

Danuta Domańska, Roman Gruszka**

WPŁYW TEMPERATURY NA STAN NAPRĘŻENIA I ODKSZTAŁCENIA W OTOCZENIU KOMORY SIŁOWNI ELEKTROWNI „PORĄBKĄ-ŻAR”

1. Wprowadzenie

Wpływ zmiany temperatury ciała na zjawiska w nim zachodzące był początkowo rozważany w ramach tzw. teorii naprężeń cieplnych, a następnie teorii termosprężystości, której intensywny rozwój nastąpił od końca lat 50. XX w. (m.in. [1, 2, 7, 8, 9]). W niniejszej pracy stanowiącej wprowadzenie do rozważań nad zagadnieniem termosprężystości w odniesieniu do wyrobiska wielkogabarytowego, jakim jest rozważana komora siłowni elektrowni „Porąbka-Żar”, zasygnalizowano duże znaczenie zmian temperatury otoczenia dla stanu naprężenia i odkształcenia konstrukcji oraz nakreślono podstawowe tendencje charakteryzujące rozważany proces. W pierwszej kolejności dokonano uproszczonej analizy teoretycznej przebiegu naprężenia i odkształcenia powstającego pod wpływem zmiany temperatury w swobodnym cylindrze kołowym, a następnie w dwóch współśrodkowych cylindrach kołowych, których model może stanowić bardzo ogólne odwzorowanie rzeczywistych warunków współpracy obudowy wyrobiska i otaczającego ją górotworu. Opierając się z kolei na wynikach pomiarów *in situ*, przedstawiono wstępną analizę korelacyjną między wartościami mierzonymi a temperaturą panującą w rozpatrywanej komorze.

2. Teoretyczne uzasadnienie zmienności naprężeń i odkształceń pod wpływem temperatury

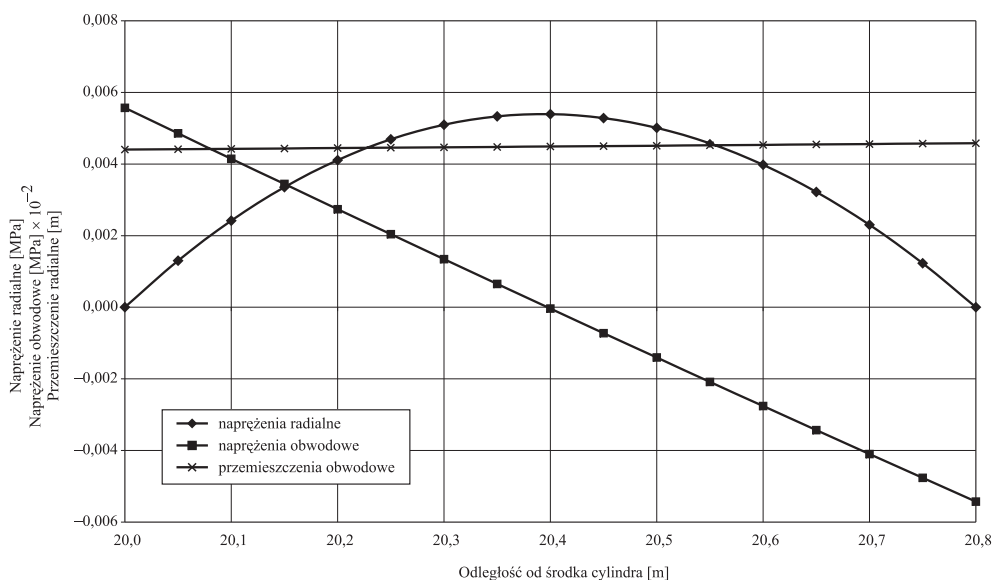
W celu teoretycznego odzwierciedlenia wpływu temperatury na stan naprężenia i odkształcenia w rozpatrywanej konstrukcji w pierwszej kolejności przeanalizowano zagadnienie przybliżone, polegające na określeniu naprężeń radialnych i obwodowych oraz prze-

* OBR BG „Budokop”, Mysłówice

mieszkań powstałych w kołowym cylindrze betonowym na skutek jego podgrzania przy założeniu radialnej, logarytmicznej zmienności temperatury oraz korzystając z wzorów wyprowadzonych dla zagadnienia pracy konstrukcji w płaskim stanie naprężenia według [2]. Dane wejściowe wprowadzone do obliczeń (tzn. wewnętrzny promień cylindra (20 m), jego grubość (0,8 m) i własności materiałowe (beton B20 [10]), odpowiadały analogicznym parametrom komory i jej obudowy.

