

中空 SRC 橋脚の破壊形態と耐力評価の一方方法

Method for evaluation of yield strength and failure mode of hollow concrete encased steel bridge columns

並川賢治*, 崎濱秀仁**, 溝口孝夫***, 土屋智史****, 臺原直*****, 矢部正明*****

Kenji Namikawa, Hidehito Sakihama, Takao Mizoguchi, Satoshi Tsuchiya, Naoshi Daihara, Masaaki Yabe

* 首都高速道路公団 計画部 第一計画課 課長補佐 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1)

** 首都高速道路公団 東京建設局 建設第二部 設計第二課 課長補佐 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-6-2)

*** 首都高速道路公団 工務部 設計技術課 班長 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1)

**** 博士 (工) 株式会社コムスエンジニアリング 代表取締役 (〒113-0031 東京都文京区根津 2-20-1-701)

***** 工修 株式会社社長大 構造事業部 構造防災室 メンバーチーフ (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚 730)

***** 博士 (工) 株式会社社長大 構造事業部 構造防災室 技術統括 (〒305-0812 茨城県つくば市東平塚 730)

Since the hollow concrete encased steel bridge columns to be examined have complicated geometry for reasons of scenic beauty, the cross-sectional shape used in the calculation of shear strength and flexural strength varies in the height direction of a bridge column. In this study, a comprehensive evaluation was made on the failure mode assessment and performance evaluation of hollow concrete encased steel bridge columns having complicated geometry by using the equation of the yield strength specified in the design standard, results of existing empirical studies, and the results of using the dedicated analysis code WCOMD for RC structures. The adequacy of applying analytical program WCOMD for RC structures to the analysis of SRC structures was verified by simulating the repeated load testing results for SRC columns carried out by Railway Technical Research Institute.

Key Words: hollow concrete encased steel bridge column, shear strength, flexural strength, seismic retrofit

キーワード: 中空SRC 橋脚, せん断耐力, 曲げ耐力, 耐震補強

1. はじめに

図-1に示す鶴見つばさ橋は、大黒ふ頭と扇島間にある鶴見航路をまたぐ1面吊りの3径間連続鋼斜張橋である。中央径間長510m、橋長1,020mは、一面吊りの斜張橋では世界一長い橋である。鶴見つばさ橋は、大黒ふ頭上の約2kmの高架橋によって横浜ベイブリッジと接続されているが、横浜ベイブリッジとは異なる構造特性を有している。特に横浜ベイブリッジの下層デッキに計画されている国道357

号が鶴見つばさ橋では独立橋となり、将来近接して同一形式で並列橋として建設される計画である。そして並列時の景観を考慮してコンピューター・グラフィックなどを用いて種々の角度から景観検討が行われている。写真-1は、本論文で検討対象とする鶴見つばさ橋の主塔橋脚である。この主塔橋脚は、並列時の景観への配慮と波浪に対する防蝕を考えて優美な八角形断面の鉄骨鉄筋コンクリート構造(以後、SRC構造とする。)として計画されている。

鶴見つばさ橋の開通は1994年12月であり、1995年兵庫県

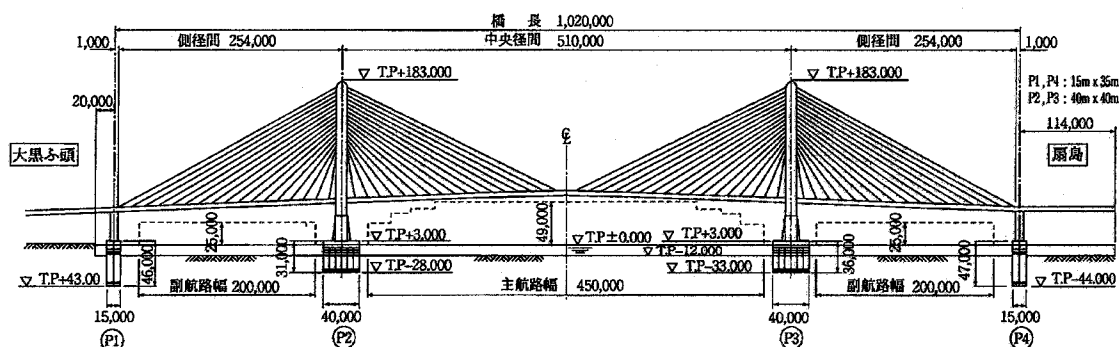
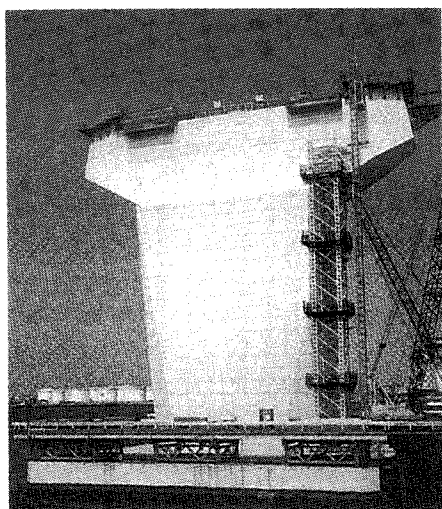


