

## 新任教員紹介

# 土木工学科・講師 中野友裕

### 略歴

1971.6 浜松市生まれ  
1990.3 静岡県立浜松西高校卒業  
1991.4 - 1995.3 名古屋大学工学部土木工学科  
1995.4 - 1998.3 日本国土開発株式会社  
1998.4 - 2000.3 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻修士課程  
2000.4 - 2003.3 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程  
2003.4 - 2005.3 国立大分工業高等専門学校土木工学科助手  
2005.4 現職



### 担当科目

構造力学Ⅰ, コンクリート構造学, 土木工学基礎ゼミナール, 土木実験, 土木設計製図  
解析数学特論

### 研究活動内容

#### コンクリート構造物の数値解析への Flexibility 法の適用に関する研究

近年のコンピュータの急速な発展に伴い、激震時における土木構造物の非線形動的解析に代表される数多くの数値解析を用いた研究が行われてきている。道路橋示方書においても、非線形動的解析を用いて構造物の挙動を予測することを推奨している。今後、土木構造物の大型化・複雑化が進めば、数値解析による構造物の挙動解析は大きな役割を担うとともに、その精度・再現性に対して一層の期待と責任を受け持つことになることは論を待たない。とりわけ実験が難しい実構造物レベルにおいては、その傾向はますます顕著になっていくものと考えられる。

今日、多くの数値解析に用いられている有限要素法であるが、静的あるいは動的繰返し载荷を受ける解析において最もよく使われる要素に、はり要素がある。はり要素はフレーム構造や橋の構造要素をモデル化する際に好都合であり、全体的な挙動を捉えるのに非常に適している。

はり要素の定式化に関しては大きく分けて2つの形式がある。1つは要素変位の近似関数を元にした剛性法に基づくものであり、もうひとつは要素内力の直線分布を規定する Flexibility 法である。従来、構造解析には専ら剛性法に基づくはり要素の定式化が用いられ、多くの汎用プログラムでも剛性法を採用している。剛性法は非線形領域に至っても比較的容易に収斂過程が作れること、また構成則の表記が一般にひずみから応力を求める方向にあることなどが、解析アルゴリズムにとって都合が良いといった理由から、多用されてきた。しかしその反面、剛性法のアルゴリズムでは、部材内力は等価節点力に置き換えられるため、節点における力の釣合いさえ満足すれば、要素内の力の分布が現実と異なっていようと、外力と内力の釣合いは見かけ上、満足していることになる。そのため剛性法では適切に要素分割を施さなければ、非線形領域での解析が妥当な解となら

ないことがあり得る。そのことは同時に、数値解析を困難にし、莫大な要素を用いた解析が必要となる一因でもある。剛性法による解析の利点を否定するものではないが、これらの問題点は、今後の数値解析において必ず大きな問題として解決すべきものであると考える。

一方で Flexibility 法による構造解析の特徴は、要素内のモーメントの直線性を規定することである。従来の Flexibility 法（一般に応力法と呼ばれる）は、力を考慮に入れてなおかつ変形を成り立たせるために、除荷域や軟化域に至った場合、収斂過程が極めて煩雑であり、数々の問題点を抱えていた。しかし近年になって California 大学の研究グループにより、力の分布を元にした新たなアルゴリズムが提案されている。そのため、力の分布を基礎とした定式化に基づく解析が可能となれば、剛性法の克服しきれない問題点を解決する有効な手段となることが期待できる。

Flexibility 法の最大の利点は、厳密な力の釣合いを基礎としているために、力の直線性が成り立つ範囲においては1要素で局所化や軟化を含めた解析が可能であるという点である。そのことは大幅に少ない自由度で精度よい解析を行うことができることにつながり、連続高架橋などのはり部材にモデル化できるような大構造物の非線形応答解析が、全体系に亘っても可能となると考えられるのである。

本研究は、Flexibility 法による構造解析をコンクリート構造物に取り入れる手法を開発するものであり、軸力・曲げ・せん断・ねじりを受けるコンクリート構造物の非線形挙動を精度よく評価することを目的としている。また、それらの挙動を考慮した地震時応答解析への拡張も試みており、以下に述べる様々な成果が得られている。

### RC連続高架橋に対する3次元効果の検討

地震時における橋梁の挙動は、構造物を構成する種々の要素が複雑に干渉しあう現象であることから、振動特性を失わない程度に簡略化されたモデルに基づき実験・解析・設計が行われることが主流である。このようなモデル化による検討は、現象を理解し説明する上で明快かつ合理的な方法であることから、現在の耐震設計における1つの重要な指針となっている。

一般に構造が単純とされる構造物、たとえば単純支持の連続高架橋では、振動単位の考え方にに基づき、2次元的な1本の橋脚と1スパンの上部構造重量にモデル化され、検討がなされる。道路橋示方書によれば、これは、橋が地震時に同一の振動をすると見なすことができる単位に分割することができるという考えと、水平2方向の地震動による慣性力が同時に最大値を取る可能性が低いという考えの2つに基づくものである。従って、特別な形状をしていない橋梁の耐震設計に際しては、水平2方向の慣性力がそれぞれ独立に作用していると仮定して照査が行われることになる。

