

Gdy ziemia płynie

ANDRZEJ SAWICKI

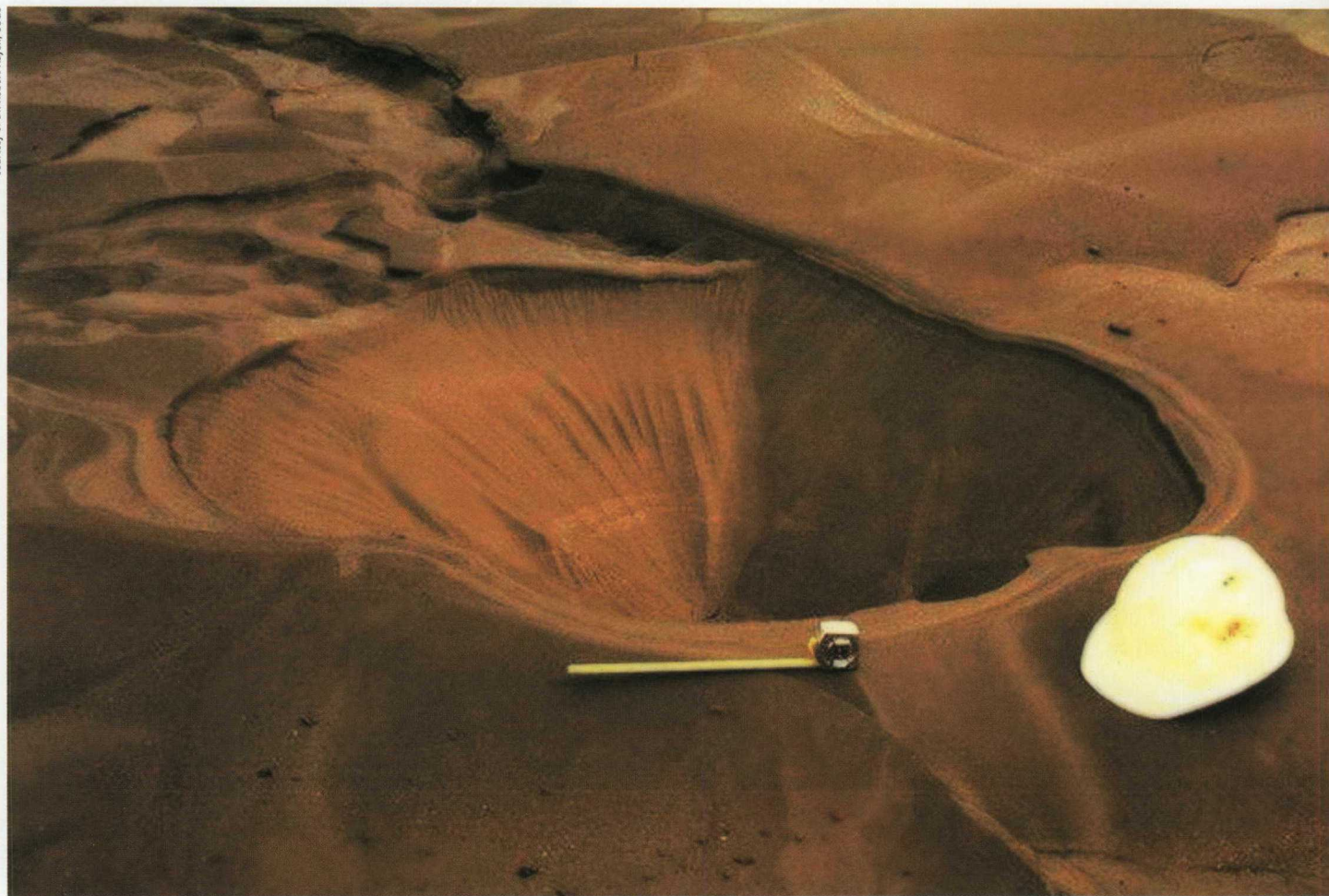
Instytut Budownictwa Wodnego, Gdańsk
Polska Akademia Nauk
as@ibwpan.gda.pl

Upłynnienie gruntów było przyczyną wielu katastrof powodujących miliardowe straty i zabierających życie tysiącom ludzi. Zniszczeniu ulegały zapory ziemne, nabrzeża portowe i konstrukcje morskie, mosty, budynki, drogi

