

LABORATORIJ ZA ISPITIVANJE KONSTRUKCIJA GRAĐEVINSKOG FAKULTETA U ZAGREBU

Današnji Laboratorij za ispitivanje konstrukcija u Zavodu za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu izravni je slijednik prvoga takvog laboratorija koji je utemeljen 1920. na Tehničkoj visokoj školi u Zagrebu. Prošle, 2005., bila je 85. obljetnica utemeljenja Laboratorija za ispitivanje građiva koji je uvelike utjecao na razvoj cjelokupnoga našeg graditeljstva. Stoga je to prava prilika da se podsjetimo što se u međuvremenu zbivalo s tim Laboratorijem i uopće s ispitivanjima svojstava materijala i konstrukcija.

1 Povijesni pregled

1.1 Utemeljenje i prve godine rada

Otprilike godinu dana nakon utemeljenja Tehničke visoke škole u Zagrebu, na prijedlog profesorskog vijeća i prema naredbi Kraljevske hrvatsko-slavonske zemaljske vlade od 6. studenoga 1920., na školi je osnovan Zavod za ispitivanje građiva. Tada je propisan i statut u kojem je navedena osnovna zadaća Zavoda:

- upotpunjavati znanja slušača škole na području tehničke mehanike i upućivati ih u "poznavanje metoda ispitivanja sve u tehnici rabljenog konstruktivnog građiva s obzirom na fizikalna svojstva"
- služiti znanstvenome radu zavodskog predstojnika i pomoćnog stručnog osoblja
- omogućiti znanstveni rad stručnjacima koji se žele usavršavati u ispitivanju građiva
- surađivati sa stranim zavodima radi usavršavanja metoda i postavljanja norma za ispitivanje građiva
- ispitivati građiva u industriji i za građanstvo te o tome izdavati svjedodžbe.

Istaknuto je da Zavodu za ispitivanje građiva služi poseban laboratorij "s uređajima za ispitivanje svega u tehnici rabljenog konstruktivnog građiva s obzirom na fizikalna svojstva", zbirka uzoraka i stručna knjižnica.

STRUCTURAL TESTING LABORATORY AT THE FACULTY OF CIVIL ENGINEERING IN ZAGREB

The Structural Testing Laboratory operating within the Structural Mechanics Department of the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, is the successor of the first such laboratory founded in 1920. Thus, the 85th anniversary of continuous operation of this laboratory was marked last year. The laboratory was founded by Professor Stjepan Timošenko who later on gained an immense scientific reputation and became known in scientific circles as the "father of the engineering mechanics". The laboratory was used for lecturing and scientific research projects, but also for testing conducted for professional clients. Some of such tests are also described in this article. Over time the laboratory has acquired a lot of modern equipment, but many old machines and instruments from the first years of its operation are still in use. The laboratory now conducts structural testing only, while materials are tested in other specialized laboratories. The state-of-the-art equipment, capable of performing even the most demanding and complex tests, has recently been acquired. The structural testing laboratory has had a decisive influence on the education of civil engineers in Croatia and on the overall development of civil engineering in our country.

Financiranje je predviđeno iz redovnih zavodskih dotacija, doprinosa industrije i privatnika, pristojbi za ispitivanje i izdavanje svjedodžbi te naplatama od slušatelja koje se "mogu upotrijebiti samo za obnovu i nabavku utrošenog i inventarskog materijala".

Osnivač Laboratorija i prvi predstojnik bio je u svijetu priznati znanstvenik i pedagog, prof. dr. Stjepan Prokofjevič Timošenko koji je prije toga bio profesor na Politehničkoj školi u Kijevu i Institutu za prometne inženjere u Petrogradu.

Boravak i rad prof. Timošenka u Zagrebu trajao je samo dvije godine. Sa svojom je obitelji živio u dvije prostorije Kemijskog instituta na Marulićevom trgu 29. Stambene prilike te skućeni uvjeti za znanstve-

ni rad prisilili su ga da napusti Zagreb i prihvati poziv iz SAD-a. Tijekom je boravka u toj zemlji prof. Timošenko dostigao golemu znanstvenu slavu i stekao epitet – "otac inženjerske mehanike". Ipak u Zagrebu je unatoč kratkom boravku ostavio neizbrisiv trag.

U početku je Laboratorij Zavoda imao samo ručnu prešu za ispitivanje cementa prema austrijskim normama s uređajem za nabijanje kocka i osmica (*Klebe-Tetmayer*) koja je preuzeta od Kemijsko-analitičkog zavoda. Time je položen temelj novom Laboratoriju. Poslije je uređaj upotpunjen miješalicom za cementni mort, a osim preše sve je priključeno na električni pogon.

S vremenom je Laboratorij sredstvima od kamata Zaklade Tehničke vi-

soke škole i raznih doprinosa nabavio osnovnu opremu za ispitivanje građevnih materijala i metala, pa je oprema bila sve brojnija. Poslije je upotpunjena onom za ispitivanje cementa: preša, nabijači, miješalice, *Vicatov* aparat, konzistometar, automatski registrator brzine vremena vezanja, *Michaelisove* vage, sita i razni volumenometri. Nabavljen je i vibrometar *Stoppani* koji je još u uporabi, a služi za mjerenje dinamičkih karakteristika konstrukcija.

