

**Jerzy GUSTKIEWICZ**

Institut Mechaniki Górnotworu PAN, Kraków

## **Studium deformacji eksperymentalnych i w naturze**

### **Streszczenie**

Praca zawiera podstawowe pojęcia związane z obserwacjami deformacji powierzchni, opis deformacji materialnych elementów górnotworu jako ośrodka ciągłego. Trochę miejsca poświęcono technikom pomiaru odkształceń górnotworu w obszarze eksploatacji górniczej i metodycznym i technicznym problemom w badaniu laboratoryjnym skał. Ostatnia część pracy zajmuje się pewnymi wynikami badań eksperymentalnych odkształceń skał.

### **Wstęp**

Badanie deformacji skał i gruntów, wywołanych przyczynami naturalnymi bądź działalnością człowieka a także ich studiowanie w warunkach laboratoryjnych, jest nieodzowne dla celów poznawczych i praktycznych jak na przykład przewidywanie zagrożeń nimi powodowanych. W pierwszym przypadku warunki brzegowe, w postaci sił lub ich zmian powodujących odkształcenia, zwykle nie są znane i nie są powtarzalne a więc badanie ma charakter obserwacji. Na jej podstawie można jednak wysnuć pewne wnioski o przyczynach odkształceń i ich, skutkach. W przypadku drugim odkształcenia sięgające nawet poza granicę wytrzymałości materiału mierzone są na próbkach znajdujących się w określonych warunkach i obciążanych w sposób kontrolowany, przy czym zarówno warunki jak i sposób obciążania są powtarzalne. Badanie ma, więc cechy eksperymentu i pozwala na pewne uogólnienia, co do zachowania i właściwości skał. Zachowanie i właściwości skały zależą od jej składu chemicznego, przestrzennego rozmieszczenia składników, warunków otoczenia skały jak ciśnienie na nią działające, jej temperatura, gęstość, rodzaj i ciśnienie płynu zawartego w porach a wreszcie od sposobu obciążania i czasu trwania obciążenia. Zachowanie ustala się na miarę precyzji przyrządów badawczych. Wiele zachowań skał a więc i właściwości poznaje się na podstawie obserwacji odkształceń i ich rozwoju zależnie od czasu i przyczyn je powodujących.

Obserwacje odkształceń w miarę możliwości powinny być poparte rozważaniami teoretycznymi, które z jednej strony stanowią podstawę do gruntownego opracowania wyników obserwacji a z drugiej stanowić mogą tło do oceny, czy wszystkie możliwości zostały wykorzystane przy danych do dyspozycji technikach obserwacyjnych. Na przykład pomiar odkształcenia w jednym tylko kierunku w ośrodku, który można potraktować jako trójwymiarowy ośrodek ciągły, wnosi na ogół bardzo niewiele informacji w świetle tensorowego opisu stanu odkształcenia, którego zastosowanie w technikach pomiarowych pozwala na znalezienie pełnego tego stanu. Bardziej gruntowne rozwinięcie tego problemu dla przypadku obserwacji deformacji górnotworu zawiera następny paragraf.

W tytule użyto terminu „deformacja eksperymentalna”. Zastosowano go do wywoływanych sztucznie, w laboratoryjnych warunkach, odkształceń próbek skał. Natomiast „deformacje w naturze” w artykule odnoszą się do powierzchni terenu, a więc głównie do gruntów.

## 1. Podstawowe pojęcia pomiarowe związane z obserwacjami powierzchni górotworu

W dalszym ciągu uwaga będzie skupiona na pomiarach odkształceń powierzchni górotworu, poddanego wpływowi eksploatacji górniczej. Skutki eksploatacji manifestują się zmianami ukształtowania terenu, czyli jego deformacją względem jego pierwotnego wykształcenia. Elementy terenu doznają przesunięć, obrotów, zmian rozmiarów i kształtu. Czynniki te pojawiają się w gruncie i obiektach z nim związanych, zagrażając spełnianym przez nie funkcjom a nawet ich bezpieczeństwu.

Ocenę szkodliwości wpływu eksploatacji górniczej na grunt i obiekty ustala się na podstawie wartości kilku wielkości powstających wskutek ruchu górotworu. Wartości te przewidywane są teoretycznie i mierzone.

Jedną z wielkości jest kąt sztywnego obrotu elementów materialnych wokół osi poziomej. Ten szczególny przypadek obrotów prowadzi do zmian nachylenia obiektów, które mogą być niebezpieczne, zwłaszcza dla obiektów smukłych i wysokich jak wieże czy kominy.

Następną wielkością, często rozważaną jako kryterium oceny zagrożenia eksploatacją górniczą, jest liniowa deformacja względna w postaci zmiany długości odcinka materialnego o jednostkowej długości przed deformacją. Wartość takiej deformacji gruntu w z góry przyjętym, zwykle pojedynczym, kierunku traktowana jest jako miara zagrożenia obiektów pozostających w kontakcie z gruntem. Niedostatek takiej pojedynczej miary jest widoczny w świetle tego co powiedziano już we wstępie. Mechanika ośrodka ciągłego bowiem dostarcza do pełnego opisu deformacji pojęcia tensora deformacji i jeszcze jednej miary deformacji dotychczas nie wykorzystywanej a mianowicie deformacji kątowej, zwanej też postaciową. Należy dodać, że istnieje dziedzina zwana tensometrią, która pozwala w drodze pomiaru wyznaczać pełny stan odkształcenia, a więc przypisać lokalnie dowolnemu kierunkowi odkształcenie liniowe a parze kierunków odkształcenie postaciowe. Zwykle odkształcenia mierzy się przymiarami długościowymi natomiast tensometria dysponuje aparaturą do pomiaru zmian długości, dzięki czemu zyskuje się na dokładności wyznaczania mierzonej wielkości i na pomiarze z dowolną częstotliwością, co sprawia poważne trudności w pomiarach długości. Tensometria jednak nie może w całości zastępować pomiaru deformacji przymiarem długościowym, który pozwala obejmować pomiarami dowolnie długie linie obserwacyjne. Stanowić ona jednak może istotne uzupełnienie pomiarów przymiarami długościowymi.

Pozostałą miarą deformacji ośrodka, będącą deformacją postaciową, jest krzywizna krzywej płaskiej, powstającej podczas odkształcenia z linii prostej. Przyjmuje się przy tym, że krzywa jest krawędzią powierzchni terenu z płaszczyzną pionową. Wobec niezerowych składowych poziomych przemieszczeń punktów górotworu z prostej na ogół może powstać krzywa przestrzenna, której nie można zanurzyć w płaszczyźnie i to szczególnej, bo pionowej. Badana linia w terenie nie zawsze musi być przed deformacją prosta. Wtedy krzywizna linii zdeformowanej przestaje być jej miarą deformacji. Ma to znaczenie zwłaszcza, kiedy zachodzi potrzeba określania deformacji górotworu między dwiema, dowolnymi chwilami. Wtedy pierwotnie prosta może być już zakrzywiona wskutek deformacji w każdej z tych chwil.

Pośród stosowanych wskaźników służących do oceny wpływu eksploatacji na powierzchnię terenu brak jest takich, które wyrażałyby zmianę zakrzywienia powierzchni. A przecież obiekty mają dwuwymiarowy kontakt z gruntem.

W następnym paragrafie zawarty jest szkic opisu zginania linii i powierzchni, która tę linię zawiera. Przy okazji skorzystano w ogólnym przypadku zginania z powszechnie znanego pojęcia stanu odkształcenia w zapisie tensorowym oraz podano sposoby pomiarowego wyznaczania współrzędnych odpowiedniego tensora odkształcenia. Szkic zawiera wyprowadzenia pewnych pojęć i definicje w podwójnym zapisie: we współrzędnych przestrzennych i materialnych co odpowiada stanom nieodkształconemu i odkształconemu badanego ośrodka. Wiele wyprowadzeń pominięto ze względu na ich obszerność przekraczającą objętościowo ramy artykułu. Można wszystkie wyprowadzenia znaleźć w cytowanych pracach.

## 2. Opis deformacji elementów materialnych górotworu jako ośrodka ciągłego

Górotwór traktowany jest jako ośrodek ciągły. Ciało utworzone z ośrodka ciągłego traktuje się jako trójwymiarową rozmaitość różniczkową. Jego cząstki są wzajemnie jednoznacznie przypisane trójkom liczb rzeczywistych  $X^A$  ( $A=1,2,3$ ) zwanych współrzędnymi materialnymi.

