ kg/cm}^2$ .

Beton odpowiadał warunkom dobrej urabialności i wysokiej wytrzymałości we wczesnym wieku, co miało zredukować straty na sprężeniu, wynikłe z pełzania.

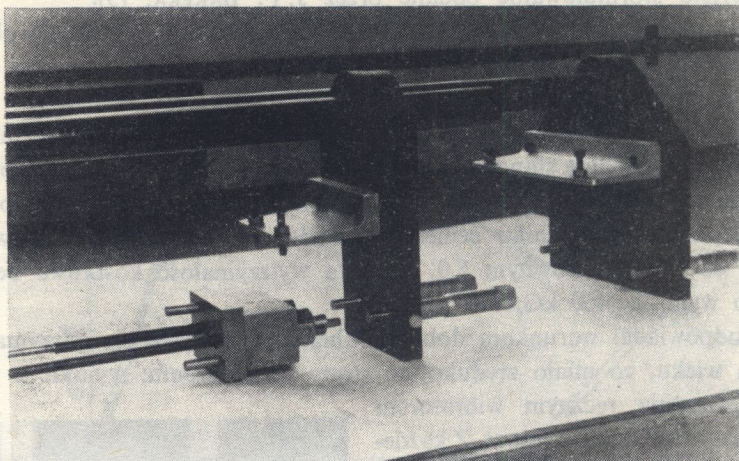
Czas zagęszczania ręcznym wibratorem wgłębnym wynosił około 4 minut. Z każdego zarobu mieszanki betonowej pobrano 6 próbek normowych do badań wytrzymałościowych na ściskanie oraz wykonano trzy próbki specjalne (por. rys. 1) do wyznaczenia pełnej krzywej materiałowej naprężenie-odkształcenie. Badania tych próbek przeprowadzono na nowej maszynie probierczej o stałym, programowanym przyroście odkształceń, [6]. Jak wiadomo, po osiągnięciu maksymalnych naprężeń, a przed wyczerpaniem pełnej nośności, beton zdolny jest jeszcze do przeniesienia znacznych odkształceń przy opadającej krzywej naprężeń. Rysunek 2 ilustruje krzywą materiałową użytego betonu. Uzyskana stąd wartość bloku naprężeń ściskanego betonu była użyta do obliczeń. Zbrojenie składało się w tym przypadku



Rys. 3

z 4 prętów stalowych średnicy około 5 mm z wysokowartościowej stali o wytrzymałości około  $16,500 \text{ kg/cm}^2$ . W celu zabezpieczenia otworów w betonie dla prętów sprężających ułożono w formie (nawleczone w rurki plastikowe) pręty stalowe z miękkiej stali, które lekko naprężono zakotwiając je w ściankach formy dla przeciwdziałania zwirzeniom w czasie betonowania i wibrowania (rys. 4). Po stwardnieniu betonu pręty wyciągano łącznie z rurkami plastikowymi i zastępowano je stalą sprężającą. System zakotwienia i naciągania poszczególnych drutów wyjaśnia rys. 3. Każdy drut zaklinowany był na obu końcach w tulejkach nagwintowanych na zewnętrznym

obwodzie. Tulejki te wkręcane były w bloki oporowe stykające się z ramą poprzez zabetonowane płytki stalowe widoczne na rys. 4. Tulejka i blok oporowy na jednym końcu drutu miały gwint lewy, zastaw zaś na drugim końcu gwint prawy. Przez równoczesny obrót kluczem obu tulejek pręt wydłużał się nie ulegając skręceniu.



Rys. 4

Wydłużenie drutów, pozwalające na określenie naprężenia, rejestrował czuły mikromierz stykowy zainstalowany na przyrządzie widocznym na rys. 3. Poszczególne druty sprężone zostały do wartości naprężeń stałych rzędu  $11,000 \text{ kG/cm}^2$ . Po siedmiu dniach od chwili sprężenia otwory wraz z drutami zainjektowano zaprawą cementową 2 : 1.

**Przebieg prac badawczych oraz metoda obciążenia i pomiarów.** Wszystkie trzy badane ramy miały takie same wymiary i przekroje, które są widoczne na rys. 5. Betonowanie i badania przeprowadzono w pozycji leżącej, przy czym do badań ramy odwracane były do góry nogami w stosunku do pozycji betonowania. Kształt zamkniętej ramy pomyślany był jako fragment ramy wielopiętrowej. Przyjęte obciążenia wynosiły: w słupach  $P$ ,  $2P$  oraz  $4P$ ; w belkach (przęsłach)  $P/2$  oraz  $P$  działając w połowie lub w  $1/4$  rozpiętości (rys. 9, 10, 11). Do obciążeń użyto lewarów hydraulicznych 6, 10 i 30 tonowych obsługiwanych za pomocą ręcznej bądź elektrycznej pompy o ciągłym działaniu i kontrolowanym przyroście i spadku ciśnienia w każdym lewarze.

