

## 連続体の弾性および弾塑性問題の解法に 関する一連の研究（総合題目）

岡村 宏 一

本論文は、従来、2次元、3次元問題の分野で蓄積されてきた解析的方法と、数値計算的方法とを組み合わせ、両者の持つ特性を相補って利用する、1つの系統的な手法を提案し、その広範囲の応用について論じたものである。すなわち、構造要素としての平板の、面内、面外の挙動、ならびに3次元連続体に関連した種々の問題において、実用上便利な形に整理された解析解を基底に置いて、精度の向上、未知量の制約などの利点を獲得し、一方、それらの持つ適用範囲の隘路を拡張するために、境界条件、連続条件、大たわみ、不均質性、弾塑性などを処理するための物理量を、有限領域内で平均化し、工学的判断によって、必要最小限の選点法、差分法を併用する、高精度、かつ実用的な一連の手法を提示したものである。

はじめに、論文報告集第190号に記載のものは、構造要素として長方形平板を含む、種々の構造物の3次元弾性解析を扱い、解法上の要点は、板と骨組の偏心結合、あるいは板と板の結合の問題を忠実に評価するところにある。まず最初に、鍵になる解析解として、上下面に垂直、水平方向の力を受ける板の解（級数解）を誘導する。次に、それらを有限領域内で等分布する形に表わすと同時に、計算上の有用な手段である級数総和法を適用できる形に整理し、解析に必要な通常の外荷重のほか、プレストレスによる拘束力、さらに、骨組との接合面、ならびに辺上に作用する不静定力を、階段状に変化する有限個の力の重ね合わせで与える。一方、部材間の適合条件、あるいは複雑な境界条件に関しては、いわゆる選点法を併用し、骨組の解を代数関数の形で適合させて、複雑な立体解析を容易にしている。解析例では、5種の実際構造物の3次元解析が、本解法の各種の構造物への一貫した応用の方法、また、その精度の検討をおもな論点として行われ、本解法の有用性を示唆している。

第196号に記載の論文は、前論文で用いた手法を、大たわみ、およびリブの補剛を考慮した平板構造の弾塑性解析に発展させ、同一の解析解を用いて高精度の性格を持たせたものである。ここで、基礎式中に非線形項として含まれる物理量を、有限領域内で平均化した上で、その単位量を前述の弾性解析で用いた部分領域の解で表わし、特に塑性変形に従属する物理量は、その自己平衡の

組み合わせで与える。さらに、これらの非線形項を線形化するために、必要最小限の選点法、差分法を併用する。一方、板とリブとの適合条件に関しては、前論文と同様の手法を踏襲し、1種の複合構造として忠実な弾塑性立体解析を行っている。論文の後半では、この種の平板に関する多面的、かつ詳細な計算例を提示し、本解法の有用性を立証している。

第206号に記載の論文は、前述の弾塑性解法を、平板の後座屈領域を含めた弾塑性座屈の問題にも適用することを意図したものである。ここでは、基本的な問題である、圧縮平板の終局強度に関する広範囲のデータを作成し、その崩壊機構を明らかにすると同時に、前論文の解法が、座屈問題のような、崩壊時に急速な変位の増大を生ずる場合にも適用性を持つことを示し、その一貫した応用の可能性を見出している。

第199号、ならびに第212号に記載の2編の論文は、前述の平板問題の解法と同様な思想に基づく手法を、3次元体の非軸対称問題の解析に導入したものである。

まず、第199号の論文では、3次元弾性体の境界値問題が扱われる。ここで平板の場合と同様に、鍵になる解析解として、内部に垂直、水平方向の力を受ける半無限体の解（Mindlinの第1、第2問題の解）が導入される。さらに、それを有限領域内で等分布する形に表わしたものは、表面荷重のほか、内部で任意の境界を作りだすための調整力の分布を、階段状に変化する有限個の力の組み合わせで与える。一方、境界条件に関しては選点法を併用し、解法上、いわゆるIntegral methodに属する1つの実用的な手法が形作られている。論文の後半では、4種の基本的な例題について、異なった性格を持つ境界調整の方法、ならびに精度についての詳細なデータを提示し、本解法の有用性を立証している。