実際の橋梁構造のように比較的長い区間に亘る構造に対してもそのモデルが実現現象に忠実であるとしているようであるが、本格的な3次元解析でその妥当性を検証した報告はない。日本をはじめ、諸外国での耐震設計で広く用いられる、橋梁を上部構造と単一の柱にモデル化する方法は、基本的な振動特性を把握するのに非常に有用な方法であると考えられるものの、それによって表現しきれない現象が存在することも事実である。とりわけ、RC構造物の耐震設計は、構造物の塑性化を許容するじん性設計であることから、構造物の塑性域での挙動を精度よく予測することは極めて重要である。さらにRC橋脚の場合、水平2方向から地震動が入力されると、2軸曲げの影響により耐力が大きく低下する場合が一般的である。これらは2次元動的解析では再現することが困難な現象であり、3次元動的解析により、実際の挙動を評価すべきであると考えられる。

以上を考慮した場合、3次元全体系の動的応答解析により実現現象を把握することが極めて重要であるといえる。しかし、先に述べたように、単純支持の連続高架橋では、振動単位の考え方にに基づき単一のユニットで照査が可能であるという考え方が一般的であるため、多くのユニットを考慮した解析は行われていない。それにも関わらず、単純支持連続高架橋での3次元振動により生じる現象は解明済みという印象のあることは否定できない。非線形領域に至る橋梁全体系の数値解析は、コンピュータの発達に伴い不可能ではなくなりつつあるものの、あまりに多くの自由度を必要とすることから困難が生じる場合が多い。それらの問題を解決するためのひとつの方法として、自由度を縮約しても精度の低下が起らない Flexibility 法を採用することが考えられる。これまで検討したように、Flexibility 法は、モーメント、せん断力などの断面力の直線性が規定される範囲においては、はり・柱部材の要素分割をすることなく、軟化領域までを解析できることから、橋梁全体系のような大構造物の動的解析に適した方法である。

以上の背景に基づき比較的広範囲の連続高架橋を対象とした Flexibility 法に基づく3次元動的解析を実施し、RC橋脚に作用する2軸曲げの影響、ならびに橋梁全体系の振動による3次元効果に関して検討、考察をおこなっている。

### RC橋脚の耐震補強方法に関する研究

現状の耐震設計基準を満たさない RC 橋脚に対して、さまざまな耐震補強法が開発されている。これらの耐震補強効果を判定する場合には、耐震補強された橋脚に対して現状の基準を満たしているか否かを照査するが、現在の設計では、同一の構造が連続している際には設計振動単位を基準にしたモデル化がなされている。

単一柱形式の橋脚に対しては、片持梁形式のモーメント分布が適用されるため、上部工慣性力の作用位置および基部でのモーメントをもとにして、柱部材内のモーメント分布が求まる。曲げ靱性の不足している橋脚の耐震補強では、橋脚の基部に塑性ヒンジが形成されるように各断面の照査が行われるが、この点で日本と米国の補強方法には差がある。日本では橋脚全体を巻き立てて補強するが、米国では橋脚の下半分のみを補強して、基部の降伏時に補強していない断面が降伏しなければ良いという考え方が採用される。

日本の現在の RC 橋脚に対する基準では、急激な断面変化点を作ることを避けるように規定されているが、曲げ靱性確保のためだけであれば、米国のように基部を中心とした補強で考える方法が合理的・経済的であるという考え方もできる。日本においても、単一柱形式の鋼製橋脚では、コンクリートを部分充填することにより、座屈防止および中空断面での適度な塑性変形による橋脚全体の変形能の向上が報告されており、示方書にも反映されている。

しかし、この米国の考え方は、橋全体を単一の柱と考えるモデル化に起因している。確かに単一の柱であれば、米国型の補強であっても問題ないと思われるが、橋梁はその3次元形状から、地震時にさまざまな挙動をする。従って単一柱としてのモデルでは説明できない問題が生じる可能性を認識する必要がある。

昨今の社会におけるコスト意識を考えれば、日本型と米国型でどちらが費用対効果の面で優れているかを論じておくことが必要であるが、現在までに、全体系を考慮した上でこの種の問題を検討した報告はなされていないのが現状である。

著者らはこれまで、一般には単一柱にモデル化される構造に対し、構造物全体をモデル化して、その場合に生じる上部工の上下振動による付加曲げモーメントの発生について報告してきた。この付加曲げモーメントはP- $\Delta$ 効果による2次モーメントとは異なるメカニズムで発生するもので、一体となっていない2本の桁により上部工構造が成り立っている形式の場合に、その2本の桁が別々の挙動を示すことにより生じるものである。そこで現状の耐震設計思想を構造物に適用する場合、付加曲げモーメントの存在がどのような問題を引き起こすかについて具体的な検証を行っている。その際に Flexibility 法に基づく全体解析によって、無補強・橋脚全体の補強・橋脚の下半分のみを補強を施された橋脚がどのような挙動を示しうるかについて明らかにし、耐震補強を考える場合に必要となる挙動について検討を行っている。