

最近の試験・実験および研究の動向

泉 満 明*

1. はじめに

建設工事の歴史は極めて古く、したがって、その技術は経験に基づく長い伝統を有していた。しかしながら、高度経済成長以来、建設工事の規模、内容はますます大型化し、複雑化してきている。これに伴って、種々の技術的問題が生じ、従来の経験を重視した方法では、処理が困難となり、非効率におちいるとともに量的増大、複雑化に対応できなくなってきた。これらの問題を解決するために、綿密な調査、計画、合理的な設計、施工の要求がきびしくなり、それに応じて、技術面での高度化、新技術の開発が活発に行われてきている。その一つの現われは、かつての感覚的なものに対して可能な限りの数量的表現での処理であり、設計、施工に関するあらゆる現象を量的に表現し、これらを工事にとり入れることは、技術水準の普遍性と施工管理の向上改善に重要な役割をはたすものと思われる。しかし、数量的表現は単なる数理計算によるものでは土木技術の性格上かなりの問題があり、これらはあくまでも工事の各段階の実態に合ったものでなければならない。このために、実態把握のための研究、試験、実験、各種測定が必要となってきた。このような時代の要請により、最近の電子技術に基づいた測定機器の発達も、この面の進展と重要な関連をもってきている。

建設工事において、試験、実験あるいは各種測定が行われる分野は広く、大きく分類すると、

構造、水文、交通、衛生、土工、港湾、トンネル、ダム、防災、施工、維持管理等となる。この中で、主として、コンクリート関係を中心に、建設工事との関連で

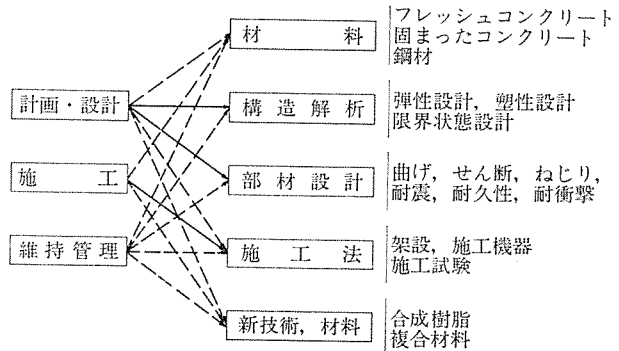


図-1 建設工事と試験, 実験, 測定対象

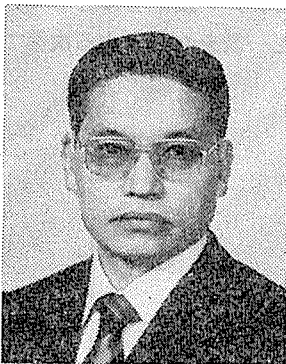
表-1 コンクリート関係研究発表の内訳

項目	発表件数	項目	発表件数
凍結融解	7	アコースティック	6
コンクリートの劣化	7	エミッション	6
鋼材腐食	7	ひびわれ	6
防食	7	曲げ	13
耐久性調査	7	温度応力	14
疲労	8	圧縮特性	7
施工	13	物性	7
骨材	7	耐震	24
混和材料	8	せん断伝達	7
流動化コンクリート	7	せん断耐力	7
乾燥収縮	7	ねじりほか	7
レオロジー	7	継手・付着	7
練りませ	7	アスファルト	14
ポンプ送	7	舗装	20
材料分離	6	プレストレスト	7
繊維補強コンクリート	7	コンクリート	7
レジンコンクリート	7	合成構造	12
		合計	283

(59年度土木学会全国大会)

示すと図-1 のようになり、大きく分けると、計画、設計、施工、維持管理等に分けることができよう。以上のように、コンクリート関係に研究、試験、実験の範囲を限定してもその内容は広い。その例、傾向を最近の学会講演会により見ると、表-1 のようになっている。

従来から、この分野では、材料関連の研究が多く、この傾向は今後も続くものと思われる。一方、第9次道路整備計画によって、43兆円の総投資額により本州四国連絡橋、列島縦断高速道路、東京湾横断道路等の大型プロジェクトが推進され、エネルギー関連施設で、原子力発電所、海上掘削基地等、大型の構造物の建設が予定されている。これらのプロジェクトと関連して、コンクリート構造物も多数建設され、その重要性はますます増大するものと思われる。建設が進められる一方で、経済成