第212号に記載の論文は、第196号、および第199号の各論文における解法上の思考が結びついたものである。

まず、3次元弾塑性問題において、基礎式中に非線形項として含まれる物理量が、体積力と類似の性格を持つことを利用し、それらを有限領域内で平均化して、その単位量をMindlin解の3重積分で与える。さらに非線形項の線形化には、板の場合と同様に、必要最小限の選点法、差分法が併用される。一方、不均質弾性を有する3次元体の問題が、弾塑性問題と同様に扱われる。すなわち、弾性母体の中で剛性の異なる部分を、有限領域の集合形で表わし、それらの剛性の、母体のそれとの差異によって基礎式中に含まれる物理量を、同一の手法で処理するものである。論文の後半に掲げた7種の基本的例題を通じて、Mindlin解の多面的な応用によって整備された本解法の実用性と、その精度の高い性格を立証している。

土木学会論文報告集 第190号、第196号、第199号、第206号、第212号所載（著者名：岡村宏一・吉田公憲・島田 功・進藤泰男）

## 沿岸水域における拡散・分散問題の 統一的研究 (英文)

(Unified View of Diffusion and  
Dispersion in Coastline Waters)

玉井 信行

本論文は沿岸水域あるいは海岸滞水層の環境保全の問題において用いられる拡散型方程式の係数の意義を、現象と対応させて統一的に論じ、温排水の放流に伴う密度流現象および河口貯水池への塩水浸透の問題を通して、混合現象の水理学的基礎を解明したものである。

拡散 (diffusion) とは、与えられた方向の実際の輸送速度と、「時間的」に平均された輸送速度の差に基づく物質輸送の偏差を表わす。一方、分散 (移流拡散, dispersion) とは、与えられた方向の実際の輸送速度と、「空間的」に平均された輸送速度との差によって生ずる物質輸送の偏差を表わす。したがって、流れの場には速度分布がない場合の分子拡散あるいは乱流拡散現象が拡散型に分類され、境界の影響を受けて主流がせん断流れになっている場合には、主流と主流と直角方向の拡散対象とが組み合わさり、混合現象は分散に属することになる。これを人が知り合う過程にたとえれば次のようになる。流れを新幹線による輸送としよう。拡散型の運動は微視的な、粒子相互の現象であるから、個人間の付き合いになる。新幹線により人の動きは頻繁になるが、これは人が単に移動したのみで理解には達しない。実際に個人間の相互理解が進むのは、移動した人間がその目的地で、個人同志十分に付き合うことが必要なのである。これは流れの混合現象にもそのまま当てはまり、主流による粒子の移動は仮定の混合といわれる由縁であり、主流の存在によって混合の程度は大いに大きくなるが、最終の段階では拡散型により流体粒子が混合することが必要である。

### 1. 水面上における密度噴流の水平放出

温水放流あるいは河口流出などに伴う、二次元あるいは三次元の拡散現象を解析した。まず、二次元の密度噴流において鉛直断面内の速度分布、密度分布を解析的に求めた。速度分布は、密度差が僅少な場合には一様流体の場合と同一の解が求まり、密度分布は速度分布とシュミット数の関数として表わされた。また、実験を行うことによって、この種の問題の基本的手段である相似性の仮説についての限界を検討し、密度フルード数の影響を明らかにした。

二次元、三次元密度噴流における噴流軸方向の物理量の変化に関しては、従来一定値として扱われてきた連行係数を、Richardson 数の関数として取り入れることが本質的な寄与をすることを最も早い時期に指摘し、手法としては基本式を差分化することにより、放出口の条件のみから三次元問題における速度変化を除いては実験結果を良く説明できることを示した。

三次元の温水噴流については、温度の変動成分の観測を初めて行い、密度フルード数が3程度で攪乱の機構が変化することを示した。連行現象の物理性についても検討を加え、密度噴流境界において混合に寄与するエネルギーは、局所リチャードソン数の二乗に反比例することを導いた。

