

4章 鋼コンクリート合成床版の各部応力の算出手法の検討

4.1 検討の概要

3章までの検討から、床版コンクリートに累積被害則を設定し、適当な大きさに細分化したコンクリート要素単位で荷重の繰り返し載荷の影響による疲労損傷が生じるとしたモデル解析によって、コンクリート系床版の輪荷重による疲労破壊の進行が近似的に表現できることがわかった。

鋼コンクリート合成床版は、底鋼板が種々のずれ止めによって床版コンクリートと一体化されていることや鉄筋以外の種々の鋼材が配置されるものがあり、床版コンクリートの各部の応力状態は鉄筋のみが配置された床版に比べて非常に複雑なものとなる。ただし、3章で示した鋼コンクリート合成床版に対する解析結果からは、床版内部の鋼材の影響を適切に考慮することでRC床版同様に床版内部でのコンクリートのひび割れの発生とその進行による床版の破壊の過程も近似的に表現できることが示された。

このため多様な形式の鋼コンクリート合成床版であっても適切な解析方法を用いて鋼部材や床版コンクリートの応力変化を精度よく算出することでRC床版との比較など同じ評価手法で定量的に疲労耐久性の評価が可能と考えられる。

本章では、RC床版と同様の解析手法による疲労耐久性の評価を行うにあたって鋼コンクリート合成床版の各部の応力を適切に算出するための手法について検討する。すなわち鋼材の応力解析やずれ止めの力の伝達機構の把握や応力状態を解明するためのFEM解析のモデル化、設計における構造詳細の照査を目的に、3章で示された疲労におけるコンクリートの弱点部となる鋼材まわりの応力状態を把握するためのFEM解析のモデル化について、既往の研究事例を示すとともに、着目点、要素分割、鋼材とコンクリートとの付着の扱いなどの解析方法とそれらの相違が解析結果に及ぼす影響について検討する。

4.2 モデル化に関する一般事項

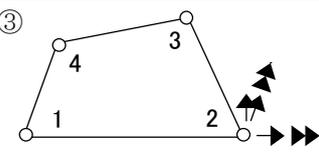
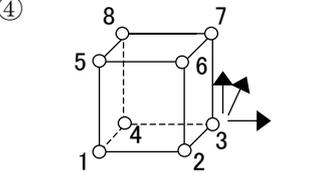
4.2.1 概要

鋼コンクリート合成床版の疲労耐久性を評価するにあたり、①鋼材継手部の応力振幅を算定し、②コンクリートの内部の応力振幅を推定することが重要である。応力振幅の推定は FEM 解析により行うことを前提とするが、FEM 解析においては、解析対象とする構造物の形状、着目すべき応力および変形の成分を考慮し、さらに解析結果をどのような目的に使用するかを念頭においてモデル化することが求められる。

ここでは、鋼コンクリート合成床版を対象に鋼部材と床版コンクリートの各部の応力状態を 3 章までに検討した疲労耐久性の評価に用いる観点で必要な精度で算出できるための解析手法を確立することを目的に、モデル化における一般的な留意事項を示す。

表 4.2-1 に 3 次元 FEM モデル解析で用いられる代表的な要素について概要を示す。

表 4.2-1 代表的要素の一覧

要素	名称	節点数	自由度	適用構造	入力条件
① 	トラス要素	2	2	骨組構造 (トラス)	構造形状 断面形状(断面 積、ねじり剛 度)
② 	はり要素	2	6	骨組構造 (ラーメン)	構造形状 断面形状(断面 積、断面 2 次モ ーメント、ねじ り剛度)
③ 	シェル要素	4	5	板構造 シェル構造	構造形状、板厚
④ 	ソリッド要素	8	3	ソリッド構造	構造形状

【記号の説明】 \longrightarrow : 変位、力、 \longrightarrow : 回転、モーメント

【共通入力条件】 ヤング率、ポアソン比、密度 材料構成則 (非線形解析の場合)

図 4.2-1 は I 型鋼を例として解析のモデル化（要素選定）の方法の相違を示したものであるが、 h に比べて L が大きい場合に、はりとしての評価を行う場合には、はり要素でモデル化を行えばよい場合もあるが、例えばフランジの平面的な応力集中を把握する場合にはフランジ部材とそれにつながる部材をシェル要素などでモデル化しなければその評価はできない。さらにフランジとウェブの交点の R 部に生じる応力集中を評価する場合は部材の立体的な形状までもソリッド要素でモデル化することも必要となってくる。このように、解析目的に応じて適切に要素を選定するなどモデル化での配慮が必要である。

