

ZBIGNIEW WASIUTYŃSKI
Katedra Budowy Mostów
Politechniki Warszawskiej

PODSTAWY POSZUKIWANIA PRZYCZYN KATASTROF BUDOWLANYCH
METODĄ ANALIZY PRZEMIAN ENERGETYCZNYCH

Cel opracowania

Notatka ta ma na celu wskazanie metody postępowania w poszukiwaniu przyczyn katastrof budowlanych. Zmierza do tego celu przez sprecyzowanie pojęć, wskazanie podstawowych zależności fizykalnych i na ich tle – sposobu postępowania i wykonywania rachunków potwierdzających lub sprawdzających wystąpienie określonych zjawisk w przypadkach poszczególnych katastrof.

Dla uniknięcia nieporozumień i dwuznaczności w pojmowaniu "przyczyny" katastrofy, należy odróżnić przyczyny fizykalne od przyczyn czynnościowych.

Przyczyną fizykalną nazywamy zależność dwóch stanów energii ustrojów: stanu wcześniejszego i stanu późniejszego, między którymi zachodzi taki związek, że ilekroć obserwujemy występowanie pierwszego stanu energii, to możemy również zaobserwować po moim drugi stan energii tego ustroju.

Przyczynowość fizykalna jest więc określona przez następujące cechy:

- dwa stany: wcześniejszy i późniejszy,
- rodzaje i ilości energii występujące w tych stanach,
- parametry fizykalne wyznaczające przemiany energetyczne lub związane z nimi, a mianowicie: parametry geometryczne położenia ustroju i jego części, parametry ruchu jak prędkości i przyspieszenia, parametry drgań giętych i skrętnych, fal wzdłużnych, poprzecznych, powierzchniowych, przemian cieplnych, impulsów zewnętrznych odbieranych lub przekazywanych, przemian występujących wewnątrz materiału konstrukcji, to jest odkształceń trwałych, tar-

cia, zmęczenia, zmian struktury materiału lub własności odkształceniowych i wytrzymałościowych.

Przyczyną czynnościową nazywamy, czynności budowlane lub użytkowe wywołujące katastrofę, to jest doprowadzające ustrój do stanu stanowiącego punkt wyjścia do łańcucha przemian energetycznych kończącego się zniszczeniem budowli.

Przyczyną czynnościową mogą być świadome lub nieświadome błędy w pracy na jakimkolwiek szczeblu, od robotników do kierownictwa, błędy w wykonaniu robót, w ich niestaranności lub niedokładności, błędy w użyciu narzędzi i maszyn, przypadkowe zbiegi okoliczności, współcześnie występujących czynności i warunków zewnętrznych.

W tym znaczeniu przyczyną katastrofy mogą być również błędne posunięcia organizacyjne lub przepisy prawne.

Opracowanie niniejsze dotyczy wyłącznie przyczyn fizycznych i nie zajmuje się przyczynami czynnościowymi.

Metoda i jej pojęcia podstawowe

Poszukując przyczyn katastrof zbieramy najpierw obserwacje stanów konstrukcji przed zniszczeniem i po zniszczeniu.

Staramy się przy tym zebrać dane dotyczące takiej liczby różnych stanów, która by pozwoliła na połączenie zależnościami przyczynowymi każdego stanu z dwoma innymi w parę poprzedzającą i następującą. Jeżeli między stanem, który wydaje nam się poprzedzać inny stan, nie potrafimy wskazać zależności przyczynowej, to staramy się bądź zebrać więcej danych o tych stanach, bądź też, rozpoznać i oznaczyć inny stan występujący między tą parą.

Ten sposób postępowania jest oparty na następujących tezach.

Między każdą parą jakichkolwiek stanów może być określony związek przyczynowy.

Jeżeli między stanem późniejszym i wcześniejszym nie znajdujemy związku przyczynowego, to może być to wywołane jedynie niedostateczną znajomością tych stanów, to znaczy niezobserwowaniem parametrów określających dość wyraźnie poszczególne

rodzaje energii w każdym z nich tak, aby można było wskazać kolejność stanów na podstawie nieodwracalności tych przemian.

Stwierdzenie dodatkowych cech w którymkolwiek z dwóch rozpatrywanych stanów, może prowadzić do wyznaczenia obrazu stanu pośredniego występującego między poprzednimi.

Kolejne pary stanów poprzedzających i następujących mogą być ułożone w szereg rozpoczynający się stanem wiadomym z opisu konstrukcji przed jej zniszczeniem i kończącym się stanem zbadanym po zniszczeniu konstrukcji.