Upłynnienie nawodnionych gruntów jest zjawiskiem polegającym na gwałtownym przejściu tych materiałów ze stanu o makroskopowych cechach ciała stałego

do stanu o cechach gęstej cieczy lepkiej. Zjawisko to jest wywołane naprężeniami ścinającymi w gruncie wskutek silnych wymuszeń, takich jak trzęsienia ziemi, wybuchy czy falowanie sztormowe. Wielokrotnie zaobserwowano, że budynki mieszkalne częściowo zatonały w upłynnionym podłożu, a niektóre z nich jeszcze się przechyliły wskutek nierównomiernych osiadań. Ludzie, którzy mieszkali na 2. piętrze, raptem stwierdzili, że są w piwnicy. Po trzęsieniu ziemi w Turcji w roku 1999 stwierdzono, że pewne konstrukcje znikły w upłynnionym dnie morskim, a nadmorska restauracja jest na dnie morza. Zjawisko upłynnienia jest również zagrożeniem dla konstrukcji morskich, takich jak platformy wydobywcze czy rurociągi, które transportują ropę. W Polsce, która nie jest regionem szczególnie po-

Courtesy of Dr. Robert Kayen, USGS



Kratery na powierzchni ziemi świadczą o gwałtownej dyssypacji ciśnienia wody w porach gruntu w postaci gejerów mieszaniny wodno-gruntowej

Upłynnienie gruntów

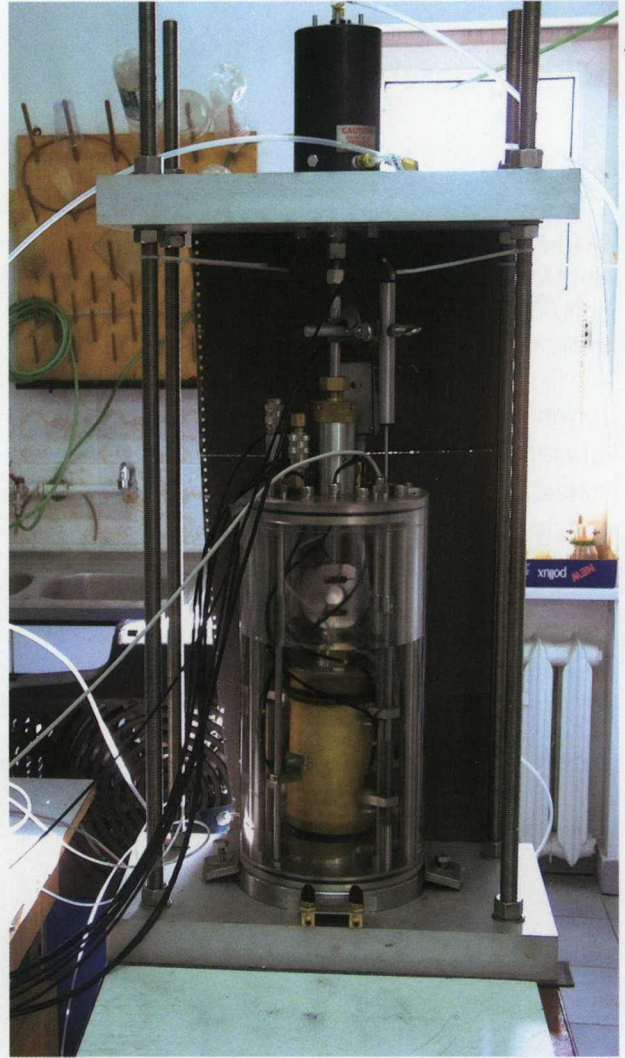
datnym na wstrząsy sejsmiczne, zjawisko upłynnienia też występuje. Była z nim kojarzona katastrofa zapory w Dychowie. Do głównych zagrożeń największego w Europie składowiska odpadów poflotacyjnych w Zagłębiu Miedziowym w Rudnej zaliczono właśnie potencjalne upłynnienie osadów służących do nadbudowy zbiornika – wiązało się to głównie ze wstrząsami parasejsmicznymi wskutek tąpnięć górniczych. Zjawisko upłynnienia może mieć też znaczenie w polskiej strefie brzożewej Bałtyku w związku z planowaną rozbudową infrastruktury takiej jak sztuczne wyspy.

Na czym polega upłynnienie gruntów?