### 2. 不規則波自身による拡散

海域に放出された流体塊が放出口より遠く離れ、初期運動量を有しない場合に不規則波によりどのように拡散するかを論じた。解法にはラグランジュ流の記述を用い、一様波に対して相互干渉を考慮した三次までの摂動解を渦なしの形で求めた。さらに不規則波の拡散係数を水面変動のパワースペクトルで表示する手法を進展させ、定量的な評価を可能にした。その結果、拡散性が存在するのは三次以上の相互干渉解であることを明らかにし、時間スケールの小さい場合には拡散係数は時間に比例し、時間スケールの大きな場合には拡散係数は一定となることを示した。沿岸海洋における、変動速度から求められた観測値は、ほぼ理論の予測と一致したが、相互干渉の実態についてはなお残された問題もある。

### 3. 多孔媒体中の分散現象

本論文の解析は、多孔媒体中の分散現象を、多孔媒体中の粘性流自身の性状から解明したものである。第一段階としては、理想化された二次元媒体中での粘性流を、ナビエ・ストークスの方程式を渦度の方程式に変換し、数値的に解くことにより決定した。得られた流れは、流線が閉曲線を描く領域が存在することを示し、これをもとに領域区分を行い、一次元分散方程式を解析的に解いた。横断方向の渦動粘性係数は、数値解より求められた渦度に比例するとして解かれた分散係数の特性は、レイノルズ数が3以下で従来の実験結果を説明しており、多孔媒体中での分散の機構が流体力学的に明らかになった。ここで用いられた分散現象の取扱いは最も基本的なものであると考えられ、同一の手法はその後、瀬戸内海の分散係数の定常解へも適用されている。

## 非線形履歴構造物のランダム 応答解析 (総合題目)

竹宮 宏和

本研究は、土木構造物が強震を受けた場合の復元力特性において非線形履歴性を導入し、その構造物応答への効果をランダム応答解析から解明したものである。まず、ランダム入力に対する非線形履歴系、特に双一次履歴系の応答解析を等価線形化手法より試み、さらに、その結果を構造物—地盤系に応用し、その耐震性について考察している。

### 1. 非線形 (双一次) 履歴系の等価線形化手法

双一次履歴系は、非線形履歴系のうち最も単純なしかし適用範囲の広いモデルであり、その特性は降伏レベル  $Y$ 、降伏比  $\alpha$  の2つのパラメータで支配される。この系が定常ランダム入力、たとえば平均値零、強度  $S_0$  のホワイト・ノイズを受けると、定常 rms 変位・速度応答値、 $\sigma_x$  および  $\sigma_{\dot{x}}$  は  $Y/N$  の関数となって現われる (図-1, 2)。ここで  $N = \sqrt{2S_0\omega_0/\omega_0^2}$ 、 $\omega_0$  は微小線形振動時の固有振動数である。ちなみに、線形系の応答は  $N$  に比例して  $\sigma_x/N = \sigma_{\dot{x}}/\omega_0 N = \sqrt{\pi/\beta_0}/2$ 、 $\beta_0$  は線形粘性減衰率である。双一次履歴系の等価線形化手法として、著者は、定常ランダム応答状態での消散エネルギー率、および応答平均振動数 ( $\sigma_{\dot{x}}/\sigma_x$ ) の一致規範を設けている。前者は1サイクルの履歴エネルギーから履歴周期を推定し評価するのであるが、本研究結果により、履歴周期には降伏後剛性に対する固有周期を採れば良いと判明した。したがって上の規範は次式を導く。

$$(N/\sigma_x)^2 = (2/\pi)^{3/2}(1-\alpha)\alpha^{1/2}(Y/\sigma_x)\text{erfc}(2^{-1/2}Y/\sigma_x) + (4/\pi)(\beta_0/\omega_0^2)(\sigma_{\dot{x}}^2/\sigma_x^2)$$

また、その後の研究で、より一般的な非線形履歴系においては、履歴周期は最大振幅時の勾配剛性に対する固有周期となると拡張された。次に、後者の応答平均振動数については、 $\alpha$  があまり小さくなければ狭帯域応答を仮定した Caughey の解を採用すれば良いが、 $\alpha \ll 1$  では、これよりも精度の良い推定法を誘導した。等価線形化の精度の検証の一例を 図-1, 2 に示す。また、これらより、双一次履歴系には、 $\sigma_x/Y \approx 1.2$  で最小応答値が存在することがわかる。ところで、上の2つの規範を満たす線形系は種々考えられるので、振動数特性としての定常応答パワー・スペクトル密度の比較も行い、降伏比、非線形応答量に応じて最適な等価線形系が選ばれることを指摘した。ついでこれら等価線形系の遷移応答領域での比較を行い、これと定常パワースペクトル密度との相関性を調べた。その結果、 $\alpha$  が 1/2 程度ではこの相関性