Gładki homeomorfizm ciała w obszar trójwymiarowej przestrzeni euklidesowej nazywa się konfiguracją ciała. Punktom obszaru są przypisane współrzędne  $x^\lambda$  ( $\lambda=1,2,3$ ) ogólnego, krzywoliniowego układu, zwane współrzędnymi przestrzennymi. Jednoparametrowa rodzina konfiguracji

$$x^\lambda = D^\lambda(X^A, t) \quad (2.1)$$

taka, że

$$x^\lambda = \delta^\lambda_A X^A \quad \text{dla} \quad t = t_0, \quad (2.2)$$

gdzie rzeczywisty parametr  $t$  jest utożsamiany z czasem, będzie nazwana deformacją względem konfiguracji (2.2), zwanej konfiguracją odniesienia. Powtarzając się wskaźnik raz na górze raz na dole jak  $A$  w (2.2) oznacza sumowanie, zgodnie z konwencją Einsteina. Współrzędne  $x^\lambda$  nazywa się współrzędnymi przestrzennymi cząsteczki ciała. Ciało w konfiguracji odniesienia tzn. dla  $t = t_0$  traktuje się jako niezdeformowane, w pozostałych konfiguracjach – jako zdeformowane.

Dla deformacji przyjmuje się aksjomat ciągłości, zgodnie z którym funkcje (2.1) mają ciągle pochodne cząstkowe dostatecznie wysokiego rzędu. Z tego aksjomatu i wzajemnej jednoznaczności funkcji deformacji wynika, że jakobian  $J$  transformacji nie znika i że przyjmuje skończone wartości. Ponieważ  $J$  jest ciągłą funkcją zmiennych, różną od zera i  $J = 1$  dla warunku (2.2) przeto:

$$J > 0 \quad (2.3)$$

Niech  $d\Sigma$  o współrzędnych  $dX^A$  będzie zaczepionym w  $X^A$  elementem łuku materialnego w ciele nie odkształconym. W wyniku deformacji (2.1) z  $d\Sigma$  powstaje element łuku  $d\sigma$  o współrzędnych  $dx^\lambda$ , zaczepiony w takim punkcie  $x^\lambda$ , że para  $X^A, x^\lambda$  spełnia (2.1). Niech  $\Sigma, \sigma$  będą metrycznymi parametrami łuku odpowiednio w stanie nie odkształconym i odkształconym.

Iloraz długości wektorów  $dX^A, dx^\lambda$  stycznych do łuku odpowiednio w stanie odkształconym i nieodkształconym, czyli iloraz:

$$\lambda = \frac{d\sigma}{d\Sigma} \quad (2.4)$$

nazywa się rozciągnięciem elementu łuku. Jest to podstawowa miara deformacji liniowego elementu ciała materialnego.

Jeśli oznaczymy przez:

$$I^A \equiv \frac{dX^A}{d\Sigma}, \quad i^\lambda \equiv \frac{dx^\lambda}{d\sigma} \quad (2.5)$$

zaczepione odpowiednio w  $X^A, x^\lambda$  jednostkowe wektory styczne do elementów łuku  $d\Sigma, d\sigma$  to korzystając z (2.1), przy ustalaniu relacji między  $dX^A, dx^\lambda$  oraz korzystając z tensora metrycznego wyrażonego odpowiednio w układzie współrzędnych materialnych ( $A$ ) i przestrzennych ( $\lambda$ ) można znaleźć takie symetryczne tensory deformacji ciała w obu układach współrzędnych  $C_{A\Sigma}, c_{\lambda\sigma}$ , że można zapisać znane mechanice ośrodka ciągłego wzory:

$$\lambda^2 = C_{A\Sigma} I^A I^\Sigma, \quad \lambda^{-2} = c_{\lambda\sigma} i^\lambda i^\sigma. \quad (2.6)$$

Wzór (2.6) przypisuje w punkcie o współrzędnych materialnych  $X^A$  za pomocą tensora deformacji  $C_{A\Sigma}$  elementowi łuku o kierunku  $I^A$  odkształcenie  $\lambda$ . Podobnie to samo odkształcenie jest przypisane przez (2.6) w punkcie  $x^\lambda$  we współrzędnych przestrzennych za pomocą tensora  $c_{\lambda\sigma}$  kierunkowi  $i^\lambda$  tego samego łuku po deformacji. Tensor  $C_{A\Sigma}$ , zwany tensorem Cauchy'ego, przeprowadza element łuku ze stanu nieodkształconego w stan odkształcony. Tensor  $c_{\lambda\sigma}$  zwany tensorem Greena, przeprowadza ten sam element ze stanu odkształconego w nieodkształcony. Tensory są, więc względem siebie odwrotne.

Każdy z obydwu tensorów jest symetryczny, posiada zatem na ogół sześć różnych współrzędnych. Pomiar  $\lambda$  w sześciu, różnych między sobą, zadanych kierunkach w przestrzeni daje z (2.6) odpowiednio po sześć równań liniowych ze względu na niewiadome współrzędne tensorów. W przypadku dwuwymiarowym tensor odkształcenia ma na ogół trzy różne między sobą współrzędne, a więc do ich wyznaczenia potrzeba pomiaru  $\lambda$  w trzech kierunkach, tworzących tak zwaną rozetę pomiarową.

Dla odkształceń nieskończenie małych korzysta się z definicji

$$\varepsilon = \lambda - 1 \quad (2.7)$$

i wtedy można napisać odpowiednio do (2.6)

$$\varepsilon = \varepsilon_{\lambda\sigma} i^\lambda i^\sigma \quad (2.8)$$

Wtedy też znika różnica między tensorem w współrzędnych materialnych i przestrzennych. Łatwo także wyraża się odkształcenie postaciowe zachodzące między dwoma, przed odkształceniem ortogonalnymi, kierunkami.

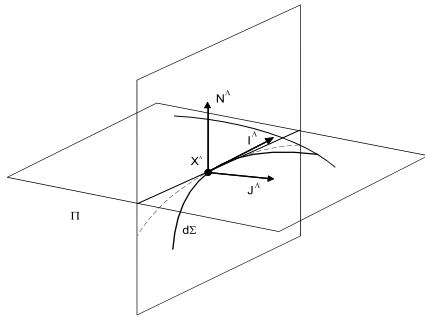
Niech w konfiguracji odniesienia  $\Pi$  będzie powierzchnią materialną, na której leży  $X^A$ . W wyniku deformacji powstaje powierzchnia  $\pi$ , na której leży taki punkt  $x^\lambda$ , że para  $X^A, x^\lambda$  spełnia (rys. 2.1). Na  $\Pi$  przyjmuje się lokalny układ krzywoliniowych współrzędnych materialnych ( $L$ ), ( $L = 1, 2$ ) a na  $\pi$  odpowiednio lokalny układ krzywoliniowych współrzędnych przestrzennych ( $l$ ), ( $l = 1, 2$ ). Punkt  $X^A$  ma w układzie ( $L$ ) współrzędne  $\Xi^L$ , a punkt  $x^\lambda$  w układzie ( $l$ ) współrzędne  $\xi^l$ . Oczywiście, gdy  $t = t_0$ ,  $\pi \equiv \Pi$ .

Powierzchnie  $\Pi$  i  $\pi$  określone są równaniami parametrycznymi odpowiednio:

$$X^A = F^A(\Xi^I), \quad x^\lambda = f^\lambda(\xi^i) \quad (2.9)$$

takimi, że z założenia rząd macierzy ich pierwszych pochodnych równy jest 2. O powierzchni  $\pi$  przyjmuje się założenie, że jej orientacja przestrzenna jest ciągłą funkcją czasu  $t$ . W szczególności zatem  $\Pi$  w punktowili  $(X^A, t_0)$  oraz  $\pi$  w punktowili  $(x^\lambda, t)$  są jednakowo zorientowane.

Niech element łuku  $d\Sigma$ , zaczepiony w  $X^A$  leży na  $\Pi$ . Wtedy, obok współrzędnych  $dX^A$  posiada na  $\Pi$  współrzędne  $d\xi^I$ . Element  $d\Sigma$  deformuje się w element  $d\sigma$ , który zgodnie z aksjomatem ciągłości leży na  $\pi$  i jest zaczepiony w  $x^\lambda$ . Element  $d\sigma$  oprócz współrzędnych  $dx^\lambda$  posiada na  $\pi$  współrzędne  $d\xi^i$ .