図-1 主塔橋脚に中空の SRC 構造を採用している鶴見つばさ橋



南部地震以前に建設された橋梁であることから、レベル2地震動に対する耐震性の照査が必要な橋である。耐震性の照査を行うためには、レベル2地震動による地震応答と各構造の耐力評価が必要となる。図-2は鶴見つばさ橋の主塔基部を表したものである。主塔基部は、主桁や主塔柱を受けるための鋼製横梁構造の下方部からケーソン頂版までの間に存在する鉄筋コンクリートで巻き建てた鋼殻部と高さ約20mの中空SRC構造からなっている。鶴見つばさ橋の耐震性照査を行うためには、図-2に示した鋼殻部とSRC構造の結合部とSRC構造部の耐力をより実態に近い形で求める必要がある。

2. SRC 橋脚の耐力評価における課題

本論文は、写真-1と図-2に示す八角形断面を有する中空のSRC構造である鶴見つばさ橋のSRC橋脚の耐震補強を合理的に行うことを目的に、その破壊形態と耐力を設計基準に示された耐力式と既往の実証的研究成果およびRC構造の専用解析コードWCOMDの解析結果を用いて総合的

曲げ耐力は、軸方向に配置された主鉄骨材を軸方向鉄筋とみなしRC断面として求めた²⁾。これは、中空のSRC橋脚であるが、主鉄骨材は、厚いコンクリート壁のほぼ中央に配置されており、十分な量の鉄筋に囲まれているため、鉄筋と同様にコンクリートと共同して軸力と曲げモーメントに抵抗できると考えられるからである。その際、斜め引張鋼材は横拘束筋として大変形時にも機能するか不明であったので、その横拘束効果を無視した。せん断耐力は、側面に配置された斜め引張鋼材は帯鉄筋と同様にせん断力を負担し、軸方向に配置された主鉄骨材もせん断力を負担するとみなして累加強度式³⁾によってせん断耐力を求めた。曲げ耐力、せん断耐力は、道路橋示方書V耐震設計編に準じて算出⁴⁾した。以後、このように算出した曲げ耐力とせん断耐力を設計式を用いて算出した耐力とする。

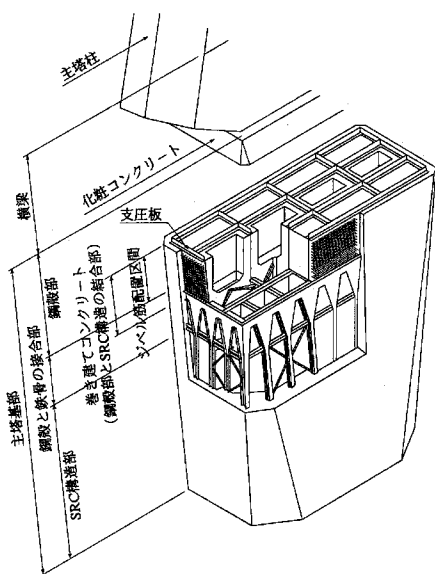
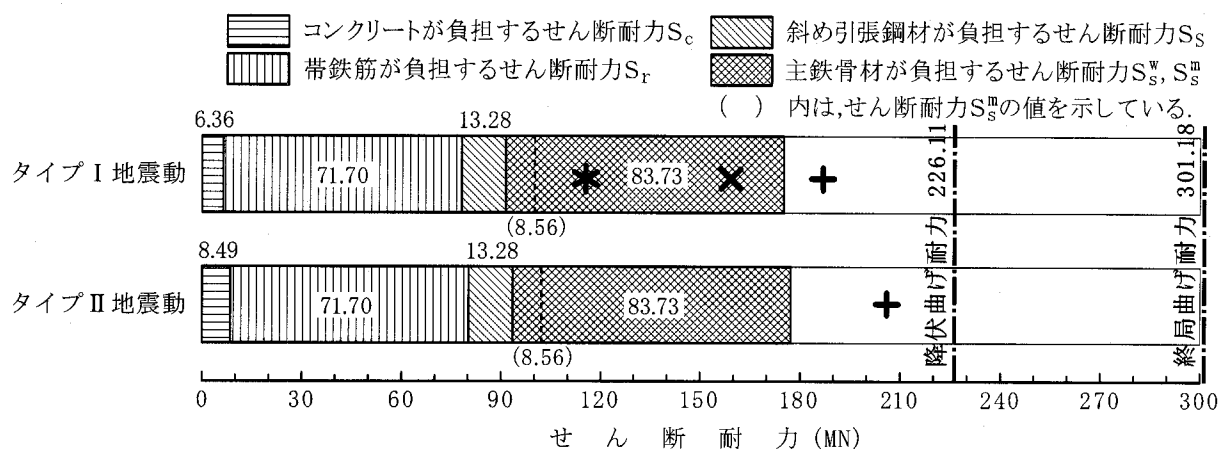