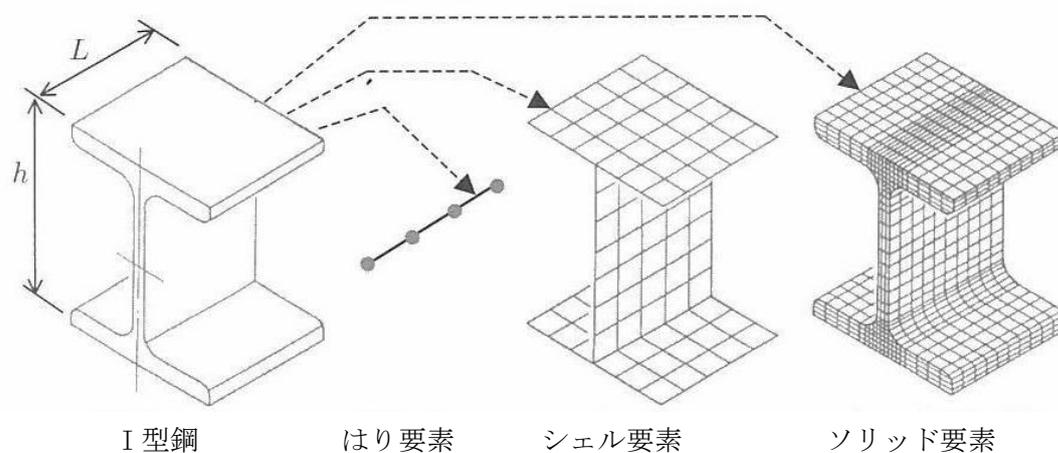


図 4.2-1 I 型鋼を例としたモデル化の相違の例

表 4.2-2 に、鋼コンクリート合成床版について、3次元有限要素法による解析が実施された例を示す。

表 4.2-2(1) 鋼コンクリート合成床版の3次元有限要素解析事例 (①輪荷重走行試験 (1))

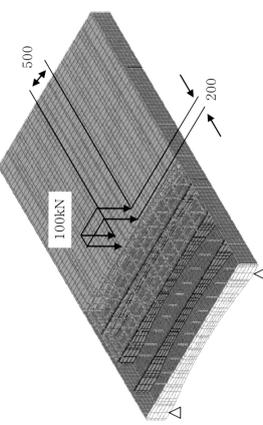
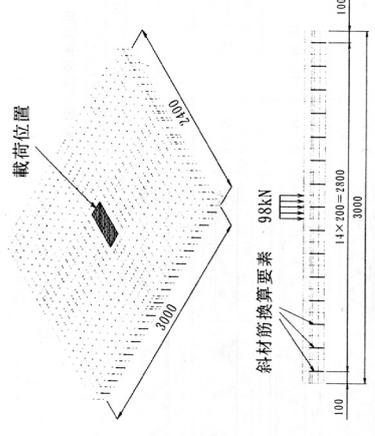
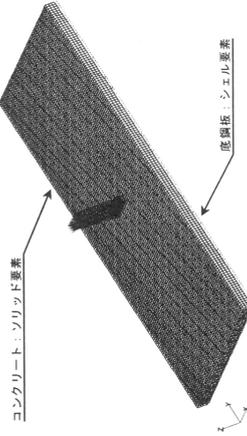
No.	モデル概要図	解析条件	解析目的	備考
①		<p>荷重：100kN コンクリート：ソリッド要素, $E_c = 2.0 \times 10^4$, $3.2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.167$ 鋼材：シェル要素, $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$ 鉄筋，スタッド：はり要素, $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$</p> <p>①全断面有効モデル (ヤング係数比 $n = 6$) ②全断面有効モデル ($n = 10$) ③引張領域剛性低下モデル ($n = 10$)</p>	<p>実測結果との比較</p>	<p>加々良, 秦, 櫻井, 大西, 松井：アーチ型合成床版の静的および動的荷重下の構造挙動に関する研究, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.91~96, 2003年6月, 土木学会</p> <p>(鈴木, 碓山, 入部：ADS 床版の疲労耐久性能確認試験の報告, 東骨技報 No.51, pp.41~55, 2005年)</p>
②		<p>コンクリート：ソリッド要素, $E_c = 32.3 \text{ kN/mm}^2$ 底鋼板：シェル要素 上弦筋，配力筋：はり要素 斜材筋：換算シェル要素 スタッド：せん断パネ要素 コンクリートー底鋼板：鉛直成分のみ伝達 荷重：98kN 等分布荷重 (載荷面積 $200\text{mm} \times 500\text{mm}$)</p>	<p>輪荷重走行試験供試体の挙動追跡</p>	<p>高林, 小栗, 阪野, 石橋, 平城, 堀川, 松井：鋼製グリップを用いたトラス鉄筋合成床版のずれ止め性能と疲労耐久性, 構造工学論文集 Vol.50A, pp.1139~1150, 2004年3月</p> <p>MGT 床版</p>
③		<p>鋼板：シェル要素 コンクリート：ソリッド要素 解析コード：MSC. Nastran</p>	<p>輪荷重の決定</p>	<p>柳澤, 橋, 久保田, 福井, 松井：鋼・コンクリート合成床版の中間支点部輪荷重走行試験 (ロビンソン型合成床版), 第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.185~190, 2004年11月, 土木学会</p>

表 4.2-2(2) 鋼コンクリート合成床版の3次元有限要素解析事例 (①輪荷重走行試験 (2))

No.	モデル概要図	解析条件	解析目的	備考
④		<p>解析コード: MSC, Marc 2001 コンクリート: ソリッド要素 底鋼板, リブ: シェル要素 鉄筋: トラス要素 鋼桁: シェル要素 ひび割れモデル: @を参考とした</p>	<p>載荷試験結果の検証</p>	<p>林, 佐藤, 内田, 吉川, 福井, 松井: T形リブを用いた鋼・コンクリート合成床版の中間支点部輪荷重走行試験, 第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.191~196, 2004年11月, 土木学会</p>
⑤		<p>解析コード: MSC, Marc 2001 コンクリート: ソリッド要素, $E_c = 2.88 \times 10^4$ N/mm², $\nu = 0.199$ 下鋼板, リブ: シェル要素, $E_s = 2.0 \times 10^5$ N/mm², $\nu = 0.3$ スタッド, 鉄筋: はり要素, $E_s = 2.0 \times 10^5$ N/mm², $\nu = 0.3$ 下鋼板, リブ-コンクリート: 付着無視, 接合面垂直方向は接触・非接触考慮 スタッド, 鉄筋-コンクリート: 剛結合 荷重: 98kN 等分布荷重 (載荷面積 200mm×500mm) 節点数: 18,100, 要素数: 16,000 (基本モデル) ひび割れモデル: 隣接する要素に節点力を伝達しない</p>	<p>走行試験の測定結果との比較</p>	<p>街道, 渡辺, 橋, 松井, 堀川: 鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析による疲労耐久性評価, 構造工學論文集 Vol.50A, pp.1119~1129, 2004年3月, 土木学会 街道, 渡辺, 橋, 田坂, 松井, 堀川: 鋼・コンクリート合成床版のスタッドに作用するせん断力の性状と横リブおよびコンクリート版厚の影響, 第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.223~228, 2004年11月, 土木学会 ロビンソン型合成床版</p>