Rys. 2.1 Element łuku na powierzchni  
Fig. 2.1 Line element on a surface

Odpowiednio do (2.5) w przestrzeni trójwymiarowej, można jednostkowe wektory styczne do odpowiednich elementów łuku w stanie niezdeformowanym i zdeformowanym wyrazić na powierzchni  $\Pi, \pi$  we współrzędnych  $(L), (l)$  następująco:

$$I^L \equiv \frac{d\xi^L}{d\Sigma}, \quad i^l \equiv \frac{d\xi^l}{d\sigma}. \quad (2.10)$$

Wektory te pokrywają się odpowiednio z wektorami jednostkowymi (2.5).

Wyrażenie lewych stron (2.9) jako różniczek zupełnych stron prawych, uwzględnienie (2.5)

i (2.10) w (2.6) pozwala ostatecznie zapisać:

$$\lambda^2 = C_{LS} I^L I^S, \quad \lambda^2 c_{ls} i^l i^s, \quad (2.11)$$

gdzie  $C_{LS}, c_{ls}$  są tensorami deformacji odpowiednio Cauchy'ego i Greena na powierzchni  $\Pi, \pi$ .

Niech jeszcze w punkcie  $X^A, x^\lambda$  zaczepienia wektora  $I^A, i^a$  zostaną zaczepione dwa inne wektory odpowiednio w stanie zdeformowanym i niezdeformowanym powierzchni. Jeden z tych wektorów  $N^A, n^a$  normalny do powierzchni  $\Pi, \pi$  i do łuku  $d\Sigma, d\sigma$  a drugi  $J^A, j^a$  styczny do powierzchni i normalny do łuku. Sytuację taką przedstawia rysunek 2.1 w przypadku powierzchni  $\Pi$ . Widoczna trójka wektorów wzajemnie ortogonalnych i dwie płaszczyzny: prostopadła do  $\Pi$  w punkcie  $X^A$  i druga styczna w tym punkcie do  $\Pi$ . Obok elementu łuku  $d\Sigma$  linią przerywaną zaznaczono ślad przecięcia płaszczyzny z powierzchnią.

Przedstawione trójki wektorów w stanie zdeformowanym i nie zdeformowanym materiału stanowią podstawę opisu zginania łuku na powierzchni i samej powierzchni. Opis jest żmudny o stosunkowo obszerny. Przerasta więc ramy objętościowe artykułu. Tu zostają podane tylko pewne, ważniejsze jego wyniki. Szczegóły zawarte są w pracach Gustkiewicza (1970, 1972, 1973a, 1973b, 1976).

Istnieje w geometrii różniczkowej pojęcie, które można przypisać w punkcie  $X^A, x^\lambda$  powierzchni  $\Pi, \pi$  w stanie niezdeformowanym i zdeformowanym. Jest nim drugi podstawowy symetryczny tensor powierzchni, który dowolnej, dostatecznie regularnej krzywej leżącej na powierzchni, przypisuje krzywiznę normalną, mierzoną w kierunku wektora normalnego do powierzchni. Według rysunku 2.1 krzywizna normalna określana jest w kierunku wektora  $N^A$

i jest ona taka sama w przypadku elementu  $d\Sigma$  krzywej oraz śladu przecięcia powierzchni z płaszczyzną prostopadłą do niej. W płaszczyźnie stycznej do powierzchni i w kierunku  $J^A$  określa się jeszcze tzw. krzywiznę geodezyjną elementu łuku. Krzywizna ta w przypadku łuku, którym jest ślad przecięcia płaszczyzny prostopadłej z powierzchnią, jest równa zero. Obie krzywizny są składowymi wektora krzywizny elementu łuku rozważanego w przestrzeni.

Jeśli  $\Gamma, \gamma$  są krzywiznami normalnymi elementu łuku na powierzchni w stanie niezdeformowanym i zdeformowanym to ich różnica wyraża miarę deformacji postaciowej krzywej na powierzchni, zwaną fleksją normalną tej krzywej. Każdą z tych krzywizn można wyrazić, zależnie od potrzeby, we współrzędnych materialnych lub przestrzennych, co wyrazimy  $\Gamma(L), \gamma(L)$  lub  $\Gamma(l), \gamma(l)$ . W ten sposób ich różnice, jako fleksje łuku na powierzchni, można wyrazić w jednorodnych współrzędnych, czyli

$$N = \gamma(L) - \Gamma(L), \quad \nu = \gamma(l) - \Gamma(l). \quad (2.12)$$

Niech  $H_{SL}$  jest drugim podstawowym tensorem powierzchni  $\Pi$  w stanie niezdeformowanym,  $B_{SL}$  takim tensorem powierzchni  $\pi$  w stanie zdeformowanym, ale wyrażonym we współrzędnych materialnych ( $L$ ),  $C_{SL}$  – tensorem Cauchy'ego a  $G_{SL}$  – tensorem metrycznym we współrzędnych materialnych. Podobnie niech  $h_{sl}$  będzie drugim tensorem podstawowym powierzchni w stanie zdeformowanym,  $b_{sl}$  takim tensorem powierzchni niezdeformowanej, ale wyrażonym we współrzędnych przestrzennych,  $g_{sl}$  – tensorem metrycznym powierzchni po deformacji i  $c_{sl}$  tensorem Greena. Przy takich oznaczeniach (2.12) można napisać:

$$N = \frac{B_{SL} I^S I^L}{C_{PK} I^P I^K} - \frac{H_{SL} I^S I^L}{G_{PK} I^P I^K}, \quad \nu = \frac{h_{sl} i^s i^l}{g_{pk} i^p i^k} - \frac{b_{sl} i^s i^l}{c_{pk} i^p i^k}. \quad (2.13)$$

Jest rzeczą oczywistą, że  $N = \nu$  choć wyrażone są w różnych układach współrzędnych.

W podobny sposób definiuje się fleksję geodezyjną krzywej na powierzchni. Wyraża się ona wzorami odpowiednio we współrzędnych materialnych i przestrzennych następująco:

$$T = \frac{W_{SL} I^S I^L}{C_{PK} I^P I^K} - \frac{U_{SL} I^S I^L}{G_{PK} I^P I^K}, \quad \tau = \frac{u_{sl} i^s i^l}{g_{pk} i^p i^k} - \frac{w_{sl} i^s i^l}{c_{pk} i^p i^k}. \quad (2.14)$$

Tutaj  $W_{SL}, U_{SL}, w_{sb}, u_{sl}$  są pewnymi tensorami przypisanymi danemu elementowi łuku  $d\Sigma, d\sigma$  na powierzchni. Natomiast tensory  $B_{SL}, H_{SL}, b_{sb}, h_{sl}$  są przypisane powierzchni  $\Pi, \pi$  a zatem określają zmianę krzywizny normalnej dowolnej, dostatecznie regularnej, krzywej przy deformacji  $\Pi$  w  $\pi$ .

Absolutnym wektorem fleksji krzywej na deformującej się powierzchni, wyrażonym we współrzędnych przestrzennych jest:

$$\mathbf{K}^A \equiv \mathbf{N}N^A + \mathbf{T}J^A, \quad \boldsymbol{\kappa}^a \equiv \mathbf{v}v^a + \boldsymbol{\tau}j^a. \quad (2.15)$$

Długość absolutnego wektora, czyli:

$$|\mathbf{K}| = \sqrt{(G_{\Sigma A} \mathbf{K}^\Sigma \mathbf{K}^A)} = \sqrt{(N^2 + T^2)}, \quad |\boldsymbol{\kappa}| = \sqrt{(g_{\sigma a} \boldsymbol{\kappa}^\sigma \boldsymbol{\kappa}^a)} = \sqrt{(v^2 + \tau^2)} \quad (2.16)$$

nazywa się absolutną fleksją łuku odpowiedni w  $X^A, x^\lambda$ , gdzie  $G_{\Lambda\Sigma}, g_{\lambda\sigma}$  są tensorami metrycznymi we współrzędnych materialnych i przestrzennych.

Wzory (2.13) – (2.16) dotyczą ogólnego przypadku zginania łuku na powierzchni, podczas którego zmienia się także długość łuku. W szczególnym przypadku, gdy zmiany długości można zaniedbać, czyli przyjąć, że rozciągnięcie (2.4)  $\lambda = 1$  można było wyprowadzić taki tensor trzeciego rzędu  $K^{\tau\sigma\lambda}, \kappa^{\tau\sigma\lambda}$  we współrzędnych materialnych i przestrzennych i symetrycznego względem dolnych wskaźników, który nazwano tensorem fleksji ośrodka.