Tezy te przyjmujemy na podstawie obserwacji jakichkolwiek przemian energetycznych, którym możemy poddawać rzeczywiste konstrukcje budowlane lub ich modele. Jest rzeczą oczywistą, że przy takich obserwacjach mamy możliwość odróżniać dowolnie wiele kolejnych stanów i stwierdzać między nimi związki przyczynowe, poznając tak dokładnie ich cechy i następstwa, jak tylko jest to nam potrzebne.

Tezy wypowiedziane poprzednio nie są więc hipotezami, lecz stwierdzeniami doświadczalnymi.

Metoda ta jest oparta na pojęciu przyczynowości w ujęciu współczesnej fizyki transponowanym na zależności mechaniki budowli. W tych zależnościach wstępuje głównie pięć rodzajów energii:

- energia potencjalna w polu ciężenia ziemskiego,
 - energia odkształceń konstrukcji sprężystych i plastycznych,
 - energia kinetyczna fal, drgań i ruchu ogniw konstrukcji,
- Poza nimi występuje w badaniach przemian energetycznych energia dostarczana z zewnątrz lub oddawana na zewnątrz.

Może to być energia cieplna wywołująca nagrzanie konstrukcji, impulsy wewnętrzne a też energia oddawana przez konstrukcję na otoczenie od niej oddzielone w rozumowaniach jak na przykład fundamenty i podłoża.

Między tymi rodzajami energii zachodzą dobrze znane z mechaniki związki pozwalające w każdym stanie ustroju na obliczenia ilościowe i na określenia wszelkich parametrów odkształceń, ruchu, fal, drgań zarówno sprężystych jak i przemian pla-

stycznych. Tymi ilościami energii i parametrami odkształcalności w oparciu o zasadę zachowania energii i o znane cechy odkształcalności i przemian strukturalnych materiału można się posługiwać dla wyznaczenia kolejnych stanów konstrukcji. Operujemy przy tym porównaniami wielkości energii poszczególnych rodzajów występujących w stanie poprzedzającym z wielkościami energii w stanie następującym i na podstawie nierówności zachodzących między tymi ilościami stwierdzamy następstwo rozpatrywanych stanów.

Drugi rodzaj przesłanek stwierdzających przemiany energetyczne wypływa z obserwacji odkształceń trwałych, rys, pęknięć i złomów oraz przemian struktury materiałów oglądanej na próbkach makroskopowo lub mikroskopowo, zarówno tworzyw metalowych jak i kamiennych.

Obszerne badania laboratoryjne umożliwiają dokładne sklasyfikowanie obrazów przemian struktury wywołanych różnymi przyczynami mechanicznymi i na tej podstawie wskazywanie układów sił, które je wywołały, zniszczeń zmęczeniowych lub powolnych, odróżniania złomów kruchych i plastycznych, wywołanych przez rozciąganie lub ściskanie, zginanie lub skręcanie, wady strukturalne, starzenie metalu, zmiany własności odkształceniowych przy niskich temperaturach.

Obserwacja odkształceń zniszczonych elementów lub nawet tylko odkształconych w sposób trwały daje możliwość określenia kierunku przejścia impulsu przez dany element wskutek tego, że od strony dojścia impulsu ilość energii jest większa od ilości odhodzającej z danego elementu na inne części konstrukcji.

Dlatego to wszelkie przemiany trwałe dostrzegane w zniszczonej konstrukcji z zewnątrz albo przez wykonanie przekrojów lub szlifów, widoczne gołym okiem lub dające się zaobserwować pod mikroskopem, czy też za pomocą odpowiednich urządzeń badawczych mierzących na przykład zmiany twardości lub innych własności odkształceniowych - są podstawowymi przesłankami w określaniu przemian energetycznych występujących przy zniszczeniu konstrukcji.

Znaczenie niestateczności. Teza podstawowa

Początkiem zniszczenia konstrukcji jest utrata stateczności którejkolwiek części, powodująca utratę niezmienności kinematycznej, prowadząca do wytworzenia łańcucha kinematycznego przekształcenia energii potencjalnej w polu ciężenia w energię kinetyczną.

Niestateczność należy rozumieć jako jedną z następujących jej odmian:

- niestateczność układu części konstrukcji jako brył sztywnych,
- niestateczność odkształceniową części konstrukcji pod siłami przez nie przenoszonymi, może to być niestateczność sprężysta lub niesprężysta,
- niestateczność tworzywa części konstrukcji powodująca odkształcenia natychmiastowe lub powolne tego tworzywa i doprowadzająca do jego zarysowania lub zniszczenia.

Jest rzeczą istotną, aby w rozpatrywaniu przebiegu zniszczenia konstrukcji rozumieć niestateczność szerzej niż to zwykle jest przedmiotem rozpatrywań w zagadnieniach mechaniki budowli, bowiem przy zniszczeniu konstrukcji mogą występować wszelkie formy niestateczności fizycznej.

Wyliczone trzy odmiany niestateczności wiążą się w ten sposób ze sobą, że niestateczność materiału wymieniona na trzecim miejscu powoduje zwykle niestateczność jednej z części konstrukcji wymienioną na drugim miejscu, a ta z kolei wywołuje niestateczność całej konstrukcji.

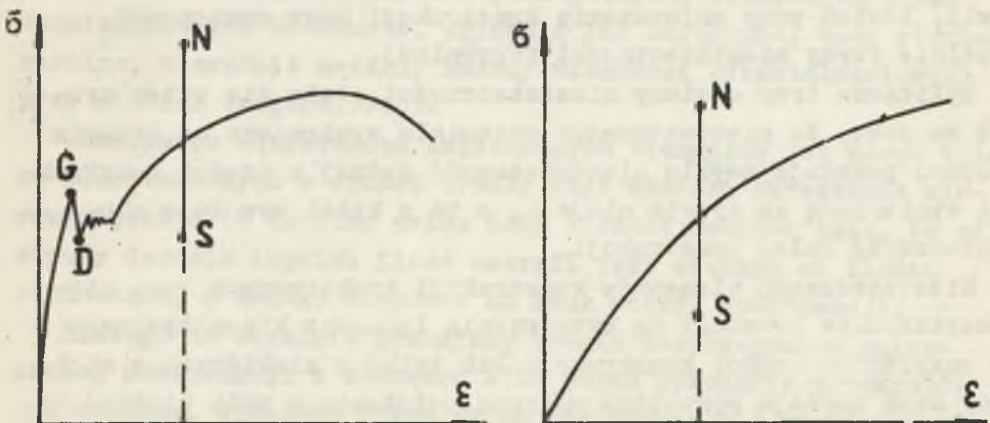
Niestateczność elementów konstrukcji traktowanych jako nieodkształcalne prowadzi do wytworzenia łańcucha kinematycznego ze wszystkich części konstrukcji lub tylko z niektórych z nich. Przy czym zostaje wyzwolona energia położenia w polu ciężkości i przekształcona w energię kinetyczną. To może wywoływać dalsze zmiany przez zniszczenie ogniw ustroju.

Łańcuch kinematyczny może mieć przesunięcia ograniczone w różnym zakresie. Na przykład łańcuch wywołany zniszczeniem filaru mostu prowadzi do upadku przęsła na dno podpory. Łańcuch wytworzony przez milimetrowe luzy między otworami na nity, a

śrubami montażowymi daje przesunięcia w granicach tych luzów i wywołuje energię kinetyczną zależną od prędkości wywołanej impulsem powodującym przesunięcia i od wielkości luzu umożliwiającego wystąpienie mniejszej lub większej prędkości przesunięcia.

Inne znaczenie fizykalne ma niestateczność ustroju wywołana odkształceniami jego elementów. Niestateczność ta w przypadku ustrojów izostatycznych prowadzi do wytworzenia łańcucha kinematycznego w pozostałych elementach.

Należy przy tym zwrócić uwagę, że stan niestateczności może utrzymywać się przez dość długi okres czasu zanim ujawni się łańcuch kinematyczny, gdyż siły konieczne do utrzymania w równowadze elementu zniekształconego przez niestateczność są początkowo tak niewielkie, że do ich przemieszczenia mogą wystarczać części budowli nie należące do właściwej konstrukcji jak na przykład rusztowania lub ściany wypełniające.