* Mitsuaki IZUMI
名城大学理工学部教授

長期を通して、相当数のインフラストラクチャーも整備されてきており、これら既設の建造物の維持管理が、重要な課題となってきた。建設工事の大きな流れとして、大型建造物の建設、既設建造物の維持管理等に、直接あるいは間接に関連した研究が今後中心となろう。しかし、これらのことも、時代の推移、要求とともに変化するものであり、現在、注目されていないものでも将来非常に重要視され、研究が盛んになるものもあれば、この反対の傾向をたどるものもあろう。ここでは単に現場に直結した実験、試験より範囲を拡げ、土木工事のコンクリート構造に関連した研究、実験、試験を項目的に取り上げて述べる。

2. 材料に関する試験、実験および研究

表一1 に示すように、材料に関連する研究は多く、コンクリートの基本的性質とそれに発展的な問題を含めての実験的研究が盛んである。コンクリートに関する各種の試験は JIS, その他の基準類に規定されており、古くから、その基本的性質を知るために実施されてきている。しかし、最近になって、施工法の変化等により、従来の方法では必ずしも十分な性質を把握することができなくなってきているため、新しく各種の研究、実験が進められてきている。それらの中の一つの例として、固まっていないコンクリートの施工性、ポンパビリティ等、ポンプ施工の基本的性質の数量的表現のため、コンクリートの粘性の研究が 図-2 に示すような装置で行われて

いる。この実験結果により、レオロジー基本式の各定数との関連、整合性、更に進んでコンクリートに適合するレオロジー式の確立のための実験的研究が進められている。

固まったコンクリートに関する例としては、アコースティック・エミッション (AE) がある。従来から主として、金属材料について適用され、有用性が認められている。その実験装置の一例は 図-3 に示すものである。これをコンクリート材料に適用し、基本的な性質の解明と同時に、ひびわれ発生前に、コンクリートの欠陥が検出可能である特長を活用して、重要な建造物の維持管理に適用する実験的研究が進められている。

大型建造物の施工に密接な関連がある研究として、従来から実験的面と理論的な両面から取り上げられてきている課題として、マスコンクリートにおける温度応力の問題がある。この研究は、温度上昇とコンクリート部材中の温度によるひずみ分布、応力の分布、拘束度等の実測と理論的な解析が必要で、電子計算機を用いて FEM によるシミュレーションが盛んに行われ、その成果も上がってきている。これらの成果は実際の施工に適用され、その有用性が高まってきている。この問題は、大型の建造物に関するのみでなく、一般的な擁壁の施工等においても重要であり、今後ともに実験、研究が盛んに行われるものである。土木学会の講演会の課題としても多く、他の協会のコロキウムテーマとしても取り上げられている。