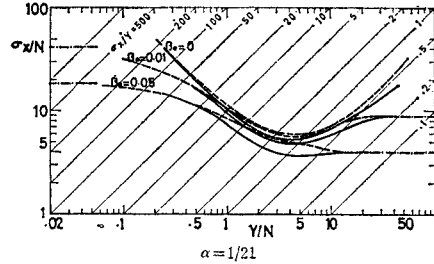


図-1 rms 変位

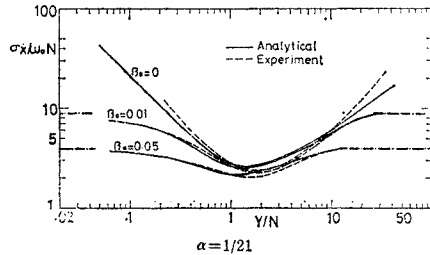


図-2 rms 速度

はほとんど無いが、 $\alpha \ll 1$  となると強くなると判明した。

### 2. 地盤の非線形性を考慮した構造物応答解析

1. で得られた結果を、地盤の非線形復元力特性に適用して、長大つり橋タワーピア系の応答解析を行った。解析にあたって、上部工のタワーシャフトと下部工のピアの減衰効果が大きく異なり、全体系として非比例減衰系となる。そこで、対象系の応答共分散マトリックスを評価するに、位相・速度のステート・ベクトルを導入して、運動方程式を連立一階微分方程式に変換し、複素固有値解析して応答共分散マトリックスに関する微分方程式を作成した。定常応答解は容易に解けて、

$$E\left[\left\{\frac{d^l y}{dt^l}\right\}\left\{\frac{d^m y}{dt^m}\right\}^T\right] = 2 \sum_{i=1}^{2N-1} \sum_{j=1}^N \text{Re}\left(\frac{I_{ij}}{r_i r_j} \left\{\frac{d^l \phi_d^{(i)}}{dt^l}\right\} \left\{\phi_d^{(j)}\right\}^T \{F\}^T \left\{\phi_d^{(j)}\right\} \cdot \left\{\frac{d^m \phi_d^{(j)}}{dt^m}\right\}^T\right) S_0$$

$l, m=0$  あるいは  $1$

ここで  $\left\{\frac{d}{dt}\phi_d^{(i)}\right\} = \lambda_i \{\phi_d^{(i)}\}$ 、 $\lambda_i$  は複素固有値、 $\{\phi_d^{(i)}\}$  はそれに応ずる複素変位ベクトル、 $r_i$  はその重み関数、 $\{F\}$  は対象系の外力ベクトルであり、 $I_{ij} = S_0/r_i r_j (\lambda_i + \lambda_j)$

応答解析結果からは、地盤の非線形性は全体系の動特性に大きく影響し、線形時固有モードが接近している系では非線形応答が線形時より小さくなり、最小応答が存在する。一方、線形時固有モードがよく分離している系では、非線形応答は線形時より大きくなることを指摘している。こうした現象は固有モードの接近・分離から生じており、通常考えられる非線形応答量で生じる。

上の厳密応答解析に対して、実耐震設計の面から古典モード解析を使用する近似応答解法をも考案した。

## 「堅岩基礎のグラウチング」ならびに 「ダム基礎における岩盤計測と その設計施工への応用」

藤井 敏夫

近年、わが国における水資源開発の必要性はますます高まり、ダムの経済的建設は時代の要請となっている。一方、地質条件に恵まれたダム地点は、おおむね開発が行われており、今後に残された地点は、むしろ地質条件の不利な場合が多い。したがって、ダムの基礎処理がきわめて重要となるが、これら処理技術には、解明を必要とする問題が多い。この研究は、ダムの基礎処理のうち、岩盤止水工としてのセメントグラウチング、ならびに、断層処理工としてのコンクリート置換、セメントグラウチング、およびPC鋼材緊結について、設計、施工上の問題点を取上げ、その解決のための提案を行い、これを適用した奈川渡ダム（アーチダム：高さ155m、コンクリート体積約70万 $\text{m}^3$ 、昭和44年竣工）の基礎処理部の挙動観測によって、その妥当性を実地に確認した経過をとりまとめたものである。