W czasie badań rama podparta była w czterech narożach na dwu prostopadłych, leżących nad sobą układach rolek, zapewniających swobodny przesuw. Stały poziom ramy w czasie badań kontrolowany był za pomocą dwu poziomic umocowanych do ramy.

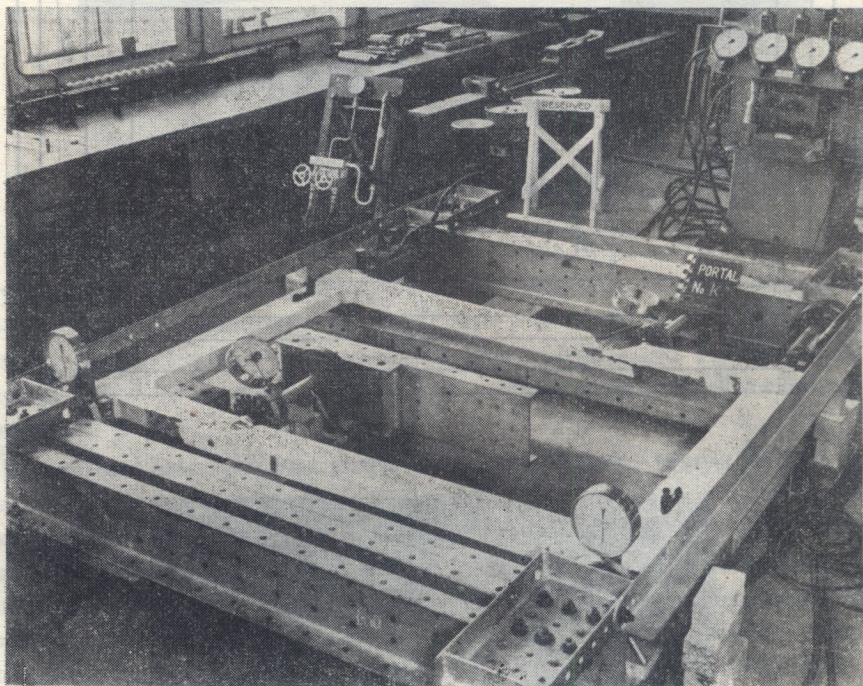
Odształcenia mierzono w sześciu przekrojach oznaczonych na rys. 5 cyframi rzymskimi za pomocą 5-calowego aparatu «Demec». W każdym przekroju mierzono odształcenia w sześciu punktach widocznych na rys. 6.

Ugięcia mierzono za pomocą czujników zegarowych zamontowanych na ramkach stalowych. Miejsca pomiaru odształceń oznaczono na rys. 5 cyframi arabskimi.



Analiza wyników badań doświadczalnych. Pomiaru obciążeń i odkształceń wykonane były z dokładnością do  $\pm 5\%$ . Interpretacja wyników oparta została na założeniu płaskich przekrojów. Do obliczeń przyjmowano wartości obciążeń mierzonych od zera. Błąd popełniany przy obliczaniu wykresów siła-krzywizna był mniejszy niż wynikający z odczytów odkształceń.

Wielkości ugięć przy obciążeniach mniejszych od połowy obciążenia niszczącego były mniejsze od założonych. Przy osiągnięciu wartości 0,75 obciążenia niszczącego ugięcia gwałtownie wzrastały. Początkowe zarysowania występujące na ryglach zaobserwowano przy obciążeniach wynoszących 62% obciążenia niszczącego ramy  $G_1$  oraz 65% obciążenia niszczącego ramy  $G_2$ . Kruszenie strefy ściskanej betonu wystąpiło w obu przypadkach przy 89% obciążenia krytycznego.



Rys. 7

Analogiczne zjawiska przy obciążaniu ramy  $G_k$  zanotowano przy 66% (rysy) i 92% (kruszenie) obciążenia niszczącego.