Od njemačke tvornice *Losenhausen* u Düsseldorfu nabavljena je 1921. hidraulična preša visine 4 m, kapaciteta 3 MN, hidraulična univerzalna kidalica kapaciteta 300 kN te uređaj za ispitivanje žice na uvijanje, a valja istaknuti da sve to, također, još danas služi svojoj svrsi. Sljedeće su godine kupljeni *Martensov* zrcalni aparat, kalupi za betonske kocke (10, 20 i 30 cm), aparat za obilježavanje metalnih uzoraka i raznovrsan sitni pribor.

Od tvrtke *Mohr&Federhart* u Mannheimu dobavljen je *Charpyev* bat (kapaciteta 100 Nm) za ispitivanje udarne čvrstoće (žilavosti) duktilnih materijala (metala). Bat je proizveden 1922. i još se upotrebljava. *Bri-nellov* mikroskop, progibomjeri i 300 kN dinamometar tipa *Amsler* za kontrolu manometara nabavljeni su 1923. godine.

1.2 Djelovanje do kraja II. svjetskog rata

Godine 1924. nabavljena su sita za agregat, tenzometri i nabijači za beton. Hladionik za ispitivanje kamena na smrzavanje, neki uređaji za demonstraciju izvijanja i Maxwell-Bettijeva stavka te indikatorske ploče za mjerenje pomaka na konstrukcijama u Laboratorij su stigli 1925. Strojevi za obradu kamena (pila i brusevi), *Böhmeov* stroj za habanje kamena, oscilograf (mehanički) kupljeni su 1926. godine. Tijekom 1927. uglavnom su montirani prije nabavljeni

uređaji koji su djelomično preuređeni za električni pogon. Nabavljen je i pribor za ispitivanje konzistencije betona (*Abrams*) te instrumenti za mjerenje deformacija (*Huggenberger*). *Föpplov* bat (kapaciteta 2,5 kNm) za ispitivanje udarne čvrstoće krhkih materijala (kamena, opeka i sl.) nabavljen je 1929. i još se rabi.

Time je oprema Laboratorija bila upotpunjena tako da je mogla služiti svojim osnovnim zadaćama. Studenti uglavnom sa svih odjela ondašnje Tehničke visoke škole (Arhitektonski, Građevno-inženjerski, Kulturno-inženjerski, Geodetsko-inženjerski, Strojarsko i elektro-inženjerski, Brodograđevno i brodstrojarsko-inženjerski te Kemijsko-inženjerski) u prvim su godinama studija imali vježbe iz ispitivanja materijala u Laboratoriju Zavoda za ispitivanje građiva. Istodobno se počela kontrolirati kakvoća materijala pa Zavod izdaje ateste i daje mišljenja o značajkama pojedinih materijala.

U razdoblju od 1930. do 1940. ne mijenja se bitno oprema Zavoda, a ni područje djelovanja. Nešto novije opreme stiglo je prije početka Drugoga svjetskog rata kada se gradi nova zgrada Tehničkog fakulteta u Kačićevoj 26. Zavod se 1942. preselio u znatno veće prostorije u prizemlju dvorišne zgrade u Kačićevoj 26 gdje je i danas njegovo sjedište. Te su prostorije na površini od 780 m² imale tri kabineta, jednu prostoriju za instrumente i prijam studenata, mehaničke i stolarske radionice, fotolaboratorij, dvije veće i dvije manje dvorane sa strojevima i ostalom opremom za ispitivanje te središnje dvorište za odlaganje i skladištenje materijala. Najveća dvorana ima široki kolni ulaz, pa se teži elementi mogu kamionom dovesti izravno do strojeva za ispitivanje.

Nakon odlaska prof. Timošenka za predstojnika Zavoda za ispitivanje građiva izabran je prof. dr. sc. Konstantin Čališev koji na toj funkciji

ostaje punih 37 godina. Tijekom 1959. za predstojnika Zavoda izabran je prof. dr. sc. Zlatko Kostrenčić koji je tu dužnost obnašao do 1974. i potom opet s prekidima. Oba su se predstojnika bavila ispitivanjem građiva i dali su golem doprinos razvoju laboratorija i ispitivanja uopće. Konstantin je Čališev (1888.-1970.) je kao asistent Akademije znanosti u Kijevu bio 1919. poslan na studij u Njemačku, odakle je 1921. na poziv prof. Timošenka došao u Zagreb. Nakon utemeljitelja Zavoda preuzeo je predavanja iz predmeta Nauka o čvrstoći i Ispitivanje materijala. Jedan je od osnivača Udruženja za ispitivanje građevnog materijala, preteče negdašnjega Saveza jugoslavenskih laboratorija za ispitivanje materijala, kojemu je bio prvi počasni član, a osnovao je i ondašnje Jugoslavensko društvo za mehaniku.

1.3 Razdoblje od II. svjetskog rata do danas

U prvim godinama nakon rata još nema znatnijeg priljeva studenata pa u drugoj i trećoj godini studija, kada su nastavnim planom predviđeni predmeti Otpornost materijala i Ispitivanje materijala, na pojedinim odsjecima ima samo 20-30 studenata. Međutim, već 1947. taj broj vrtoglavo raste i dostiže 600 studenata koji vježbe polaze u Zavodu i na Katedri za mehaniku. Istodobno se značajno povećava zanimanje za ispitivanje materijala i konstrukcija jer je oprema Laboratorija Zavoda ostala pošteđena od ratnih pljački i razaranja. Stoga Zavod ispituje materijale i konstrukcije s područja cijele ondašnje države.

Iako je to razdoblje bilo vrlo korisno za stjecanje iskustava u planiranju istraživačkog i ispitivačkog rada te u usvajanju novih postupaka ispitivanja, ipak je opterećenje stručnog i pomoćnog osoblja te strojeva i opreme bilo veliko. Stoga je rutinska ispitivanja, na kojima su stečena mno-ga iskustva i obrazovano stručno i

pomoćno osoblje, valjalo prepustiti drugim institucijama. Tako je na poticaj Zavoda 1949. osnovan Laboratorij Ministarstva građevina NRH. Iz tog se laboratorija, koji je postupno preuzimao najveći dio rutinskih ispitivanja, razvio današnji Institut građevinarstva Hrvatske (IGH).

Laboratorij Fakulteta se od tog vremena ponajprije bavi istraživačkim i znanstvenim te nastavnim radom, a potom, u iznimnim prilikama, rutinskim ispitivanjima. U Laboratoriju je od tog doba obavljen čitav niz sustavnih istraživanja na materijalima i na primjenama novih postupaka ispitivanja, od kojih se posebno ističu:

- primjena električnih otpornih tenzometara (1950.)
- izrada vlastitih električnih otpornih tenzometara (1953.)
- konstrukcija prijenosnih mehaničkih tenzometara tipa *Berry Whitmore* (1953.)
- metoda krhkih lakova za mjerenje deformacija (1953.)
- modelska ispitivanja i mehaničke analogije (1954.)
- dinamička ispitivanja konstrukcija (1954.).

Pošto se 1956. Tehnički fakultet Sveučilišta u Zagrebu razdijelio u više

tehničkih fakulteta, Zavod za ispitivanje građiva s laboratorijem ostao je pri Građevinskom odjelu AGG fakulteta Sveučilišta u Zagrebu u Kačićevoj ulici.

Laboratorij je nastavio uvoditi nove metode u teoretskom i eksperimentalnom radu. Tako je 1965. uvedeno ispitivanje ultrazvukom i sklerometrom kao nerazorni postupak ispitivanja betona i betonskih konstrukcija. Rezultati su pretočeni u prijedloge ondašnjih standarda. U suradnji s gospodarstvom ispitivali su se betonski elementi za montažnu gradnju i prednapete konstrukcije. Sustavno su se ispitivali elementi i cijele čelične konstrukcije, plastike i gume, polimerne konstrukcije te kolosiječne veze i pribor, a pritom su se često rabile originalne mjerne tehnike. Od 1964. počinje se primjenjivati i razvijati metoda fotoelastičnosti. Za gospodarstvo je Zavod rješavao neke aktualne probleme modelskim ispitivanjima, gdje su se primjenjivale posebne tehnike mjerenja. Valja istaknuti i velik broj diplomskih i magistarskih radova te doktorskih disertacija koje su izrađene u Zavodu i Laboratoriju.

U razdoblju od 1964. do 1974. Laboratorij je nabavio češki fotoelastični

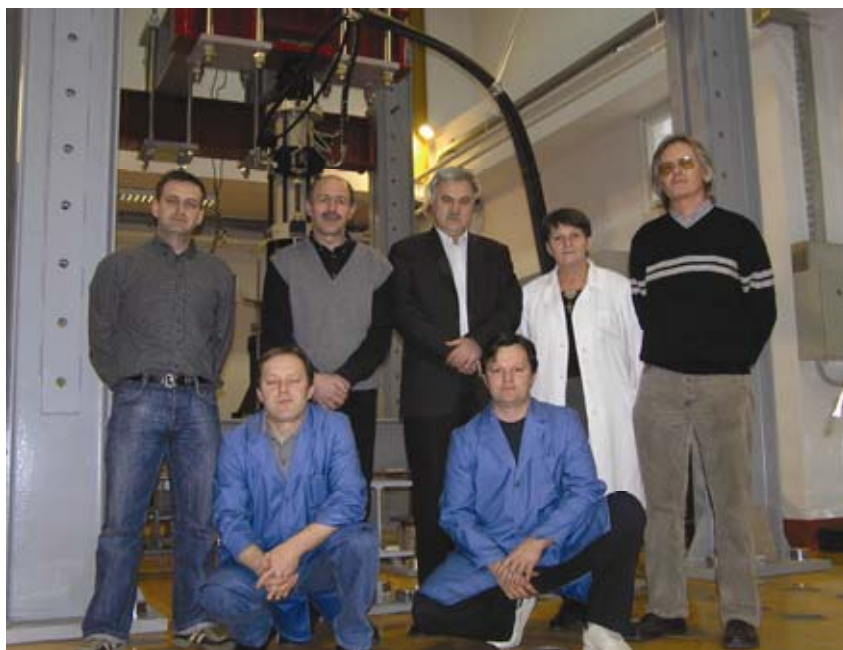
uređaj, betonoskop za ultrazvučna ispitivanja betona (poljske, a potom i francuske proizvodnje), sklerometar za ispitivanje betona, *Rockwellov* prijenosni uređaj za ispitivanje tvrdće materijala, tokarski stroj i manju oprema za mehaničku radionicu, stroj za ispitivanje uzoraka na rastezanje (kapaciteta od 100 kN) te univerzalni stroj za ispitivanje platna na rastezanje (kapaciteta 10 kN) tvrtke *Rauenstein*.

Udruživanjem Građevinskog fakulteta s Institutom građevinarstva Hrvatske 1977. Zavod za tehničku mehaniku, u čijem je sastavu Laboratorij, počinje se razvijati u dva osnovna smjera: razvoj numeričkih metoda te eksperimentalnih postupaka u području tehničke mehanike i ispitivanja konstrukcija. Ispitivanje materijala (cementa, agregata, betona, kamena i sl.) prelazi u Zavod za betonske konstrukcije. Tijekom postojanja Građevinskog instituta, Laboratorij je nabavio dio opreme za dinamička ispitivanja: niskofrekventni mjerač akceleracija, brzina i pomaka (tvrtke *Hottinger – SMU 30 A, SMU 31, SMU 300*), osciloskope, spore pisane te neke automatske skupljače podataka.

Nakon prestanka rada Građevinskog instituta (1991.) u Laboratoriju je



Slika 1. Istaknuti voditelji Laboratorija (s lijeva na desno: prof. Timošenko, prof. Čališev, prof. Kostrenčić)



Slika 2. Zajednički snimak sadašnjih zaposlenika Laboratorija

nabavljena suvremena oprema za mjerenje deformacija pri motrenju ili monitoringu (sustavno i dugotrajno ispitivanje) konstrukcija te oprema za dinamička ispitivanja i modalnu analizu konstrukcija: analizator *Hewlett Packard (HP3560 A)*, akcelerometri i impulsni pobuđivač *Hewlett Packard (HP35207 A)*. Ta se oprema rabi za registriranje i analizu funkcija odgovora građevinskih konstrukcija na pobude općeg oblika te za unošenje impulsne pobude na modelima konstrukcija.

Od 1991. ispitivanje materijala, uglavnom betona, prelazi u novoosnovani Odjel za materijale, a tehnička mehanika, ispitivanje mehaničkih svojstava materijala i ispitivanje konstrukcija ostaju u Odjelu za tehničku mehaniku. Tako je opći središnji laboratorij postao Laboratorijem za ispitivanje konstrukcija i mehaniku materijala.

Dakle u povijesnom razvoju današnjeg Laboratorija za ispitivanje konstrukcija u Zavodu za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, posebno treba istaknuti prof. Timošenka kao njegova

osnivača, zatim prof. Čališeva kao njegova nasljednika i prof. Kostrenčića koji je nastavio taj slijed, koji su dali izuzetan doprinos razvoju ovog laboratorija i ispitivanja uopće (slika 1.).

Značajan doprinos u razvoju laboratorija imali su i svi ostali djelatnici koji su kroz njega prošli od osnutka do danas, primjerice: doc. dr. sc. Zlatko Modor, prof. dr. sc. Aleksandar Kiričenko, prof. dr. sc. Krešimir Herman, prof. dr. sc. Vice Šimić, dr. sc. Džemaludin Kalajdžisalihović, Zvonimir Špringer, dipl. ing. građ., Josip Kršul, dipl. ing. građ., Vladimir Škrobot, dipl. ing. građ., Hrvoje Duboković, dipl. ing. građ., Braslav Rabar, dipl. ing. građ., prof. dr. sc. Ljudevit Herceg, prof. dr. sc. Želimir Šimunić, prof. dr. sc. Mladenko Rak (sadašnji voditelj), doc. dr. sc. Joško Krolo, Vladimir Čalogović, dipl. ing. građ. i Domagoj Damjanović, dipl. ing. građ. Valja spomenuti i službenike kao što su: Vlado Kostrenčić, Dragutin Juričić, Nada Komerički, Martin Prpić, Otto Barić (nogometni trener), Josip Kecerin, Dragutin Kelković, Marinko Kelković i Željko Kelković.

2 Djelatnost i opremljenost Laboratorija

2.1 Ispitivanja mehaničkih svojstava materijala i konstrukcija

Od osnutka do danas djelatnost je Laboratorija povezana s aktivnim znanstvenoistraživačkim i nastavnim radom te suradnjom s gospodarstvom u izradi cijelog niza složenih zadataka. Istodobno se neprekidno obavljaju ispitivanja i istraživanja materijala, konstrukcija i njihovih elemenata te modela konstrukcija. Provode se istraživanja mehaničkih svojstava materijala koji se upotrebljavaju u graditeljstvu: čvrstoća (tlak, vlak, savijanje, posmik), modul elastičnosti, modul smika, Poissonov koeficijent i sl. Rade se ispitivanja tehnoloških proba žilavosti i tvrdoće materijala, ispitivanja umora materijala te istraživanja na materijalima izloženim višesmjernim stanjima naprežanja. Eksperimentalno se određuju ugrađena i zaostala naprežanja i deformacije u materijalima i elementima konstrukcija te reološke promjene pri puzanju i skupljanju materijala. Laboratorij se najviše bavi ispitivanjima:

- mostova, tornjeva, kranskih staza, tribina, zidanih građevina i sl.
- elemenata i konstrukcija s određivanjem stanja naprežanja, deformacija i pomaka
- modela konstrukcija i pojedinih elemenata.

Osim razornih metoda ispitivanja u Laboratoriju se razvija i niz nerazornih metoda za određivanje mehaničkih svojstava materijala i konstrukcija, a posebno se to odnosi na betonske konstrukcije s pomoću ultrazvuka i sklerometra. Od modelskih ispitivanja i ispitivanja konstruktivnih detalja posebno valja istaknuti primjenu metode fotoelastičnosti i metode fotoelastične obloge te ispitivanja vezana uz primjenu elektrootpornih mjernih traka i minijaturnih akcelerometara.

Veći se dio djelatnosti Laboratorija vezan uz znanstvenoistraživački rad i suradnju s gospodarstvom odnosi na ispitivanje konstrukcija. Laboratorij je opremljen za ispitivanje konstrukcija pri utjecaju statičkih i dinamičkih opterećenja različite naravi. Prikupljeno je veliko iskustvo u ispitivanju konstrukcija oštećenih u elementarnim nepogodama, požarima i ratnim djelovanjima. Radi dokazivanja sigurnosti i stabilnosti konstrukcija, stvarnog ponašanja konstrukcija tijekom uporabe te potvrđivanja novih konstruktivnih rješenja, provode se ispitivanja svih vrsta čeličnih, drvenih, armiranobetonskih konstrukcija te konstrukcija od prednapetoga betona i od kompozitnih materijala. Ispituju se utjecaji prirodnih fenomena, korisno uporabno opterećenje i umjetno izazvane pobude na: konstrukcijama mostova, novim rješenjima montažnih konstrukcija, visokim tornjevima i dimnjacima, sportskim gledalištima, dalekovodnim stupovima, hidrotehničkim građevinama, silosima te ostalim konstrukcijama. Uz ta se ispitivanja vežu istraživanja značajki opterećenja, posebice određivanja dinamičkih opterećenja visokih objekata vjetro, pritisaka usklađenih materijala u visokim silosima te pobuda konstrukcija punih tribina športskih borilišta. U novije se vrijeme provodi motrenje na više značajnih građevina izloženih raznim utjecajima osnovnih i dopunskih opterećenja radi određivanja stvarnog ponašanja konstrukcija tijekom uporabe.

2.2 Razvoj laboratorijske opreme

Oprema namijenjena ispitivanjima mehaničkih svojstava materijala i konstrukcija u Laboratoriju, te ona namijenjena terenskim ispitivanjima na konstrukcijama, značajna je za ukupni razvoj. Premda je dio glavne laboratorijske opreme vrlo star i potječe od osnutka Laboratorija, uglavnom se još uvijek rabi za dio laboratorijskih ispitivanja. Taj dio opreme



Slika 3. Preša kapaciteta 3000 kN



Slika 4. Preša i kidalica kapaciteta 300 kn

sačinjavaju preše, kidalice i uređaji za tehnološke probe. Pri ispitivanjima mehaničkih svojstava gradiva još se i danas rabe mehanički instrumenti za mjerenja deformacija i pomaka.

U izradu mjerne opreme bili su uključeni znanstvenici i djelatnici Laboratorija. Već se od 1953. u Laboratoriju izrađuju prvi elektrootporni tenzometri za mjerenje deformacija i indikatorske ploče za mjerenje pomaka. Poslije su izrađeni instrumenti za mjerenje velikih pomaka na principu matematičkog njihala, induktivni senzori deformacija te uređaji za mjerenje i unošenje sila i pritisaka.

U novije je doba Laboratorij opremljen specijaliziranom pokretnom opremom za mjerenje, registriranje i analizu podataka mjerenja, što omogućuje suvremen pristup eksperimentalnom istraživanju konstrukcija. Svi su senzori, registratori, analizatori i ostala elektronička oprema prilagođeni ispitivanjima građevinskih konstrukcija i elemenata. Pokretnu opremu sačinjavaju komponente za mjerenje pomaka i deformacija, poput induktivnih osjetila pomaka (veličine mjernog područja od 1-500 mm), induktivnih osjetila deformacija, niskofrekventni senzori deformacija (akceleracija, brzine i pomaka), elektrootporni tenzometri raznih veličina mjernih baza, induktivni ekstenzometri različitih izvedaba, senzori brzine vjetra te razna osjetila za mjerenje sile, tlaka, temperature, vlage, zvuka i sl. Opremu sustava za mjerenje i registraciju čine višekanalni mjerni mostovi tipa *Wheatstone* za statička i dinamička mjerenja mjernim trakama te razni oscilografi, osciloskopi, pisaiči, automatski digitalni mjerni sustavi, spektralni analizatori i sl. Posebno valja istaknuti naj-suvremenije mjerne sklopove s odgovarajućim softverom za digitalno skupljanje podataka velikog kapaciteta za simultana mjerenja s raznim vrstama senzora. To su mjerni sustavi glaso



Slika 5. Charpyev bat



Slika 6. Brinellov aparat

vitih proizvođača (*National Instruments, Hotinger, Bruel & Kjaer* itd.). Uz te se mjerne sustave upotrebljavaju razni programski paketi za mjerenje, skupljanje, prikaz i analizu podataka u stvarnom vremenu. Ti su sustavi bazirani na osobnom računaru i mogu prikupljati podatke vrlo velikom brzinom te ih slati na daljinu posebnom telefonskom linijom ili internetom. Dio glavne laboratorijske opreme koja služi od samih početaka rada Laboratorija do danas prikazana je na slikama 3. do 6.

3 Značajnija eksperimentalna ostvarenja

Tijekom 85 godina razvoja naše građevinske industrije, ali i drugih grana privrede, Laboratorij Zavoda za tehničku mehaniku svojim je aktivnostima neprekidno bio uključen u razvitak i primjenu novih materijala i konstrukcija. Istraživačkim radom i ispitivanjima radi dokazivanja kvalitete materijala te sigurnosti i stabilnosti konstrukcija, Laboratorij je stekao povjerenje sudionika u projektiranju i izvođenju svih vrsta građevina. Stoga će ovdje biti prikazana neka istraživanja materijala i konstrukcija ostvarena od osnutka do danas.

Radi dokazivanja sigurnosti provedeni su istraživački radovi i ispitivanja

djelovanja statičkog opterećenja na brojnim konstrukcijama različitih namjena. Provedena su ispitivanja statičkog djelovanja pokusnog opterećenja na cijelom nizu konstrukcija čeličnih mostova te mostova od armiranoga i prednapetog betona, poput velikoga mosta Erdut-Bogojevo na Dunavu, čuvenoga (staroga) Maslениčkog mosta, mostova na Savi kraj Jasenovca, na Zrmanji, Uni kraj Ripača, *Mostu mladosti* u Zagrebu, mostu Rječina, mostu preko Pazinske jame, mostu preko Drave kod Bелиšća, mostu preko Rijeke dubrovačke, mostu preko Krke kod Skradina, mostu preko Dobre kod Ogulina, vijaduktu Drežnik, vijaduktu Mirna i nizu drugih mostova, cestovnih i željezničkih nadvožnjaka i vijadukata. Provedena su ispitivanja pokusnog opterećenja paviljona posebne konstrukcije na starome i novome *Zagrebačkom velesajmu*. Statička i dinamička ispitivanja kranskih staza provedena su na mnogim industrijskim postrojenjima: *TLM-u* u Šibeniku, *Željezari Sisak*, *Radi Končaru* i *Janju Gredelju* u Zagrebu, brodogradilištima u Splitu, Rijeci i Trogiru, strojarnicama elektrana i dr. Provedena su ispitivanja brojnih športskih gra-

đevina pokusnim zamjenskim opterećenjem: stadiona Poljud u Splitu te *Dinama* i *Zagreba* u Zagrebu, kompleksa bazena u Splitu te športskih dvorana *Cibona* i *Mladost*, športskog doma u Zagrebu, dvorane Gripe, športske dvorane *Trogir* itd.

Statička su ispitivanja pri odgovarajućim opterećenjima djelovanja pritiska vjetra provedena na nizu dalekovodnih stupova koje su proizveli *Dalekovod* (Zagreb), *Senec* (Slovačka), *Tehnobeton* (Varaždin), *TBS* (Jastrebarsko) i sl. Radi verifikacije novih montažnih i polumontažnih nosivih konstrukcija provedena su ispitivanja do loma na armiranobetonskim i prednapetim elementima proizvodnje *Jugomont* (Zagreb), *Vegrad* (Velenje), *Stavbar* i *Gradis* (Maribor), *Viadukt*, *Tehnika* i *Industrogradnja* (Zagreb) itd. Razorna i nerazorna ispitivanja na konstrukcijama stradalima u požarima ili ratu obavljena su na više građevina radi ocjene stupnja oštećenosti te načina sanacije: u hali *Tomo Vinković* u Slavonskom Brodu, na čeličnoj konstrukciji *Soko* u Mostaru, *Nami* u Kumrovcu, dvorcu u Bелиšću, silosima *Koka* u Varaždinu te na brojnim javnim



Slika 7. Ispitivanje čeličnog spoja greda-stup

građevinama u Vukovaru, Pakracu, Lipiku i dr.

Posebna je pozornost pri istraživanjima posvećena građevinama kulturne baštine. Provodi se *monitoring* promjena, stanja deformacija i pomaka, pojava pukotina i diferencijalnih slijeganja na crkvi Sv. Jurja u Belcu, crkvi Sv. Marije Snježne u Kamenskom, Kneževu dvoru, crkvi Sv. Jakova i Samostanu male braće u Dubrovniku, brojnim sakralnih zgrada u Istri, Hvarskom kazalištu i sl.

Ocjena stanja hidrotehničkih tunela nerazornim postupcima ispitivanja obavljena je na cijelom potezu tlačnoga cjevovoda hidrocentrale *Nikola Tesla*. Teorijska i modelska istraživanja te ispitivanja do loma pri višeosnim stanjima naprezanja cjevovoda velikih profila rađena su na vodovodima od PVC cijevi preko Linskoga kanala, azbestcementnom cjevovodu riječkoga vodovoda i drugdje.

Eksperimentalna istraživanja dinamičkih utjecaja prometnog opterećenja i dinamičkih parametara provedena su na više mostovnih konstrukcija: most kopno - otok Pag, Maslenički most, Morinski most kraj Šibenika, viseći pješački i željeznički most u Osijeku, *Most mladosti* i *Most slobode* u Zagrebu, most preko Rijeke dubrovačke itd.

Istraživanja utjecaja tranzijentnih pobuda pri miniranju rađena su na konstrukcijama silosa u Solinu, termoelektrani Urinj, koksari u Bakru, tunelu kod Grabovice, više stambenih zgrada u blizini kamenoloma i sl. Pri dinamičkim utjecajima opterećenja vjetrom obavljena su istraživanja na više konstrukcija mostova i visokih građevina, osobito u priobalnom dijelu: televizijski tornjevi Učka, Čelavac, Biokovo, dimnjak *TE Plomin II* i sl. Također su ispitivani utjecaji vibracija agregata velikih energetskih postrojenja na temelje postrojenja: hidroelektrana *Peruća*, *Manojlovac*, *Jablanica* i *Varaž-*



Slika 8. Ispitivanje predgotovljenih armiranobetonskih nosača



Slika 9. Ispitivanje krova bazena u Utrinama

din, turbogeneratorskih stolovova *TE Zagreb*, *TE Sisak* i *TE Tuzla*, cementare *Našice* i *Koromačno* i sl.

Valja dakako spomenuti i mnoga istraživanja obavljena u laboratorijskim ispitivanjima, koja su poslužila za izradu tehničkih propisa i norma te razvoju novih materijala i konstrukcija. U šezdesetim godina prošlog stoljeća obavljena su opsežna istraživa-

nja hidrotehničkih betona koja su poslužila pri izradi tehničkih propisa za hidrotehnički beton. Razvojna eksperimentalna istraživanja obavljena su za primjenu Bi-čelika i reb-rastog čelika u armiranom betonu, za primjenu istegnutih čeličnih ploča te za potrebe opekarske industrije. Obavljena su i ispitivanja *fert* stropova i zidova od opeke za mnoge proizvođače.



Slika 10. Ispitivanje mosta Krka kod Skradina

Za potrebe željezničkog prometa rađena su istraživanja vezana uz izbor najpovoljnijega sustava kolosiječnih veza, prednapetih, armiranobetonskih i drvenih pragova, tračnica i spojeva tračnica, a za potrebe ZET-a ispitivanja utjecaja tramvaja na kolosijেকে u Zagrebu. Za više proizvođača u zemlji obavljala se neprekidna kontrola kvalitete betonskih proizvoda i elemenata konstrukcija.

Ispitivanja zavarenih spojeva čeličnih rešetki od cijevi i prostornih rešetki sustava *mero* za potrebe *Željezare Sisak* poslužila su pri izradi propisa za takve konstrukcije, ali i za kontrolu pri izvođenju najvećih takvih konstrukcija i u svjetskim razmjerima, primjerice stadiona na Poljudu. Detalji i spojevi montažnih armiranobetonskih i prednapetih konstrukcija ispitivali su se u Laboratoriju kao prototipovi u pravoj veličini, ali i na modelima (detalji oslanjanja i spojeva montažnih sustava *Vemont*, *Stavbar*, *Jugomont*).

Posebno se ističu istraživanja na modelima gradskog stadiona i nosačima tribina kompleksa bazena u Splitu, konstrukciji kolone za tvornicu lijekova *Pliva*, okvirne konstrukcije ispunjene židom te rotacijske ljsuske krovne konstrukcije.

Ekperimentalne analize složenih stanja naprezanja uporabljaju se na modelima i elementima konstrukcija primjenom metode fotoelastičnosti i refleksijske polaroskopije pri metodi fotoelastične obloge. Tom su metodom provedena istraživanja na više desetaka modela konstrukcijskih detalja u sklopu izrade diplomskih, magistarskih i doktorskih radova. Neka značajna ispitivanja i ekperimentalna istraživanja prikazana su na slikama 7. do 10.

4. Rekonstrukcija i osuvremenjivanje

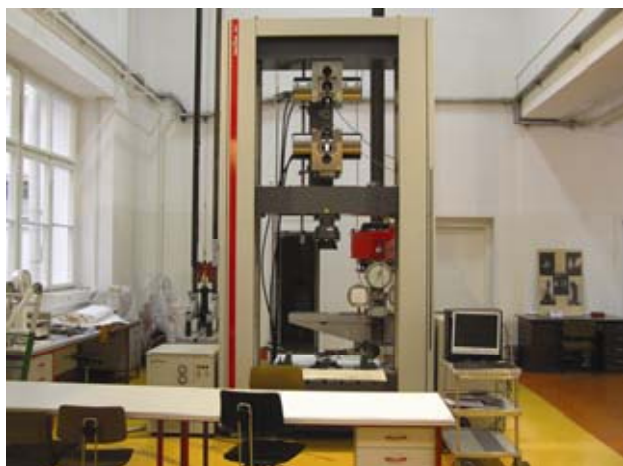
Budući da je postojeća oprema Laboratorija za ispitivanje konstrukcija u Zavodu za tehničku mehaniku, posebno glavna oprema poput preša i kidalica za ispitivanje konstrukcija i materijala, bila zastarjela i više nije zadovoljavala standarde koji se primjenjuju u suvremenim ispitivanjima, izrađen je program za nabavu nove suvremene glavne opreme. Slični su programi modernizacije i osuvremenjivanja izrađeni i u drugim laboratorijima Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Čelnici Fakulteta su tijekom 2003. donijeli odluku o nabavi nove opreme za većinu zavoda i laboratorija, a najveća je svota izdvojena za opremanje i rekonstruk-

ciju Laboratorija za ispitivanje konstrukcija u Zavodu za tehničku mehaniku.

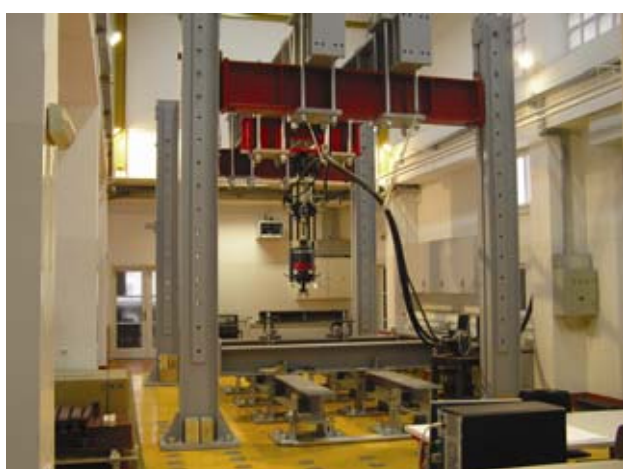
To i ne čudi jer se radi o najstarijem i najvećem laboratoriju na Fakultetu, pa je stoga bilo potrebno najviše novca za njegovo osuvremenjivanje. Kroz taj Laboratorij nekoliko puta tijekom studija prođu sve generacije studenata, a u njemu se stalno obavljaju laboratorijske vježbe iz kolegija: Otpornost materijala, Mehanika materijala, Mehanika loma, Polimeri, Kompoziti, Ispitivanje konstrukcija te Ekperimentalne metode I i II. Uz to u njemu se obavljaju sva ekperimentalna istraživanja iz područja građevinskih konstrukcija i mehanike materijala, a služi i za ekperimentalnu potporu brojnim magistarskim i doktorskim radovima iz građevinskih konstrukcija. Stoga je odluka o toj investiciji došla u pravi trenutak. Najveći je dio financijskih sredstava za renoviranje Laboratorija utrošen iz vlastitih sredstava Građevinskog fakulteta koja su ostvarena u suradnji s gospodarstvom.

Program osuvremenjivanja uključivao je nabavu glavne laboratorijske opreme, zatim odgovarajuće građevinske radove za kvalitetan smještaj te opreme i uređivanje prostora Laboratorija, kako bi se ostvarili osnovni uvjeti za moguću akreditaciju pri Državnom zavodu za normizaciju i mjeriteljstvo. Od glavne laboratorijske opreme nabavljena su dva višenamjenska i univerzalna ispitna stroja *Z600E* i *Actuator 600/250* tipa *Zwick* iz Ulma u Njemačkoj koji su namijenjeni statičkim i dinamičkim ispitivanjima mehaničkih svojstava građevnih materijala i konstrukcija.

Z600E je univerzalni tlačno-vlačni stroj za ispitivanje (kapaciteta 600 kN) na električni pogon koji je namijenjen vrlo preciznim statičkim i niskocikličkim ispitivanjima manjih uzoraka (slika 11.). Gornji dio stroja za statička ispitivanja koncipiran je kao kidalica za vlačna ispitivanja



Slika 11. Univerzalni stroj za statička ispitivanja kapaciteta 600kN



Slika 12. Univerzalni stroj za statičko-dinamička ispitivanja kapaciteta 600 kN

čelika za armiranje i prednapinjanje drva, plastike, kompozita i sl., a donji dio za tlačna ispitivanja i ispitivanja na savijanje manjih uzoraka do gotovo 2 m od različitih materijala. Zbog visoke preciznosti osobito je pogodna za ispitivanje parametara mehanike loma. Strojem upravlja računalo s pomoću programa *Testexpert* koji može postavljati parametre ispitivanja prema raznim postojećim svjetskim standardima (ISO, EN, DIN, BS, ASTM i sl.). Program koji pokreće stroj za ispitivanje može kontrolirati silu ili pomak tijekom ispitnog procesa i pripada najsvremenijim i najpreciznijim laboratorijskim ispitnim strojevima u svijetu.

Actuator 600/250 također je univerzalni tlačno-vlačni stroj (kapaciteta 600 kN, s mogućim pomakom cilin-

dra od 250 mm) pokretan vrlo snažnom hidrauličnom pumpom (snage 55 kW), a predviđen je za precizna statička i dinamička ispitivanja srednjih i većih predgotovljenih elemenata te dijelova raznih građevinskih i drugih konstrukcija (slika 12.).

Posebno je pogodan za ispitivanje zamora materijala odnosno trajne dinamičke čvrstoće. Strojem upravlja program *Workshop* koji ima mogućnost kontrole procesa ispitivanja preko pomaka ili sile. Radni frekvencijski opseg je u granicama od 0,1 do 70 Hz, s amplitudama od 250 do 0,01 mm. Strojem upravlja računalo, a uz dodatne adaptore moguće je obaviti vrlo široki spektar statičkih i dinamičkih testova iz područja građevinskih elemenata i konstrukcija te ostale industrije.

Osim nabavljanja i instaliranja dvaju velikih ispitnih strojeva, programom je obuhvaćeno i kompletno uređivanje i osuvremenjivanje laboratorijskog prostora s pripadajućim prostorijama za smještaj opreme, arhiviranje elaborata o ispitivanju, norma i procedura te čuvanje ispitnih uzoraka. Uređeni su podovi, ugrađeni novi radni pultovi, novi energetske priključci, mreža i telefonija te novi ormari za smještaj arhive i laboratorijskih dokumenata. Ugrađena je suvremena i moderna oprema i uređen prostor koji je pripravljen za moguću akreditaciju u području ispitivanja elemenata i građevinskih konstrukcija u skladu s novim europskim normama.

Voditelj laboratorija:
prof. dr. sc. Mladenko Rak