表 4.2-2(3) 鋼コンクリート合成床版の3次元有限要素解析事例 (②静的載荷試験 (1))

No.	モデル概要図	解析条件	解析目的	備考
⑥		<p>床版、主桁：等方性薄板要素 床版-主桁間：骨組要素 荷重：98kN等分布荷重 (接地面積 20cm×50cm→床版厚の1/2まで45°分布) ヤング係数比：n=10, ポアソン比：ν=0.2 要素寸法：50mm 節点数：5,796, 要素数：5,710</p>	<p>走行試験の測定結果との比較</p>	<p>街道、渡辺、橋、松井、梶川：床版張出し部の輪荷重走行試験および曲げモーメント性状について、構造工学論文集 Vol.48A, pp.1429～1439, 2002年3月 ロビンソン型合成床版</p>
⑦		<p>床版、主桁：等方性薄板要素 床版-主桁間：骨組要素 荷重：100kN等分布荷重 (接地面積 20cm×50cm→床版厚の1/2まで45°分布) ヤング係数比：n=8, ポアソン比：ν=0.2 要素寸法：50mm</p>	<p>載荷試験の測定結果との比較</p>	<p>街道、渡辺、橋、松井、栗田：鋼・コンクリート合成床版を適用したプレストレスしない連続成げたの中間支点部の静的載荷試験、構造工学論文集 Vol.49A, pp.1115～1126, 2003年3月 ロビンソン型合成床版</p>
⑧		<p>解析コード：MSC. Marc コンクリート：ソリッド要素, $E_c = 2.66 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.170$ 下鋼板、リブ：シェル要素, $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$ スタッド、鉄筋：はり要素, $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$ 鋼桁：シェル要素, $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu = 0.3$ 鋼桁-コンクリート：剛結 下鋼板、リブ-コンクリート：附着無視、接合面垂直方向は接触・非接触考慮 スタッド、鉄筋-コンクリート：剛結合 荷重：98kN等分布荷重 節点数：11,200, 要素数：9,700 (基本モデル) ひびわれモデル：隣接する要素に節点を伝達しない</p>	<p>静的載荷試験の測定結果との比較</p>	<p>保坂、街道、橋、田坂、松井、栗田：鋼・コンクリート合成床版を適用した連続成げたの静的載荷試験および3次元有限要素解析、構造工学論文集 Vol.50A, pp.1111～1118, 2004年3月 ロビンソン型合成床版</p>

表 4.2-2(4) 鋼コングリート合成床版の3次元有限要素解析事例 (②静的載荷試験 (2))

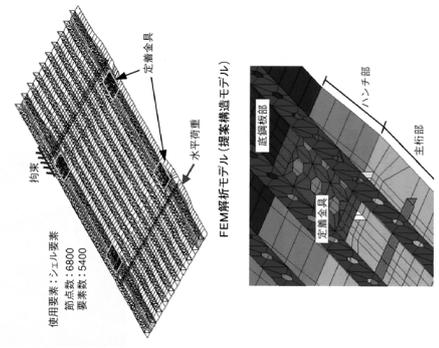
No.	モデル概要図	解析条件	解析目的	備考
⑨		解析コード: COSMOS/M 2.7	試験結果の検証	井口, 小山, 春日井, 高田: 開断面箱桁用パワースラブ鋼パネルの水平せん断試験, 横河ブリッジルール技報 No. 34, pp. 52~57, 2005年1月

表 4.2-2(5) 鋼コンクリート合成床版の3次元有限要素解析事例 (③要素解析)