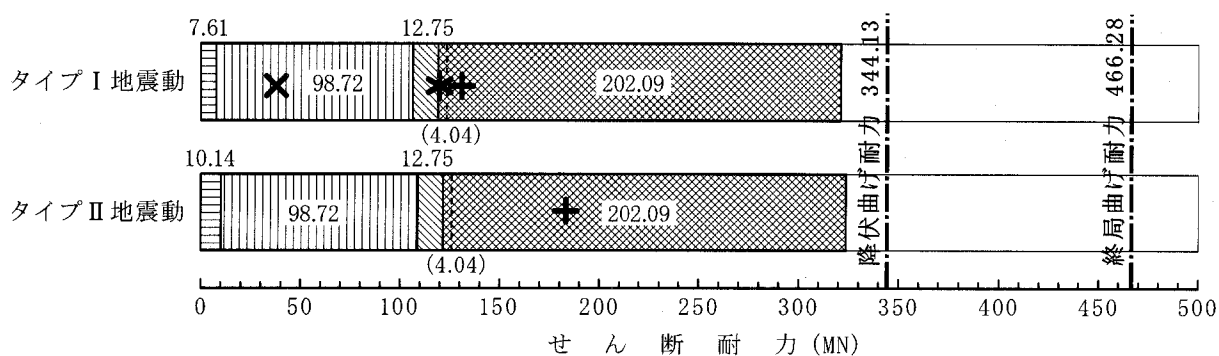
図-2 鶴見つばさ橋の主塔基部

レベル2地震動による最大応答せん断力 S_{max}

タイプI・II地震動 標準加速度波形入力時 **+**
 タイプI地震動 震源断層モデルによる長周期地震動入力時 **×**
 タイプI地震動 震源断層モデルによる長周期地震動の短周期を補正した加速度波形入力時 *****



(1) 橋軸方向



(2) 橋軸直角方向

図-3 鶴見つばさ橋 SRC 橋脚の設計式を用いて算出した曲げ耐力とせん断耐力および最大応答せん断力の比較

が負担するせん断耐力 S_r 、斜め引張鋼材が負担するせん断耐力 S_s 、主鉄骨材が負担するせん断耐力 S_s^W 、 S_s^m より構成される。一般に、主鉄骨材が負担するせん断耐力は、各設計基準とも基準で定めた鋼材配置を前提にその算出方法が示されている^{3), 5), 6), 7), 8), 9)}。各基準に規定された鋼材配置と鶴見つばさ橋の鋼材配置は異なるため、各基準における主鉄骨材が負担するせん断耐力算出式の鶴見つばさ橋への適用性が不明であったので、図には、鉄骨(ウェブ)のせん断降伏より決まるせん断耐力 S_s^W と鉄骨の曲げ降伏より決まるせん断耐力 S_s^m の両方を示してある。鉄骨の曲げ降伏より決まるせん断耐力 S_s^m は、鉄骨断面の全塑性曲げモーメントを水平力に換算したものである。図より、設計式によれば、鶴見つばさ橋のSRC橋脚は、橋軸方向、橋軸直角方向の両方向とも、その破壊形態はせん断破壊先行型と判定されることがわかる。また、SRC橋脚のせん断耐力は、主鉄骨材が負担するせん断耐力の評価の仕方によってその値が大きく異なることがわかる。

図-3 には、鶴見つばさ橋を対象としたレベル2地震動に対する橋梁全体系を対象とした非線形動的解析より得

られた最大応答せん断力もプロットしてある。図中、標準加速度波形は、道路橋示方書V耐震設計編に規定されるⅢ種地盤上の標準加速度応答スペクトルに相当する加速度波形に対する応答値である。タイプI地震動の長周期地震動、短周期を補正した長周期地震動は、1923年関東地震における震源断層を基本としながら、鶴見つばさ橋の主要な固有振動モードの固有周期をよく励起するアスペリティサイズや破壊伝播速度が鶴見つばさ橋にとって大きな影響を与える地震動となる¹⁰⁾という観点から定めた加速度波形に対する応答である。図より、主鉄骨材が負担するせん断耐力の評価によって、要求性能に対する耐力の過不足が大きく異なることがわかる。

3. 既往の実証的研究におけるせん断耐力への主鉄骨材の寄与

図-4は、SRC構造や鋼管複合構造を対象に実施された載荷実験結果^{2), 11), 12)}を、主鉄骨材が負担できるせん断耐力に着目して整理したものである。整理の対象とした実験結

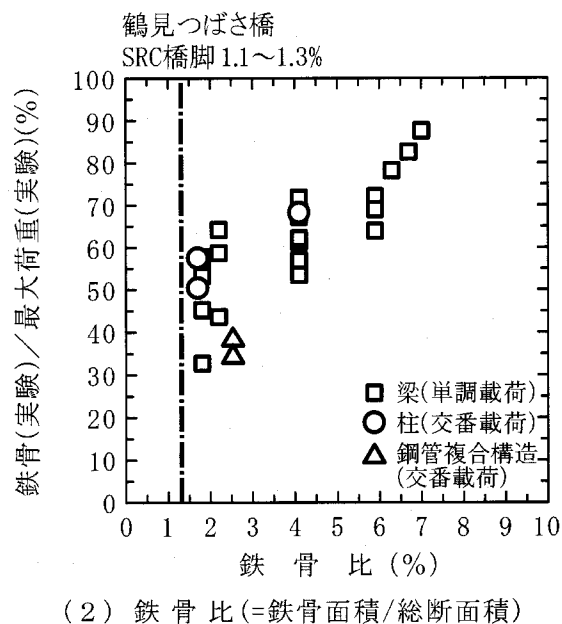
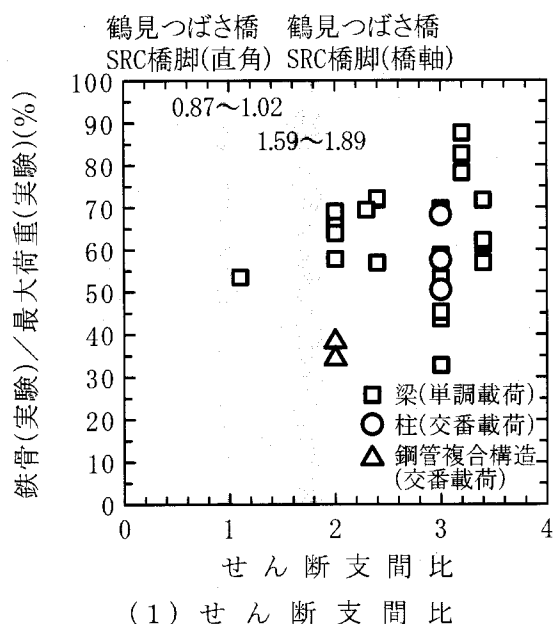