Obliczenia zrealizowano po przyjęciu temperatury początkowej cylindra wynoszącej 200°C i ekstremalnych różnic temperatur wynikających z zaobserwowanych w rzeczywistości w wyrobisku w całym okresie realizacji pomiarów ich rocznych wahań: $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ i $\Delta T = 50^\circ\text{C}$.

Otrzymane wyniki dla różnicy temperatur wynoszącej $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ przedstawiono w formie graficznej (rys. 1).



Rys. 1. Wykres naprężeń radialnych i obwodowych oraz przemieszczeń radialnych w swobodnym cylindrze kołowym na skutek zmiany temperatury $\Delta T = 50^\circ\text{C}$

Ponieważ powyższy model obliczeniowy nie odwzorowywał reakcji między obudową i górotworem oraz zjawisk zachodzących w samym górotworze, zagadnienie przeanalizowano ponownie w odniesieniu do dwóch pierścieni kołowych posadowionych jeden wewnątrz drugiego bez luzu i bez wcisku. Naprężenia powstające na granicy ośrodków na skutek zmiany temperatury określono, wychodząc z założenia równości przemieszczeń na kontakcie obydwu z nich [5].

Po wprowadzeniu przyjętych danych wejściowych [5]:

- dla pierścienia wewnętrznego, jak dla przedstawionego modelu pojedynczego cylindra kołowego,
- dla pierścienia zewnętrznego o średnicy 30 m, jak dla otaczającego komorę górotworu (fliszu karpackiego [6]) i temperatur:

$$T_1 = 210^{\circ}\text{C}, T_2 = 200^{\circ}\text{C}, T_3 = 200^{\circ}\text{C};$$

$$T_1 = 240^{\circ}\text{C}, T_2 = 200^{\circ}\text{C}, T_3 = 200^{\circ}\text{C};$$

$$T_1 = 250^{\circ}\text{C}, T_2 = 200^{\circ}\text{C}, T_3 = 200^{\circ}\text{C};$$

gdzie:

T_1 — temperatura na wewnętrznej powierzchni cylindra środkowego (obudowy betonowej),

T_2 — temperatura na zewnętrznej powierzchni cylindra środkowego (obudowy betonowej),

T_3 — temperatura na zewnętrznej powierzchni cylindra zewnętrznego (górotworu),

ciśnienie na kontakcie obudowy i górotworu wyniosło odpowiednio: 0,055 MPa, 0,063 MPa i 0,066 MPa.

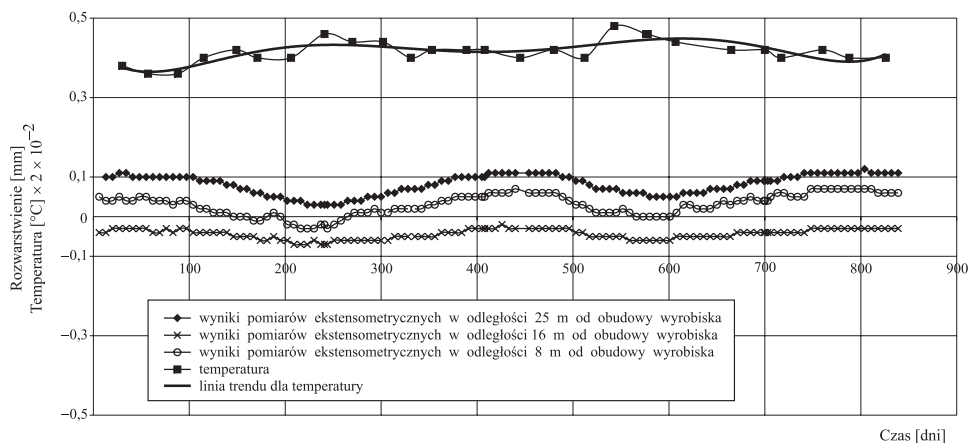
Z przeprowadzonych obliczeń przybliżonych wynika, że w przypadku budowli o dużych gabarytach nawet niewielkie zmiany temperatury mają wpływ na stan jej naprężenia. Przedstawione wyżej wartości zawierają się w przedziale zmienności ciśnienia działającego na obudowę komory siłowni elektrowni „Porąbka-Żar” oszacowanego na podstawie wyników *in situ* w przykładowo przyjętym przedziale czasowym (lata 2002–2003) [5]. Można na tej podstawie wnioskować, że obserwowane w warunkach *in situ* roczne wahania ciśnień, jak również pozostałych parametrów mierzonych, mają uzasadnienie teoretyczne wynikające z teorii termosprężystości.