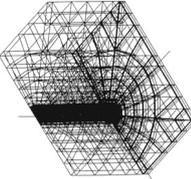
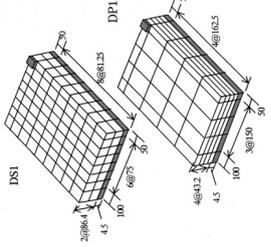
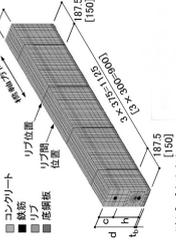
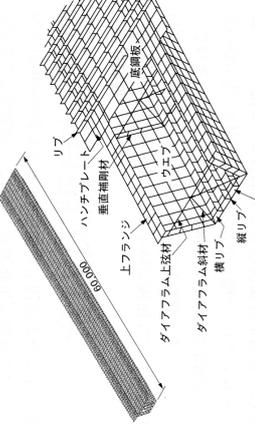
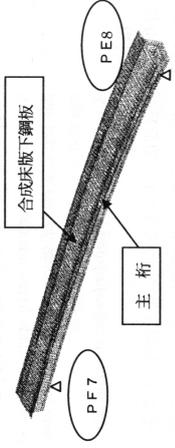
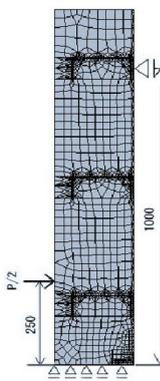
No.	モデル概要図	解析条件	解析目的	備考
⑩		<p>デッキプレート厚：4.5mm, 6.0mm, 9.0mm, 12mm スタッド径：φ13, φ16 スタッド高：80mm スタッド頭部：コンクリートとリンク要素で接合</p>	<p>スタッド破壊の発現機構の明確化</p>	<p>松井, 文, 福本：鋼板・コンクリート合成床版中のスタッドの疲労破壊性状について, 構造工学論文集 Vol. 39A, pp. 1303~1311, 1993年3月, 土木学会 ロビンソン型合成床版</p>
⑪		<p>解析プログラム：自主開発 使用要素：20節点アイソパラメトリック要素 コンクリートの破壊基準：二羽モデル, 青柳・山田モデル 構成則：ひび割れ前コンクリート・鋼材-3次元弾塑性破壊モデル ひび割れ発生時-Reinhardtの引張軟化モデル メッシュ分割：高さ方向5分割, 面内8×9分割 接合部：接合要素(スタッドのせん断力-ずれ関係)</p>	<p>押し抜きせん断破壊シミュレーション 要素寸法の影響 鋼板厚の影響</p>	<p>高橋, 佐藤, 上田：3次元非線形有限要素解析による鋼コンクリート合成板のせん断挙動シミュレーション, 構造工学論文集 Vol. 48A, pp. 1297~1304, 2002年3月, 土木学会</p>
⑫		<p>コンクリート：ソリッド要素, $E_c = 3.0 \times 10^4$ N/mm² リブ、底鋼板：ソリッド要素, $E_s = 2.0 \times 10^5$ N/mm² 鉄筋：トラス要素, $E_s = 2.0 \times 10^5$ N/mm²</p>	<p>孔あきジベラ位置における応力集中</p>	<p>春日井, 井上, 保坂：合成床版のリップ位置における応力集中に関するFEM解析, 土木学会第59回年次学術講演会講演概要集, 1-683, pp. 1363~1364, 平成16年9月</p>
⑬		<p>底鋼板, リブ：シェル要素 鋼桁：シェル要素 ダイアフラム上弦材：はり要素 ダイアフラム斜材：トラス要素</p>	<p>合成床版底版の剛性への寄与度の検証</p>	<p>高田, 永田, 名取, 清田：合成床版底版の架設時補強材としての有効性に関する検討, 横河ブリッジグループ技報 No. 28, pp. 62~71, 1999年1月</p>

表 4.2-2(6) 鋼コンクリート合成床版の3次元有限要素解析事例 (④実橋解析、その他)

No.	モデル概要図	解析条件	解析目的	備考
⑭		主桁, 合成床版: シェル要素	下鋼板の全体圧屈耐力への寄与度の把握	水野, 木本, 香川, 池田, 斉木: 鋼・コンクリート合成床版 (SCデッキ) の曲線開断面箱桁への適用, 第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.263~268, 2004年11月, 土木学会
⑮		(梁モデルの2次元解析) コンクリート, 底鋼板, リブ: 平面ひずみ要素 スタッド, 鉄筋: 棒要素 解析コード: ATEVA	試験結果との比較	河野, 塩永, 鈴木: 合成床版橋軸方向縦ぎ手の強度特性に関する解析的検討, 土木学会第56回年次学術講演会, CS7-006, pp.392~393, 平成13年10月, 土木学会 チャンネルビーム合成床版

4.2.2 コンクリートのモデル化

(1) 一般事項

3章で示したように、リブタイプの鋼コンクリート合成床版では、内部の鋼材まわりから疲労によるコンクリートの損傷が生じており、コンクリートのモデル化を行うにあたり、移動荷重によって複雑に変化する鋼材まわりの床版コンクリートの応力状態を反映できるモデル化が必要である。

あまり要素分割が粗いと一部の弱点となる要素の状態によって全体の構造状態が急激に変化するなど、耐久性の見積もりにも大きく影響する。一方、あまり細かい要素分割を行っても実構造の不均質性などを考慮すると必ずしも精度的な改善効果には限界があるばかりか実現象とも乖離すると考えられる。従って鋼コンクリート合成床版の床版コンクリート部分のモデル化にあたって、その要素サイズについては内部の鋼材の寸法や形状も考慮してコンクリートの局所的な応力がある程度精度よく算出できる範囲であり小くなりすぎない適当な大きさとなるように配慮する必要がある。

床版コンクリートのモデル化は、移動荷重の影響で3次元的に複雑に変化する応力の大きさや向きの影響を考慮できるようにソリッド要素とすることが一般的である。床版コンクリート中にある鋼材をソリッド要素でモデル化する場合には鋼部材の板厚を含めてモデル化されることになるため、その部分の床版コンクリートの要素サイズをそれにあわせることで特段の配慮は必要ないが、鋼部材をシェル要素でモデル化する場合は、鋼部材の板厚に相当する部分をコンクリート要素で調整するなど、解析目的に応じた境界部の扱いの配慮が必要である。

一般的な鋼コンクリート合成床版では載荷荷重が大きくなると、中立軸より下側のコンクリート部が引張軟化域にはいり、リブタイプの床版ではリブ上縁のコンクリート部が引張軟化域にはいる構造もある。載荷荷重が小さい場合にはこのような非線形性の影響は小さいと考えられるが、後述する4.5の解析では輪荷重280kN程度以上になると非線形性が影響することが予想されたため材料非線形性を考慮した検討も行っている。このように、解析の目的により材料非線形の影響を考慮する必要がある場合には、コンクリート要素の計算応力の算出時に材料非線形が考慮できる要素を用いることが必要となる。

