

氏 名	鈴木 基行
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和63年9月14日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和52年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 前期2年の課程修了
学位論文題目	RCラーメン高架構造の耐振性に関する研究
論文審査委員	東北大学教授 尾坂 芳夫 東北大学教授 倉西 茂 東北大学教授 福田 正 東北大学教授 三浦 尚 東北大学教授 柴田 明德

論 文 内 容 要 旨

第1章 序 論

RCラーメン高架構造は、高速鉄道、高速道路用として広く用いられてきており、その耐震性を保証することは重要である。

1978年6月12日に発生した宮城県沖地震により、当時建設途上にあった東北新幹線のコンクリート高架橋には、大小のひびわれが発生し、そのままでは正常な使用に耐えないものが少なくなかった。高さが10mを越える高架橋では、柱の曲げモーメントを軽減させるため、線路方向と線路直角方向に中層ばりを用いているが、交番した曲げおよびせん断の作用により、特に、線路直角方向の中層ばりに大きな被害が生じていた。

東北新幹線RCラーメン高架橋は、ほぼ同一の構造形式を有し、振動特性の異なる地域や地盤に建造されており、それらが同一の地震により、程度の異なる被害を受けたことはRC構造の合理的設計法を考える上で注目すべき点であり、今回の地震被害データは現行耐震構造設計システムにおいて、部材や構造物の振動特性、あるいは地盤の振動特性等が合理的に考慮されているか否かを検討するための貴重な資料となりうると考えられる。

以上の観点から、本研究は宮城県沖地震により生じた東北新幹線RCラーメン高架橋の被害の実態調査、RC柱部材の履歴復元力特性の実験的検討、RCラーメン高架橋の静的および動的弾塑性

応答解析および信頼性解析を通じて、RCラーメン高架構造の耐震安全性を検討することを目的として行われたものである。

第2章 宮城県沖地震によるRCラーメン高架橋の被害の調査と構造上の特徴

本章では、宮城県沖地震により東北新幹線RCラーメン高架橋に生じたひびわれの発生位置、パターン、幅、およびこれらの部材について構造上の幾何特性と力学的特性を述べている。

また、震害を受けたコンクリート構造物における鉄筋の損傷程度を調べるため、実構造物からひびわれと交わる鉄筋を取り出し引張試験を行い、鉄筋には複雑なしぼりが残留し、しぼりが大きいほどひずみ硬化が大きく現れる傾向があることを明らかにした。また、残留ひずみおよびひずみ硬化は、コンクリートのひびわれ幅が1mm以下の範囲ではひびわれ幅が大きい程大きい傾向がみられた。

さらに、東北新幹線RCラーメン高架橋の中層ばりが地震時に受けた荷重作用のせん断スパン比を確認する載荷実験を行い、RCラーメン高架橋中層ばりは地震時にせん断スパン比2.70前後の荷重作用を受けたと推定されることを述べている。

第3章 宮城県沖地震によるRCラーメン高架橋の被害の統計的検討

本章では、宮城県内のRCラーメン高架橋全てについて、構造条件、地盤条件、基礎条件、外力条件等を調査し、これらと地震被害との相関関係を明らかにし、各要因の地震被害に及ぼす影響を数量化理論を用いて検討している。その結果、ひびわれ発生確率は地盤種別毎にかなり異なっていること、および被害に大きな影響を与える要因は基礎深度、地盤N値、地盤種別、および支持層までの深さ等の地盤条件であることを結論づけ、現行耐震構造システムにおいて地盤条件が十分に考慮されていないことを指摘している。

第4章 静的交番繰り返し荷重下でのRC柱の履歴復元力特性

本章では、帯鉄筋が比較的多く配筋され、軸方向主鉄筋が断面の周囲に沿って配筋されているRC柱を対象に、静的交番繰り返し荷重下で軸方向主鉄筋量、帯鉄筋量、および作用軸圧縮応力度が耐力、ダクティリティ、復元力特性等の部材挙動に及ぼす影響を実験的に調べることを目的としている。

実験に用いた供試体は、一辺が40cmの矩形断面を有し、有効高さ $d=35\text{cm}$ 、せん断スパン長 $a=140\text{cm}$ 、せん断スパン比 $a/d=4.0$ の柱である。実験パラメーターは、東北新幹線RCラーメン高架橋柱部材の実際の設計条件を勘案して、軸方向主鉄筋比は0.95%~3.80%の4通り、帯鉄筋比は0.158%~0.357%の5通り、作用軸圧縮応力度は0~40 kgf/cm^2 の4通りとした。また、載荷は部材降伏変位 δ_y の整数倍づつ変位を漸増させ、各変位で5回づつ正負交番繰り返し載荷を行った。

その結果、斜めひびわれ発生時の荷重、部材降伏荷重、最大荷重、そして部材ダクティリティに大きな影響を及ぼすパラメーターは軸方向主鉄筋比であり、帯鉄筋比および作用軸圧縮応力度の影響は極めて少ないこと、部材降伏時の載荷点水平変位は曲げによる変位に鉄筋伸び出しによる付加