Nośność konstrukcji została wyczerpana z chwilą utworzenia mechanizmu złożonego z 6 przegubów, po trzy na każdym ryglu. Schemat zniszczenia dla ram  $G_1$  i  $G_2$  był jednakowy. Ramę  $G_k$  po zniszczeniu pokazuje rys. 7. Sposób obciążania, w przypadku ram  $G_1$  i  $G_2$ , i wielkość obciążenia nie miały istotnego wpływu na rozkład przegubów na ramie. We wszystkich przypadkach przeguby plastyczne wystąpiły bezpośrednio pod siłą działającą na ryglu oraz w narożach w odległości około 5 cm od słupa (uwzględniając skosy). Schematy powstałych przegubów, widoczne

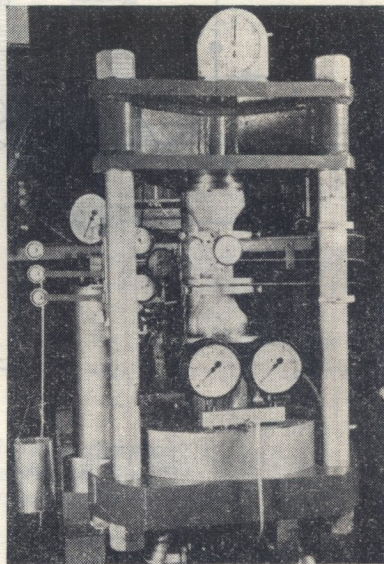
na rys. 9, 10 i 11, zgodne były z ustaleniami teoretycznymi. Naroża nie były dodatkowo zbrojone.

W przypadku bardziej skomplikowanych konstrukcji właściwe przyjęcia przegubów w rozważaniach teoretycznych zależne jest od wyczucia i doświadczenia konstruktora. Jest to słabą stroną teorii przegubów plastycznych, ale nawet przy nieco niewłaściwym obraniu tych punktów nie popełnia się wielkiego błędu w oszacowaniu nośności. W omawianym przypadku właściwe obranie miejsc powstania przegubów plastycznych było oczywiste.

Ze względu na wyłącznie pionowe obciążenie badanych ram słupy w chwili załamania wykorzystane były tylko w 55%. Nośność słupa ramy  $G_k$ , zbadanego osobno na osiowe ściskanie, wyniosła 42,6 ton.

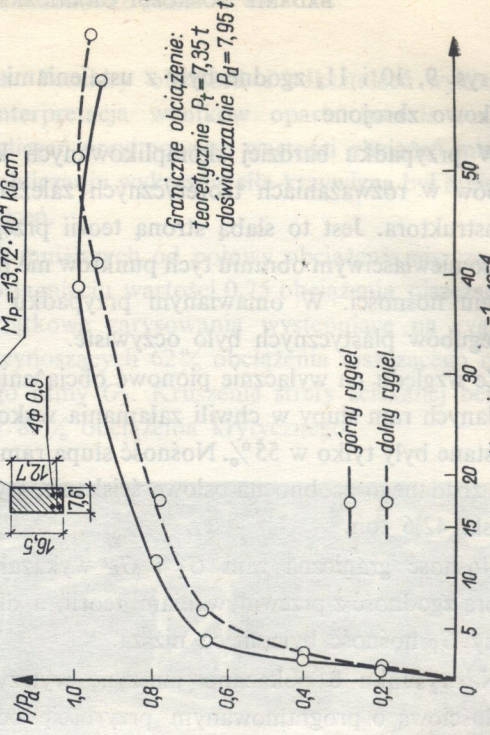
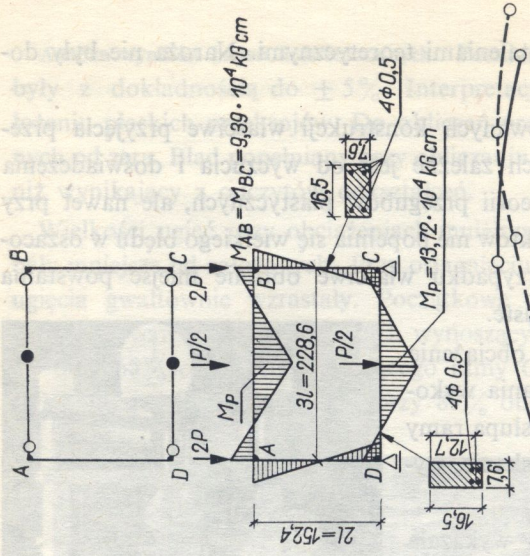
Nośność graniczna ram  $G_2$  i  $G_k$  wykazała dobrą zgodność z przewidywaniami teorii, a dla ramy  $G_1$  nośność była nieco niższa.

Na rysunku 8 pokazano maszynę wytrzymałościową o programowanym przyroście odkształceń, której użyto do wyznaczenia krzywej materiałowej badanego betonu. Równoległe z badaniem na ściskanie zmierzono w środku próbki odkształcenia poprzeczne widoczne na rys. 2. Na wykresie odkształceń poprzecznych zwraca uwagę w początkowym stadium obciążania występowanie pewnego niewielkiego zwięźnienia próbki, obserwowanego w wielu przypadkach badań wykonywanych na tej maszynie. Zjawisko to nie zostało dotychczas wyjaśnione.