図-4 SRC構造を対象とした荷重実験結果を用いた鉄骨が負担できるせん断耐力の割合

果は、せん断破壊したものとせん断損傷が卓越したものである。図には、鶴見つばさ橋のSRC橋脚におけるせん断支間比と鉄骨比も示してある。図より、鉄骨が負担するせん断耐力は、せん断支間比が1~2の範囲ではSRC構造としてのせん断耐力の約30%~70%、せん断支間比が3~3.5で約30%~90%を占めていることがわかる。梁と柱の比較では、梁部材の方が鉄骨が負担できるせん断耐力が全般的に大きいという傾向がみられる。当然、鉄骨の量(鉄骨比)が増せば、鉄骨材が負担できるせん断耐力も大きくなっている。図には、鶴見つばさ橋のSRC橋脚のせん断支間比と鉄骨比も示してある。高さ方向に断面寸法が変化する鶴見つばさ橋のせん断支間比は、橋脚基部と橋脚上端部の有効高さと橋脚高さ(基部から鋼殻部中心位置)を用いて求めたものである。これらの実験に用いられた供試体と鶴見つばさ橋のSRC橋脚の構造形式や寸法には違いがあるので、図に示したせん断支間比と鉄骨比および鉄骨材が負担できるSRC構造としてのせん断耐力の比に関する関係を、そのまま鶴見つばさ橋のSRC橋脚に用いることはできない。ここでは、図に示された鉄骨材が負担できるSRC構造としてのせん断耐力の比として既往の実験より得られた下限値の約40%を用いて、鶴見つばさ橋のSRC橋脚中の主鉄骨材が負担できるせん断耐力を推定した。

図-3に示す設計式によるせん断耐力を用いて、鉄骨(ウェブ)のせん断降伏より決まるせん断耐力 S_S^W とSRC橋脚としてのせん断耐力の比を求めると、鶴見つばさ橋の橋軸方向では約45%、橋軸直角方向では約60%となる。これより、鶴見つばさ橋の橋軸方向に関しては、鉄骨(ウェブ)のせん断降伏より決まるせん断耐力 S_S^W 相当には主鉄骨材はせん断耐力を負担することができるが、橋軸直角方向には、その約7割(=40%/60%)ほどしか負担できないこ

とになる。

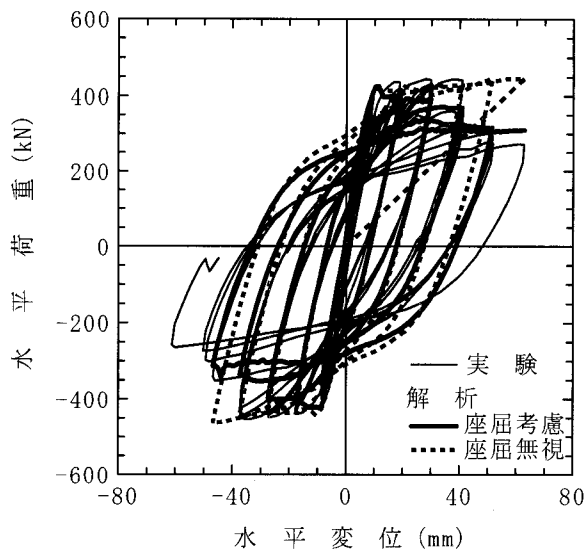
4. 解析的方法による破壊形態の判定とせん断耐力の評価

4-1. 解析コードのSRC橋脚への適用性の確認

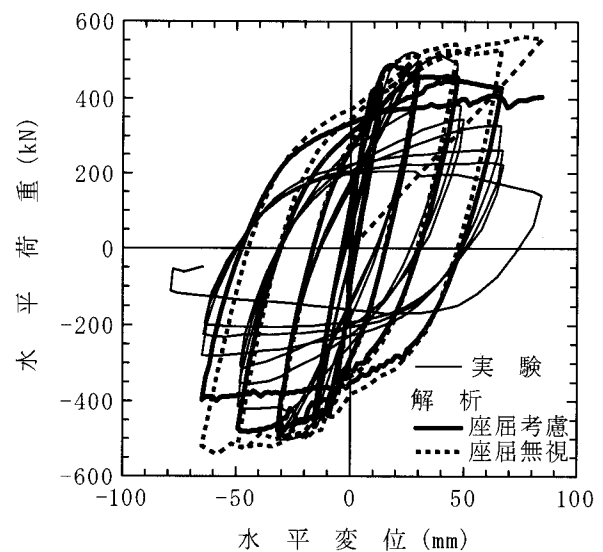
鶴見つばさ橋のSRC橋脚のせん断耐力をより実態に近い形で求めることを目的に、東京大学コンクリート研究室で開発され、RC構造物の荷重実験等に対する再現性において実績がある2次元有限要素解析コードWCOMD¹³⁾を用いて、鶴見つばさ橋のプッシュオーバー解析を行った。鶴見つばさ橋の解析に先立って、WCOMDのSRC構造への適用性を確認するために(財)鉄道総合技術研究所で実施されたSRC柱の繰返し荷重実験²⁾のシミュレーションを行った。