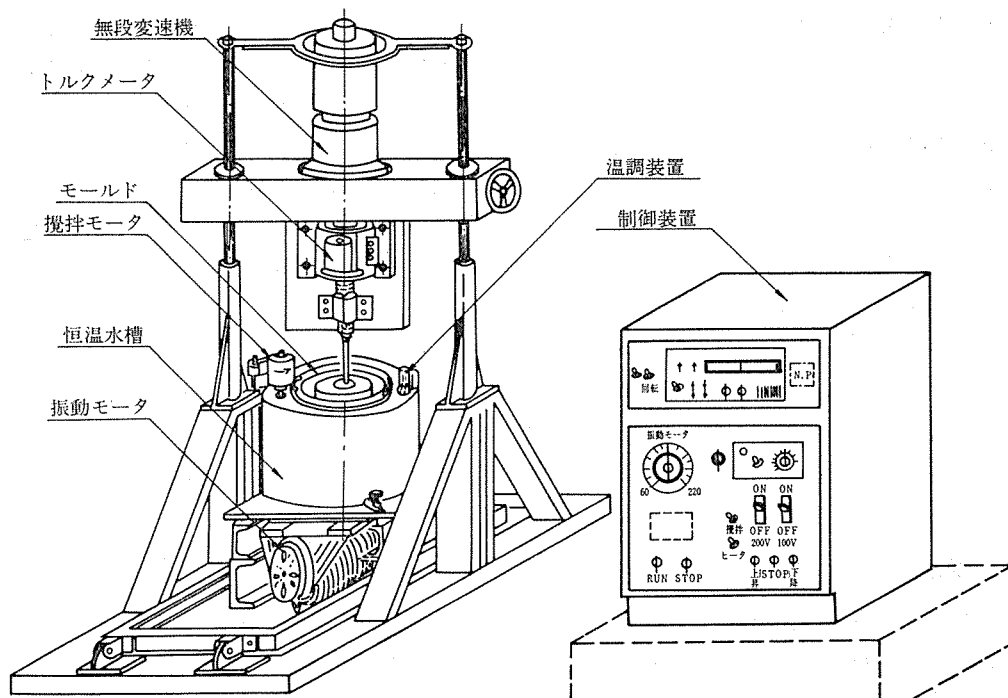
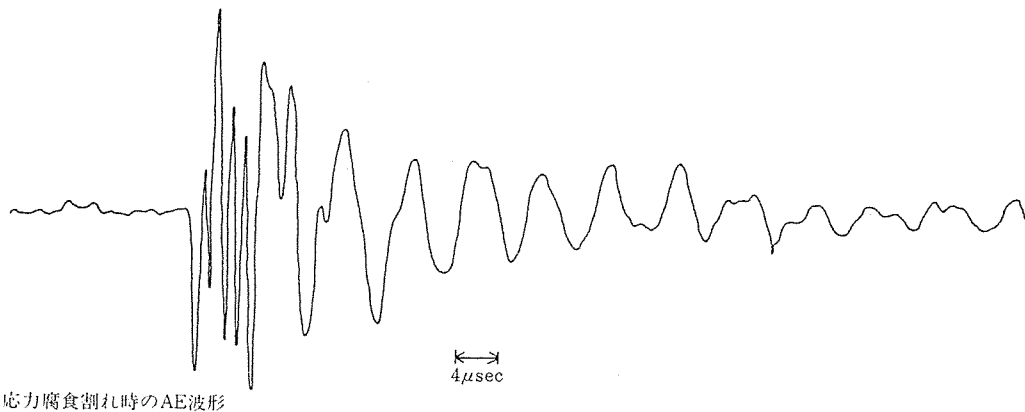
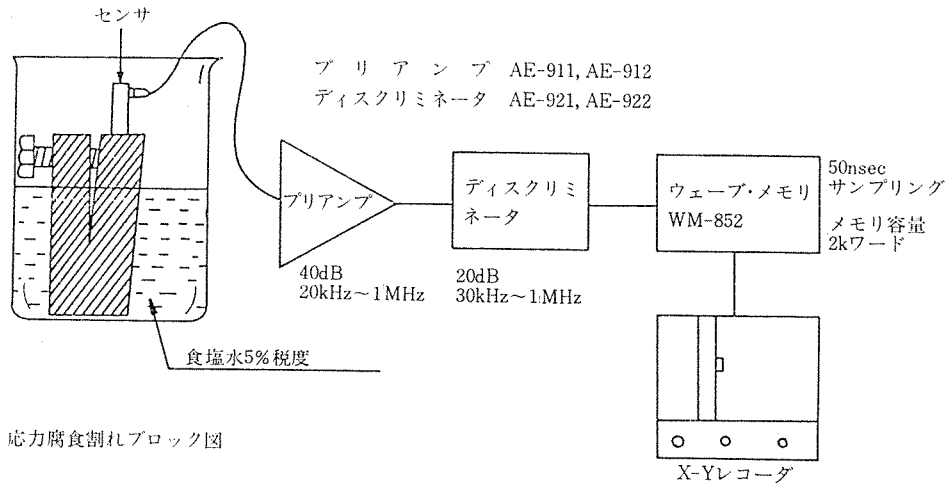


図-2 コンクリートの粘度測定装置



図—3 アコースティックエミッションの実験装置と AE 波形の例

その他、コンクリート構造の耐久性と関連が深く、今後実験的に研究が進められるテーマとしては、

- アルカリ骨材反応
- コンクリート中の塩分量の耐久性との関連
- 省資源、エネルギー関連として
- 産業副産物の活用
- 高温、低温時におけるコンクリート材料の性質
- 現場の施工管理
- 早期におけるコンクリート強度の推定