Nawodniony grunt jest porowatą strukturą złożoną ze szkieletu gruntowego oraz z wody wypełniającej pory. Szkielet gruntowy jest utworzony z mineralnych ziaren o różnych rozmiarach i kształcie. W zwykłych warunkach ziarna te stykają się z sobą i cała struktura może przenosić dodatkowe obciążenia, np. od budowli. Wskutek ciężaru własnego gruntu oraz zewnętrznych oddziaływań na powierzchniach kontaktu pomiędzy ziarnami pojawiają się siły, których miarą są tzw. naprężenia efektywne. Właśnie te siły decydują o spójności szkieletu gruntowego i jego zdolności do przenoszenia dodatkowych obciążeń. Jeżeli znikną, szkielet gruntowy przestanie pełnić swoją funkcję. Naprężenia efektywne są zatem kluczem do zrozumienia zjawiska upłynnienia gruntów. Są one ściśle związane z ciśnieniem wody w porach gruntu. Wzrostowi ciśnienia porowego towarzyszy redukcja naprężeń efektywnych i w skrajnych warunkach, gdy ciśnienie porowe będzie wystarczająco duże, naprężenia efektywne mogą zniknąć, co jest równoważne upłynnieniu. Budowla posadowiona na takim podłożu zaczyna zatem tonąć i ten proces trwa tak długo, jak podłoże pozostaje upłynnione, zwykle kilkanaście sekund, czyli tyle co trzęsienie ziemi. Potem, gdy ustaje wymuszenie, nadwyżka ciśnień porowych ulega dyssypacji i podłoże powraca do stanu prawie wyjściowego.

Początek drogi

Upłynnienie gruntu poprzedzone jest wzrostem ciśnienia porowego, któremu towarzyszy redukcja naprężeń efektywnych. W zwyczajnych warunkach eksploatacyjnych, gdy nie ma ekstremalnych wymuszeń, ciśnienie wody w porach można łatwo obliczyć. Obliczenie nadwyżki ciśnień porowych, generowanej przez dodatkowe wymuszenia, jak wspomniane trzęsienia ziemi, wybuchy czy falowanie sztormowe, jest znacznie trudniejszym zadaniem. Dodatkowo pojawiają się inne problemy, np. makroskopowe osłabienie szkieletu gruntowego postępujące w miarę generacji ciśnienia porowego, co przejawia się tym, że sztywność szkieletu gruntowego jest coraz mniejsza i materiał jakby mięknie. Modelowanie wymienionych zjawisk jest dużym wyzwaniem badawczym



Waldemar Swirski

Badania próbek nawodnionego gruntu w cyklicznym aparacie trójosiowego ściskania w laboratorium IBW PAN

w mechanice gruntów i inżynierii. Wydaje się, że ciągle jesteśmy tu jeszcze na początku drogi.

Modelowanie upłynnienia

Obserwacja zjawiska upłynnienia w warunkach rzeczywistych jest bardzo trudna, gdyż występuje ono głównie podczas zdarzeń ekstremalnych, które są w większości nieprzewidywalne, a ponadto budzą grozę, co nie sprzyja badaniom naukowym. Dopiero badanie skutków takiego zdarzenia pozwala na stwierdzenie, czy nastąpiło upłynnienie gruntów, czy nie. Oprócz ewidentnych dowodów, np. w postaci zatopionych budynków, są też inne oznaki upłynnienia, jak występowanie kraterów na powierzchni gruntu, które były ujściem dla wygenerowanego ciśnienia porowego w postaci geizerów wody gruntowej. Badania empiryczne pozwoliły na identyfikację czynników sprzyjających upłynnieniu. Stwierdzono, że upłynnieniu podlegają w pełni nawod-

nione grunty sypkie, o określonym składzie granulometrycznym i raczej luźnym upakowaniu ziaren oraz że czynnikiem sprawczym są naprężenia ścinające, głównie cykliczne, ale też czasem o charakterze monotonicznym. Ta wiedza empiryczna pozwoliła na sformułowanie pierwszych modeli teoretycznych opisujących omawiane zjawiska, w tym modeli zaproponowanych w Instytucie Budownictwa Wodnego PAN.