3. Wpływ zmian temperatury na stan naprężenia i odkształcenia panujący w otoczeniu komory siłowni elektrowni „Porąbka-Żar” na podstawie pomiarów *in situ*

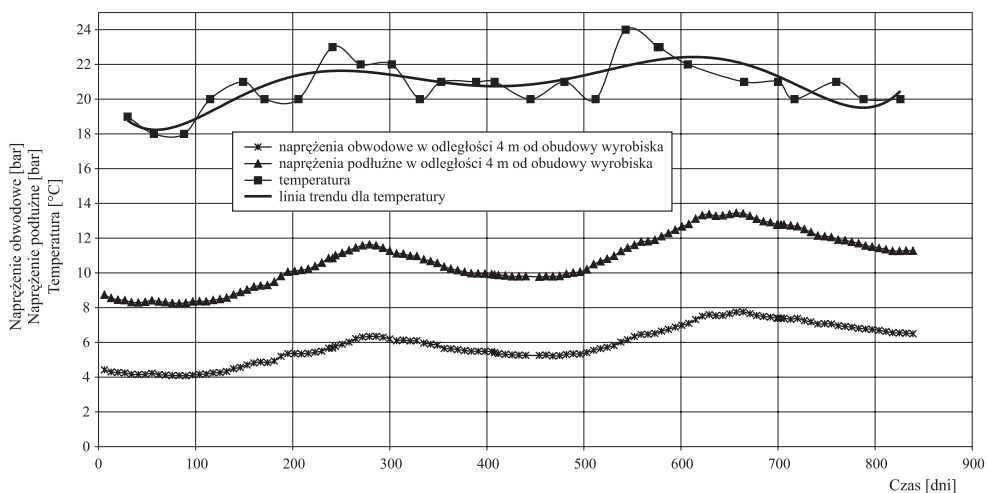
Z przebiegu wykresów poszczególnych wartości parametrów mierzonych w komorze [3, 4, 5] można wyciągnąć wniosek o ich ścisłej zależności od temperatury. Relacje te są szczególnie zauważalne w odniesieniu do rejestrowanych w sposób automatyczny w odstępach tygodniowych naprężeń działających wzdłuż osi komory (nazywanych podłużnymi), naprężeń obwodowych i radialnych oraz rozwarstwień górotworu.

W celu powiązania zmienności parametrów określanych w warunkach *in situ* od temperatury panującej w komorze, określono współczynniki korelacji między ww. wartościami

oraz oszacowano widoczne na wykresach przesunięcia czasowe reakcji konstrukcji na zmiany temperatury. Wzięto pod uwagę wyniki uzyskane w latach 2002–2004, których graficznym obrazem są przykładowo wybrane wykresy zamieszczone na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Przekrój pomiarowy P-2, wykres rozwarstwień w stropie komory w odległości 8, 16 i 25 m od obudowy wyrobiska na tle zmienności temperatury



Rys. 3. Przekrój pomiarowy P-1, wykres naprężeń obwodowych i podłużnych na ośrodku lewym komory w odległości 4 m od obudowy wyrobiska na tle zmienności temperatury

Ponieważ w odniesieniu do potrzeb postawionego zadania odstępów pomiędzy odczytami temperatury panującej w komorze dokonywanymi przez OBR BG „Budokop” (od roku

2002 średnio raz w miesiącu) są zbyt duże i nie odpowiadają częstości określania naprężeń i rozwarstwień w otoczeniu wyrobiska, w pierwszej kolejności przebieg temperatury opisano linią trendu (rys. 2 i 3), na podstawie której wyznaczono następnie wartości temperatury dla poszczególnych punktów pomiarowych naprężeń i rozwarstwień.