なお、コンクリート要素の応力振幅の算出などに線形要素を用いた解析の計算応力を用いた疲労照査を行うことでより安全側の評価となることが明らかな場合には、線形要素でモデル化した解析モデルで合理的に安全側の検討を行うなど、解析対象の条件と照査内容に応じて適切な解析手法を用いることが検討の合理化には必要と考えられる。

(2) 材料構成則の例

汎用プログラムにおける弾塑性解析では、材料に適した降伏関数あるいは破壊規準を選定して、一軸における応力-ひずみ関係を与えて、流動則の理論などを用いて3次元における構成則が展開される。図 4.2-2 に一軸状態における非線形の応力-ひずみ関係、すなわち、材料構成則の例を示す。

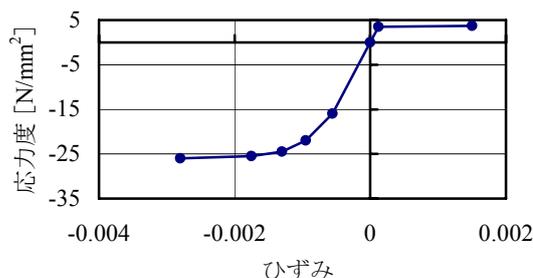


図 4.2-2 非線形構成則の例

3次元のソリッド要素における構成則では、降伏関数と破壊規準の選定が重要である。

鋼材の弾塑性変形を記述するには、いわゆるミーゼスの降伏関数が用いられ、実験結果ともよく合致することが知られている。この関数は、主応力空間では主軸を静水圧とする円筒形となる。すなわち、降伏強度は静水圧の大きさに依存しない。一方、コンクリートに関しては、非線形挙動の始まる応力状態は静水圧に依存する。これは地盤材料でも見られる変形挙動である。その点で、鋼材とコンクリートでは異なった構成則モデルを用いることが必要となる。これまでにコンクリートの構成則モデルは数多く提案されている。弾塑性理論に基づいた構成則モデルは、参考文献 1)、2) に詳述されている。

それらのモデルは非常に精巧なものもあるが、比較的簡便な静水圧に依存する降伏関数としてはドラッカー-プラガーモデルがよく知られており、コンクリートの弾塑性解析にも用いられる。これは主応力空間で主軸を静水圧とする円錐形となるモデルである。

鋼材の材料挙動は圧縮応力下と引張応力下で一般に差がないとされるが、コンクリートは圧縮応力下と引張応力下で変形挙動は大きく異なる。弾塑性理論が適用できるのは基本的には圧縮応力下と考えられる。引張応力作用下では、亀裂が生じてその変形挙動を支配する。そのため、破壊力学の適用が試みられてきた。しかしながら、線形破壊力学をコンクリートに適用するのは困難であることが明らかとなり、非線形破壊力学が用いられている。具体的には、応力-ひずみ関係に軟化領域（ひずみが増加するにつれて応力が低下）が導入されている。このような軟化型構成則モデルを有限要素法に適用すると解析結果が要素分割に依存するという問題が生じる。そのため、要素の大きさに応じて軟化領域の応力-ひずみ曲線の勾配を変化させる手法が用いられている³⁾。

4.2.3 鋼部材のモデル化

(1) 一般事項

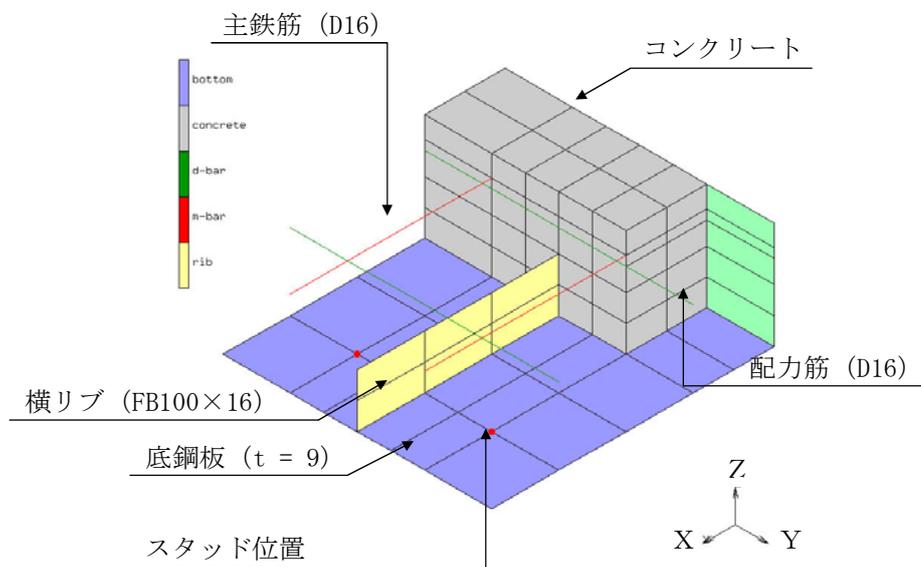
ここでは鋼コンクリート合成床版のずれ止めを除く鋼部材（底鋼板、補強リブ）のモデル化について、モデル化方法と解析結果の関係について考察する。

鋼部材（底鋼板）の疲労耐久性は、通常溶接部など鋼部材同士の接合部に着目してその部位の応力振幅量を計算して、現在のところ確立されている継ぎ手強度等級との比較による照査を行うことが一般的である。鋼コンクリート合成床版の場合底鋼板に様々な鋼部材が溶接などで接合されており、接合部とその近傍における応力振幅を把握するためには鋼材の形状なども反映できるシェル要素やソリッド要素によるモデル化が一般には必要である。なお、板厚方向の応力分布を考慮する必要がある場合は、ソリッド要素としなければ厚さが表現されないシェル要素ではこれを求めることができない。

(2) モデル化例

図 4.2-3 は底鋼板および横リブをシェル要素とした 3 次元解析モデルの例である。このように通常の RC 床版と同様に単独で配置されている鉄筋はそれを含むコンクリート要素に含めてモデル化することも可能である。底鋼板や横リブについては鋼部材としての疲労耐久性を適切に評価するためにその形状や接合条件が計算応力などに反映されるようなモデル化による必要がある。

なお、鋼部材の疲労耐久性については通常、パターン化された継ぎ手形式に対してそれを有する部材の公称応力によって疲労強度等級が定義されている。そのため床版に用いられる鋼部材の疲労耐久性をこれらの疲労強度等級を参照することで評価する場合には、計算応力や継手形式について参照しようとする継手等級の適用条件との関係を考慮して適切に評価する必要がある。さらに既存の継手強度等級は鋼部材がコンクリート等で拘束されていない条件下の試験結果に基づいている。このため頭付きスタッドなどコンクリートによる拘束の影響が疲労耐久性を大きく左右する可能性のある継手構造に対してはその影響を考慮して適切に継ぎ手強度等級を設定するなど、鋼材に生じる力の流れをコンクリートの影響も含めて把握したうえで適切に評価する必要がある。



- ①コンクリート：8 節点ソリッド要素
- ②底鋼板、横リブ：4 節点シェル要素
- ③鉄筋：トラス要素
- ④スタッド：バネ要素

図 4.2-3 ロビンソンタイプの 3 次元モデル化例

4.2.4 ずれ止めのモデル化

(1) 一般事項

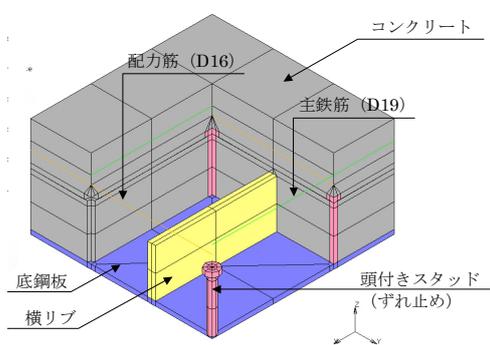
鋼コンクリート合成床版では、床版コンクリートと鋼部材が様々なずれ止めによって一体化されることを前提として設計される。鋼コンクリート合成床版の疲労耐久性の評価にあたって3章における検討では、ずれ止めによる一体化が失われていく過程を考慮することは信頼性の面からも困難であることから、所要の耐荷力が損なわれるまでは耐荷力上考慮する部分の床版コンクリートと鋼材のずれ止めによる一体化は損なわれないことを前提としている。この鋼材とコンクリートとの一体化としてずれ止めが機能することを検証するには、ずれ止めへの力の伝達機構を検証しておくことが必要であり、解析によって検証を行う場合はずれ止めに対して適切なモデル化が必要である。ここで、底鋼板と床版コンクリート下面は施工直後は全面が付着しており付着による相互の応力伝達があるが、活荷重の繰り返し等の影響によって徐々に付着による結合は失われていくため、機械的なずれ止め機構による鋼板と床版コンクリートのせん断等による応力伝達のみを設計において考慮して、ずれ止め機能を検証することが必要である。

ずれ止めのモデル化にあたっては、ずれ止め本体に生じる応力状態とずれ止め近傍の床版コンクリートの局所的な応力状態に対して適切に疲労耐久性を評価できるよう、ずれ止めとコンクリートの両方を要素サイズや結合条件などを適切にモデル化する必要がある。

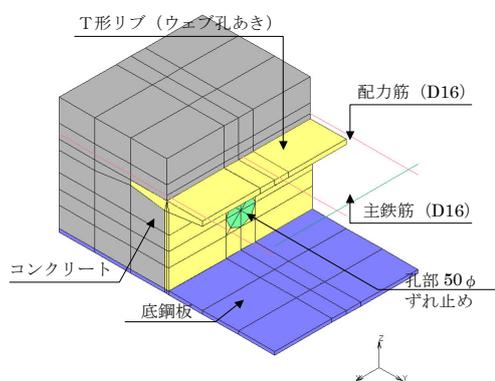
ずれ止め以外に着目する場合、ずれ止めや底鋼板と床版コンクリートを剛結の条件とする方が安全側の評価となる場合があるなど、着目する事象と解析目的に応じて適切な評価ができるようモデル化の条件を変えて検討する必要がある場合もある。例えば、鋼部材(底鋼板)の応力振幅の算出にあたって、床版剛性を高めに設定した方が安全側に評価できる場合には、ずれ止めをモデル化せずに鋼部材と床版コンクリートの付着も剛結でモデル化することもある。逆に、コンクリート上縁の応力振幅を算出する目的である場合、床版剛性を低く評価した方が安全側に評価できるとの理由から、ずれ止めを忠実にモデル化して考慮することもある。

(2) モデル化例

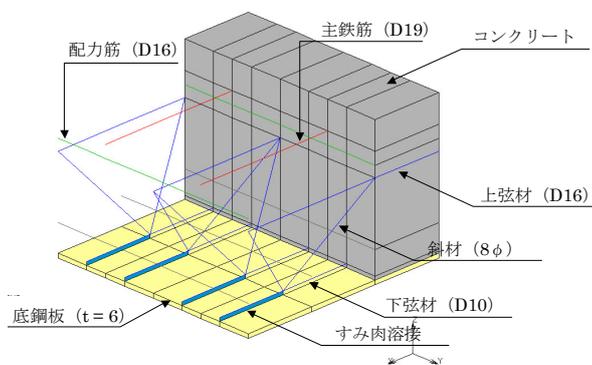
図4.2-3は、ずれ止めのスタッドをバネ要素でモデル化した例である。ロビンソンタイプのずれ止めは孔あき鋼板ジベルのような剛なジベルと比較して柔なジベルの頭付きスタッドであるため、解析における応力度の算出にあたって、バネ剛性の設定は押しぬきせん断試験結果をもとに適切に設定する必要がある。図4.2-4は、頭付きスタッドもソリッド要素としてモデル化した例、ずれ止めの機能をTリブとした例、トラスジベルのモデル化例である。



a) ロビンソンタイプ



b) Tリブタイプ



c) トラスジベルタイプ

図 4.2-4 ずれ止めのモデル化例

4.2.5 鉄筋のモデル化

鉄筋コンクリート床版のように床版コンクリート内部に相互に特別な拘束のない条件で配置されている鉄筋では、鉄筋はコンクリートに拘束された軸力部材と評価し、トラス要素やはり要素としてモデル化するのが一般的であり、本研究においても3.5.3において内部鋼材のモデル化の相違によるRC床版の疲労損傷過程の解析の比較を行ったが、結果に大きな差異は現れなかった。構造をより忠実に再現できるよう対象に応じて適切に使い分ける必要がある。

なお、トラス要素でモデル化する場合には鉄筋位置に接点を設ける必要があるため要素分割に制約を生じる場合がある。

図4.2-4に示すように、鋼コンクリート合成床版の場合にも鉄筋自体は補強リブや底鋼板とは特別な接合を介さず配置されている場合が多く、これらについても鉄筋と同様の扱いが行える。また解析目的によっては、鉄筋を含むコンクリート要素に鉄筋の存在の影響を見込むなどにより鉄筋そのもののモデル化が不要とできる場合もあるなど、着目している項目など解析目的に照らして適切なモデルを選択することが合理的である。

4.2.6 底鋼板部材とコンクリートの結合のモデル化

(1) 一般事項

鋼コンクリート合成床版では、コンクリート打設直後は鋼板とコンクリートとが付着しているが、荷重の履歴やコンクリートの乾燥収縮の影響などにより、比較的早期に少なくとも部分的には底鋼板とコンクリートとの付着は失われる。その後も繰り返し作用する荷重の影響により付着が失われる範囲が徐々に拡大するものと考えられる。耐荷力照査では安全側の評価となるように底鋼板と床版コンクリートの結合には底鋼板との付着を考慮しない条件で設計することが一般的である。

ただし、底鋼板と床版コンクリートの付着の有無は床版としてのモーメント分配には大きく影響しないものの、局部的な応力状態にはその影響があるため疲労耐久性の評価にあたっては、着目位置などに応じて安全側の評価となるようにその影響を適切に評価することが必要である。

結合のモデル化は、一般に FEM 解析における結合の扱いとして、底鋼板とコンクリートを剛結としたモデル、底鋼板とコンクリートをバネで結合したモデル、底鋼板とコンクリートを接触要素で結合した要素モデル、底鋼板とコンクリートを非接触としたモデルが用いられる。以下にそれぞれのモデル化の概要を示す。

1) 剛結としたモデル

隣接する鋼板要素とコンクリート要素を同一節点で結合する。

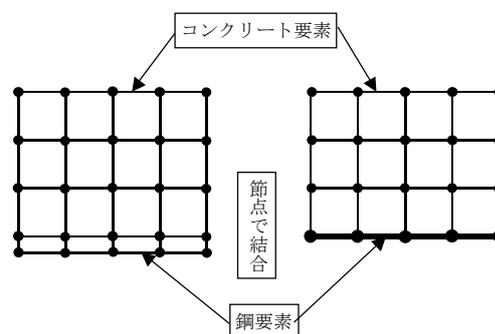


図 4.2-5 剛結モデル

2) 接触要素で結合したモデル

付着切れを考慮したモデルである。隣接する底鋼板要素とコンクリート要素の間を接触要素で結合する。接触要素は、コンクリート界面において両者のせん断力を無視し、境界面が接触して面圧が発生する場合には面圧力を伝達し、境界面での力が離れる方向の場合には、両面が自由に変位する特性をもつ要素である

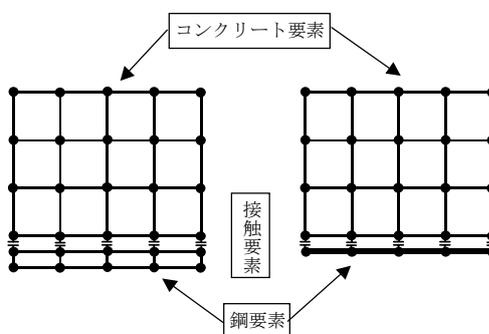


図 4.2-6 接触要素モデル

鋼コンクリート合成床版において付着が切れた状態を最も表現でき得るモデルであるが、材料非線形要素であり、接触の判定と適合条件とつり合い条件の収束をはかりながら解析が進められるので、解析時間は長くなりがちである。