Modele opracowane w IBW PAN oparto na analogii pomiędzy zagęszczaniem gruntu suchego albo nawodnionego, ale przy swobodnym przepływie wody przez pory, a generacją ciśnienia porowego w warunkach bez odpływu wody z porów, takich jakie mają miejsce w czasie krótkotrwałych dynamicznych obciążeń. W pierwszej kolejności zbudowano teorię zagęszczania gruntów sypkich poddanych obciążeniom cyklicznym, którą później uzupełniono o model opisujący deformacje gruntów w zakresie poprzedzającym osiągnięcie stanu granicznego. Następnie, korzystając ze wspomnianej analogii, opracowano model opisujący generację ciśnienia porowego w nawodnionym gruncie oraz degradację własności mechanicznych szkieletu gruntowego, zarówno dla obciążeń cyklicznych, jak i monotonicznych. Modele te zweryfikowano w laboratorium, a następnie zastosowano do analizy problemów o dużym znaczeniu praktycznym: osiadania fundamentów pod turbogeneratorami; osiadania nawierzchni drogowych i nasypów kolejowych wskutek cyklicznego ruchu pojazdów; osiadania gruntów wskutek trzęsienia ziemi; opisu zjawisk podczas wbijania pali gruntowych; opisu zagęszczania i upłynnienia gruntów podczas wybuchów; opisu generacji ciśnienia porowego w dnie morskim podczas sztormu i upłynnienia podłoża pod falochronem; opisu dynamiki strefy brzegowej morza podczas trzęsienia ziemi; opisu zjawiska tonięcia obiektów w upłynnionym podłożu; analizy procesu generacji ciśnień porowych w zaprze ziemnej podczas trzęsienia ziemi; opisu dyssypacji ciśnień porowych.

Piąty stan materii

Przedstawiono tu zaledwie jedno spektakularne zjawisko charakterystyczne dla gruntów. Warto może wspomnieć, że ośrodki sypkie są też przedmiotem badań fizyków zajmujących się problematyką złożoności w przyrodzie i samoorganizacji. Coraz liczniejsze prace na ten temat są publikowane nawet w takich prestiżowych czasopismach, jak „Nature” czy „Physical Review Letters”. Niektórzy autorzy, na pewno z przesadą, zaczynają traktować ośrodki sypkie jako piąty stan materii.

Mechanika ośrodków sypkich, w tym mechanika gruntów, nie jest już specjalnością zamkniętą. Wiele podstawowych problemów wciąż czeka na rozwiązanie. Miejmy nadzieję, że władze odpowiedzialne za rozwój nauki w Polsce umożliwią dalszy rozwój tej dziedziny,

a my postaramy się o to, aby badania były nadal prowadzone na światowym poziomie. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Sawicki A., Mierczyński J. (2006). Developments in modeling liquefaction of granular soils, caused by cyclic loads. *Applied Mechanics Reviews (Am. Soc. Mech. Eng.)*, 59, 91-106.

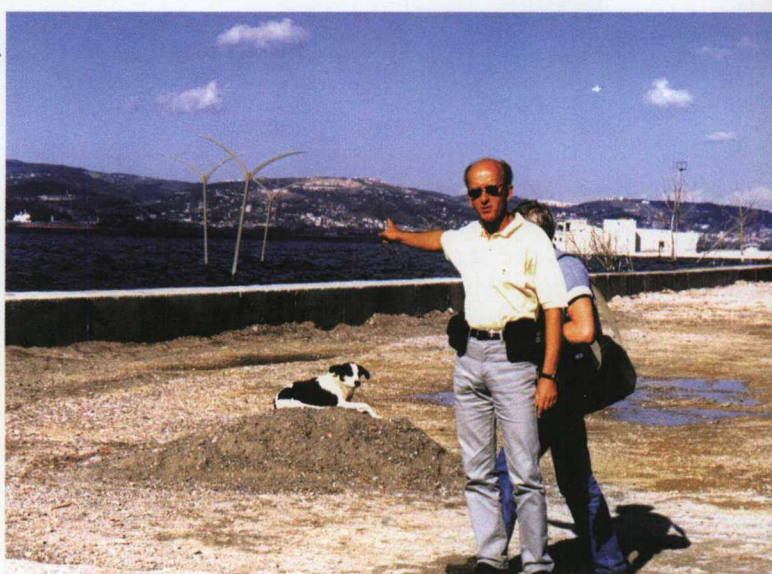
Groot de M.B., Bolton M.D., Foray P., Meijers P., Palmer A.C., Sandven R., Sawicki A., Teh T.C. (2006). Physics of liquefaction phenomena around marine structures. *Journal Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engng (Am. Soc. Civil Eng.)*, 132, 227-243.

Andrzej Sawicki



Zniszczone i przesunięte wskutek upłynnienia gruntu nabrzeże w porcie Derince (Turcja)

Andrzej Sawicki



Restauracja nad brzegiem morza Marmara spłynęła do morza z powodu upłynnienia gruntów. Widoczne są wierzołki latarni, które przed trzęsieniem ziemi oświetlały alejkę wiodącą do tej restauracji