W przypadku elementu łuku mającego w punkcie  $X^A, x^\lambda$  jednostkowy wektor kierunkowy  $I^A, i^\lambda$  można określić absolutny wektor jego fleksji w postaci:

$$\mathbf{K}^A = K^A_{\tau\sigma\lambda} I^\tau I^\sigma I^\lambda, \quad \mathbf{k}^\lambda = \kappa^\lambda_{\pi\sigma\lambda} i^\pi i^\sigma. \quad (2.17)$$

Jeśli  $N^A, n^\lambda$  jest jednostkowym wektorem normalnym do powierzchni, na której leży element łuku o wektorze kierunkowym, jak poprzednio  $I^A, i^\lambda$ , to fleksja normalna tego łuku na powierzchni wyraża się wzorem:

$$N = G_{\Lambda\Sigma} N^A K^{\Sigma}_{TP} I^T I^P, \quad v = g_{\lambda\sigma} n^\lambda \kappa^{\sigma}_{\pi\lambda} i^\pi i^\lambda, \quad (2.18)$$

a dla wektora jednostkowego  $J^A, j^\lambda$  normalnego do elementu łuku i stycznego do powierzchni fleksją geodezyjną jest

$$T = G_{\Lambda\Sigma} J^A K^{\Sigma}_{TP} I^T I^P, \quad \tau = g_{\lambda\sigma} j^\lambda \kappa^{\sigma}_{\pi\lambda} i^\pi i^\lambda. \quad (2.19)$$

Istnieje jeszcze pojęcie drugiej fleksji geodezyjnej. Może ona być traktowana jako pewien analogon deformacji postaciowej, kątowej. Jest nią:

$$Z = G_{\Lambda\Sigma} N^A K^{\Sigma}_{TP} I^T I^P, \quad \zeta = g_{\lambda\sigma} n^\lambda \kappa^{\sigma}_{\pi\lambda} i^\pi i^\lambda. \quad (2.20)$$

Fleksja ta wyraża zmianę skręcenia elementu łuku.

Na zakończenie tego paragrafu należy wspomnieć, że istnieje dziedzina zwana tensofleksjometrią, która pomiarowo wyznacza fleksję normalną. Zwykle to się dzieje w skali laboratoryjnej lub na obiektach, takich jak zapory. Ostatni rozdział pracy Gustkiewicza (1972) zawiera rozważania na temat pomiaru wielu ze wspomnianych tutaj pojęć. W ogólności jednak pomiar nie jest łatwy, nastroczając trudności natury technicznej a także ekonomicznej. Przedstawiony jednak szkic opisu deformacji uświadamia, co dzieje się z ośrodkiem poddanym deformacjom i jak ubogi, często z konieczności, jest zasób stosowanych środków do ich opisu.

### 3. Tensometria w zastosowaniu do gruntów na terenach górniczych

W latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia w środowisku naukowym skupionym wokół Profesora J. Litwiniszyna zrodził się pomysł aby do wyznaczania liniowych odkształceń gruntów poddanych wpływom podziemnej eksploatacji górniczej zastosować tensometrię. Uzupełniałaby ona powszechnie stosowane geodezyjne metody pomiarowe, gwarantując odczyty odkształceń z dowolną częstotliwością oraz instalację przyrządów w układach pozwalających lokalnie wyznaczać płaskie, a nawet przestrzenne, stany odkształcenia.

W ramach podjętych prac nad rozwiązaniem problemu przyjęto założenie, że przetworniki odkształcenia gruntu mają być z nim dobrze zespolone i znajdować się poniżej strefy przemar-

zania i wahań dobowych temperatury. A więc, w przeciętnych warunkach klimatycznych Polski, mają być posadowione w wykopach ziemnych poniżej głębokości 1,5 m – 2 m. W związku z powyższym przyrządy mają być przykryte masą gruntową a zatem powinny dawać możliwości zdalnego odczytu zmian wielkości charakteryzujących odkształcenia. Bazy pomiarowe, czyli długości przetworników przyjęto między 0,5 m a 5 m. Początkowo wykorzystano w przetwornikach tensometry oporowe naklejane na elementy systemu mechanicznego przejmującego zmianę długości odcinka gruntu i przetwarzającego tę zmianę na odkształcenie czujnika oporowego. W celu zwiększenia dokładności pomiarów i trwałości aparatury w czasie skonstruowano nowe przetworniki, w których wykorzystano jako miarę odkształcenia częstotliwość drgań własnych struny stalowej zmieniającej swoje mechaniczne napięcie pod wpływem systemu przejmującego odkształcenie gruntu. Koncepcja i przykład rozwiązania konstrukcyjnego a także wyniki badania laboratoryjnego przetwornika opublikował Gustkiewicz (1966). Fotografia na rys. 3.1 przedstawia widok przetwornika w wykopie przed zasypaniem



Rys. 3.1 Przetwornik deformacji gruntu w wykopie, przed zasypaniem

Fig. 3.1 Soil strain transducer in an excavation before covering

Na fotografii na rysunku 3.2



Rys. 3.2 Wykopy pod rozetę równoboczną przetworników  
Fig. 3.2 Excavations for instalation of equilateral rosette of strain transducer

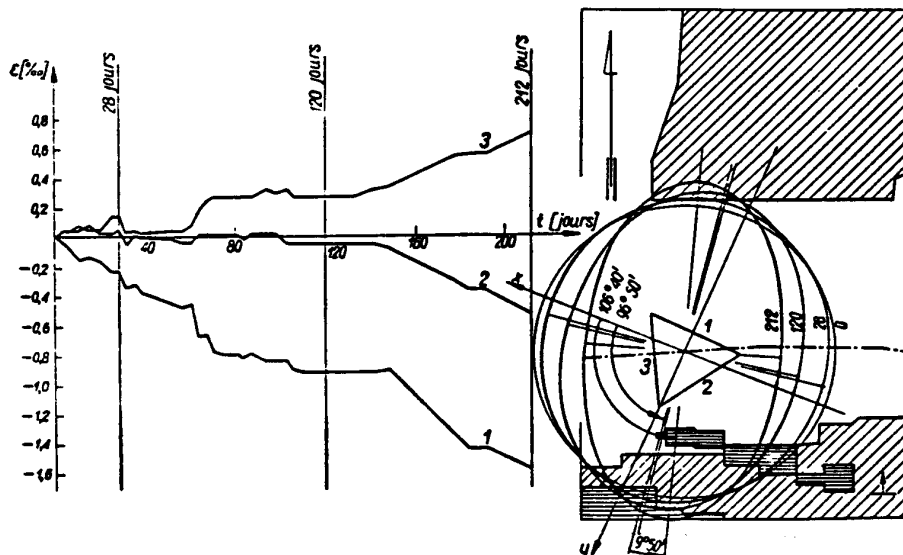
Na fotografii na rysunku 3.2 pokazano wykopy tworzące ciąg trójkątny. Pomiar odkształceń w trzech kierunkach pozwala na wyliczenie współrzędnych tensora odkształceń liniowych.

Przykłady pomiaru odkształceń w terenie poddanym wpływom eksploatacji górniczej a także pewne wyniki obserwacji długotrwałych na polietku doświadczalnym obok Instytutu Mechaniki Górotworu PAN zawiera praca Gustkiewicza i in. (1985, 1995). Podano w nich także opis przetworników i aparatury odczytowej. Na rysunku 3.3 przedstawiono pierwszy udany wynik wyznaczania płaskiego stanu odkształcenia

uzyskanego w Bytomiu na początku lat sześćdziesiątych ubiegłego stulecia w ramach pracy doktorskiej opublikowanej przez Gustkiewicza (1963,1965). Po lewej



stronie rysunku widoczny jest rozwój odkształceń w czasie, zmierzonych przez tensometry. Strona prawa przedstawia sytuację eksploatacyjną dwóch kopalń, kierunki pomiaru w rozecie oraz, obrazowo, jak zmienia się koło, które można by zakreślić w gruncie, w elipsy odkształceń w ciągu 212 dni pomiarów. Najdłużej trwającym okresem pomiarowym są objęte obserwacje



Rys. 3.3 Wyniki pomiaru odkształceń w czasie i odpowiednie elipsy odkształceń  
Fig. 3.3 Results of strain measurements and strain ellipses

kilku przetworników zainstalowanych w grudniu 1973 roku na wspomnianym poletku doświadczalnym. Dotychczas, czyli już ponad 25 lat, wszystkie funkcjonują nienagannie. A więc metoda nadaje się do pomiarów bardzo długotrwałych rzędu dziesiątek lat.