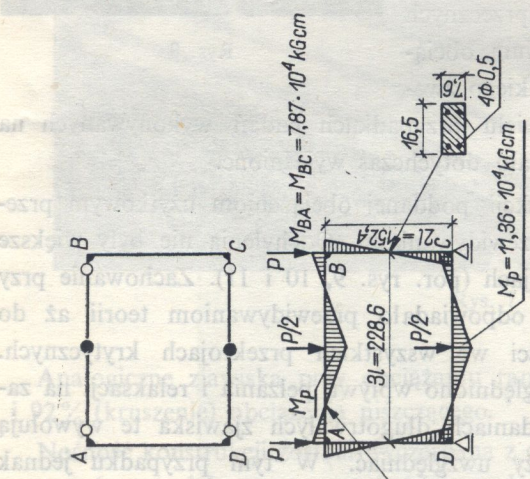
Rys. 8

**Wnioski.** Zachowanie się konstrukcji poddanej obciążeniom użytkowym przebiegało zgodnie z teoretycznymi przewidywaniami. Odchylenia nie były większe niż w innych podobnych konstrukcjach (por. rys. 9, 10 i 11). Zachowanie przy obciążeniach granicznych również odpowiadało przewidywaniam teorii aż do osiągnięcia granicznej wytrzymałości we wszystkich przekrojach krytycznych. Przy interpretacji wyników nie uwzględniono wpływu pełzania i relaksacji na zachowanie się konstrukcji. Przy badaniach długotrwałych zjawiska te wywołują wstępne odkształcenia, które należy uwzględniać. W tym przypadku jednak badania przeprowadzone były bezpośrednio po sprężeniu. Współczynnik bezpieczeństwa przyjęto zgodnie z teorią plastyczności. Wielkość obciążenia niszczonego w stosunku do wartości obliczeniowej wyniosła 96,9% dla ramy  $G_2$  oraz 92,5% dla ramy  $G_k$ . Warunek pełnej dystrybucji momentów nie znajduje zastosowania w przypadku konstrukcji sprężonej. Jakkolwiek moment zginający nie po-

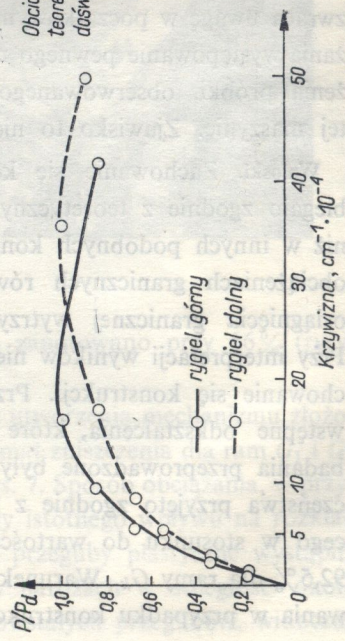


Graniczne obciążenie:  
 teoretyczne  $P_t = 7,35 \text{ t}$   
 doświadczalnie  $P_d = 7,95 \text{ t}$

Rys. 10



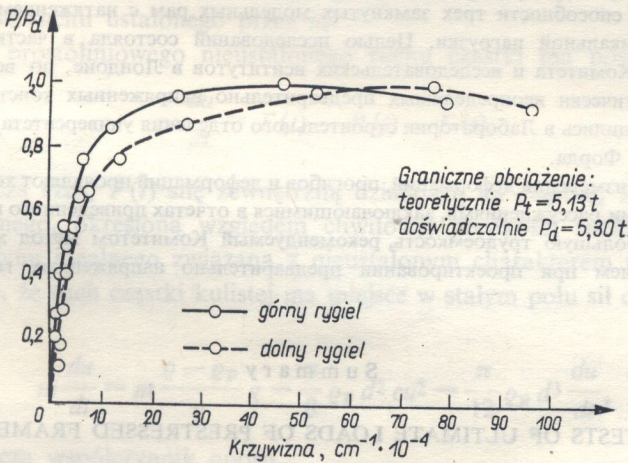
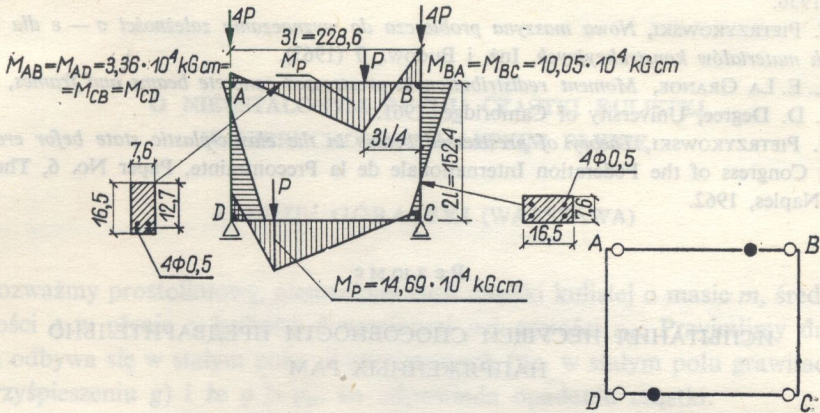
Obciążenie graniczne:  
 teoretyczne  $P_t = 6,72 \text{ t}$   
 doświadczalnie  $P_d = 6,6 \text{ t}$