### ダム基礎の止水グラウチング

岩盤のセメントグラウチングの技術は、従来から経験に依存するところが多いが、これは主として、施工の対象となる岩盤の地質条件が多様で、しかも、その定量的な把握が困難であって、個人的な判断にゆだねられることが多く、また、施工の所産であるグラウトが、岩盤内部の直接目の届かないところにあり、しかも、施工の是非を判断する観測手段が乏しかった等の理由によるものと考えられる。この研究では、従来からの多数の施工実績を検討のうえ、グラウト注入の複雑な機構をできるだけ理解し易くするために、極力単純化し、注入にかかわる主要な要因を選択し、それらの役割りを推定し、それをもとに、注入孔間隔、注入圧力、グラウト濃度、追加注入基準等、設計ならびに施工管理上の要項を合理的に定める方式を導き、その適用の成果を、奈川渡ダムの実施例によって示している。

そして、グラウチングの技術を体系的技術に脱皮させるための当面の課題として、岩盤の定量的な地質評価、注入にかかわる要因の選択、データの集積と解析等に関する基本方針を樹立し、工事規模に見合った実際的な手順を決定し、広範囲の系統的な調査、研究を実施することの必要性を述べている。

### ダム基礎の断層処理

ダムの基礎は、ダムからの力を十分支持できる強度および変形性を持つと同時に、貯水池の水を漏洩させることのないよう十分不透水なものであることが必要である。したがって、基礎に断層等の脆弱部のある場合は、これを処理しなければならない。ダム基礎の断層処理には、従来、種々方法が用いられているが、断層部をコンクリートで置換える処理が一般に確実な方法であると考えられる。コンクリートは、強度、弾性係数、透水係数等ダムの基礎に要求される条件を満足するほか、施工性に優れており、しかも、工事単価もあまり高価でないので、コンクリート置換処理によって、断層部の強度の増強、変形の抑制、透水の制御等が期待できる。しかし、この処理の規模が大きい場合には、断層掘削に伴う周辺岩盤の弛みを極力抑制することが必要となるので、そのための掘削工法を開発するとともに、掘削によって不可避免的に生じる空洞周辺の地圧による弛みに対し、グラウチングや、PC鋼材による緊結処理を併用する等の措置をこうじなければならない。この研究では、このような大規模断層処理における問題点の解決方法を検討し、その奈川渡ダムにおける適用の効果を、施工中および湛水後の処理部の計測記録によって確認している。

### ダム基礎の計測とその応用

構造物の基礎の設計および施工の妥当性を現実に明らかにするためには、一般に実物の挙動を観測することが必要である。ダムの基礎の場合は、特に、その規模が大きく、しかも、地質条件がダム地点によって異なり、また同一地点においても場所によって変化している場合が多いので、実施した基礎処理の効果については、個々のダムにおける基礎各部の挙動を観測し、それらの結果と、設計および施工において考慮した諸条件とを対比、検討することによって始めて明らかにすることが可能となる。そして、ダムの基礎処理技術の現状は、個々のダムにおける詳細な検討資料を集積し、解析を積重ねて、その発展を促進すべき段階にあると考えられ、今後、基礎処理に関する詳細な計測記録が数多く報告されることが望まれる。この研究は、その意味において、奈川渡ダムの基礎処理部の計測結果をとりまとめ報告するものであり、結論として、観測されたセメントグラウチングによる基礎の止水効果、および断層処理による基礎の補強効果は、いずれもほぼ期待通りであり、実施された基礎処理が、有効適切な工法であると述べている。

## ねじりをうける鉄筋コンクリート 部材の設計法に関する研究

松 島 博

この研究は、曲げ—ねじりをうける長方形断面鉄筋コンクリート部材の設計法について、破壊強度設計法の立場からその強度とともに変形をも重視して検討し提案したものである。このためにまず、skew bending の考え方をを用いて部材の破壊機構を明らかにし、力のつり合い条件とひずみの条件をともに満足するようにしてその強度と変形を評価する一般式を導き、これに基づいて設計法を提案した。