Należy zwrócić uwagę, że taki sposób oszacowania temperatury jest obarczony błędem wynikającym z możliwości funkcyjnego jej odwzorowania. W związku z powyższym, uzyskane jako ostateczny efekt rozważań praktycznych współczynniki korelacji między średnią temperaturą w komorze wyznaczoną na podstawie opisującego ją równania oraz wartościami mierzonych ciśnień i rozwarstwień mają głównie wymiar jakościowy.

Podobny wniosek można wysnuć również w odniesieniu do oszacowanego przesunięcia czasowego reakcji obudowy i otaczającego komorę górotworu na zmiany temperatury wewnątrz wyrobiska [5], które zostało określone dla punktów pomiarowych charakteryzujących się maksymalnymi, co do wartości bezwzględnej, współczynnikami korelacji wynoszącymi [5]:

- $0,53 \div 0,92$ dla pomiarów ekstensometrycznych,
- $0,54 \div 0,92$ dla pomiarów naprężeń.

Wielkości tych przesunięć mieszczą się w granicach [5]:

- $6 \div 230$ dni dla pomiarów ekstensometrycznych,
- $6 \div 139$ dla pomiarów naprężeń (z wyjątkiem naprężeń radialnych mierzonych w przekroju P-3 szczególnie po stronie prawej komory, gdzie o widocznej korelacji w stosunku do temperatury można było mówić dopiero po wprowadzeniu przesunięcia czasowego o wartości 314 dni).

W tabeli 1 zamieszczono przykładowe zestawienie ekstremalnych wartości współczynników korelacji między średnią temperaturą panującą w komorze a naprężeniami i rozwarstwieńmi górotworu oraz odpowiadających im przesunięć czasowych parametrów mierzonych w stosunku do temperatury dla przekroju P-2.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że wzrost temperatury powoduje przyrost wartości ciśnień odbieranych przez czujniki (generalnie większe wahania odczytów rejestrowane na czujnikach zabudowanych bliżej obudowy w odległości 4 m), przy czym ze względu na duże gabaryty wyrobiska reakcja ta jest opóźniona.

Tego typu wniosków nie można natomiast wyciągnąć w odniesieniu do wyników pomiarów ekstensometrycznych, które w miarę wzrostu temperatury, w zależności miejsca badania, sygnalizują zarówno zmniejszanie się rozwarstwień górotworu, jak i zależność odwrotną. Wyjaśnienia tej sytuacji można szukać przede wszystkim w braku możliwości jednoznacznego wydzielenia roli temperatury w procesie rejestrowanym przez ekstensometry, od wpływu pozostałych czynników rzutujących na zjawiska zachodzące w górotworze.

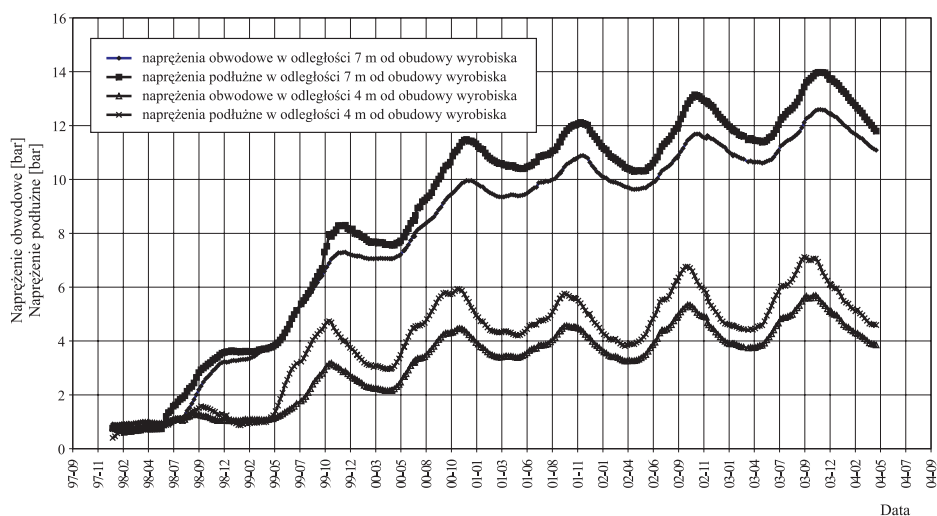
TABELA 1

Przekrój pomiarowy P-2, zestawienie ekstremalnych wartości współczynników korelacji między średnią temperaturą panującą w komorze a naprężeniami i rozwarstwieniami górotworu oraz odpowiadających im przesunięć czasowych parametrów mierzonych w stosunku do temperatury