検討対象とした供試体は文献2)において、曲げ破壊したG-3供試体と曲げせん断破壊したG-5供試体の2つである。図-5(1)と図-5(2)は、実験と解析より得られた荷重-変位関係と、解析より得られた最大耐力時と終局時付近における損傷状況を示したものである。図中、座屈考慮は、鉄筋の座屈とかぶりの剥落を考慮した解析である。

図より、鉄筋の座屈とかぶりの剥落を考慮した解析であれば、荷重-変位関係は、曲げ破壊した供試体と曲げせん断破壊した供試体とも解析は実験にほぼ近い結果が得られることがわかる。しかし、損傷状況に着目すると、曲げせん断破壊したG-5供試体の解析結果には、明確なせん断損傷モードは現れていない。この理由として、H鋼のせん断抵抗に対する寄与分が大きく、奥行方向に節点を共有する2次元解析では、コンクリート部に対してせん断変形を実際よりも小さめに評価していることが考えられる。この

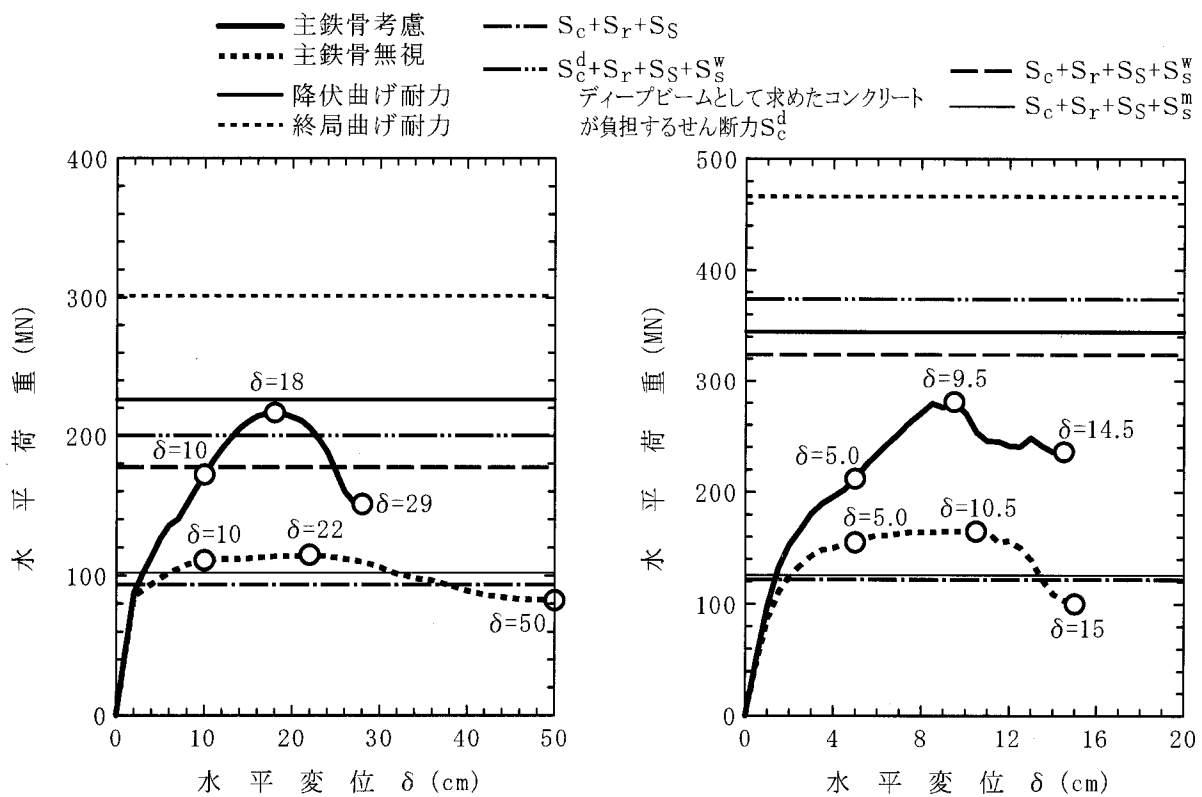


(1) G-3 供試体の荷重-変位関係



(2) G-5 供試体の荷重-変位関係

図-5 (1) SRC 柱の繰返し載荷実験結果と WCOMD による解析結果の比較 (荷重-変位関係)



(1) 橋 軸 方 向

(2) 橋軸直角方向

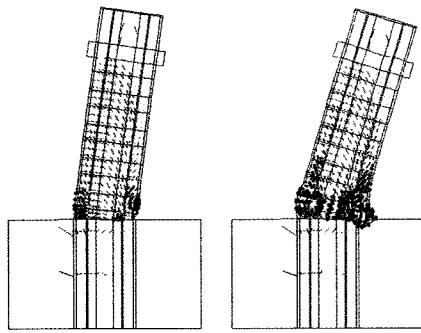
図-6 鶴見つばさ橋主塔橋脚 (SRC 橋脚) の WCOMD による荷重-変位関係と設計式による耐力

ように、曲げせん断破壊する供試体のひびわれと変形状態の再現性が僅かに劣る点を除けば、WCOMDでも実用上十分な精度でSRC構造の耐力を求めることができるといえる。

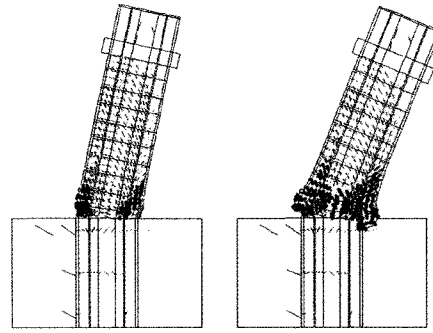
4-2. 鶴見つばさ橋SRC橋脚のプッシュオーバー解析

ここでの検討目的は、SRC橋脚の破壊形態の判定と耐力の推定である。モデル化の基本方針を以下に示す。

a) 鉄筋配置に応じて、RC/無筋要素を適用することにより対象とする構造物の配筋を考慮した。

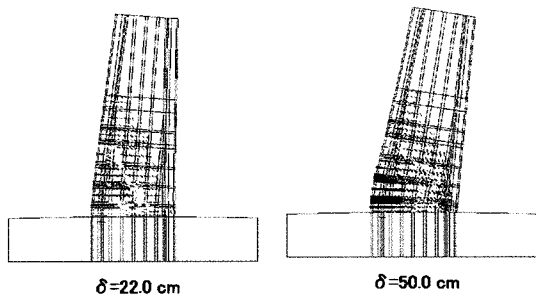


(1) G-3 供試体の損傷状況 (解析)

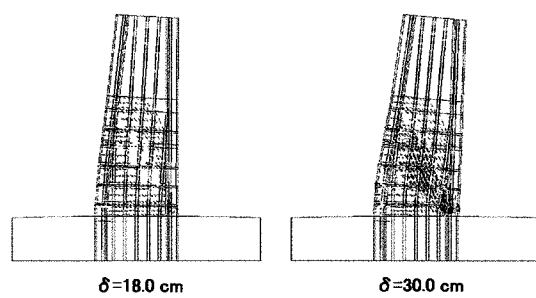


(2) G-5 供試体の損傷状況 (解析)

図-5 (2) SRC 柱の繰返し載荷実験結果と WCOMD による解析結果の比較 (損傷状況)

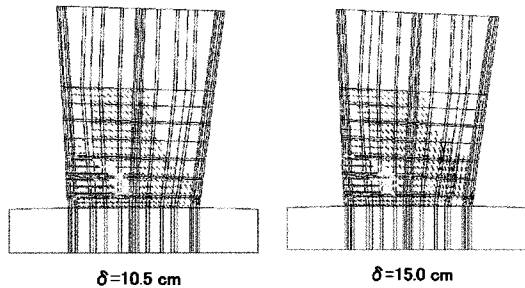


(a) 主鉄骨無視

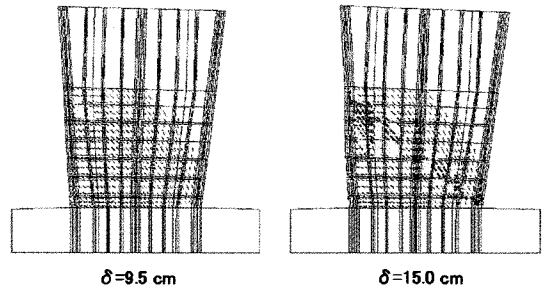


(b) 主鉄骨考慮

(1) 橋軸方向載荷時



(a) 主鉄骨無視



(b) 主鉄骨考慮

(2) 橋軸直角方向載荷時

図-7 鶴見つばさ橋主塔橋脚 (SRC 橋脚) の WCOMD による損傷状況

b) 奥行方向に要素を重ね合わせることで、H 鋼の配置を表現し、主鉄骨材 (H 鋼) は鋼材平面要素によって表した。なお、大変形の正負交番載荷を受けると鉄骨材とコンクリート間の付着は切れると予想されるので、付着は無視した。

c) 斜め引張鋼材は、軸力のみを伝達するトラス要素で表した。

d) 中空部に配置されている鉄骨材は、形状保持を目的に配置されている部材なので、その影響を無視した。

e) 中空の SRC 構造であるが、大断面であることと壁厚が厚いため、最大耐力付近では、鉄筋の座屈やかぶりの剥落が顕著とならないと考え、鉄筋の座屈やかぶりコンクリートの剥落は考慮していない。

f) SRC 柱の載荷実験のシミュレーションと同様に、コンク

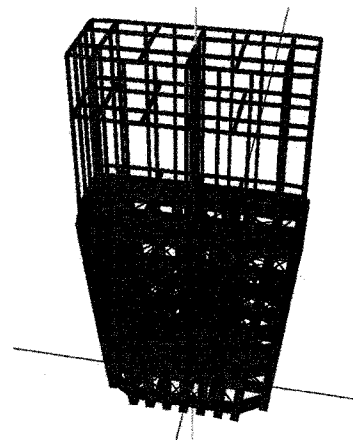
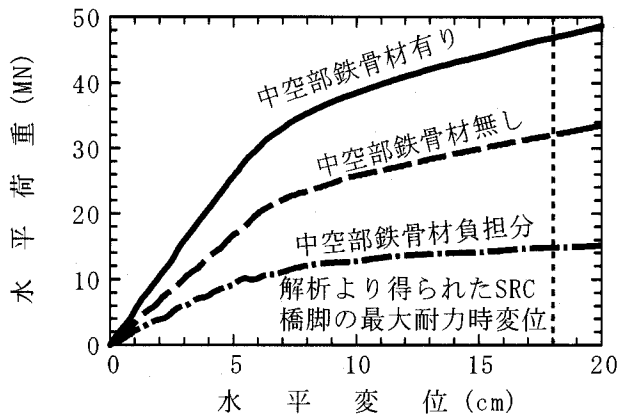
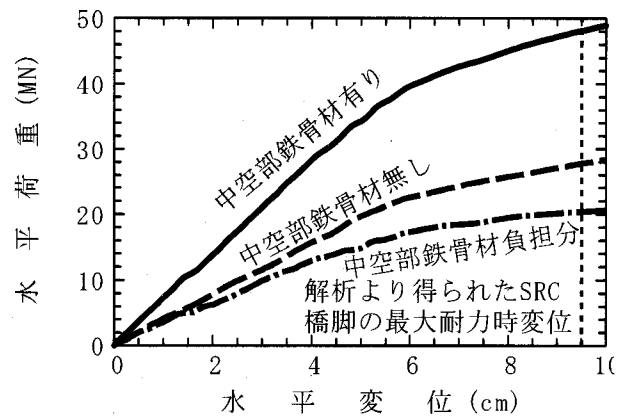


図-8 鶴見つばさ橋の SRC 橋脚に配置されている鉄骨材からなるフレーム構造の解析モデル



(1) 橋軸方向



(2) 橋軸直角方向

図-9 鶴見つばさ橋のSRC橋脚中に配置された鉄骨フレームの荷重-変位関係

リート圧縮軟化曲線は、要素寸法に拠らず一定とした。

橋軸方向、橋軸直角方向とも、主鉄骨材を考慮した場合と無視した場合の2ケースを解析対象とした。これは、主鉄骨材の存在が鶴見つばさ橋主塔橋脚に与える影響を明らかにするためである。図-6と図-7は、解析より得られた荷重-変位関係と損傷状況を示している。また、荷重-変位関係には、図-3に示した設計式による耐力を併記してある。せん断耐力は、タイプII地震動のものを示している。図-4に示したように鶴見つばさ橋のせん断支間比は2以下と小さく、柱(はり)としてよりもコーベルとしての耐荷機構に近いと考えられるので、コンクリートが負担するせん断耐力を、コーベルと同様にせん断補強筋を用いないディーブームとして求めた⁹⁾場合も示してある。

図-7より、主鉄骨材が曲げやせん断に対する抵抗材として機能していることがわかる。主鉄骨材を無視した解析では、曲げ変形とそのひび割れが卓越し、主鉄筋の降伏に達しているが、主鉄骨材を考慮した解析では、曲げ耐力が大きく上昇しているが、途中からせん断変形とそのひび割れが顕著となってあらわれ、最終的には急激な耐力低下が生じている。橋軸方向は柱部材に、橋軸直角方向は壁部材に近い挙動を示している。橋軸直角方向では、中空断面の中央に位置する壁で大きくせん断変形に抵抗し、最終的には、下部の断面を絞っている影響もあるためか、斜め方向の圧縮力に押し出されるようにして破壊に至っている。一方、中壁のない橋軸方向は、斜めひび割れ発生後に、主鉄骨部とRC壁部でせん断変形に抵抗している様子が明瞭となっている。

上述した損傷状況と図-6に示した荷重-変位関係および設計式の耐力を比較すると、コンクリートが負担するせん断耐力をコーベルとみなして求めた S_c^d を正とすれば、橋軸方向に対しては、主鉄骨材は、設計式で想定される鉄骨(ウェブ)のせん断降伏より決まるせん断耐力 S_s^W 相当の効果が解析結果からも確認することができる。しかし、橋軸直角方向は、設計式で想定される鉄骨(ウェブ)のせん断降伏より決まるせん断耐力 S_s^W ほど

には主鉄骨材がせん断耐力を負担できていないことがわかる。これは、図-7に示すように、中空断面の中央に位置する壁で大きくせん断変形に抵抗していることから、主鉄骨材の位置によってせん断に対する抵抗度合いが異なるからと考えられる。

WCOMDによる解析結果は、橋軸方向に関しては設計式と同程度のせん断耐力を示し、橋軸直角方向に関しては設計式の約70%~85%とわずかに小さいせん断耐力であった。これは、3で述べた既往の載荷実験結果から推定される鶴見つばさ橋の主鉄骨材が負担できるせん断耐力と調和的な結果となっている。

5. SRC橋脚の中空部に存在する鉄骨材が負担するせん断耐力

ここでは、鶴見つばさ橋のSRC橋脚に配置された鉄骨材のみからなるフレーム構造を対象にプッシュオーバー解析を行い、中空部に存在する鉄骨材がどの程度の水平力を負担できるかを解析的に検討した。解析は、橋軸方向、橋軸直角方向とも、図-8に示す解析モデルの中空部に存在する鉄骨材(図中細い線で示している)を考慮した場合と無視した場合の2ケースを対象とし、両解析結果の差分を中空部に存在する鉄骨材が負担できる水平力の近似値とする。モデル化の基本方針を以下に示す。

- コンクリート内に配置されている鉛直材と水平材は、曲げ変形は小さく、座屈も生じないとみなし、線形梁要素で表した。
- 中空部に配置された水平材は、引張側は降伏応力度、圧縮側は道路橋示方書Ⅱ鋼橋編の座屈を考慮した軸方向圧縮応力度をそれぞれの降伏軸力とし、曲げの非線形性も考慮した非線形梁要素で表した。
- コンクリート内に配置されている斜材は、座屈は生じないとみなし、線形のトラス要素で表した。
- 中空部に配置された斜材は、引張側は降伏応力度、圧縮側は道路橋示方書Ⅱ鋼橋編の座屈を考慮した軸方

向圧縮応力度をそれぞれの降伏軸力とした、非線形トラス要素で表した。

ここでの検討目的は、SRC橋脚の最大耐力付近の変形量10～20cm（図-6参照）が生じた時点での中空部鉄骨材が負担できる水平力の近似値の算出にあり、着目する領域では幾何学的非線形性は顕著に現れないと予想されたので、解析は微小変位理論による材料非線形解析とした。

図-9は、解析より得られた荷重－変位関係である。図より、WCOMDで得られたSRC橋脚の最大耐力時の変位が生じたときの、中空部に存在する鉄骨材が負担する水平力（近似値）は、橋軸方向は約15MN、橋軸直角方向は約20MNと小さいことがわかる。これは、図-3に示す設計式によるSRC橋脚のせん断耐力の約8%と約6%に相当する。これより、鶴見つばさ橋のSRC橋脚のせん断耐力の評価において、中空部に存在する鉄骨材は、実用上無視できることがわかる。なお、図-6に示したSRC橋脚としての最大耐力付近の変位に達するまでは、鉄骨フレームの荷重－変位関係も安定した耐力上昇を示していることから、形状保持材としての機能は確保できるとみなすことができる。

6. 結 論

八角形断面を有し橋脚の高さ方向にもその形状が変化する鶴見つばさ橋の中空SRC橋脚を対象に、設計式、既往の載荷実験結果、2次元有限要素法（WCOMD）を用いた解析に基づいてその破壊形態と主鉄骨材が負担できるせん断耐力を推定した。鶴見つばさ橋のSRC橋脚の破壊形態は、橋軸方向、橋軸直角方向とも、せん断破壊先行型と推定された。主鉄骨材が負担できるせん断耐力は、橋軸方向では設計式で想定される鉄骨（ウェブ）のせん断降伏より決まるせん断耐力 S_s^W 相当、橋軸直角方向はそれよりも小さいと推定された。その結果、2次元有限要素法による解析結果は、橋軸方向に関しては設計式と同程度のせん断耐力を示し、橋軸直角方向に関しては設計式の約70%～85%とわずかに小さいせん断耐力であった。

長大橋梁の主塔橋脚や端橋脚の中には、その形状、構造形式とも複雑なものが多数ある。このような構造のせん断耐力を設計式のみから求めた場合、その値は時にはかなり保守的な値となり、その値を用いて耐震補強を検討した場合、過大な補強となる場合がある。このような場合、最良の方法は、大規模な模型供試体を用いた載荷実験による実証的方法によってその耐力や変形性能を確認することである。しかし、そのような実証的な方法によって既設橋の耐力や変形性能が確認されることは稀である。実証的な方法に代わる方法として、本論文で示したような設計式、既往の載荷実験、実験の再現性が検証されている解析コードを用いた解析結果を用い総合的に当該橋脚の耐力と変形性能を推定するという方法は、実用的な方法であると考えられる。

鶴見つばさ橋のSRC橋脚は、本検討結果を参考にしながらアラミド繊維補強等の合理的な耐震補強を実施して行

く予定である。

謝 辞

WCOMDのSRC構造への適用性の検討に用いたSRC柱の載荷実験結果は、（財）鉄道総合技術研究所鋼・複合構造研究室室長の村田清満博士からご提供頂いたものである。また、SRC橋脚のせん断耐力の検討にあたっては、東京大学教授前川宏一先生のご指導を受けた。ここに、深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 首都高速道路公団神奈川建設局：鶴見つばさ橋，1995。
- 2) 村田清満，池田学，川井治，瀧口将志，渡邊忠朋，木下雅敏：鉄骨鉄筋コンクリート柱の変形性能の定量評価に関する研究，土木学会論文集，No.619, pp.235-251，1999。
- 3) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計と保有水平耐力－，1958制定，2001改訂（第4次），2001。
- 4) （社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002。
- 5) （財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物設計標準・同解説－鋼とコンクリートの複合構造物－，1998。
- 6) 本州四国連絡橋公団：鉄骨鉄筋コンクリート構造設計指針・同解説，1977。
- 7) 本州四国連絡橋公団：大型鉄骨，鉄筋コンクリート橋脚設計要領・同解説（案），1981。
- 8) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書構造性能照査編，2002。
- 9) 土木学会鋼・コンクリート合成構造連合小委員会：構造工学シリーズ11複合構造物の性能照査指針（案），土木学会，2002。
- 10) 東京大学地震研究所：地球科学の新展開2地殻ダイナミクスと地震発生，朝倉書店，pp.179-195，2002。
- 11) 村田清満，池田学，渡邊忠朋，戸塚信弥：鉄骨鉄筋コンクリート部材のせん断耐力，土木学会論文集，No.626，pp.207-218，1999。
- 12) 加藤敏明：鋼管・コンクリート複合構造高橋脚の弾塑性挙動と耐震安全性照査法に関する研究，京都大学学位論文，1998。
- 13) K.Maekawa, A.Pimanmas and H.Okamura: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London and New York, 2003。

（2003年9月12日受付）