従来の研究においては、ねじり強度の評価方法として

1) コンクリートと鉄筋の分担する抵抗モーメントの和として求めるもの、2) 実験的に求めた曲げ—ねじりの相関関係に基づくもの、3) 仮定した破壊面に関する力のつり合い条件に基づくもの等が提案されているが、これらは破壊機構を明らかにした上での評価方法ではない。また、力のつり合い条件に基づく3)の方法においても、ひずみの条件は全く考慮されておらず、いずれの方法によっても変形の問題を理論的に取扱い得ない。

曲げ—ねじりをうける長方形断面鉄筋コンクリート部材の破壊面は曲面であるが、解析のためにはこれを理想化して逆台形断面とみなし、これと同一断面をもつ複鉄筋の仮想部材を設定する。ついで、外力としての曲げモーメントとねじりモーメントの、この仮想部材に関する断面力を求め、仮想部材について力のつり合い条件とひずみの条件から中立軸と強度に関する一般式を誘導した。この一般式に対して、部材降伏時および破壊時のひずみの条件を与えて、それぞれの場合における中立軸係数と抵抗モーメント係数を表わす式を求めた。

このとき、コンクリートと鉄筋についてそれぞれ応力度とひずみ度の関係を定め、鉄筋については明確な降伏点をもつものとし、そのひずみ硬化領域まで考えた。また、部材は軸方向鉄筋とこれに直交する閉じたスターラップでつり合い鉄筋比以下に補強されているものとし、それぞれの鉄筋が同時に降伏することを条件に軸方向鉄筋比とスターラップ比の割合を求め、スターラップ間隔の限界を定めた。

曲げ—ねじりをうける部材の変形をねじれ変形と曲げ

変形に分けて考え、前者を部材軸まわりのねじれ角で、後者を部材軸直交軸まわりの断面の回転角で表わす。これらを部材降伏時と破壊時について、それぞれのひずみの条件を考慮して求めた。このためにまず、仮想断面部材についてねじれ率と曲率を求め、部材軸方向のそれぞれの成分の和から部材のねじれ率を、部材軸直交軸方向の成分の和から部材の曲率を導いた。部材の降伏とともに plastic-hinge が形成されるが、その長さを skew bending をうける仮想断面部材圧縮域の部材軸方向斜影長に等しくとって、部材における、ねじれ角と断面の回転角を計算する式を示した。

解析の結果に基づいて設計のための図表を、鉄筋比の値に対応する中立軸係数と抵抗モーメント係数について、部材断面の縦横比 ( $h/b=1.0\sim 2.0$ ) ごとに、部材降伏時と破壊時のものを準備した。変形式における係数も同様に、あらかじめ計算してグラフで示した。しかる後に、これらを用いて行う断面および変形の計算と安全度の検討の方法について述べた。このとき、設計の基準を部材降伏時の強度と変形にとり、破壊時のものについての余裕を確かめておく。ねじりに対しては、部材降伏後の剛性の低下は著しく、また一般に強度上も破壊までの余裕が少ないことに注意する必要がある。構造物の構成要素としての部材の設計においてその変形を特に重視すれば、所要変形能力に対して鉄筋比を定め、ついでコンクリート断面を求め、これについて強度上の余裕を確かめる方法も考えられる。

中空箱形断面部材を用いることは、ねじりに対しても有効でしかも経済的な場合が多い。CEB-FIP 国際指針ではねじりに対して中空断面を基準とし、充実断面に対しては理論的壁厚をもつ中空断面におきかえてねじりせん断応力度を計算するように定めてある。ここでは、中空断面部材が充実断面部材とほぼ同等の強度と剛性を確保するための肉厚の基準を、鉄筋比の値に応じて示した。

正方形、長方形およびT形断面をもつ鉄筋コンクリート部材について、曲げ—ねじり比、コンクリート強度および補強方法等を変化させながら一連の実験を行い、解析のための仮定および方法の妥当性を確認した。また、実験結果に基づき部材の降伏値は正規分布をするものとし、危険率を定めてそのときの信頼限界の下限値から、提案式に用いる強度低減係数の値を示した。