Rys. 1

Trzeci rodzaj niestateczności to niestateczność tworzywa występująca na przykład między ziarnami metalu, między ziarnami ferrytu i otoczkami perlitu lub między cząstkami metalu w

danych ziarnach - powodująca poślizgi warstw lub słupów tych cząstek, niestateczność między ziarnami kruszywa w betonie powodująca pęknięcia lub rysy, utrata przyczepności między prętami i betonem. Ten rodzaj niestateczności może być zobrazowany na wykresach odkształceń stali lub betonu w osiach współrzędnych odkształcenia, obciążenia lub naprężenia. Punkty S położone pod liniami znaczącymi zmienność (σ, ϵ) odpowiadają stanom równowagi statecznej. Punkty N leżące nad krzywymi tych wykresów znaczą stany równowagi niestatecznej. Podobnie punkt G oznaczający górną granicę podatności i przejścia do punktu D znaczącego dolną granicę podatności przy zniszczeniu części otoczek perlitycznych i jednoczesnym zniekształceniu niektórych ziaren, oznacza niestateczność zmieniającą budowę stali. Ten sam rodzaj niestateczności wewnętrznej występuje w betonach wskutek rys na powierzchniach ziaren w zaprawie lub w samych ziarnach. Utrata stateczności przez element wykonany z takiego materiału może być zahamowana przez zmianę układu sił wewnętrznych i wzrost tych sił w otoczeniu trwałych przesunięć lub pęknięć. Przy dostatecznie dużym dopływie energii z zewnątrz zakres zniekształceń budowy i zakres pęknięć rozszerzenia się i powoduje zniszczenie całego elementu. Zjawisko utraty stateczności wewnątrz materiału przebiega podobnie do utraty stateczności poszczególnych elementów w konstrukcji wielokrotnie hiperstatycznej, w której łańcuch kinematyczny nie powstaje od razu.

Zjawiskiem podobnym do niestateczności jest odkształcalność konstrukcji powodująca jej drgania a więc przemiany energii kinetycznej. Podobieństwo polega na wyzwalamiu tej energii i na stopniowym jej hamowaniu przez przenoszenie sił na inne części oraz na rozpraszaniu części energii na tarcie. Różnica polega na występowaniu zmęczenia pod wielokrotnymi impulsami energii kinetycznej. Im większa jest odkształcalność ustrojów tym większe ilości energii ruchu mogą występować i tym większe mogą być efekty zmęczenia. Dlatego żądamy dostatecznie małych odkształcalności konstrukcji zarówno w czasie jej użytkowania jak i montażu. Dlatego też należy unikać elementów

nadmiernie odkształconych, na przykład zbyt gibkich belek lub lin o dużym zwisie. Z tych też przyczyn unikamy przenoszenia momentów skręcających na kształtowniki nie dostosowane do ich przenoszenia, a tak samo przestrzegamy stężenia wszystkich części konstrukcji zarówno podczas użytkowania jak i montażu.

W ten sposób rozumiana niestateczność jest przyczyną bądź wytworzenia łańcuchów kinematycznych stopniowo rozszerzających się ze struktury materiału na mniejsze, później na większe części konstrukcji i wreszcie obejmujących cały ustrój, bądź też przyczyną zmęczenia materiału zmieniającego jego budowę i prowadzącą do pęknięć lub lokalnych uszkodzeń rozszerzających się, bądź wreszcie przyczyną nadmiernych drgań powodujących zmęczenie i w końcowym efekcie zniszczenie konstrukcji. Wszystkie te objawy występują wskutek dopływu energii z zewnątrz - powolnego lub nagłego.

Ta lista zjawisk wyczerpuje przemiany wewnątrz w konstrukcji.

Dlatego ta niestateczność może być traktowana jako jedyna przyczyna zniszczenia konstrukcji. Jest rzeczą zrozumiałą, że energia kinetyczna występująca pod wpływem niestateczności jest podstawowym miernikiem w rozpatrywaniu przyczyn katastrof. Jest też rzeczą oczywistą, że wszelkie zmiany w strukturze materiału należą do podstawowych zjawisk wskazujących na przyczyny zniszczenia. Dlatego też właściwa metoda rozpatrywania tych przyczyn powinna być oparta na analizie przemian energetycznych i na obserwacjach zmian strukturalnych.

ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЧИН СТРОИТЕЛЬНЫХ АВАРИЙ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Резюме

Работа имеет целью показать метод действия по поискам причин строительных катастроф путем уточнения понятий, указания основных физических зависимостей, определяющих превращения энергии в системе.

FUNDAMENTALS OF SEARCHING FOR CAUSES OF
STRUCTURAL FAILURES BY A METHOD OF THE ANALYSIS
OF ENERGY TRANSFORMATIONS

S u m m a r y

The paper aims at giving a method of proceeding in looking for the causes of building disasters - by a precise definition of ideas and by giving the fundamental physical dependences, which determine the energetic transformations in the structure.