Rys. 9



zostaje stały przy zmianach krzywizny, to jednak można go rozważać analogicznie jak przy przegubach plastycznych w konstrukcjach stalowych (por. [7] i [8]). Wyniki



Rys. 11

badania doświadczalnych łącznie z rozważaniami teoretycznymi wskazują, jeśli uwzględnić częściową dystrybucję momentów, na ścisłą zależność pomiędzy obciążeniami roboczymi a nośnością graniczną w przekroju krytycznym.

Literatura cytowana w tekście

[1] The Institution of Civil Engineers, Report of the Committee on Ultimate Load Design of Concrete Structures, Proceedings, February 1962.  
 [2] A. L. L. BAKER, *The ultimate load theory applied to the design of reinforced and prestressed concrete frame*, London Concrete Publication Ltd., 1956.  
 [3] E. HOGNESTAD, N. W. HANSON and D. MCHENRA, *Concrete stress distribution in ultimate strength design*. Journal of American Concrete Institute, 27, 4, December 1955.

[4] A. MOSS-MORRIS, *An investigation into the factors affecting the collapse loads of reinforced concrete frames*, Thesis for the Degree of Ph. D. at London University 1954.

[5] J. F. BAKER, M. R. HORNE, J. HEYMAN, *The Steel Skeleton*, Vol. 2, Cambridge University Press, 1956.

[6] J. PIETRZYKOWSKI, *Nowa maszyna probiercza do wyznaczania zależności  $\sigma - \epsilon$  dla betonu i innych materiałów konstrukcyjnych*, Inż. i Budow., 7 (1963).

[7] L. E. LA GRANGE, *Moment redistribution in prestressed concrete beams and frames*, Thesis for Ph. D. Degree, University of Cambridge, 1961.

[8] J. PIETRZYKOWSKI, *Theory of prestressed beams in the elastic-plastic state before cracking*, Fourth Congress of the Federation Internationale de la Precontrainte, Paper No. 6, Thema I, Rome-Naples, 1962.

### Резюме

## ИСПЫТАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ РАМ

В работе приводится процесс и результаты экспериментальных исследований, касающихся несущей способности трех замкнутых модельных рам с натяжением на бетон, под влиянием вертикальной нагрузки. Целью исследований состояла в частичной проверке рекомендаций Комитета и исследовательских институтов в Лондоне, по вопросам проектирования статически неопределимых предварительно напряженных конструкций. Эксперименты проводились в Лаборатории строительного отделения университета в Кэймбридже, в рамках фона Форда.

Результаты измерений деформаций, прогибов и деформаций проявляют хорошее согласие с теоретическими рассуждениями, заключающимися в отчетах приведенного выше Комитета. Несмотря на большую трудоемкость, рекомендуемый Комитетом метод может быть хорошим указанием при проектировании предварительно напряженных гиперстатических систем.

### Summary

## TESTS OF ULTIMATE LOADS OF PRESTRESSED FRAMES

This paper contains a description of tests and test results of limit loads of three closed, post-tensioned R.C. model frame structures subject to vertical loads. The aim was to verify to some extent the requirements of the Committee of Research Institutes in London concerning the design problems of prestressed redundant structures. The experiments were carried out at the Laboratory of the Civil Engineering Department of the Cambridge University within the framework of the programme of a Ford Foundation Scholarship.

The measurement results of strain, deflection and deformation show good agreement with the theoretical considerations of the report mentioned. Despite the fact that the method proposed requires considerable labour it may be very helpful for the design of prestressed redundant structures.

ZAKŁAD MECHANIKI OŚRODKÓW CIĄGŁYCH  
INSTYTUTU PODSTAWOWYCH PROBLEMÓW TECHNIKI PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 10 kwietnia 1964 r.