Opisywana tensometria zwana tensometrią gruntową jest w dalszym ciągu rozwijana dzięki zespołowi kilku osób. Powstają nowe przetworniki, a przede wszystkim rozwijana jest strona elektroniczna. Istnieją aktualnie, dzięki wysiłkowi elektroników, możliwości rejestracji danych z dowolną częstotliwością i wprowadzania ich do komputera a także zdalnego, drogą kablową lub radiową, odczytu.

Powstała w celu badania deformacji górotworu i skał w skali laboratoryjnej Pracownia Odkształceń Skał Instytutu Mechaniki Górotworu PAN została wyposażona w zbudowany własnym sumptem pomocniczy sprzęt do badania przetworników gruntowych. Między innymi istnieje stanowisko do ich w stałej lub zmiennej temperaturze w granicach od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+30^{\circ}\text{C}$ . Zaprojektowano także i wykonano szereg tensometrów mechanicznych do skał i obiektów budowlanych o bazach od 10 cm do 1 m.

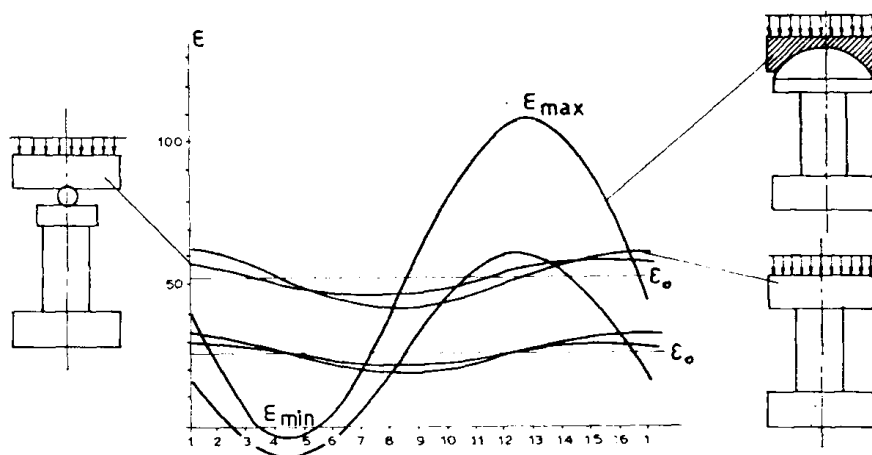
#### 4. Zagadnienia metodyczne w badaniach laboratoryjnych

Mechanika skał jest dziedziną eksperymentalną i podstawowe jej wyniki powstają w warunkach laboratoryjnych podczas badania próbek skał. W laboratorium dąży się do stworzenia warunków, w których badana jest próbka, jak najbardziej zbliżonych do warunków w naturze. Głównymi czynnikami są: temperatura, stan naprężenia, któremu poddana jest skała, a który

w laboratorium przeważnie zastępuje się ciśnieniem hydrostatycznym, zawartość w porach skały płynów ich ciśnienie.

Podstawowymi narzędziami w laboratorium mechaniki skał są maszyny wytrzymałościowe, głównie prasy. W nich dokonuje się ściskanie próbek regularnych. Okazuje się jednak, że mimo, iż konstruuje się aktualnie bardzo wysokiej klasy maszyny to nie pozbawione są one pewnych mankamentów. Jednym z nich, stosunkowo istotnym, jest obecność w prasie tzw. kulisy, która zapewnia ruch obrotowy płyty naciskającej na powierzchnię czołową próbki i tym samym zapewnia jej równomierne obciążenie. Doświadczenie uczy, że próbki o poprzecznych rozmiarach małych w porównaniu z wymiarami płyty doznają podczas ściskania działania znacznego momentu zginającego próbkę. O wiele mniejszy moment zginający powoduje płyta prasy usztywniona. W tym przypadku moment wynika praktycznie wyłącznie z nieuniknionego braku równoległości podstaw próbki, co zostało potwierdzone doświadczalnie.

Otóż, jedna i ta sama próbka cylindryczna, z jednorodnego makroskopowo wapienia, na której obwodzie naklejono 16 tensometrów ściskana była w sposób nieniszczący w trojaki sposób w jednej i tej samej prasie. Ścismano ją płytami z kulisą, z płytami unieruchomionymi i płytą, która opierała się o małą kulkę. Rozkład odkształceń na obwodzie próbki dla jej dwóch obciążeń ilustruje rysunek 4.1. Widać, że kulisa powoduje tak duży moment zginający, że pewna partia próbki jest rozciągana. A więc w przekroju próbki występują naprężenia o znacznej rozpiętości. Znacznie mniejsza rozpiętość odkształceń a więc i naprężeń występuje w pozostałych przypadkach, w których zawsze wyniki były porównywalne. A zatem najlep-



Rys. 4.1 Rozkład odkształceń na poboczniczy próbki przy różnych systemach jej obciążania  
 Fig. 4.1 Strain distribution on a side surface of specimen for different loading systems

szym rozwiązaniem wydaje się zastosowanie płyty sztywnej. Szczegółowy opis zjawisk zachodzących w próbce liniowo sprężystej zginanej w prasie został podany przez Gustkiewicza (1975a) a w nieco ogólniejszy sposób przez Gustkiewicza (1975b). W szczególności wykazano tam, że pomiar odkształceń próbki, w trzech miejscach jej obwodu, pozwala znaleźć nie tylko odkształcenie średnie odpowiadające naprężeniu, które, jako iloraz siły nacisku prasy i powierzchni przekroju próbki, zawsze jest średnie, ale także maksymalne i minimalne odkształcenie w przekroju, a więc pozwala kontrolować moment zginający. Duża rozpiętość odkształceń w przekroju próbki radykalnie zmniejsza wartość granicy wytrzymałości, zwłaszcza materiału kruchego. Pęknięcie zaczyna się bowiem tam, gdzie naprężenie w przekroju próbki osiąga ma-

ksymalną wartość i stamtąd propaguje na całą próbkę. Eksperyment wykazał, że usunięcie płyty z kulisą zwiększyło granicę wytrzymałości badanego materiału dwukrotnie. W szczególności praca Gustkiewicza (1975b) omawia jeszcze wady i zalety pomiaru na próbce odkształceń w sposób lokalny, w centralnej jej części, i pomiaru globalnego, jako przemieszczeń podstaw próbki.

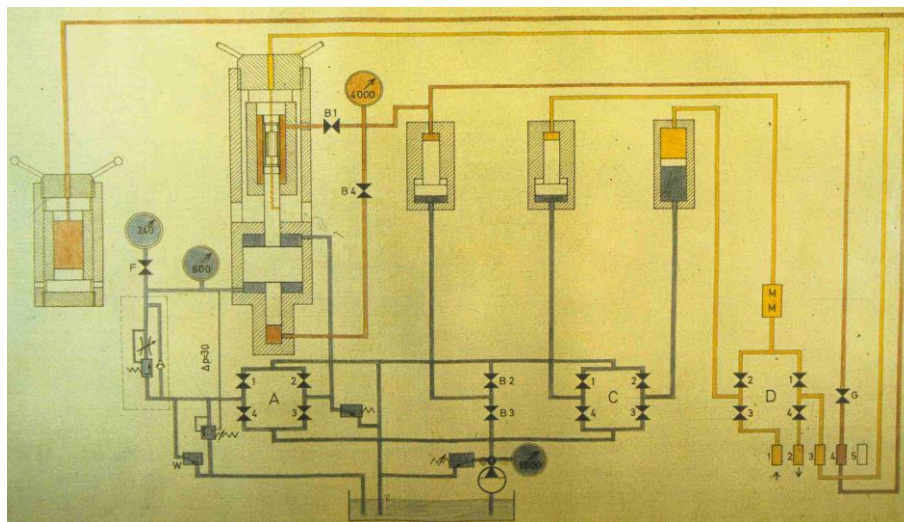
Ważnym elementem wyposażenia laboratorium mechaniki skał jest aparatura do badania próbek skał w trójosiowym stanie naprężenia, które może się zmieniać w zadawany sposób aż do osiągnięcia przez próbkę granicy wytrzymałości. Istnieje szereg typów aparatów zależnie od sposobu obciążania próbki. W połowie lat siedemdziesiątych ubiegłego stulecia powstała koncepcja, w której wybór padł na system występujący pod nazwą systemu Kármána. Polega on na tym, że cylindryczna próbka jest obciążana naciskiem cieczy o pewnym ciśnieniu zwanym ciśnieniem okólnym oraz siłą osiową tłoka prasy. Rozwiązanie praktyczne może być w postaci cylindrycznego naczynia ciśnieniowego umieszczonego w prasie bądź w formie samoistnej, złożonej z cylindra, prasy, źródła zasilania cylindra ciśnieniem i takiego źródła prasy. Zdecydowano się na to drugie rozwiązanie, bardziej skomplikowane, ale niezależne od innych urządzeń.