となる。特に最後の項目は、現在、研究、実験が一応の成果があったものとしてほとんど行われていないが、現場におけるコンクリート工事の管理としては重要と思われる。

鋼材関係について、耐腐食性に関する実験が進められており、コンクリート構造物の耐久性に密接な関連があり、今後その成果が期待されている。

3. 構造物の大型化

本州四国連絡橋を始めとして、大型の構造物の設計、施工に関連した実験が行われてきている。一般に構造物は、使用条件に対する十分な耐力と許容される変形特性が要求される。これらを知ることが、計画、設計のため

の前提条件となり、このために、実物試験、小型模型試験等がある。前者は費用と時間、後者には、相似率を含めた実物への展開について厳密なルールが定量化のために要求されるので、いきおい定性的試験として利用される傾向が強い。しかし、解析理論の確認手法としては有用である。現状では、解析理論で構造特性を完全にカバーすることはほとんど不可能であり、総合的な判断や、一次的要素の影響の確認、総合耐力のレベルの確認に大規模実験の意義は大きいので、実験の大型化が目立ってきている。この傾向を支えるものとして、次のことが想定される。

- a) 大型事業の誕生と、それに伴う開発研究費の充実
- b) 構造物の大型化に伴う実験値の外挿による適用に対する不満
- c) 電子計算機による情報処理能力の向上と解析計算能力の向上

以上の結果、大型の実験が続々と行われてきている。実験や数値解析の規模が大型化されたことによって明らかにされた事項は極めて多いが、小型模型の活用や理論解析の組立てによって、いっそう研究や調査の成果が期待できる。

実験規模の大型化は、巨額の費用と時間、そして大き

な労力を必要とするだけに、その本質を見きわめることが大切となる。

本州四国連絡橋工事について、設計・施工上に検討が加えられた主なものを示すと、

- 設計関係 上部工 耐風設計, 疲労設計, 緩衝桁軌道伸縮装置
- 下部工 耐震設計
- 施工関係 上部工 ケーブル架設, 補剛桁の架設, 防食, 舗装
- 下部工 マスコンクリート, プレキャストコンクリート
- 新しい構造 設置ケーソン, 大口径杭基礎, 多柱式基礎

となる。以上から分かるように、大規模工事が土木技術の全般にわたっており、この工事が調査開始から 30 年近く、公団の創立より 10 余年が経過、この間、完工を目指して多くの技術開発がなされ、これとともに施工実績が着々と積み重ねられるなど、優れた技術的成果が上げられつつある。

一方、PC 技術についてもその進歩は著しく、コンクリート橋梁の長大化志向に対して、PC 斜張橋が注目されてきている。欧米においては、既に支間 320m の PC 斜張橋が建設されている。我が国においても、その例として 図-4 に示す鉄道橋がある。他の形式の新しい試み

として、図-5 に示す PC トラス橋が建設されている。これらの構造形式はいずれにしても長径間、軽量化、そして経済性を目途として設計・施工されたものである。これらの橋梁の計画、設計においては、従来コンクリート橋として通常検討していなかった、耐風性、を含めて、厳密で高度な手法が要求される。例えば、構造系全体あるいは施工法に関連した耐震・耐風安定性、材料のクリープ、レラクセーション、乾燥収縮を考慮した設計理論、部材としては、クリープ座屈、アンカー部およびザイルの疲労、部材継目部の強度等、施工機器の開発、施工管理法等多くの問題を含み、現在実験的研究の段階にある高度の課題が輻湊しており、これらに関連した研究の推進が必要で、これに基づいた技術水準の向上が期待される。

構造部材についての研究は、許容応力度設計法から限界状態設計法への転換により、部材の設計法の高度化、精密化が必要となってきており、従来から研究されてきている曲げ、せん断のほかにはねじりの問題も最近注目されている。しかし、更に重要なことは、実際の構造物中における部材の受ける応力状態を検討して、組合せ荷重が作用した場合の部材の挙動に関する実験的研究、更に、靱性、塑性ヒンジに関する実験等が必要となってきている。