## 80 キロ級高張力鋼を使用した長大トラスの設計について (総合題目)

奥村 敏 恵・笹 戸 松 二  
松 本 忠 夫・河 井 章 好

本総合題目は次の4つの論文を含み、これらの論文はいずれも港大橋(旧称 南港連絡橋)の設計を対象とした一連の研究成果である。

論文1: 長大トラス橋の2次応力について(土木学会 第19回橋梁構造工学研究発表会)

論文2: 80 キロ級高張力鋼の実働荷重による疲労きれつの伝播について(土木学会 第19回橋梁構造工学研究発表会)

論文3: 長大カンチレバートラス橋の地震応答と耐震設計法について(土木学会論文報告集第212号)

論文4: 南港連絡橋上部工の設計とその問題点(橋梁と基礎 第7巻第6号, 第7号)

港大橋は主径間510mのゲルバートラス橋であり、完成するとこの形式では、世界最大の規模となる長大橋であるが、わが国特有の地震、風等のきびしい自然条件下で設計され、さらに70・80キロ級高張力鋼を有効に利用しているなど、多くの点において特質を有している。

### 論文1: 長大トラス橋の2次応力について

本橋のような長大橋になると、格点の剛結による2次応力は設計上無視できないものと思われる。本論文ではこの2次応力に注目し、種々の角度から検討している。

まず、本橋で取り扱う2次応力について定義をし、その処置法として許容応力度を10%割増しすることを前提としている。

本橋はKトラスとして骨組みは決定されているが、これをワーレントラスとした場合と2次応力度の比較考察している。次にこの2次応力を変形法による1次理論と有限変形法による2次理論とで比較検討し、さらに、急に曲げの方向が変わるいわゆる飛躍現象についても2次理論を用いて計算している。さらに、2次応力を考慮した設計法に対応した格点構造の細部についても検討した結果を報告している。また、架設途中の状態においてもその性状の検討をつけ加えている。

### 論文2: 80 キロ級高張力鋼の実働荷重による疲労きれつの伝播について

80 キロ級高張力鋼の使用にあたり、その鋼材規格の

設定において、特にぜい性破壊防止に留意したが、本論文では、線形破壊力学を前提とし、切欠き深さと破壊応力の関係を角変形、目違い、残留応力および使用温度の関連づけ、供用中においてぜい性破壊を生長せしめないための条件が必要である。そこで、本橋の実際の設計数値をもとにし、そこに繰り返し回数の因子を導入して、代表的な部材を取り出し、疲労きれつ伝播について計算検討し、破壊に対する理論的考察の裏づけを行った。疲労を考慮したわれの伝播に対する従来の許容応力度法を用いた設計法や、静的試験の結果に対する評価だけで、構造物の安全性を判断するのは問題がある。また、これらの結果、非破壊検査の判定限度からみて、われ発生の危険性がないことを立証したものである。

### 論文3: 長大カンチレバートラス橋の地震応答と耐震設計法について

耐震設計法の確立された解法の存在しない現況において、本論文では、長大カンチレバートラス橋の地震応答特性を明らかにし、またこの種の構造物に対する耐震設計の手法を示した。

まず本橋の全体を1本の棒に置換した多質点系の棒系モデルと、立体骨組みモデルの双方について震動解析を実施し、その地震応答値、振動モード等を多次に至るまで明らかにしている。

さらにこれらの結果から本橋に対する耐震設計法として応答を考慮した修正震度法による設計を提案し、各方向の地震に対する設計震度とその分布を、各構造部門に即して提案し、この結果、本橋の部材に生じる外力を動的解析、および従来の静的震度法と3方法について比較検討している。

これらの方法は、厳しい地震条件で長大橋を建設することに対し一指針となるものと思われる。

### 論文4: 南港連絡橋上部工の設計とその問題点

本論文は前記各論文を踏まえて、さらに本橋の上部工設計に対する考え方を総じて論じたものである。

まず本橋に対する特殊条件の荷重(地震、風を含めて)の設定とそれに対する具体的な設計法、超高張力鋼を含めた許容応力度、さらには、2次応力に対する設計法、曲げを考慮したガセットプレートの板厚の決定法や、フレット部の検討などについて総合的にのべている。その他にも箱断面の角溶接の寸法の考え方、架設中における設計上の諸検討など本橋の設計で遭遇した種々の新しい問題に対し、その対処すべき方向を示している。