Miejsce pomiaru	Rodzaj pomiaru	Oznaczenie pomiaru	Ekstremalna wartość współczynnika korelacji wartości mierzonej i temperatury po przesunięciu wyników pomiarów w czasie o n [dni]	Przesunięcie wartości mierzonej w stosunku do temperatury n [dni]
Ocios lewy	pomiary ekstensometryczne	P2-E8L	0,53	188
	pomiary ekstensometryczne	P2-E16L	-0,90	27
	pomiary ekstensometryczne	P2-E25L	0,92	209
Ocios prawy	pomiary ekstensometryczne	P2-E8P	0,82	188
	pomiary ekstensometryczne	P2-E16P	-0,79	48
	pomiary ekstensometryczne	P2-E25P	0,85	202
Strop	pomiary ekstensometryczne	P2-E8S	0,86	174
	pomiary ekstensometryczne	P2-E16S	0,90	181
	pomiary ekstensometryczne	P2-E25S	0,91	181
Ocios lewy	naprężenia obwodowe	P2-V4L	0,86	55
	naprężenia podłużne	P2-H4L	0,71	20
Ocios prawy	naprężenia obwodowe	P2-V7P	0,92	76
	naprężenia podłużne	P2-H7P	0,92	69
	naprężenia obwodowe	P2-V4P	0,89	34
Ociosy i strop	naprężenia radialne ocios lewy	P2-RL	0,75	6
	naprężenia radialne strop	P2-RS	brak istotnej zmienności wartości mierzonej	
	naprężenia radialne ocios prawy	P2-RP	0,82	6

Objaśnienie: liczba po symbolu pomiaru określa odległość wykonywania pomiaru od obudowy (np. V4P — naprężenie obwodowe w odległości 4 m od obudowy na ociosie prawym)

Analizując przebiegi poszczególnych wartości mierzonych, począwszy od czasu instalacji mierników, co przykładowo obrazuje rysunek 4, można wysunąć wniosek, że w chwili obecnej, tzn. po około 7–10-letnim okresie od zainstalowania aparatury pomiarowej, mamy do czynienia ze zjawiskiem ich stabilizowania się na określonym poziomie (prędkość zmian parametrów ma charakter malejący). W początkowym okresie pomiarowym zmiany temperatury nie stanowiły podstawowego elementu decydującego o wielkości parametrów rejestrowanych przez czujniki, natomiast w chwili obecnej ich znaczenie jest coraz większe. W związku z powyższym można ostatecznie prognozować, że jeżeli w przyszłości nie wystąpią inne niekorzystne uwarunkowania pracy konstrukcji (np. znaczne osłabienie parametrów wytrzymałościowych materiałów obudowy, zjawiska w górotworze powodujące zwiększenie obciążenia na obudowę), zmiany wartości parametrów mierzonych, będą głównie zależne od temperatury występującej w komorze.



Rys. 4. Przekrój pomiarowy P-2, wykres napiężeń obwodowych i podłużnych na ościsie prawym komory w odległości 4 i 7 m od obudowy

4. Podsumowanie

1. Za cel niniejszej pracy uznano zasygnalizowanie dużego znaczenia zmian temperatury dla zjawisk zachodzących w budowlu wielkogabarytowej na przykładzie komory siłowni elektrowni „Porąbka-Żar” i nakreślenie podstawowych tendencji charakteryzujących rozważany proces.
2. W pracy dokonano zarówno uproszczonej analizy teoretycznej obrazującej wpływ temperatury na stan napięcia i odkształcenia występujący w konstrukcji, jak również odniesiono się do wyników pomiarów *in situ*.