PC 構造部材に関しては、PRC 部材、アンボンド PC

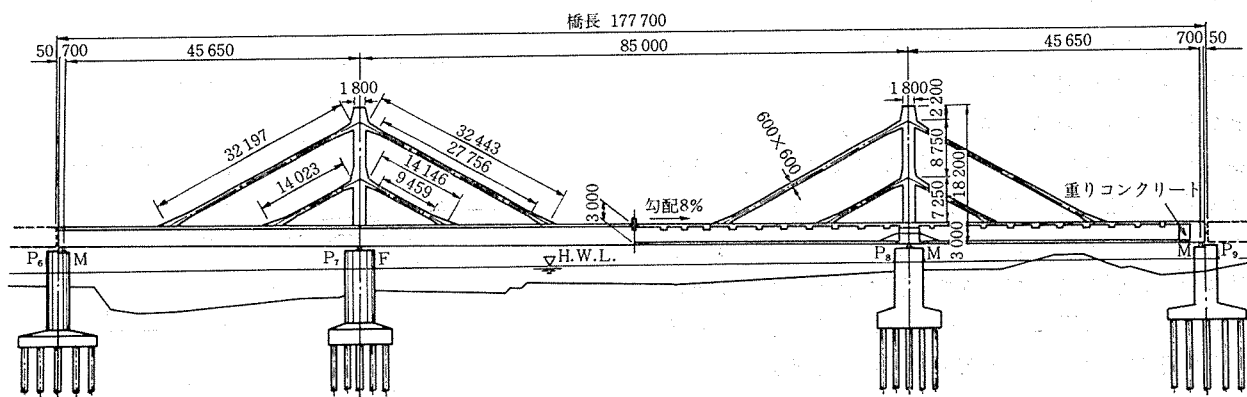


図-4 小本川 PC 斜張橋一般図

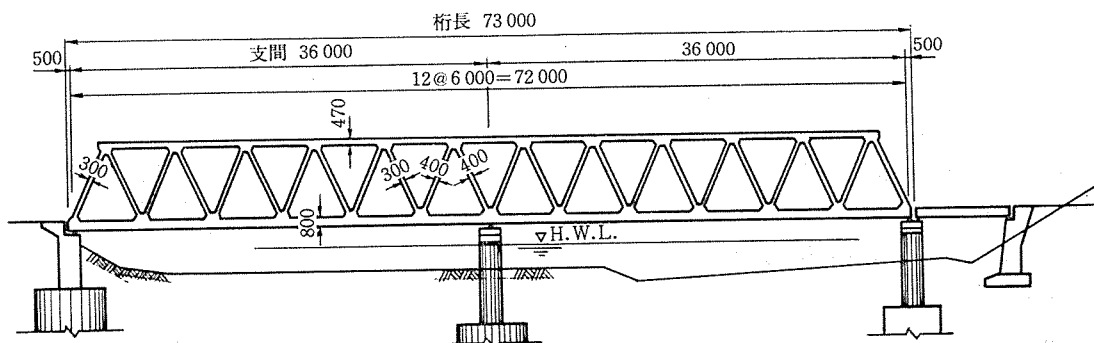


図-5 PC トラス橋

部材のほかに、最近アウトサイドケーブルのPC部材についての研究は、維持管理の容易なPC構造、更に経済性を含めて重要である。更に、この部材の研究はPC構造物の補修の手法に非常に有用で、我が国においても欧米においても注目されているが、国内における実験的研究は少ない。なお、視点を変えれば、PC斜張橋は、アウトサイドケーブルの偏心量を大きくした構造と考えることもでき、構造物の長径間化とも関連がある。

長径間のPC橋梁の開発、原子力発電所、大型海上構造物等、大型構造物に使用する大容量のPCケーブルシステムの開発に関する実験的研究が進められ、プレストレストコンクリート構造の大型構造物への適用の態勢が整えられてきている。

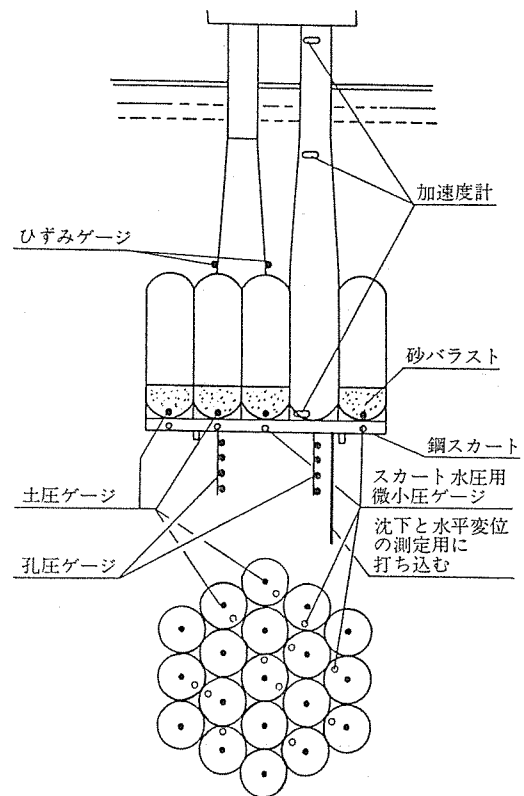
4. 構造物の維持管理

第2次大戦後の復興期から、高度成長期を経て多くの構造物が建設され、これらの維持管理が最近特に注目されてきている。

一般にコンクリート構造物の耐久性は高く、その寿命は半永久的と考えられてきている。しかし、材料の選択、設計、施工方法が適切でなく、環境条件の悪化、使用状態の変化などにより、意外に老朽化が早いことも事実である。近年、構造物に作用する荷重の量の増大、質の変化に伴って構造物の機能低下、損耗も急速に進行しているものと推定されており、経済の成長とともに建設されてきた構造物を十分な維持、管理の下に大切に使用していく努力が一層必要となってきた。このようなことから、維持管理の一環としての補修はますますその重要性を増してきている。構造物の補修技術に関する歴史は浅く、現在のところ定性的な判断をするためのよりどころとしての基準はあるものの、定量的にはあまり明確ではなく、経験的に判断される面が多い現状である。したがって、この面における研究は、補修が必要となる状態に構造物が至る経過と結果を再現できる実験が行えることで、これが可能になれば、補修工事も定量的に計画、設計が行えるものである。しかし、現状では、材料的あるいは構造的にも種々の工夫がされてきているにもかかわらず、劣化の様相が複雑であるのと、それにかかわる要因が多く、満足すべき再現実験といったものは行われていない。これらの実験による劣化の過程、結果は構造物の設計にフィードバックして、よりよい構造物の計画、設計、施工に対して、極めて有用な資料を提供するものである。このような情勢から、建設省は「建設技術研究開発の長期的方向」を策定し、これにおいて、行政ニーズが強く、緊急を要するプロジェクトの一つとして、「コンクリート耐久性向上」を60年から新しくスタ

ートする予定としている。この研究の内容は、コンクリートの劣化のメカニズムの解明、コンクリート中の塩分総量の規制値を明らかにし、最終的な成果としては、内部ひびわれ、鉄筋腐食度の測定機器などを開発して劣化診断技術を確立する。また、新しい補修材料の開発、補修補強工法の基準の作成、更に耐久性向上の各種技術の確立を図ることになっている。

補修と表裏一体のものとして、管理の問題がある。従来から、ダム、大型橋梁などには、管理用の計測機器が設置され、その資料は、その後の同様な構造物の計画、設計に関して活用されてきている。その一例として、最近のエネルギー問題により、海中に大型構造物が設置され、その維持管理と、今後の計画、設計資料を得る目的で図-6に示すものがあり、有用な資料が得られてきている。一方、コンクリート構造の老朽化、耐久性の指標としての、ひびわれ深さについては、図-7に示すような超音波表面法によって、非破壊的に簡便に行えるようになってきている。更に、既設構造物の活荷重によるたわみの測定は、通常ダイヤルゲージが用いられているが、この方法は各種の不便があり、図-8に示すように光学的に測定する方法によれば、記録装置と併用することで通行車輛によるたわみを連続的に測定することが可



Brent B

図-6 大型海構造物の測中定

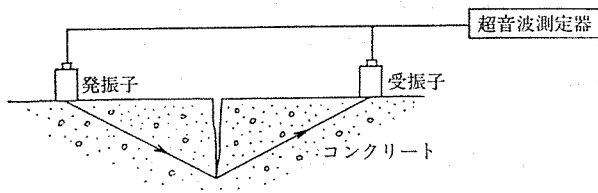


図-7 超音波表面法によるひびわれ深さの測定

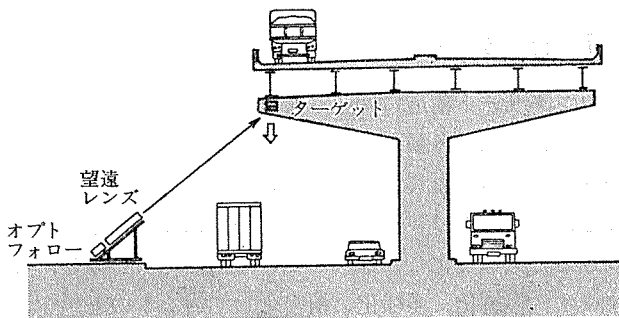


図-8 梁の載荷試験とオプトフォロによるたわみ測定

能である。この結果と計算値の比較検討により、老朽化、補修の要、不要の判定が行えることになる。

構造物の維持管理の基本となる耐力や耐久性を含めた構造物の的確な診断は、老朽化した橋の補修、補強、場合によっては架替えを決定する重要な要素であるばかりでなく、国民生活の安全性確保のための鍵であり、このため、よりよい診断方法の研究開発を目指した実験、試験が推進されている。

5. 電子計算機の活用

模型実験は、相似則の設定、模型の設計、実験計画の

各段階において、実物の挙動を模型によって完全に再現しうるといった理想的な模型を想定するわけであるが、現実には、実験費の限界、材料の物理的性質による限界、寸法縮小の限界、製作技術上の限界等の問題がある。これを解決する手段の一つとしては、FEMを構造物の解析に精度高く適用することが考えられる。FEMのコンクリート構造への適用には電子計算機を用いて、モデルシミュレーションが行われる必要がある。しかし、過去に多くの研究が行われてきたにもかかわらず、なお、統一した解析手法は確立の段階には至っていない。構成材料の特性が十分に解明されていないことと、個々の材料非線形を数値モデルに反映させる手法に問題が残されているからであろう。特に、コンクリートの構成則、ひびわれ面でのせん断伝達とダイレイタンス、鉄筋とコンクリートとの相互作用、ひびわれのモデル化、ひずみ軟化域を含む、収束性と解の唯一性が保証された安定求解法、コンクリートについての実験データと有限要素の寸法との関連などが問題となっている。現段階では、現象に対しての解析精度に問題がある。これらの問題点を解決するためには、コンクリートの構成則等の上記の問題の研究が、今後とも急速に必要とされる。この研究の一例は、多軸応力下におけるコンクリートの特性に関するもので、図-9に示すような試験装置により実験が行われ、2枚の供試体に、同時に直交2方向の圧縮力と引張力を加える。これらの研究が進むと、FEMは大型電子計算機を使用して現在より更に部材の挙動の解明に寄与することになり、更に進めば、コンクリート構造物の実験を電子計算機により行うことが可能になり、多大の費用と労力を必要とする実験、研究の軽減につながる

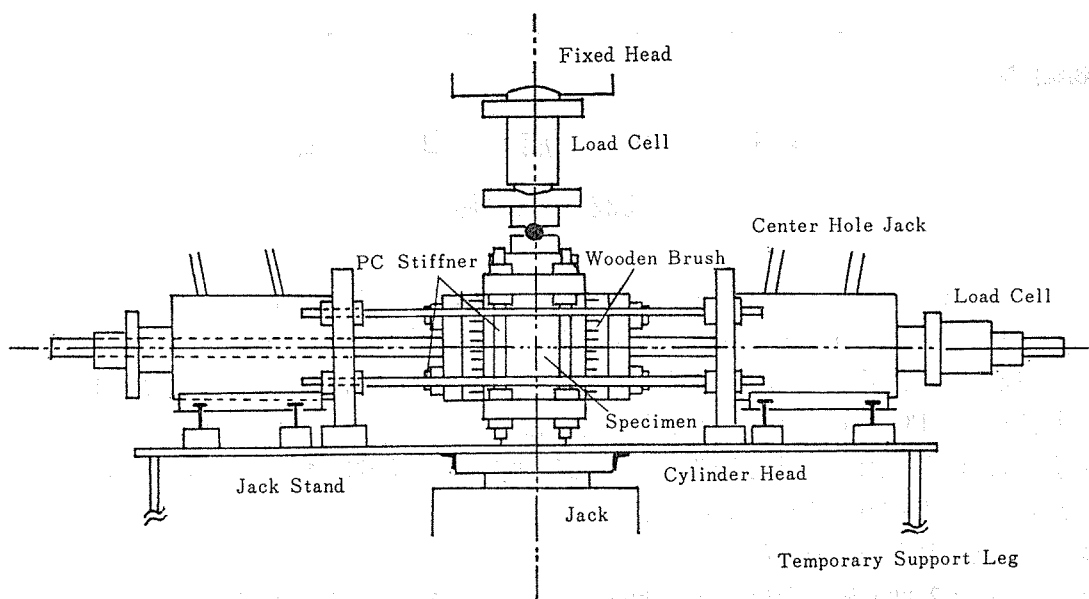


図-9 載荷システムの概略

ものとなろう。

6. 動的荷重, 衝撃荷重

コンクリート構造の適用範囲が広がるとともに、これらが受ける外力は、より過酷になってきている。その代表的なものとして衝撃荷重が挙げられる。衝撃荷重を受けるコンクリート部材の挙動は古くから研究対象となっているが、計測、解析装置の未開発、あるいは対象とする衝撃荷重の定義もまちまちである等の問題があり、今なお、完全な解明には至っていない。実際に問題となってくる場合として、

- a) 道路、鉄道におけるシェルターへの落石、高欄への車の衝突、伸縮継手での車輪による打撃
- b) コンクリートくいの打込み時の打撃
- c) 橋脚への車あるいは船の衝撃
- d) 海洋構造物への船舶の衝突、接触あるいは嵐による大波の激突および流氷の接触
- e) 原子炉格納容器への航空機の衝突、ミサイルの激突、原子炉での冷却水の流出事故
- f) 構造物への爆撃

従来から、重大な衝撃荷重の構造物使用期間内での発

注) 漸増破壊限界状態 (progressive failure limit state) 誤用や突発事故によって構造物に損傷が生じた後に進行する変形。

生確率は非常に小さい場合が多く、設計に考慮されない場合もあったが、最近の実情はかなりの頻度で発生する可能性も考えられ、漸増破壊限界状態^{注)}が定義されるに至っている。

この面での研究は、衝撃荷重の特性、頻度、材料特性の定式化、FEM による解析、耐衝撃性の評価法の確立と多くの問題があるが、現状では実験的研究が、この主流とならざるを得ない段階である。

7. むすび

コンクリート構造に関連した研究、実施工事に関連した試験、実験は多種、多様であるが、その中で代表と思われるものの最近における傾向といったものを取り上げてきた。これらは、その時代のニーズによる建設事業の動きとともに変化し、推移していくものであろうし、ますます、複雑化、多様化、精密化していくものと想定される。しかし、我が国において、その基本的な項目としては、

- 新材料を含む材料関連
- 構造物の構造解析の高度化、精密化
- 維持管理

となろう。いずれの研究、実験、試験も上記のものに集約されるものと思われるが、欧米の傾向を見ても、維持管理関係の比重が高まるものと思われる。

◀刊行物案内▶

PC 定着工法

(1982年改訂版)

本書は、現在我が国において多く用いられている PC 定着工法 19 種についてとりあげ、それぞれの工法の概要、構造、施工法、特長、注意事項などを解説したものであります。

設計者、施工者の利用とともに教育用テキストなどにも広く使用できることと思います。

また付録として PC 鋼材一覧表 (改訂版) 等を添付してあります。

ご希望の方は代金を添え (現金書留かまたは郵便振替東京 7-62774) プレストレストコンクリート技術協会宛 (電 03-261-9151) お申し込みください。

体 裁 : B5判 94 頁

定 価 : 2,800 円 (会員特価 2,500 円)

送 料 : 350 円