## 吊橋補剛桁の架設工法について (総合題目)

長谷川 徹一・菅 七郎・原田 康夫

吊橋補剛桁の架設は、1, 2 パネルの部材を部分的に添接することによって既設部材へ取付け、添接可能な時期をみはからって現場継手を施工するという、いわゆる無補剛架設工法で行われるのが従来の一般的な方法であった。これは確かに、補剛桁架設途中における変形が大きいことに対する施工上の対策の1つといえるが、いっぽうには補剛桁を逐次剛結した場合の変形、応力を把握する手段に乏しかったことも、このような架設工法が採用されてきた要因の1つであったと考えられる。しかしながら、無補剛架設工法による場合には、一瞬のうちに過ぎ去る添接可能時期に多くの作業員を投入しなければならぬという施工上の不利益、その添接可能時期を逸することによる施工精度低下の危険性、さらに架設途中における耐風性能の欠如など多くの問題点が残されている。

そこで筆者らは、高精度で製作された部材を既設の部材に完全に添接してから吊材を引込むという逐次剛結法を用いることによってこれらの諸問題が解決されるとして、この工法を用いた場合について

- (1) 補剛桁架設途中の挙動を追跡するための数値計算方法
- (2) 架設用模型実験による検証
- (3) 本工法の適用と問題点への対応策

などを明らかにした。

本研究は5編の論文から成立しているが、現場施工上の実際面をふまえて考察を加え、問題の解明にあっている。

### 1. 数値計算方法について

吊橋の設計計算法としては、計算式に現われる非線形の影響をたくみに避けた線形化撓度理論がひろく実用に供されているが、ここでは補剛桁架設途中の状態に注目してその挙動を解析しようと試みるものであり、設計計算とはおのずから別の観点に立つものである。

解析の基本的な考え方としては、ケーブルを格点で折れた力の多角形であるとするとともに、ある既知の状態を初期状態として、ケーブルおよび補剛桁の格点における平衡条件から吊材張力の変化量に関する基本方程式を

導き、これをケーブル方程式と連立させて解くことにあたる。具体的には、設計図に明示される吊橋完成状態を初期状態としてケーブル張渡し形状を求め、これをあらためて初期状態として各架設段階の性状を追跡し、さらに水平荷重による挙動をも明らかにすることができる。また各種の境界条件をパラメータとし、ケーブルの水平反力に対して Newton-Raphson の方法を適用することによって効率よく繰返し計算を行っている。各種の製作施工誤差が完成吊橋に与える影響も評価できるように配慮してある。

### 2. 架設用模型実験について

上述した吊橋架設計算法の妥当性を確認するために、架設用模型実験を行った。実験の対象には関門橋の試設計諸元を用いることとし、Scale Factor を  $n=89$  (支間  $2m+8m+2m$ )、Slicing Factor を  $m=2.49$  とした。

### 3. 本工法の適用と問題点への対応策

逐次剛結法においては、架設途中の補剛桁先端に吊材張力が集中するため、吊材引込装置が必要となるとともに、場合によっては大きな変形に伴って補剛桁に過応力部材が現われることがある。

吊材引込装置については、本来の吊材ソケットの背面におじを設けるなり、仮吊材を利用するなどして、センターホールジャッキを併用すれば簡単に解決できる。関門橋では仮吊材と1格点あたり4台の50tセンターホールジャッキを用いているが、本研究でも吊橋の規模に応じて各種の具体例を示している。

過応力部材の発生については一般に補剛桁のせん断力、すなわち補剛トラスの斜材応力に問題がある。この点については、2ヒンジ補剛吊橋ならびに連続補剛吊橋を例にとって具体的に検討している。過応力部材の発生のしかたは側径間と中央径間の架設比によっても変動するから、数値計算によって事前に十分な検討を行うことが必要である。その対策として、部材断面をまったく補強する必要がない程度にヒンジを入れる方法と、すべて部材断面の増加で過応力を補う方法の両極端に対して、これらに施工性、経済性を考慮して、ある程度の補強を許してヒンジ数を減少させるという方法に妥当な施工法が見出されることを示している。

2, 3の代表的な架設機材についても、それらの具体案を例示している。