変位を加えることにより精度よく評価できること、最大荷重時変位は曲げによる変位に鉄筋の伸び出しに伴う変位の2倍を加えたもので評価できること、さらに鉄筋の伸び出しによる載荷点水平変位が全水平変位に占める割合は、変位水準1 δ_y で50~60%、ほぼ最大荷重時に対応する変位水準3 δ_y で約80%であり、鉄筋の伸び出しによる水平変位の割合は極めて大きいことを指摘している。また、本実験の範囲内では、荷重-変位曲線はスリップのない最大点指向型モデルで近似できることを示している。

第5章 R C柱の履歴復元力特性に及ぼす載荷速度と載荷パターンの影響

本章では、R C柱の地震時挙動を検討するため、断面寸法が40cm×40cm、せん断スパン比 $a/d=4.0$ のR C柱を対象に、載荷速度と変位振幅パターンとがR C柱の履歴復元力特性に及ぼす影響を実験的に調べ、それらのモデル化の方法を提案することを目的としている。なお、供試体のパラメーターは、軸方向主鉄筋比、帯鉄筋比、せん断スパン比および側面鉄筋量（側面鉄筋とは曲げが作用する断面の中立軸に対し直角方向に配筋した軸方向主鉄筋をいう）である。

その結果、一方向載荷時の荷重-変位曲線は、正負交番繰り返しを受けた場合の荷重-変位曲線の包絡線の上限值であり、繰り返し載荷の際の変位あるいは繰り返し数により描かれる包絡線が異なること、さらにある変位に到達するまでの変位履歴および繰り返し回数が少ないほど、包絡線は一方向載荷時の荷重-変位曲線と大変位レベルまでほぼ一致することを指摘している。また、部材降状変位を載荷の際の尺度とし、変位を徐々に増加させて得られた部材降状後の包絡線は、変則的載荷パターンにより得られた部材降状後の包絡線より下回っており、このような包絡線をR C構造の応答解析における部材履歴の包絡線とすることは安全側の選択であることを指摘している。

載荷速度が速くなると、塑性ヒンゲ領域が狭くなること、各変位振幅での最大荷重は大きくなること、しかし、載荷速度は履歴ループ形状にはほとんど影響を与えないことを指摘している。

また、同一変位振幅で正負交番繰り返し載荷が行われると、各サイクルの最大荷重は、繰り返し回数の増加につれ低下する現象を本実験の範囲内で次のように定量化している。

$$P_1/P_{\max} \geq 0.80 \quad : \quad P_2/P_1 = -0.61(P_1/P_{\max}) + 1.49$$

$$P_1/P_{\max} < 0.80 \quad : \quad P_2/P_1 = 1.00$$

ここに、 P_1 : 前のサイクルの最大荷重、 P_2 : 今回のサイクルの最大荷重、 P_{\max} は、静的一方向載荷を行った荷重-変位曲線の最大荷重（2 δ_y で生じた）である。

部材の履歴復元力特性のモデル化にあたっては、その包絡線、載荷剛性、除荷剛性等を適切に定めなければならないが、ここでは静的一方向載荷時の包絡線を基準にモデル化をはかった。そして、半サイクルの履歴を3本の直線の組合せにより近似し、除荷剛性 K_m と初期剛性 K_0 との関係は次式で表される。

$$K_m/K_0 = (1/n)^{0.4}$$

また、載荷時剛性 K_a は、半サイクルの履歴ループが囲む面積と、モデル化した履歴ループの囲む面積とが等しくなるように求めた。その結果、 K_a/K_0 は次のように表される。

$$K_{\alpha}/K_0=1.4 \times 10^r$$

$$r = (-0.8 + 0.24 A_{ds}/A_t) (d/a) \cdot n$$

ここに、 A_{ds} は側面鉄筋総断面積、 A_t は両最外縁軸方向主鉄筋総断面積、 a/d はせん断スパン比、 n は δ/δ_y で塑性率を示す。

本章では、以上の履歴特性および繰り返し荷重による各サイクルの最大荷重の低下現象を考慮して、RC柱の履歴復元力特性のモデル化の方法を提案している。

第6章 RCラーメン高架橋被害の解析的検討

本章では、載荷実験により求められたRCラーメン高架橋のはりおよび柱部材の荷重-変位関係を基に、高架橋の静的および動的弾塑性解析を行い、RCラーメン高架橋の地震被害メカニズムについて検討している。

解析に当たっては、線路直角方向の平面ラーメンを解析対象とした。

まず、RC2層ラーメン高架橋について静的解析を行った結果、東北新幹線RCラーメン高架橋は柱よりもはりの降伏が先行する構造であること、また、高架橋被害は、中層ばり降伏時の降伏震度（すなわち、ベースシャー係数）で説明づけられることが判明した。

また、中層ばり降伏震度が異なる3種のラーメン高架橋を対象に宮城県沖地震の際、記録された実地震波を入力波として動的解析を行い、挙動の相違を検討し被害との関係を調べた結果、柱や中層ばりの降伏が生じる最大加速度は地震波によりかなり異なっていること、および今回の地震の推定加速度は200~500galに及んでいたが、これは高架橋中層ばりの降伏を生じさせうる加速度帯であったことも確認された。

さらに、成層地盤に対する伝達関数を用いて、基盤への入力地震波が地表面でどれほど増幅されたかを推定し被害との関係を調べた。その結果、地表での推定加速度は1, 2, 3, 4種地盤の順に大きくなり、その平均値は1種地盤で275gal, 2種地盤で320gal, 3種地盤で406gal, 4種地盤で424galであった。1種地盤での加速度を1とすれば、2, 3, 4種地盤ではそれぞれ1.25, 1.35, 1.58であった。また、地盤種別毎の中層ばり降伏震度の平均値をみると1種地盤では0.44, 2種地盤では0.51, 3種地盤では0.79, 4種地盤では0.55であった。これらの値は現行耐震設計法において地盤種別に対する考慮の程度を示すものと考えられる。

同一の構造設計システムで建造された構造物が、ある地震の作用を受けた場合、地盤種別毎の被害発生率がほぼ同一となるような設計システムが釣合のとれた設計法であるとの考えの基に、信頼性モデルを用いて、ラーメン構造物の被害発生率を評価した。ここでは、構造物耐力の確率分布として、静的解析による中層ばり降伏震度の分布をあてはめた。作用する地震力は、(地震加速度) × (加速度応答倍率) として表し、地動加速度は伝達関数を用いて算定された推定加速度を用い、加速度応答倍率は高架橋の固有震動数が約3Hzであったことから2とした。作用地震力の分布形は対数正規分布とした。その結果、被害率の計算値と実測値は地盤種別に関わらず比較的よく一致していた。さらに、これらのモデルを用い釣合のとれた設計法についての検討を行い有意義な知見を得ている。

第7章 結 論

本章においては本研究で得られた結論を述べている。

審査結果の要旨

RCラーメン高架構造は、高速鉄道、高速道路の構造物として広く用いられており、その耐震性を保証することは重要である。本論文は、宮城県沖地震により地震の作用を受けた東北新幹線RCラーメン高架橋を対象に、これら構造物の耐震安全性を統計的および解析的手法により検討することを目的として行われたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の意義と目的述べている。

第2章では、地震の作用を受けたRCラーメン高架橋の構造上の特徴を述べると共に、震害を受けたコンクリート構造物の損傷程度を調べた結果を述べている。すなわち、震害を受けた実構造物からひびわれと交わる鉄筋を取り出し引張試験を行い、残留ひずみとひびわれ幅との関係を求め、被害の程度を推定し、また、はりの交番載荷実験を行い、実高架橋の中層ばりは地震時にせん断スパン比2.5~3.0の曲げせん断の作用を受けたと考えられることを論じている。

第3章では、RCラーメン高架橋の地震被害と、構造条件、地盤条件、基礎条件等の要因との関係を統計的手法により検討している。その結果、基礎深度、地盤種別、支持層までの深さ等の地盤条件が被害と大きな関係を有していることを明らかにしている。

第4章では、静的交番繰り返し荷重下でRC柱の履歴復元力特性に及ぼす軸方向主鉄筋量、帯鉄筋量、作用軸圧縮応力度等の影響について実験的に調べた結果を論じている。

第5章では、載荷速度と変位振幅パターンとがRC柱の履歴復元力特性に及ぼす影響について述べている。載荷速度は、塑性ヒンジ領域や各変位振幅での最大荷重に影響を与えるものの、履歴ループ形状にはほとんど影響を与えないこと等、重要な結論を得ている。また、同一変位振幅で正負交番繰り返し載荷を行うと、繰り返し数の増加と共に各繰り返しの最大荷重が低下する現象を定量化し、さらにこの現象を取り入れた精度の高い履歴復元力モデルを提案する等、貴重な知見を得ている。

第6章では、実験で得られた部材の履歴復元力特性を用いた弾塑性解析を行い、RCラーメン高架橋の破壊機構を明らかにし、地震被害との対比を行っている。特に、東北新幹線RCラーメン高架橋は中層ばりの降状が柱の降状より先行する構造であったこと、中層ばりの被害の程度は、中層ばり降状震度でよく説明づけられること、等の結論を導いている。さらに、これら解析結果を取り入れた信頼性解析を行い、構造物の被害率の評価および合理的設計法に関する検討を行い、貴重な知見を得ている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、RCラーメン高架構造物の地震被害と地盤条件、構造因子等との関係を統計的に明らかにするとともに、RC柱の履歴復元力モデルを提案し、かつこの結果に基づいた弾塑性応答解析と信頼性解析とにより、RCラーメン高架構造の耐震安全性の検討を行う方法を示したもので、土木構造工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。