Przyjęto, że urządzenie ma być na tyle uniwersalne, aby mogło służyć wynikami górnikom, geologom i geofizykom, a więc jego ciśnienie okólne powinno odpowiadać głębokości w naturze sięgającej co najmniej kilkunastu kilometrów. Przyjęto także aby możliwe było badanie próbek, których pory nasycone byłyby płynami sorbującymi lub nie na nich. Objętość próbek przyjęto taką, aby czas napełniania porów płynami i sorbowania w nich zamykał się w ciągu co najwyżej kilku dni. Wreszcie założono, możliwość uzyskiwania podwyższonych temperatur w komorze wysokiego ciśnienia.

W wyniku nawiązanej współpracy z Aleksandrem Wysockim konstruktorem w ówczesnym Zakładzie Wysokich Ciśnień PAN powstał projekt a następnie realizacja urządzenia pod nazwą GTA – 10. Urządzenie dopuszcza próbki o średnicy 22 mm – 32 mm i smukłości 2, cechuje się maksymalną siłą nacisku tłoka prasy 1500 kN, ciśnieniem okólnym do 400 MPa i takim ciśnieniem wywoływanym w porach próbki a także możliwością powodowania przepływu płynów przez próbkę pod obciążeniem. W komorze urządzenia można wywoływać temperatury do 150 °C. Widok ogólny urządzenia przedstawia rysunek 4.2 a jego schemat rysunek 4.3. Centralnym elementem urządzenia jest komora, z widoczną w niej próbką, zawarta w ramie prasy, której tłok naciska próbkę. Prasa jest napędzana z widocznej w dole rysunku pompy poprzez układ zaworów A. Zawory układu B służą do wywołania przez widoczny multiplikator ciśnienia w komorze. Zawory C służą do kierowania medium ciskącego do multiplikatora cieczowo-gazowego i separatora cieczy od gazy. Wywołane ciśnienie, pobieranego z niewidocznej butli, gazu przez zawory układu D, przez te zawory może być przekazane do porów próbki. O ile zachodzi potrzeba, gaz może być odprowadzany przez kanał w tłoku prasy. Gaz też jest stosowany do wywołania ciśnienia porowego w innym medium, którym wcześniej pory próbki



Rys. 4.2 Ogólny widok urządzenia GTA-10  
Fig. 4.2 General view of the GTA-10 device



Rys. 4.3 Schemat ideowy urządzenia GTA-10  
Fig. 4.3 Scheme of the GTA-10 device

są napełnione.

Badanie funkcjonowania urządzenia dokonał Marek Długosz. Opis urządzenia i przykłady wyników badania w nim skał opisali Długosz i in. (1981). Urządzenie w kilku odmianach było powielane przez wykonawcę i zakupione do laboratoriów w Polsce, Czechach i Francji.

Jako urządzenia dodatkowe do GTA 10 powstały jeszcze aparaty do sorbowania płynów pod ciśnieniem do kilku MPa na próbkach, poza GTA 10. Chodzi o to, że czas sorbowania płynu w próbce trwa do kilku dni i dokonanie tego w aparacie GTA 10 blokowałoby możliwości jego użycia w innych celach. Ponadto Pracownia Odkształceń Skał została zaopatrzona w urządzenie GCA 30, które jest kompresorem pozwalającym ścisnąć próbki o średnicy 22 mm w gazie lub cieczy pod ciśnieniem do 1500 MPa. Obydwa urządzenia wysokociśnieniowe są wyposażone w elektryczne przepusty, pozwalające mierzyć elektrycznie procesy zachodzące w ich komorach ciśnieni.

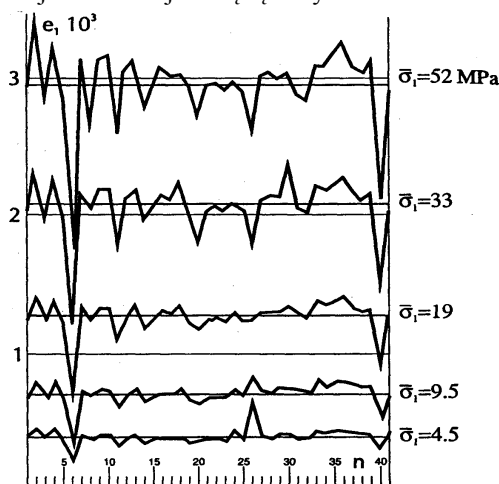
Wspólnie z Prof. A. Czaplńskim i dr S. Hołdą zbudowano aparat do badania siły pęcznienia próbek węgla, obciążonych w wysokiej próżni i następnie poddawanych sorpcji płynów do ciśnienia równowagowego przy ustalonej temperaturze. Aparat z przykładem wyników został opublikowany przez Hołdę i in. (1986).

## 5. Deformacje eksperymentalne

Deformacje eksperymentalne rozważane są w skali laboratoryjnej. Można bowiem wspomnieć, że deformacje eksperymentalne można wywoływać w naturze, na przykład badając próby o wymiarze liniowym rzędu metra.

Odkształcenie liniowe zdefiniowane na gruncie ośrodka ciągłego jest pojęciem punktowym przypisanym kierunkowi w przestrzeni. Tymczasem zmierzyć odkształcenie można tylko wzdłuż odcinka o skończonej długości. Grunt czy skała, czyli ośrodki rzeczywiste, są losowo niejednorodne i nieciągłe w różnych skalach rozpatrywania. Rzeczywiste odkształcenia w takich ośrodkach są wielkościami losowo się zmieniającymi od miejsca do miejsca. Wynik po-

miaru takich odkształceń w danym kierunku zależęć będzie od długości odcinka, zwanego bazą pomiarową, wzdłuż którego dokonuje się pomiar. Odkształcenia rzeczywiste na ogół będą fluktuować wokół pewnych wartości średnich. Na przykład jeśli czoła próbki cylindrycznej przeźmieści się równomiernie to odkształcenia od miejsca do miejsca będą oscylować wokół wartości stałej. Przykład takich fluktuacji zawiera rysunek 5.1 w przypadku pewnego piaskowca. Na obwodzie centralnej części próbki naklejono 40 tensometrów równolegle do osi próbki. Tensometry bocznymi krawędziami się stykały między sobą. Na rysunku pokazano wyniki pomiaru odkształceń dla kilku wartości naprężenia osiowego wywołanego naciskiem w prasie. Granica wytrzymałości próbki wynosiła 55 MPa. Zbadano i oceniono probabilistycznie fluktuacje w kilku rodzajach skał w jednoosiowym stanie naprężenia ściskającego. Wyniki zostały opublikowane przez Gustkiewicza (1975c, 1985a, 1985b) oraz przez Gustkiewicza i Kleina (1975).

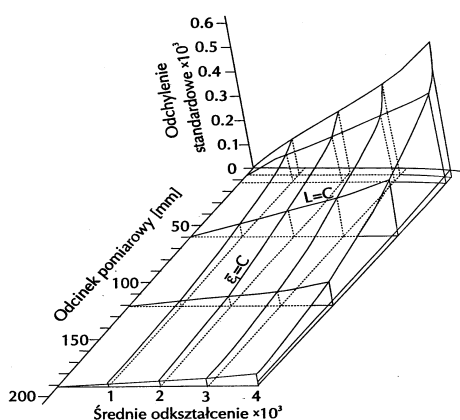


Rys. 5.1 Fluktuacje odkształceń na poboczniczy próbki piaskowca  
Fig. 5.1 Strain fluctuations on the side surface of a sandstone specimen

W każdym przypadku badanej skały stwierdzono, że o ile odkształcenie jest losową funkcją położenia, to w danym miejscu jest regularną funkcją odkształcenia średniego. Kształt tej funkcji odzwierciedla takie zjawiska w próbce jak zamykanie się istniejących spękań, pojawianie się i rozwój spękań nowych stabilnych i niestabilnych, prowadzących do ruiny próbki. Zbadano także funkcje autokorelacji fluktuacji i takie ich charakterystyki probabilistyczne jak odchylenie standardowe, skośność i spłaszczenie krzywej rozkładu gęstości prawdopodobieństwa. Charakterystyki te, wyrażone jako funkcje odkształcenia średniego, także reagują na wymienione, charakterystyczne zjawiska zachodzące w próbce podczas jej obciążania.

W szczególności odchylenie standardowe, wyrażone jako funkcja odkształcenia średniego i długości bazy pomiarowej, czyli odcinka wzdłuż którego mierzy się odkształcenie, może mieć znaczenie dla ustalenia rozmiaru liniowego tzw. obszaru reprezentatywnego. Może to być obszar, dla którego fluktuacje osiągają poziom białych szumów. Przykład odchylenia standardowego jako funkcji odcinka pomiarowego i odkształcenia średniego dla pewnego granitu przedstawia rysunek 5.2. Widać, że ze wzrostem odkształcenia odchylenie standardowe rośnie a z długością odcinka pomiarowego maleje. Maksymalne odkształcenie średnie zostało zarejestrowane praktycznie na granicy wytrzymałości próbki.

W trójosiowym stanie naprężenia studiowano deformacje i pękanie próbek skał. Badano je zależnie od stanu naprężenia a w szczególności od ciśnienia okólnego i ciśnienia porowego płynów sorbujących lub nie na materiale skalnym. Badania wykonywano na kilka sposobów. Jednym ze sposobów było ściskanie ciśnieniem hydrostatycznym próbek powietrznie suchych lub nasyconych płynami pod ciśnieniem porowym, stałym bądź zmiennym. Obydwa ciśnienia zwykle osiągały wartość do 400 MPa, a w pewnych przypadkach 1500 MPa. Do sposobu drugiego należało ściskanie dewiatorowe próbek powietrznie suchych lub nasyconych sorbującymi lub nie płynami pod ciśnieniem porowym, przy stałym ciśnieniu okólnym. Oba ciśnienia



Rys. 5.2 Odchylenie standardowe fluktuacji odkształcenia jako funkcja odkształcenia średniego i długości bazy pomiarowej; granit

Fig. 5.2 Standard deviation of strain fluctuations as a function of mean strain and measurement length of the gauge; granite

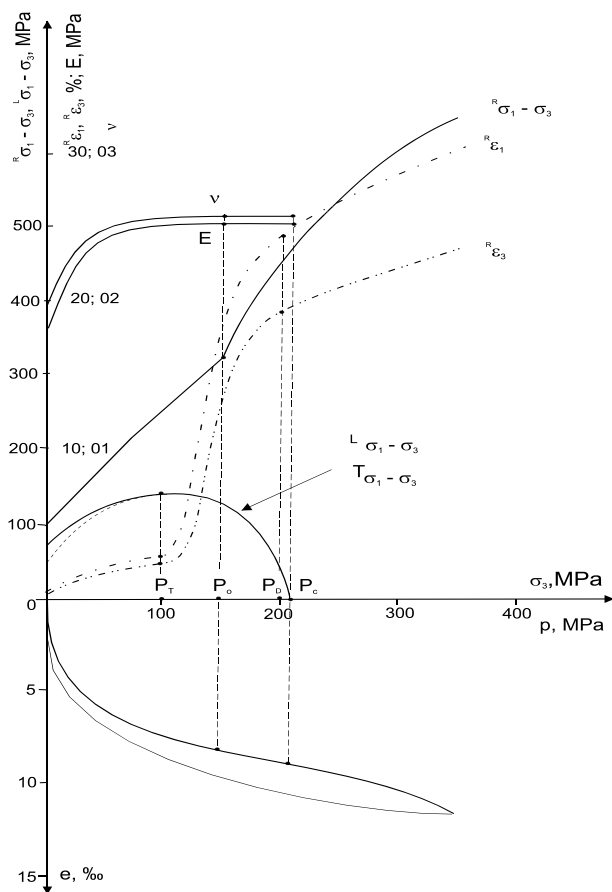
mogły osiągać niezależnie wartości do 400 MPa. Wykonywano także eksperymenty złożone z obu wymienionych sposobów. Serie próbek ściskano hydrostatycznie a następnie badano metodą dewiatorową. Wyniki były odnoszone do wyników otrzymanych dewiatorowo na próbkach nie ściskanych hydrostatycznie.

Wyniki badania ścisłości skał opublikował Gustkiewicz (1989a, 1989b, 1998) a także Gustkiewicz i Orengo (1998). Do ciekawszych wyników można zaliczyć stwierdzenie histerezy sprężystej w pewnych przypadkach skał spękanych na ich krzywej ścisłości, co może być wynikiem wyindukowanych w niejednorodnym materiale lokalnych naprężeń dewiatorowych, które są powodem poślizgów a więc i dyssypacji energii na zamkniętych powierzchniach spękań. Inne zauważone regularności dotyczą ścisłości skał z inertnym gazem pod ciśnieniem w porach. W granicach liniowej sprężystości skały ciśnienie efektywne równe jest ciśnieniu okólnemu pomniejszonemu o ułamek ciśnienia porowego.

Tymczasem dwa ograniczające to liniowe zachowanie skały ciśnienia efektywne, tzn. ciśnienie kompaktacji zamykające spękania i ciśnienie konsolidacji, przy którym pojawiają się trwałe odkształcenia w skale, wyrażają się jako różnice między ciśnieniem okólnym odpowiednio kompaktacji lub konsolidacji a całym ciśnieniem porowym. Ściskanie hydrostatyczne węgla w dwutlenku węgla ujawniło znaczące siły pęcznienia tej skały, przeciwstawiające się ciśnieniu hydrostatycznemu, które to pęcznienie mogło pokonać, osiągając wartości rzędu setek MPa. Podobne przeciwstawne działanie sił pęcznienia naprężeniom zaobserwowano podczas badania zachowania chłonącego wodę piaskowca obciążonego siłą ściskającą przy stałym odkształceniu. Z jednej strony indukowały się siły pęcznienia z drugiej następowała relaksacja naprężeń. Można było tak dobrać odkształcenie, że obie te siły pozostawały w długim, wielodniowym okresie, w równowadze.

Wyniki badań w dewiatorowym stanie naprężenia przy stałym ciśnieniu okólnym i ewentualnie porowym opublikowali Gustkiewicz (1985c, 1989b, 1990), Gustkiewicz i Orengo (1991) oraz Czaplinski i Gustkiewicz (1990). Podczas badań próbek w dewiatorowym stanie naprężenia, uzupełnionych o wyznaczenie krzywej ścisłości, wyodrębniono cztery znane charakterystyczne ciśnienia okólne: wspomniane już ciśnienie kompaktacji  $p_0$  i konsolidacji skały  $p_c$  oraz ciśnienie  $p_T$  przejścia od kruchego pęknięcia do ciągliwego płynięcia i ciśnienie  $p_D$  pełnej ciągliwości, powyżej którego skała wykazuje ciągliwość typu plastycznego lub kataklastycznego. Stwierdzono, że pierwsze dwa z tych ciśnień mogą swoją obecność uwidaczniać na krzywej zależności między granicą wytrzymałości a ciśnieniem okólnym. Otóż, przy przejściu ciśnienia okólnego  $\sigma_3$  przez jedno z tych ciśnień na krzywej pojawia się większy przyrost wytrzymałości niż poniżej tego ciśnienia. Na rysunku 5.3 krzywa  $^R\sigma_1-\sigma_3$  wykazuje ten efekt w otoczeniu ciśnienia kompaktacji  $p_0$ , co może być spowodowane umocnieniem materiału w wyniku kompletnego zamknięcia spękań i ograniczenia na nich poślizgów. Podobny efekt może pojawić się po osiągnięciu ciśnienia konsolidacji. Występujące wtedy deformacje plasty-

czne, w wyniku wyindukowanych lokalnych naprężeń dewiatorowych, umacniają materiał skalny. Dwa drugie ciśnienia są wyraźnie wyznaczone przez krzywe zależności między odkształceniem podłużnym  $^R\varepsilon_1$  i poprzecznym  $^R\varepsilon_3$  na granicy wytrzymałości a ciśnieniem okólnym  $\sigma_3$ .