3. Uproszczone rozważania teoretyczne potwierdzają związek pomiędzy rocznymi wahaniami poszczególnych parametrów rejestrowanych za pomocą aparatury pomiarowej zabudowanej w wyrobisku [3, 4] a temperaturą.
4. Również na podstawie analizy wyników pomiarów *in situ* stwierdzono istnienie ścisłej korelacji między wartościami naprężeń i rozwarstwień górotworu a temperaturą występującą w wyrobisku. Zwrócono ponadto uwagę na widoczne na wykresach poszczególnych parametrów mierzonych przesunięcia czasowe reakcji konstrukcji na zmiany temperatury.
5. Ze względu na złożoność procesów zachodzących w rzeczywistości w obudowie i otoczeniu rozpatrywanego wyrobiska górniczego usytuowanego w rejonie o zróżnicowanych warunkach górniczo-geologicznych (zaburzone tektonicznie warstwy fliszu karpackiego [5]), za trudne uznano ilościowe oszacowanie rejestrowanej przez czujniki zmienności poszczególnych procesów, powodowanych tylko wahaniami temperatury. Za element mający ważny wpływ na wartości mierzonych naprężeń i odkształceń, uznaje się zarówno odbudowywanie stanu równowagi obudowa — górotwór naruszonego pod wpływem wykonania wyrobiska i zabudowy przyrządów pomiarowych, jak i występowanie procesów reologicznych prowadzących do zmienności opisu poszczególnych zjawisk w czasie.
6. Zagadnienie podjęte w niniejszym opracowaniu ma duże znaczenie dla prawidłowej oceny warunków pracy konstrukcji, a co za tym idzie — dla właściwego oszacowania występującego w niej stanu naprężenia i odkształcenia. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do podziemnych budowli wielkogabarytowych, cechujących się dużymi kubaturami materiałów, dla których nawet niewielka zmiana temperatury może powodować duże wahania parametrów, ważnych z punktu widzenia ich stateczności. Stanowi to nowe spojrzenie na problem termosprężystości, który w większości przypadków jest rozpatrywany dla obiektów naziemnych.

LITERATURA

- [1] Birger I., Panovko J.: Pročnost ustojčivost' kolebanija. T. 1. Spravočnik w trzech tomach. Moskwa, Izdatel'stvo Mašinostroenie 1968
- [2] Boli. B. Uejner D.: Teorija temperaturnych napriazhenij. Izdatel'stvo Mir. Moskwa 1964
- [3] Domańska D.: Metody oceny pracy wielkogabarytowych wyrobisk podziemnych w oparciu o wyniki pomiarów *in situ*. Wstępna ocena zjawisk zachodzących w otoczeniu komory elektrowni wodnej „Porąbka-Żar” na podstawie wyników pomiarów *in situ*. Mysłowice, OBR BG „Budokop” 2003 (praca niepublikowana)
- [4] Domańska D., Gruszka R.: Wstępna ocena zjawisk zachodzących w otoczeniu wyrobiska wielkogabarytowego na podstawie wyników badań *in situ*. XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH, Zakopane 14–19 marca 2004, 37–44
- [5] Domańska D., Gruszka R., Wichur A.: Metody oceny pracy wielkogabarytowych wyrobisk podziemnych w oparciu o wyniki pomiarów *in situ*. Oszacowanie zależności pomiędzy stanem naprężenie – odkształcenie występującym w otoczeniu komory elektrowni „Porąbka-Żar” a temperaturą panującą w wyrobisku. Mysłowice, OBR BG „Budokop” 2004 (praca niepublikowana)
- [6] Fudalej D., Mazur J. i in.: Prace badawczo-doświadczalne dla potrzeb projektowania i wykonawstwa podziemnych wyrobisk elektrowni wodnej Porąbka-Żar. Mysłowice, OBR BG „Budokop” 1975 (praca niepublikowana)

- [7] *Nowacki W.*: Dynamiczne zagadnienia termosprężystości. Warszawa, IPPT-PAN 1966
- [8] *Nowacki W.*: Termosprężystość. Wrocław, Polska Akademia Nauk, Zakład Narodowy im. Ossolińskich 1972
- [9] *Rekač V.*: Rukovodstvo k rešeniju zadač po teorii uprugosti. Moskva, Izdatel'stvo Vysšzaja škola 1966
- [10] PN-B-03264:2002: Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie