

横荷重を受ける合成 2 主箱桁の 床版及び主桁に対する荷重分担率の評価

杉山 裕樹¹・吉田 高之²・西田 康人³・吉原 瑞貴⁴
佐々木 達生⁵・宮田 秀太⁶・中村 太郎⁷

¹正会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 神戸建設部 (〒650-0023 神戸市中央区栄町通 1-2-10)
E-mail: hiroki-sugiyama@hanshin-exp.co.jp

²非会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 神戸建設部 (〒650-0023 神戸市中央区栄町通 1-2-10)
E-mail: takayuki-yoshida@hanshin-exp.co.jp

³非会員 阪神高速道路株式会社 建設事業本部 神戸建設部 (〒650-0023 神戸市中央区栄町通 1-2-10)
E-mail: yasuto-nishida@hanshin-exp.co.jp

⁴非会員 阪神高速道路株式会社 管理本部 大阪保全部 (〒552-0023 大阪市港区港晴 2-11-12)
E-mail: mizuki-yoshihara@hanshin-exp.co.jp

⁵正会員 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所 (〒541-0058 大阪市中央区南久宝寺町 3-1-8)
E-mail: tatsuo@ne-con.co.jp

⁶正会員 大日本コンサルタント(株) インフラ技術研究所 (〒102-0075 東京都千代田区三番町 6-3)
E-mail: miyata_shuta@ne-con.co.jp

⁷非会員 大日本コンサルタント(株) 技術部 (〒541-0058 大阪市中央区南久宝寺町 3-1-8)
E-mail: nakamura_taro@ne-con.co.jp

平成 29 年の道路橋示方書の改定に伴い、レベル 2 地震動の影響を考慮した設計状況における上部構造の耐荷性能の照査の一環として、床版の照査を実施する必要があるとされている。改定された道路橋示方書に対応した計算例では、上部構造に生じる断面力を 100%床版が負担することによる応答算出の結果が示されている。この設計法では、従前の設計法に比して著しく不合理となる場合もある。本研究では、鉄筋コンクリート床版をソリッド要素、主桁をシェル要素とした部分 FE 解析を実施し、横荷重を受けた際の床版及び主桁の荷重分担を解析的に確認した。あわせて、ファイバー要素を用いた骨組解析を実施し、両解析の比較分析により、横荷重が作用した状態において、主桁は床版と同程度の荷重を分担していることが評価できたため、その結果を報告する。

Key Words: lateral loads, load sharing rate, composite two box girders, FEM, push-over analysis

1. はじめに

平成 29 年の道路橋示方書¹⁾(以下、H29 道示)の改定に伴い、レベル 2 地震動の影響を考慮した設計状況における上部構造の耐荷性能の照査の一環として、床版の照査を実施する必要があるとされている。この床版の照査は、橋の立体的機能が確保²⁾されることを前提として、地震の影響等の横荷重に対して、主として床版が抵抗することによる安全性の確認が行われている。具体的な設計例として、H29 道示を対象とした計算例^{3),4)}では、上部構造に生じる断面力を 100%床版が負担することが示されて

いる。この設計法では、橋長及び支間長が長い場合に応答値が大きくなり、輪荷重を直接受ける版や、主として鉛直荷重に対する合成桁として設計された、従前の設計結果と比べて配筋量が多くなる場合もある。

横荷重に対する上部構造全体の抵抗特性は、種々の部材の組合せのため、実験による把握は難しく、既往の研究においては、FE 解析を用いた解析的検討が行われている。(一社)日本橋梁建設協会では、従来桁橋及び連続少数 I 桁橋を対象とした解析的検討^{5)~9)}において、簡易梁モデルにより算出される断面力を用いて床版のみで抵抗させた場合の応力度と、FE 解析による床版応力度の

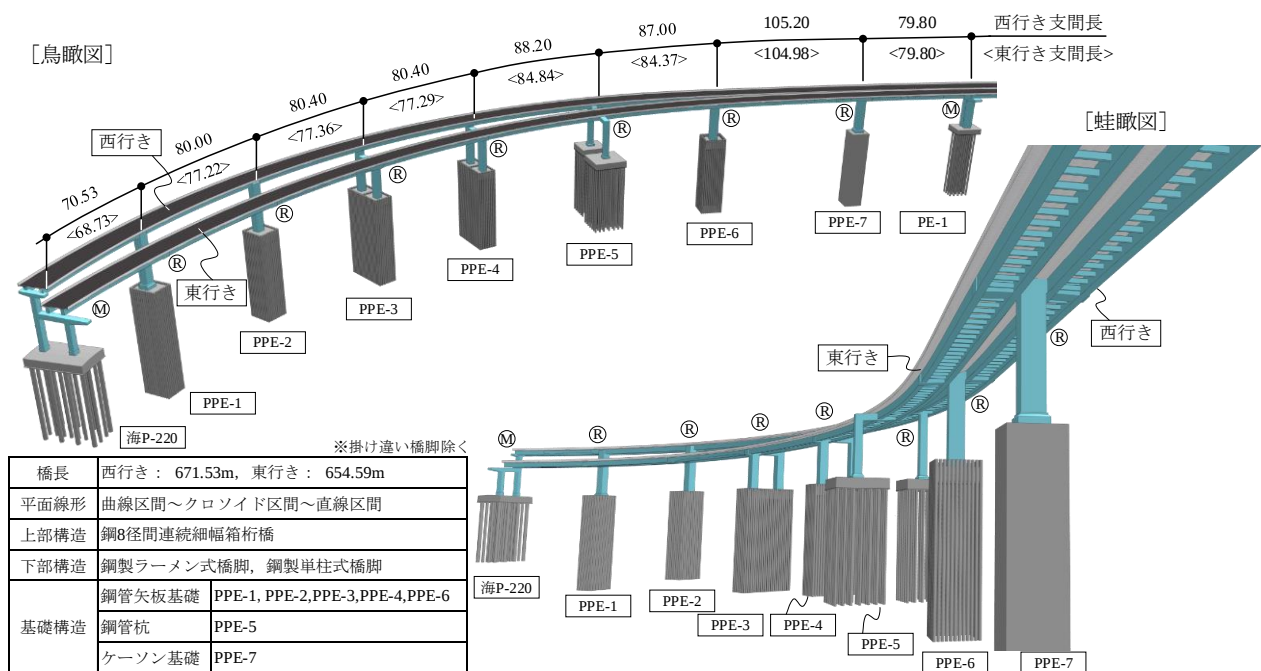


図-1 対象橋梁の概要

比較を行い、荷重分担率の妥当性検証が行われている。一方で、細幅箱桁を対象とした検討⁷⁾では、横荷重に対する主桁への荷重分担の可能性も示唆されており、中田ら⁸⁾は、曲線少数Ⅰ桁橋を対象に、地震の影響を受けた際の挙動を解析的に検討し、床版だけでなく上部構造全体の立体的機能で横荷重に抵抗することも示されている。

過去の地震被災事例^(例えば 9)～11)では、鋼桁支点付近の座屈損傷や、支点沈下及び側方移動の影響等により上下部構造間の相対変位が生じ、桁衝突等による損傷が発生していることを除き、地震動の影響を直接的な要因とした床版の損傷事例は少ない。このことから、上部構造に生じる応答値に対して、床版のみで抵抗するといった設計上の仮定は、実際の挙動に即していない可能性があり、安全側の仮定ではあるものの不合理な設計となりうる可能性も否定できない。

以上の背景を踏まえ、本研究では、鋼2主箱断面を有する合成桁に横荷重が作用した状態を解析し、主桁への荷重伝達の有無、床版及び主桁の荷重分担率を検討した。解析は、上部構造の一部に対して、シェル・ソリッド要素を用いて緻密にモデル化した非線形 FE 解析と、ファイバー要素を用いた非線形骨組解析により行った。

2. 対象橋梁の概要

図-1 に対象橋梁の概要を示す。対象橋梁は、6 車線を有する都市高速道路とし、上部構造は東西線分離構造、下部構造は一体構造となっている。共に、鋼 8 径間連続細幅箱桁橋であり、橋長は、西行き約 671.5m、東行き約 654.6m となっている。

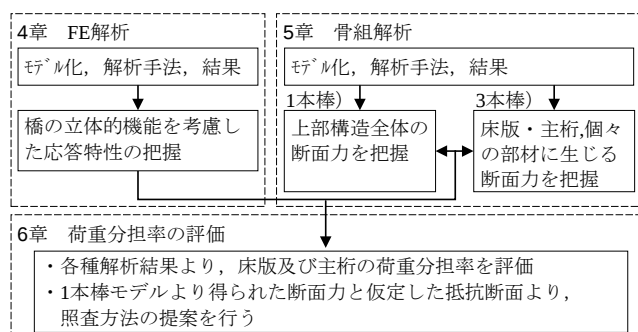


図-2 研究フロー

上部構造は、標準部にて桁高が 2.8m となっており、東西線の各々に対して 2 主桁を配置し、鋼コンクリート合成床版となっている。また、柱部は、コンクリート充填を施した鋼製橋脚となっており、掛け違い部を除いて、上下部接合部は剛結構造となっている。なお、鋼製橋脚は、街路の条件に応じて、単柱式又はラーメン式となっている。基礎構造は、街路又は地盤条件に応じて、鋼管杭、鋼管矢板基礎、ケーソン基礎となっている。掛け違い部の支承条件は、橋軸方向を可動条件、橋軸直角方向を固定条件となっている。

架橋位置の地盤種別はⅢ種地盤であり、地域別補正係数は A2 地域で 1.0 となる。橋の固有周期は、着目する方向により異なるものの、約 1.0 sec となる。レベル 2 地震動(タイプⅡ)における設計水平震度の標準値 k_{h0} は、1.50 となる。

3. 検討概要

図-2 に本研究のフローを示す。本研究では、2 種類の

構造解析を実施した。

4章では、横荷重を受ける上部構造に対して、FE解析による弾塑性有限変位解析を行い、構成部材を緻密にモデル化することで、橋の立体的機能、床版及び主桁の応答特性を整理し、両部材における荷重分担率の把握を行った。

5章では、標準的な設計に用いられる平面保持の仮定に基づく非線形骨組解析を行った。骨組解析では、床版及び主桁を一体断面としたモデル化、それぞれを独立させ単独断面としたモデル化の2つのモデルを構築し、両モデル間の整合性、FE解析との応答の再現性を確認し、それぞれの部材に生じる断面力ベースでの応答特性の把握を行った。

6章では、各種解析結果を比較し、骨組解析より得られた応答値と仮定した抵抗断面より応力度算出を行い、横荷重を受けた際の荷重分担率を評価した。

4. シェル・ソリッド要素を用いたFE解析

(1) FE解析のモデル化

図-3に橋全体系のモデル化範囲を示す。FE解析におけるシェル・ソリッド要素のモデル化範囲は、計算負荷の軽減に加えて、曲線区間の影響を極力を除いた結果考察が可能であり、支間長が最も長く横荷重に対する応答値が大きい西行き PPE-6 から PPE-7 の支点部を含む直線区間とした。

対象橋梁は、上下部接合部が剛結構造となっており、横荷重に対する挙動を把握するためには、橋全体系の水平剛性を適切にモデル化する必要がある。そこで、シェル・ソリッド要素範囲の境界部は、境界条件による構造の連続性を仮定するのではなく、図-3に示すように、橋全体系を梁要素にて基礎ばね要素までモデル化し、接続した。図-4には、シェル・ソリッド要素と梁要素との接合方法を示す。梁要素は、床版及び主桁端部の節点より剛体要素を集約して接合し、この接合箇所は主桁端部及び横梁端部とした。梁要素は、境界条件の明確化を目的としていること、本解析の着目箇所をシェル・ソリッド要素範囲としていることから、線形要素にてモデル化した。

図-5に各部材のモデル化概要を示す。同図(a)に床版のモデルを、同図(b)に鋼部材のモデル化を示す。鋼部材は、主桁、横桁、横梁に加えて、縦リブ、補剛材をシェル要素でモデル化した。なお、図中の色の変化は、板厚又は部材グループで表示を変えている。同図(c)に床版における構成部材のモデル化を示す。床版は、鋼コンクリート合成床版となっており、床版コンクリートはソリッド要素、鉄筋は梁要素、底鋼板はシェル要素、スタッドジベルは非線形ばね要素

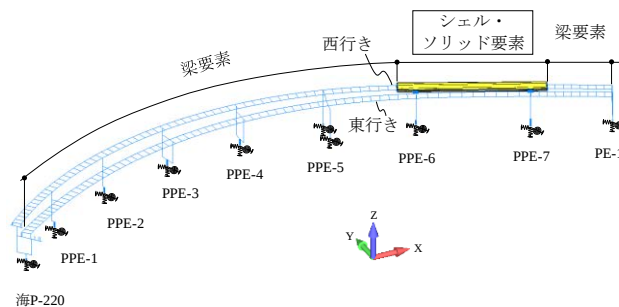


図-3 橋全体系のモデル化

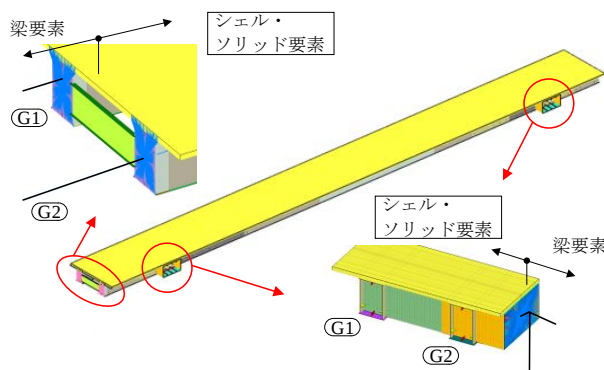


図-4 シェル・ソリッド要素と梁要素との接合方法

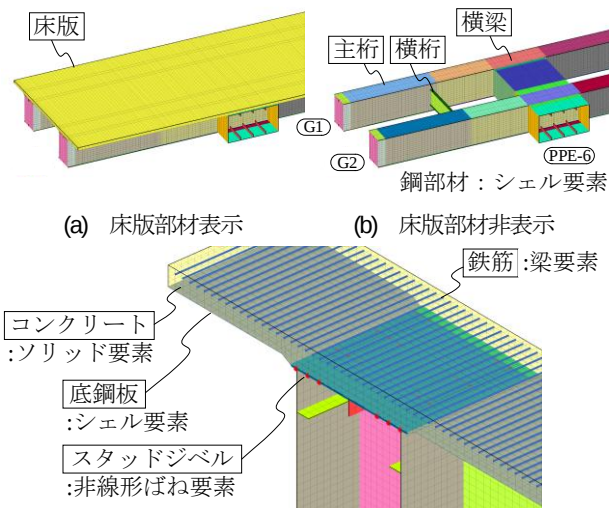


図-5 各部材のモデル化

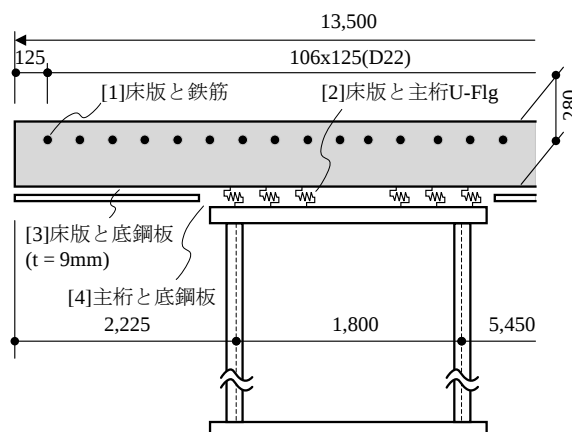


図-6 床版部材のモデル化概要と境界条件

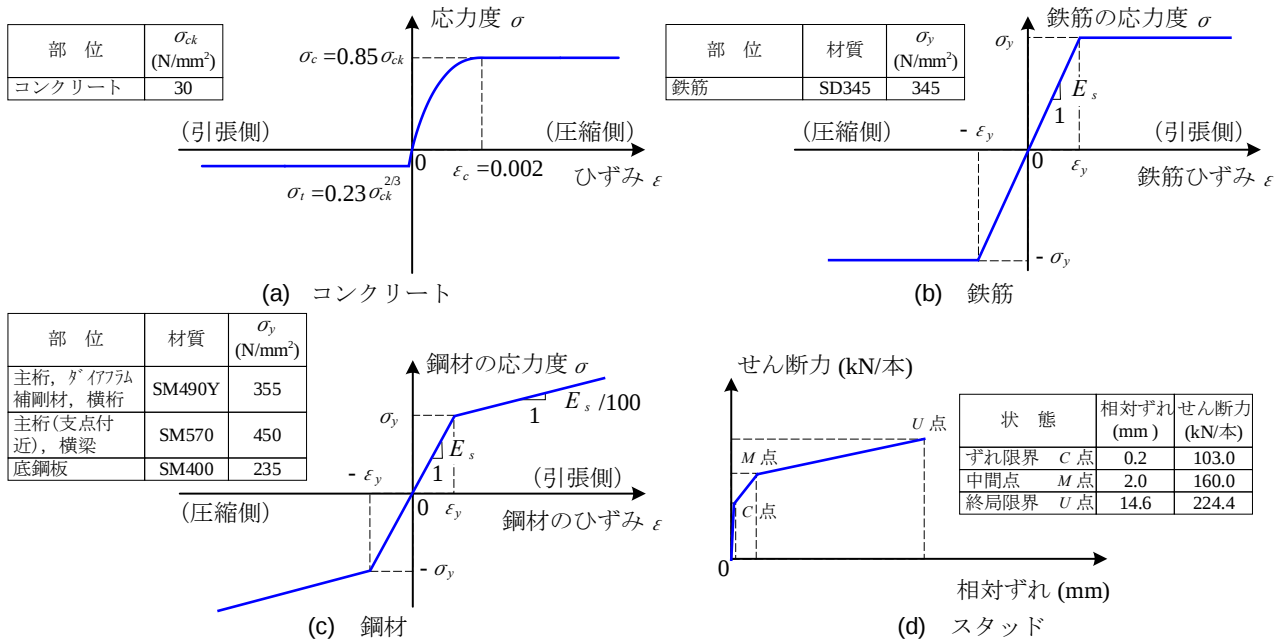


図-7 材料構成則及び非線形特性

ッドジベルは非線形ばね要素でモデル化した。

図-6 には、床版部材の基本寸法、モデル化、境界条件を示す。コンクリートのソリッド要素は、床版の厚さ方向に 4 分割しており、1 層目下縁と上面鉄筋位置を合わせ、幅員方向も鉄筋位置に合わせた要素分割とした。コンクリートと鉄筋の境界条件[1]は、完全結合とした。床版と主桁 U-Flg 面の境界条件[2]は、スタッドジベルを用いた接合となっており、後述の特性を有する非線形ばね要素を用いた接合とした。非線形ばね要素の配置は、スタッドジベルの配置に合わせた。鋼コンクリート合成床版は、床版の主応力方向に対して抵抗する機構として、各種仕様²⁾に合わせたリブやジベル等の構造細目が用いられている。本解析では、横荷重に抵抗する機構のみをモデル化し、これら細部構造のモデル化は省略した。具体的には、底鋼板のみを板厚 9mm としてモデル化した。コンクリートと底鋼板の境界条件[3]は、完全結合とした。主桁 U-Flg と底鋼板の境界条件[4]は、ボルトや治具による固定がなされており、完全結合とした。

図-7 には、各構成部材の材料構成則及び非線形特性、使用材料を示す。同図(a)にコンクリートの材料構成則を示す。圧縮側は、H29 道示³⁾に規定される拘束効果を考慮しない材料構成則を用いた。引張側は、解析の収束性と、本解析への影響が小さいことから、引張限界以降も負勾配を設けずに荷重一定³⁾のままで取扱うこととした。同図(b)に鉄筋の材料構成則を示す。鉄筋は、H29 道示³⁾に規定される材料構成則を用いており、2 次勾配を零として取扱った。同図(c)に鋼部材の材料構成則³⁾を示す。鋼部材は、弾性係数 E_s として、2 次勾配を $E_s/100$ として取扱った。同図(d)にスタッドジベルの非線形特性を示す。スタッドジベルの非線形特性は、大城ら⁴⁾の実

表-1 FE 解析の条件

使用ソフト	Abaqus FEA
使用要素	ソリッド, シェル, 梁, ばね
非線形	材料非線形, 幾何学的非線形
増分法	弧長増分法
解析規模	節点数: 404,976, 要素数: 444,713

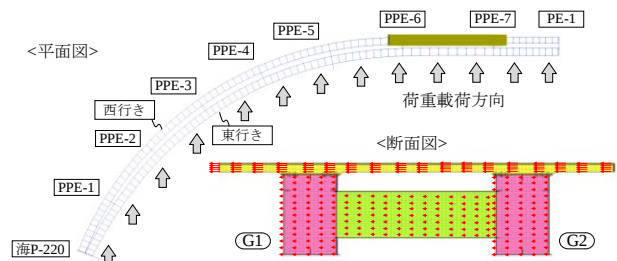


図-8 荷重載荷の方向

験を参考に、スタッド 1 本あたりのせん断耐力と相対ずれ量を特性値として設定し、せん断方向に対する非線形ばね要素として設定した。

(2) FE 解析手法

表-1 に解析条件を示す。解析は、部材の非線形化に伴う応力の再分配が考慮でき、幾何剛性の変化に伴う鋼桁部の座屈現象が生じた際に考慮できるよう、材料非線形、幾何学的非線形による弾塑性有限変位解析とした。解析ソフトは Abaqus FEA を用いた。

解析は、荷重漸増解析により行い、増分法は、弧長増分法により行った。これは、荷重荷重が増え、非線形性の増加に伴い解析が不安定となる場合に配慮し、より効果的に収束のできる解法として設定した。図-8 に荷重

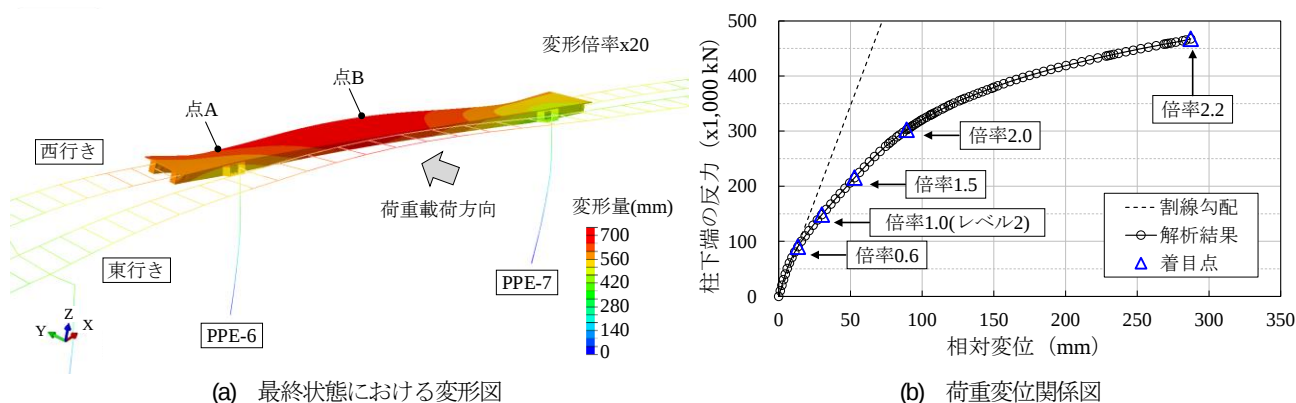


図-9 変形図及び荷重変位関係図

荷重の方向を示し、その方向は、着目する PPE-6 から PPE-7 の法線方向とした。荷重漸増解析における載荷荷重の分布は、動的応答の分布を静的に置き換える方法¹⁵⁾や、震度一定で載荷する方法がある。本解析では、レベル 2 地震動を受けた状態とそれを越えた状態まで荷重漸増解析により載荷し、各部材の状態を把握するため、後者である震度一定の漸増荷重を用いることとした。本研究では、床版及び主桁の横荷重に対する荷重分担率を評価することが目的であり、載荷荷重による作用の影響を単純化した方が、応答値に着目した分析がしやすいと考えたからである。

目標震度は、骨組解析による予備解析の結果、震度 1.60 にて着目区間における、動的解析と荷重漸増解析との応答値の一致が確認できた。よって、設計水平震度の標準値を若干上回るが、この値を用いて解析を行った。

(3) FE 解析結果

図-9(a)に載荷最終状態における変形図を示す。コンターの着色は、変形量を示している。上部構造の変形状態は、剛結構造により弾性支持されているものの、PPE-6 及び PPE-7 を支点に、横荷重を受ける連続梁状の挙動となっており、支間中央部にて最大変位が生じている。図中に示す 2 点 A、B は、床版最外縁の節点のうち、PPE-6 を点 A、支間中央部を点 B とし、荷重変位関係を整理するうえでの基準点とした。

図-9(b)に荷重変位関係図を示す。縦軸の柱下端の反力は、PPE-6 及び PPE-7、2 橋脚における XY 平面における水平反力の合成成分の合計値とした。横軸の相対変位は、XY 平面内の変位基準点の差(点 B-点 A)の合成成分とした。荷重変位関係図上には、目標震度としたレベル 2 地震時の状態を基本として、状態変化が見られた着目点を、漸増載荷における載荷 step 数の倍率で整理し、図中にプロットした。なお、シェル・ソリッド要素範囲内での、倍率 1.0 における上部構造の変形量及び支点反力(PPE-6、PPE-7)は、骨組解析による予備解析と概ね一致しており、解析の妥当性は確保できていると判断した。

着目点における損傷イベントの概要は、倍率 0.6 はコンクリートのひび割れに伴う剛性低下、倍率 1.5 より底鋼板の降伏が始まり、倍率 2.0 において鉄筋降伏に伴う剛性低下が確認できる。解析は、倍率 2.2 にて解析不安定となり終了した。

以降に、床版のひび割れ以降、上部構造の剛性が一定となる倍率 1.0 から 2.0 を代表に、解析結果を示し、床版及び主桁の応答値の変化を確認していく。

a) 倍率 1.0 の解析結果

図-10 及び図-11 には、倍率 1.0 の解析結果を示す。図-10 には、床版構成部材である、コンクリート、鉄筋、底鋼板における着目応力のコンター図を示す。なお、図中の数値は、支点部又は支間中央部における最大最小値を示している。

図-10(a)、同図(b)に示すコンクリートの状態は、上部構造の変形により、支点部及び支間中央部において、圧縮領域又は引張領域が発生している。応答値は、橋全体系の特性により、支間中央ではほぼ対称ではあるものの、PPE-7 側が若干大きい傾向となっている。支点部の圧縮領域では、最小主応力の最小値が約 11N/mm^2 となっている。引張領域は、支点部及び支間中央部に関わらず、引張限界を超えている。これは、倍率 0.6 にて、すでに引張限界を超えているため、以降の倍率も全て同様である。同図(c)に示す鉄筋の状態は、床版が引張限界を超えた範囲にて荷重を負担し、支点部で約 172N/mm^2 となっている。なお、鉄筋は、引張応力のみ図化している。同図(d)に示す底鋼板の状態も、鉄筋同様に、支点部の応答値が大きく、約 154N/mm^2 となっている。底鋼板のコンター図は、ミーゼス応力で表示しており、引張領域のみならず、曲げ圧縮領域においても、高い応答値が発生している。スタッドは、全てずれ限界以内となっている。

図-11 には、鋼桁部のミーゼス応力コンターと、部材の変形状態とを重ねて示している。鋼桁部も、鉄筋及び底鋼板と同様に、引張領域となる支点部及び支間中央部で応答値が高くなる。なお、梁要素との境界部において、部分的に高い応力が発生しているが、これは異なる要素

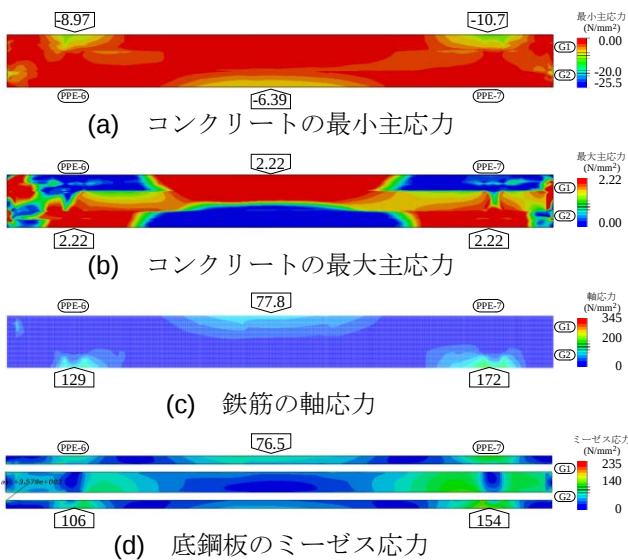


図-10 床版構成部材のコンター図(倍率 1.0)

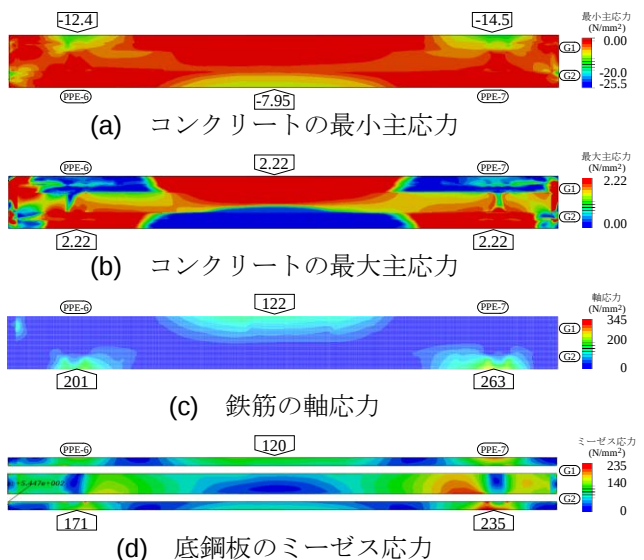


図-12 床版構成部材のコンター図(倍率 1.5)

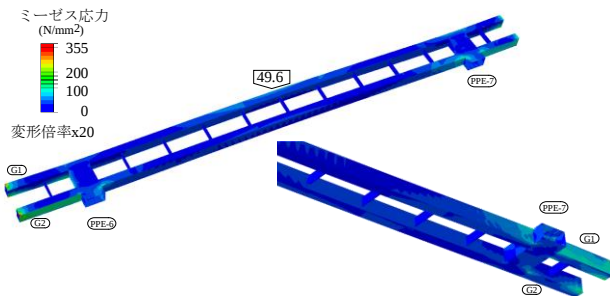


図-11 鋼桁部のミーゼス応力コンター及び変形図(倍率 1.0)

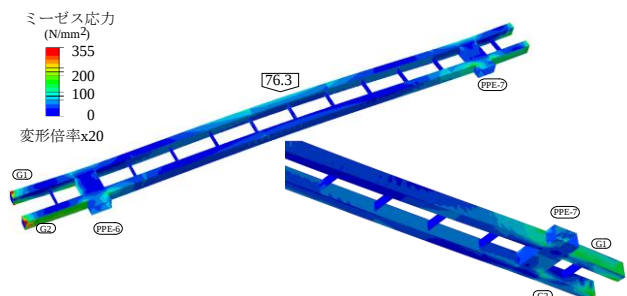


図-13 鋼桁部のミーゼス応力コンター及び変形図(倍率 1.5)

との接合に起因する問題と考えられる。本研究では、支点部及び支間中央部の解析結果に着目しており、予備解析との整合性は確認しており、境界近傍の局所的な挙動が着目箇所に与える影響は小さいと考える。

b) 倍率 1.5 の解析結果

図-12 及び図-13 には、倍率 1.5 の解析結果を示す。図化の方法は、前述の倍率 1.0 と同様としている。

載荷荷重の増加に伴い、図-12(a)に示すコンクリートの状態は、最小主応力の応答値が大きくなっており、支点部で最小値が約 15N/mm^2 となっている。同図(b)に示すコンクリートの最大主応力は、倍率 1.0 と比較しても、定性的にも定量的にも変化は見られない。

同図(c)に示す鉄筋の状態は、支点部で約 263N/mm^2 となっている。同図(d)に示す底鋼板の状態は、PPE-7 付近が降伏に達している。図-13 に示す鋼桁部の状態は、床版構成部材の鉄筋及び底鋼板の引張抵抗部材の応答値の増加に比例して、支点部及び支間中央部にて応答値が増加している。

c) 倍率 2.0 の解析結果

図-14 及び図-15 には、倍率 2.0 の解析結果を示す。図化の方法は、前述の倍率 1.0 と同様としている。

載荷荷重の増加に伴い、図-14(a)に示すコンクリートの状態は、最小主応力の応答値は支点部にて最小値が約

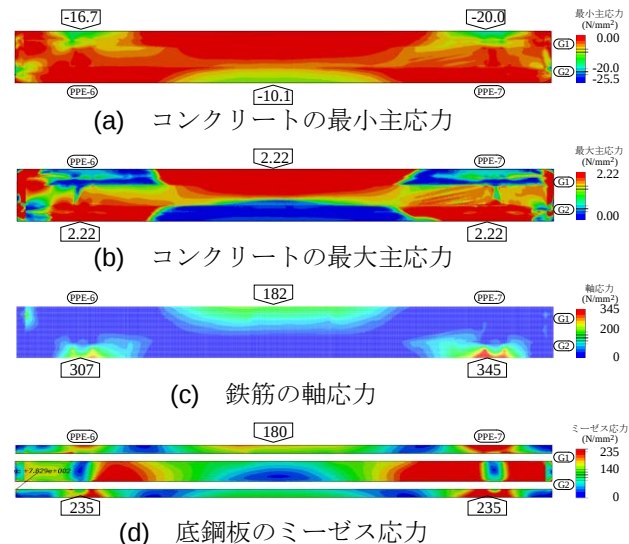


図-14 床版構成部材のコンター図(倍率 2.0)

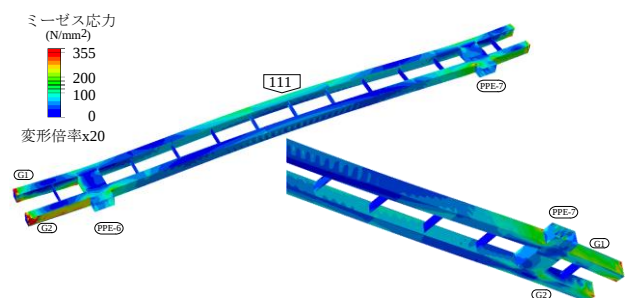


図-15 鋼桁部のミーゼス応力コンター及び変形図(倍率 2.0)

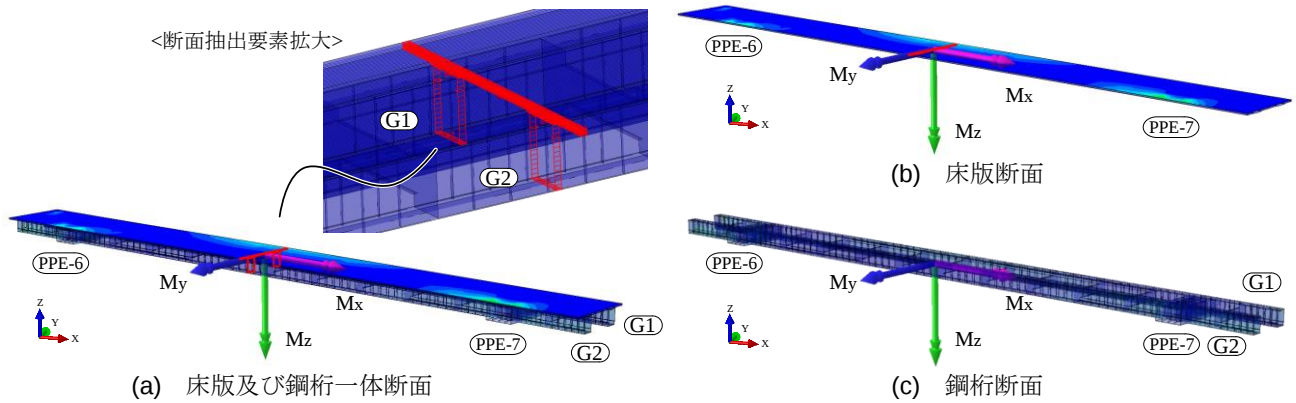


図-16 部材断面力を抽出する着目断面

表-2 着目断面での部材断面力抽出結果

部 材 断 面 力		床 版	主 桁	一 体
面内曲げモーメント	M_y (kN・m)	401	611	10, 890
ねじりモーメント	M_x (kN・m)	13	885	1, 087
面外曲げモーメント	M_z (kN・m)	62, 230	63, 190	125, 400

20N/mm²となっている。同図(b)に示すコンクリートの最大主応力は、倍率 1.5 同様に大きな変化は見られない。

同図(c)に示す鉄筋は、PPE-7 側で降伏に達しており、同図(d)に示す底鋼板は、支点部の降伏範囲が広がっている。図-15 に示す鋼桁部の状態は、床版構成部材のうち、鉄筋及び底鋼板の引張抵抗部材の降伏に伴い、応力の再分配が生じ、支点部及び支間中央部にて応答値が増加している。

載荷荷重の増加に伴い、倍率 1.5 から 2.0 において部材の非線形化が生じる箇所がある。これは、鉄筋コンクリート構造となる床版部材において、支点付近の鉄筋及び底鋼板といった引張応力を負担している部材の降伏範囲が広がっていくことに起因している。一方で、引張部材の支点部における局所的な降伏を除いて、床版及び主桁の応答値は、荷重増加に伴い、ほぼ線形的に増加していることが確認できる。

d) 倍率 1.0 における床版及び主桁に作用する断面力

前項までは、要素に生じる微視的な応答値(応力度)を整理し、横荷重の増加に伴う、構成部材の応答値の増加を確認した。本項では、巨視的な断面力ベースの集計を行い、床版又は主桁といった部材単位の応答値の比較を行う。

図-16 には、支間中央部を着目断面とし、断面力を抽出した部材を示す。断面力の抽出は、同図(a)に示す床版及び主桁の一体断面(以下、一体断面)、同図(b)に示す床版のみと、同図(c)に示す主桁のみ(以下、単独断面)に着目して行った。断面力は、AbaqusFEA の抽出コードにより自動計算し、着目断面とその法線方向の直応力を、中立軸を起点に積分し算出した。

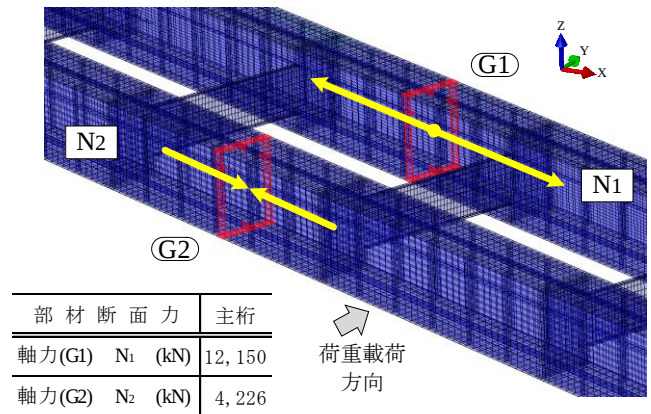


図-17 主桁に作用する軸力の集計

表-2 に着目断面における部材断面力のうち、レベル 2 地震時に相当する倍率 1.0 に着目し、面内、面外曲げモーメント及びねじりモーメントを算出した結果を示す。面内曲げモーメント及びねじりモーメントは、一体断面と単独断面にて図心位置が異なり、この図心からの離れによる影響で差が生じている。

面外曲げモーメントは、床版及び主桁に生じる断面力が重ね梁と等価に機能するため、単独断面における各断面力の和と一体断面の断面力は、ほぼ同じ値となっている。単独断面に作用する断面力は、床版及び主桁の荷重分担率が約 1:1 となっており、横荷重に対して、床版と同様に主桁も抵抗していることが確認できる。

図-17 には、着目断面における主桁に作用する軸力の抽出結果を示す。荷重載荷方向に対して、引張側の G1 側にて約 12,000kN、圧縮側の G2 側にて約 4,000kN となる。この軸力の差に主桁間距離 7.25m を乗じると、約 58,000kN・m となり、表-2 の面外曲げモーメントの値とも近くなっている。主桁に生じる面外曲げモーメントは、主桁に生じる軸力と主桁間距離を乗じたモーメント(以下、偶力モーメント)の影響が大きいことが確認できる。

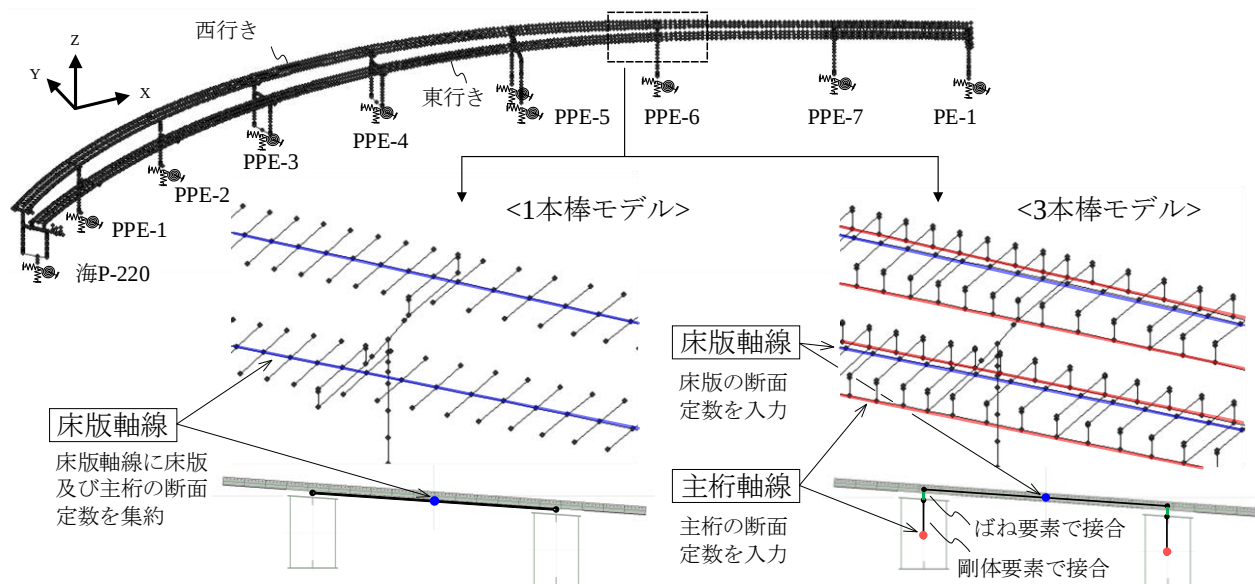


図-18 ファイバー要素を用いた骨組解析のモデル化概要

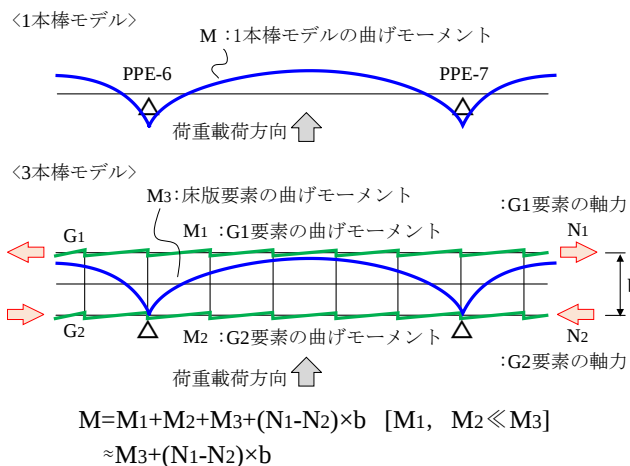


図-19 着目する断面力と偶力モーメントの算出方法

5. ファイバー要素を用いた骨組解析

(1) 骨組解析のモデル化

図-18 にファイバー要素を用いた骨組解析のモデル化概要を示す。骨組解析は2種類で行っており、床版及び主桁2本の断面定数を1本の骨組みに集約したモデル(以下、1本棒モデル)、床版又は主桁の断面定数を単独でモデル化し、各々を接合したモデル(以下、3本棒モデル)とした。本研究では、3本棒モデルにより、断面力ベースでの床版及び主桁の荷重分担率の比較、FE解析との応答の再現性確認を行うことを目的とする。その前段として、標準的な設計に用いられる1本棒モデルとの応答値の比較も行った。

1本棒モデルは、床版下縁に軸線を取り、床版及び主桁の一体断面をファイバー要素でモデル化した。このとき、回転慣性を考慮するため、床版軸線と主桁質点を剛体要素で接合した。橋脚位置では、主桁軸線と横梁軸線が高さ方向に不一致となるため、剛体要素により接合し

た。3本棒モデルは、床版又は主桁の図心位置に軸線を取り、床版軸線と主桁軸線を剛体要素で接合し、スタッド位置でばね要素により完全結合¹⁰⁾とした。ファイバー要素は、モデル化範囲の全域にわたり、上部構造及び鋼製橋脚に対して適用した。

床版の配筋条件及び主桁の断面構成は、基本的にはFE解析に合わせた。材料構成則は、スタッドの非線形特性は考慮していないが、その他の特性は、使用ソフトの違いによる差はあるものの、図-7と同様とした。

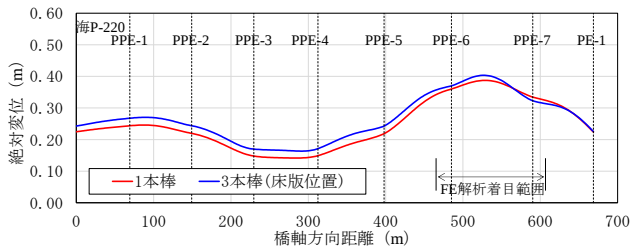
(2) 骨組解析手法

本解析は、SeanFEM¹⁷⁾を用いて、材料非線形、幾何学的非線形を考慮した弾塑性有限変位解析により行った。解析は、FE解析と同様に、レベル2地震動を受けた状態を目標震度1.60として、震度一定に静的載荷した。載荷荷重の方向は、図-8に示すFE解析と同様に、PPE-6からPPE-7の法線方向とした。

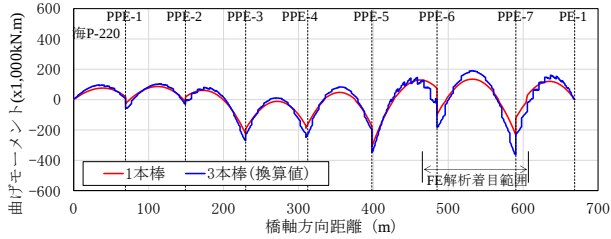
(3) 骨組解析結果

図-19には、1本棒モデル又は3本棒モデルにおいて、着目する断面力を示す。3本棒モデルにおける主桁1本に生じる面外曲げモーメントの値は、床版の面外曲げモーメントや主桁の偶力モーメントに対して相対的に小さい。FE解析の結果からも、荷重分担には、主桁の偶力モーメントの寄与率が高いため、骨組解析においても、床版の面外曲げモーメントと、主桁の偶力モーメントに着目して整理をした。

図-20(a)には、1本棒モデル及び3本棒モデルの両モデルにおける絶対変位の比較を示す。図中には、PPE-6からPPE-7のFE解析着目範囲を示している。解析結果は、PPE-5より起点側において若干の差は生じているものの、



(a) 絶対変位分布



(b) 面外曲げモーメント分布

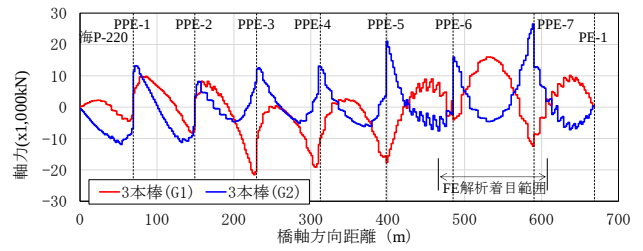
図-20 両モデルの変位及び面外曲げモーメント分布の比較

概ね一致した。同図(b)には、両モデルの面外曲げモーメントの比較を示す。ここで、3本棒モデルにおける面外曲げモーメントは、図-19に示す床版及び主桁の偶力モーメントの和による換算値とした。結果は、絶対変位同様に、面外曲げモーメントも概ね良好な一致を示した。よって、両モデルにおける上部構造は、同様の挙動を示しており、3本棒モデルのうち、床版及び主桁の構成部材の応答値に着目した比較を行っていく。

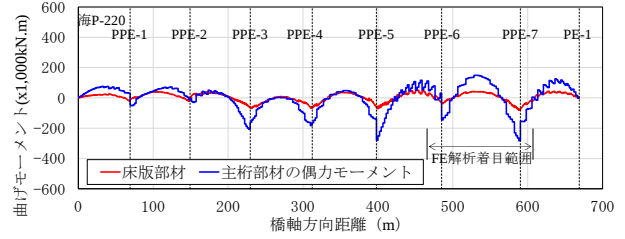
図-21(a)には、3本棒モデルにおける G1 及び G2 主桁の軸力分布を示す。支点部となる橋脚位置や、荷重載荷方向と直交している PPE-6 から PPE-7 の区間では、2主桁に作用する軸力が反転している。FE 解析着目範囲の支間中央部では、引張側の G1 側にて約 16,000kN、圧縮側の G2 側にて約 4,500kN の軸力が作用している。図-17に示す FE 解析の結果と比較すると、骨組解析結果の方が引張側で約 1.3 倍大きな応答値となるが、引張、圧縮のバランスは、定性的には一致しており、FE 解析の再現性が確認できた。

図-21(b)には、床版の面外曲げモーメントと主桁の偶力モーメント分布を示す。偶力モーメントは、主桁の軸力分布の傾向に伴い、軸力が反転している領域で大きくなっている。FE 解析着目範囲の支間中央部では、主桁の偶力モーメントの値が大きくなっている。床版の面外曲げモーメントと主桁の偶力モーメントの比率は、約 1:3 となり、主桁の荷重分担率の方が大きくなっている。

床版及び主桁の荷重分担率について、FE 解析の結果と差が生じた要因を考察する。一つは、主桁の軸力に差が見られたため、図-18のモデル化に示す床版及び主桁を含む、上下部接合部における剛結構造のモデル化が要因と考える。3本棒モデルでは、主桁要素にて下部構造と接合しているため、荷重伝達が主桁を介して行われ、



(a) 主桁軸力分布



(b) 面外曲げモーメント分布

図-21 3本棒モデルの軸力及び面外曲げモーメント分布

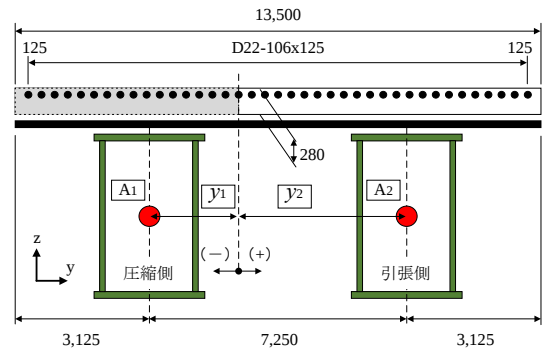


図-22 上部構造全体の面外方向における断面定数の算出方法

表-3 支間中央部における断面2次モーメントの整理結果

着目部位		断面2次	比率
床版	I_z (m ⁴)	29.03	0.41
主桁	I_z (m ⁴)	41.44	0.59
上部構造全体	I_z (m ⁴)	70.47	1.00

主桁に高い応答値が発生した可能性がある。もう一つは、荷重の載荷方法である。骨組解析では、鋼桁の荷重強度を算出し、主桁の軸線に代表して載荷している。FE 解析では、鋼桁のシェル要素に対して単位荷重を立体的に載荷しているため、床版との合成作用の影響が含まれ分擔されていると考える。これらは、より緻密にモデル化した FE 解析の結果が実挙動に近いと考える。一方で、骨組解析においても主桁に横荷重が伝達されることは確認できた。

6. 荷重分担率の評価

FE 解析及び骨組解析の結果より、本研究で対象とした横荷重を受ける鋼箱断面桁橋に対して、床版のみならず、主桁も抵抗していることが確認できた。主桁の抵抗

表-4 1本棒モデルに生じる断面力を用いて異なる抵抗断面による応力度の簡易計算結果

Case	抵抗断面	着目部位	照査項目	応答値	抵抗値
Case1 床版のみで負担		支間中央部	設計断面力	M (kN・m)	140,000 ---
			圧縮応力度	コンクリート σ_c (N/m ²)	16.3 [25.5]
			引張応力度	鉄筋 σ_t (N/m ²)	293 [345]
		支点部 (脚位置)	引張応力度	底鋼板 σ_t (N/m ²)	298 [235]
			設計断面力	M (kN・m)	240,000 ---
			圧縮応力度	コンクリート σ_c (N/m ²)	28.0 [25.5]
Case2 床版と主桁で負担		支間中央部	設計断面力	M (kN・m)	140,000 ---
			圧縮応力度	コンクリート σ_c (N/m ²)	8.2 [25.5]
			引張応力度	鉄筋 σ_t (N/m ²)	104 [345]
		支点部 (脚位置)	引張応力度	底鋼板 σ_t (N/m ²)	106 [235]
			設計断面力	M (kN・m)	240,000 ---
			圧縮応力度	コンクリート σ_c (N/m ²)	14.1 [25.5]
			引張応力度	鉄筋 σ_t (N/m ²)	179 [345]
			引張応力度	底鋼板 σ_t (N/m ²)	182 [235]

機構としては、偶力モーメントが支配的であるため、図-22に示す2本主桁の断面積と中立軸からの離れから計算される断面2次モーメントが抵抗特性に依存していると考えられる。表-3には、算出した一体断面及び分離断面の面外方向に対する断面2次モーメントを示す。床版と主桁の面外剛性比は、約1:1に近くなっており、FE解析における荷重分担率の結果とも近くなっている。

表-4には、前章の1本棒モデルに生じる断面力を用いて、仮定した抵抗断面により、簡易的に応力度を算出した結果(以下、簡易計算)を示す。このときの設計断面力は、レベル2地震動を受けた状態として、震度1.60の応答値となっている。PPE-6及びPPE-7の着目範囲では、支間中央部で約140,000kN・m、支点部で約240,000kN・mの面外曲げモーメントが生じている。抵抗断面としては、2種類を設けており、Case1は、文献³⁴⁾に基づき床版のみで抵抗、Case2は、床版に加えて主桁も抵抗断面として設定した。

簡易計算結果と、同じ荷重条件となる図-10に示す倍率1.0のFE解析結果を比較する。Case1は、支間中央部及び支点部ともに、FE解析結果よりも高い応力度となっている。これは、1本棒に生じる応答値を床版のみで抵抗していることに起因しており、抵抗断面が実際の抵抗機構と乖離しているためと考えられる。Case1を満足させるには、鉄筋をD32で100mm間隔として、底鋼板厚を11mmで材質SM490Yに上げる必要があり、著しい配筋量の増加とともに、道示等³⁴⁾に示される構造細目を満たすことができない。

Case2は、支間中央部及び支点部、圧縮及び引張応力度の全てを見ても、FE解析の結果と定性的に近似した値が得られている。このことから、主桁は、断面の剛性や桁の配置に相応して横荷重に抵抗しているといえる。

なお、簡易計算では、FE解析の結果と比較して、若干、高い応力度となっている。これは、1本棒モデルに生じる断面力が、表-2に示すFE解析の断面力よりも大きいことに起因しているためと考え、解析方法の違いによるものである。

7. まとめ

本研究では、横荷重が作用した床版及び主桁の荷重分担率を把握するため、FE解析及び骨組解析を行い、応答特性の把握、双方の再現性の確認、荷重分担率の分析を行った。各種解析結果を踏まえて上部構造における抵抗断面を仮定し、断面計算による簡易的な応力度の算出方法を提案した。対象橋梁は、2主桁にねじり剛性の高い箱断面を用いており、橋の立体的機能が確保されていることが前提として、得られた知見は次のとおりである。

- (1) FE解析より、載荷荷重を倍率1.0から2.0と増加していくにあたり、鉄筋及び底鋼板といった、鉄筋コンクリート構造の引張部材の降伏箇所が見られた。支点付近に降伏範囲が広がっているものの、床版及び主桁の応答値は、荷重増加に伴い、ほぼ線形的に増加していることが確認でき、主桁にも荷重が伝達していることが確認できた。
- (2) FE解析より、着目範囲における支間中央部の断面力を集計した。その結果、面外方向の曲げモーメントは、床版と主桁で約1:1の分担となっていた。また、主桁に生じる曲げモーメントは、主桁の軸力に主桁間距離を乗じた偶力モーメントが支配的であった。
- (3) ファイバー要素を用いた骨組解析の結果、1本棒モ

デル及び3本棒モデルは、同様の挙動を示すことが確認できた。また、3本棒モデルに生じる軸力のバランスより、FE解析との再現性を確認した。

- (4) 骨組解析における荷重分担率は、床版と主桁で約1:3の分担となっており、骨組解析においても主桁への荷重分担を確認することができた。一方で、骨組解析のモデル化に影響して、主桁の分担率がFE解析よりも大きくなった。
- (5) 横荷重に対して、主桁も抵抗断面に寄与するといった仮定のもと、2種の抵抗断面を設定した簡易計算を実施した。床版のみで抵抗するとしたCase1はFE解析結果との再現性に劣り、Case2は再現性が高かった。これより、主桁は、抵抗断面に寄与するといえる。

参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説(I編～V編)(平成29年版)，2017。
- 2) 宮田秀太，徳橋亮治，馬越一也，野中哲也：横荷重を受ける鋼 I 桁橋に対する立体的機能の確保に関する一考察，第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp.199-206，2021。
- 3) (公社)日本道路協会：平成29年道路橋示方書に基づく道路橋の設計計算例，2018。
- 4) (一社)日本橋梁建設協会：連続合成2主桁橋の設計例と解説～道示平成29年11月版対応～，2019。
- 5) 尾下里治，松永静男，天沼邦彦，加藤進：下横構省略によるプレートガーダー橋の構造改築策，橋梁と基礎，Vol.5，pp.33-38，2004。
- 6) (一社)日本橋梁建設協会：連続合成2主桁橋の設計例と解説について，令和元年度 橋梁技術発表会資料，
<https://www.jasbc.or.jp/wp/wp-content/themes/jasbc/images/release/slide/2019/renzokugousei2.pdf>，2021年7月21日参照
- 7) (一社)日本橋梁建設協会：細幅箱桁橋の設計例と解説～道示平成29年11月版対応～，2021。
- 8) 中田知志，勝俣徹，長井正嗣：曲線2主I桁橋の設計に関する検討，鋼構造論文集，Vol.11，No.43，pp.63-73，2004。
- 9) 小森暢行，運上茂樹，堺惇一，星隈順一：地震による鋼上部構造横げたの損傷分析と部材補強に関する試算，第13回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.291-296，2010。
- 10) 国土技術政策総合研究所，土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料 No.814/土木研究所資料 No.4295，2014。
- 11) 国土技術政策総合研究所，土木研究所：平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料 No.967/土木研究所資料 No.4359，2017。
- 12) (一社)日本橋梁建設協会：鋼・コンクリート合成床版の計画資料(設計例と解説)，2012。
- 13) 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究，国土技術政策総合研究所資料 No.472，2008。
- 14) 大城壮司，上條崇，奥井義昭，長井正嗣：プレキャスト床版連続合成桁のずれ止めに関する実験および解析，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.68，No.2，pp.331-346，2012。
- 15) 奥村徹，馬越一也，野中哲也，吉野廣一：非エネルギー吸収部材の損傷を伴う上路式鋼アーチ橋の構造全体系の地震時終局挙動，構造工学論文集，Vol.66A，pp.264-273，2020。
- 16) (公社)土木学会：2018年制定 鋼・合成構造標準示方書耐震設計編，2018。
- 17) (株)耐震解析研究所：SeanFEM User's Manual，2009。

EVALUATION OF LOAD SHARING RATE FOR DECKS AND MAIN GIRDERS OF COMPOSITE TWO BOX GIRDERS THAT RECEIVE LATERAL LOAD

Hiroki SUGIYAMA, Takayuki YOSHIDA, Yasuto NISHIDA, Mizuki YOSHIHARA
Tatsuo SASAKI, Shuta MIYATA, and Taro NAKAMURA

From the revision of the Specifications for Highway Bridges in 2017, it was required to consider Level 2 earthquake ground motion for the Verification of the decks. In the calculation example corresponding to the Specifications for Highway Bridges, the verification result was shown when the deck bears 100% of the sectional force generated in the superstructure. This design method may be significantly more unreasonable than the previous design method. In this study, partial FE analysis was performed using a solid element for the reinforced concrete deck and a shell element for the main girder. At the same time, a frame analysis using fiber elements was performed. Based on the analysis results, it was confirmed that the decks and the main girders were integrated to resist the lateral load. Then, the load sharing rate was evaluated.