Rys. 5.3 Synoptyczny przegląd własności marmuru zależnie od ciśnienia okólnego

Fig. 5.3 Synoptic view of marble properties as depending on confining pressure

Ciśnieniu przejścia  $P_T$  odpowiada na krzywych punkt przegięcia a poczynając od ciśnienia pełnej ciągłości  $P_D$  bardzo szybki przyrost odkształcenia wyraźnie maleje lub nawet staje się zerowy. Krzywe, razem lub pojedynczo, stanowią kryterium, określające przedziały ciśnienia, w których skała odpowiednio pęka krucho, bądź płynie ciągliwie, bądź wreszcie znajduje się w stanie pośrednim między kruchym pękanem a ciągliwym płynięciem. Rysunek 5.3 zawiera jeszcze, wyrażone jako funkcje ciśnienia okólnego  $\sigma_3$ , krzywe  $^L\sigma_1 - \sigma_3$ ,  $^T\sigma_1 - \sigma_3$  przedstawiające granice liniowości skały między odkształceniem podłużnym i poprzecznym próbki a naprężeniem różnicowym. Na rysunku umieszczono jeszcze wykresy wyrażające moduł Younga  $E$  i współczynnik Poissona  $v$  jako funkcje ciśnienia okólnego.

Wraz z partnerami, polskim (Prof. A. Czaplński) i francuskim (Y. Orengo) zbadano zachowanie węgla kamiennego podczas jego nasycania wodą, lub dwutlenkiem

węgla. W szczególności zarejestrowano takie zjawiska jak emisja akustyczna, deformacje pęcznienia i siłę pęcznienia próbek podczas chłonięcia tych płynów poczynając od próżni do ciśnienia równowagi na różnych poziomach jego wartości. Samodzielnie zbadano także właściwości skał, a w tym i węgla, w trójosiowym stanie naprężenia, po pełnym ich nasyceniu płynami sorbującymi lub nie pod ciśnieniem w porach. W szczególności wyrażono granicę wytrzymałości, moduł Younga, granicę sprężystości jako funkcje ciśnienia porowego dla ciśnienia okólnego jako parametru.

Wpływ wysokiego ciśnienia, do 1500 MPa, na trwałe zmiany właściwości różnych skał opisany został przez Gustkiewicza (1989b, 1995). Dla skały szczególnej opisali takie zmiany Gustkiewicz i in. (1989). W szczególności wykazano, że doznanie przez skałę wszechstronnego ciśnienia hydrostatycznego powyżej kilkuset MPa zmienia w stosunku do skały nie

ściskanej jej wytrzymałość, ciśnienie przejścia między kruchym pękaniem a ciągliwym płynięciem, odkształcenie na granicy wytrzymałości, a także krzywe ściśliwości. Zauważono, że o ile pewne składniki skały doznają przemian fazowych (np. kalcyt-aragonit) podczas ściskania, to skała doznaje trwałych zmian skokowych właściwości, podczas gdy w materiale chemicznie jednorodnym (np. czysto kalcytowy wapień) przemiany fazowe np. kalcyt-aragonit, które okazują się być odwracalnymi, nie są zapamiętywane przez skałę. W tym drugim przypadku właściwości pozostają niezmienione w stosunku do skały ściskanej.

## **Literatura**

- [1] Czaplński A., Gustkiewicz J. 1990: Sorpcyjne naprężenia i odkształcenia w węglu, w: Górotwór jako ośrodek wielofazowy, Litwiniszyn (red.) t. 2, 455 – 468.
- [2] Długosz M., Gustkiewicz J., Wysocki A. 1981a: Apparatus for investigation of rocks in a triaxial state of stress. Part I Characteristic of the apparatus and the investigation method, Arch. Górn. 26, 17 – 28.
- [3] Długosz M., Gustkiewicz J., Wysocki A. 1981b: Apparatus for investigation of rocks in a triaxial state of stress. Part II Some investigation results concerning rocks, Arch. Górn. 26, 29 – 41.
- [4] Gustkiewicz J. 1963: L'ellipse de la déformation du terrain cause par l'extraction minière, Bull. Acad. Pol. Sci. Sér. Tech. 11, 9 – 14.
- [5] Gustkiewicz J. 1965: O pewnym pomiarze deformacji terenu metodami tensometrii oporowej w obszarze eksploatacji górniczej, Prace Komisji Nauk Technicznych, Górnictwo 1, 183 – 198.
- [6] Gustkiewicz J. 1966: Rezonatorowy czujnik gruntowy, Prace Kom. Nauk Techn. Górnictwa 3, 157 – 173.
- [7] Gustkiewicz J. 1970: Flexural field deformations with the range of effects of minning working, Bull. Acad. Pol. Sci. Sér. Tech. 18, 533 – 540.
- [8] Gustkiewicz J. 1972: Fleksyjna deformacja terenu w zasięgu wpływów eksploatacji górniczej, Arch. Górn. 17, 83 – 116.
- [9] Gustkiewicz J. 1973a: Flexural deformations of a material line in a continuous body, Bull. Acad. Pol. Sci. Sér. Tech. 21, 15 – 18.
- [10] Gustkiewicz J. 1973b: The second geodesic flexion on a line on a material surface, Bull. Acad. Pol. Sci. Sér. Tech. 21, 545 – 549.
- [11] Gustkiewicz J. 1975a: Uniaxial compression testing of brittle rock specimens with special consideration given to bending moment effects, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 12, 13 – 25.
- [12] Gustkiewicz J. 1975b: O zniekształceniach w wyniku testowania skał na jednoosiowe ściskanie, Arch. Górn. 20, 17 – 39.
- [13] Gustkiewicz J. 1975c: Strain fluctuations in heterogeneous rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 12, 181 – 189.
- [14] Gustkiewicz J., Klein G. 1975: Random character of strains in rocks, Arch. Górn. 20, 381 – 394.
- [15] Gustkiewicz J. 1976: Description of pure flexion state of surface, Arch. Górn. 21, 3 – 18.
- [16] Gustkiewicz J. 1985a: Strain fluctuations within some rock specimens under uniaxial compression, Part I. Local fluctuations, Acta Geophys. Pol. 33, 389 – 405.
- [17] Gustkiewicz J. 1985b: Strain fluctuations within some rock specimens under uniaxial compression, Part II. Certain probabilistic characteristics of the fluctuations, Acta Geophys. Pol. 33, 406 – 428.
- [18] Gustkiewicz J. 1985c: Transition of rocks from the brittle to ductile state: strain at failure as a function of confining pressure, Acta Geophys. Pol. 33, 169 – 181.
- [19] Gustkiewicz J., Kanciruk A., Stanisławski L. 1985: Some advancements in soil strain measurement methods with special reference to mining subsidence, Min. Sci. & Technol. 2, 237 – 252.
- [20] Gustkiewicz J., Kanciruk A., Stanisławski L. 1995: Przetworniki strunowe, Elektronizacja 1, 5 – 8.
- [21] Gustkiewicz J. 1989a: Objętościowe deformacje skały i jej porów, Arch. Min. Sci. 34, 594- 609.
- [22] Gustkiewicz J. 1989b: Synoptiv view of mechanical behaviour of rocks under triaxial compression, Rock at Great Depth, Maury & Fourmaintraux (eds.) Balkema, 3 – 10.
- [23] Gustkiewicz J., Mochnacka K., Orenge Y. 1989: Modifications permanentes d'une roche par pression hydrostatique, Rock at Great Depth, Maury & Fourmaintraux (eds.) Balkema, 131 – 139.



- [24] Gustkiewicz J. 1990: Deformacje i wytrzymałość skał w trójosiowym stanie naprężenia z uwzględnieniem płynów porowych, w: *Górotwór jako ośrodek wielofazowy*, Litwiniszyn (red.) t. 1, wydawnictwo AGH, 97 – 136.
- [25] Gustkiewicz J., Orengo Y. 1991: Zmiany zachowania węgla pod działaniem wody, w: *Górotwór jako ośrodek wielofazowy*, Litwiniszyn (red.) t. 3, 763 – 781.
- [26] Gustkiewicz J., Orengo Y. 1998: Behavior of coal caused by water or carbon dioxide, in: *Advances in Rock Mechanics*, Yunmei Lin (ed.), World Scientific, 18 – 27.
- [27] Gustkiewicz J. 1995 : Permanent changes in deformations and strenght of rocks due to hydrostatic pressure, *High Pressure Science & Technology*, Trzeciakowski (ed.), 909 – 912.
- [28] Gustkiewicz J. 1998 : Compressibility of rocks with a special consideration given to pore pressure, *Poromechanics*, Thimus et al. (eds.) Balkema, 573 – 577.

### **Study of experimental and in situ deformations**

In the paper some fundamental notions describing deformation types of surface as well as describing deformation of material rockmass elements are mentioned. The rock mass is considered as a continuous medium.

Some place is devoted to a soil strain measurement technique in the range of mining excavation and to methodical and technical problems concerned with laboratory rock testing. The last part of the paper deals with some certain results of a study rock experimental strains.

*Przekazano: 15 marca 2001*