3) バネで結合したモデル

付着切れを考慮したモデルである。隣接する底鋼板要素とコンクリート要素の間をバネ要素で結合する。付着の強弱を、バネ剛性の大小で表現したモデルである。予め付着が切れる領域がわかっている場合は、適用することができると考えられる。バネ剛性は一般に、バネ要素および付着要素で表現することができる。

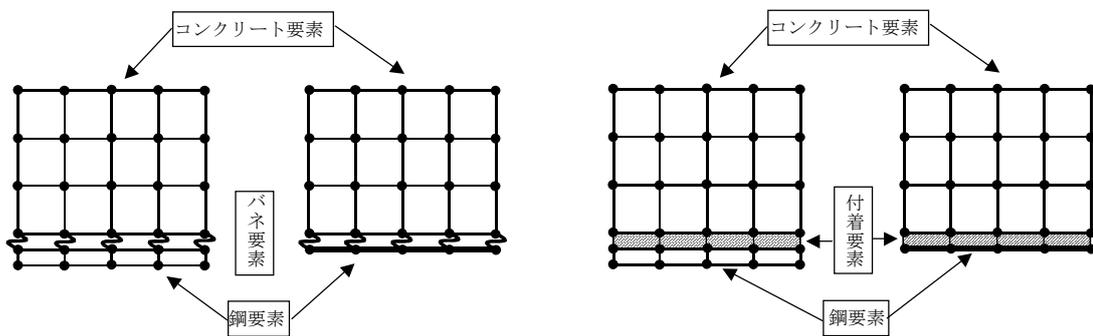


図 4.2-7 バネ結合および付着要素結合モデル

4) 非接触としたモデル

付着切れを考慮したモデルである。隣接する底鋼板要素とコンクリート要素は非接触として、2重節点で扱う。付着を切ったモデルであり、予め付着が切れる領域がわかっている場合は適用することができると考えられる。

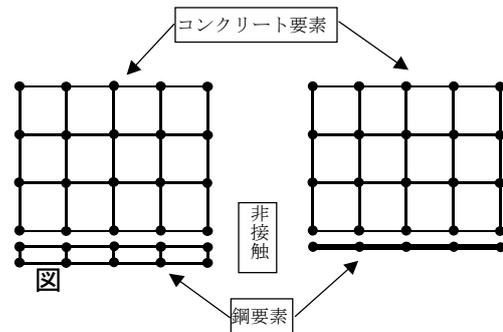


図 4.2-8 非接触としたモデル

(2) 結合モデルの選定

結合のモデル化手法の選定によって評価に比較的大きな差異が生じると考えられる着目項目には以下のようなものがある。これらの検討にあたっては特に解析目的に応じた適切なモデル化が必要である。

- ・橋の立体的な挙動や床版の断面力の評価。
- ・曲げにより発生する床版上下縁の応力度の評価。
- ・鋼コンクリート合成床版の内部の局所的な応力の評価。

例えば、橋の立体的な挙動や床版の断面力を評価するための3次元解析では、一般に、鋼部材とコンクリート部材は剛結として、リブやずれ止めをモデル化せずに解析を行う場合が多い。これは、異方性の程度が小さい鋼コンクリート合成床版の場合には、剛結モデルと付着を考慮したモデルで断面力の分配の評価に解析上大きな差異が生じないことや、付着が切れる領域が全床版域ではなく床版の一部にとどまることなどを理由としたものである。図4.2-9に要素分割例を示す。

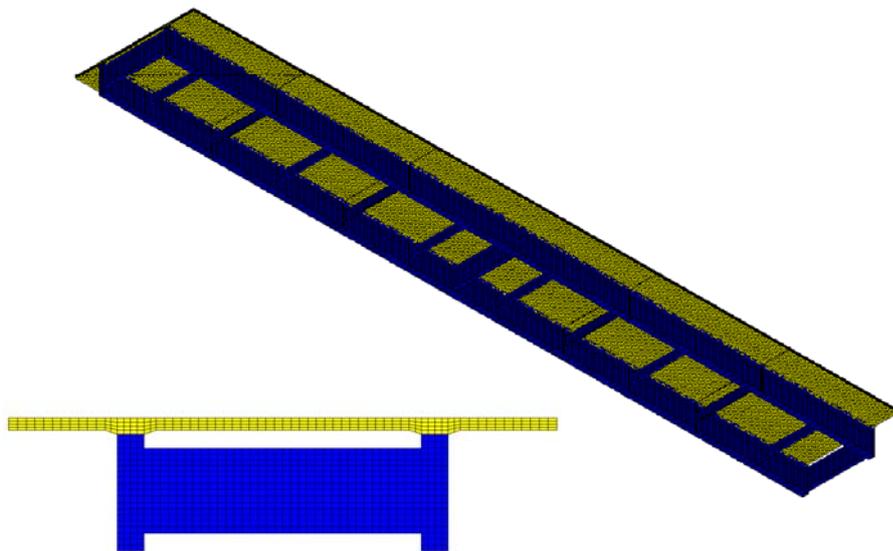


図 4.2-9 床版の断面力を調べるための床版の3次元要素分割例

このようなモデルにより、実橋において曲げにより発生する床版上下縁の応力度の算出を行うには、解析結果に対して、輪荷重走行試験の結果を用いて、解析による応力値を補正して実構造における応力度を評価することが必要である。

なお、曲げにより発生する床版上下縁の応力度の算出、および、鋼コンクリート合成床版の内部の局所的な応力の算出とモデル化の関係については4.3および4.4で考察する。

4.2.7 要素分割

(1) 一般事項

鋼コンクリート合成床版の床版各部の応力を3次元有限要素法解析によって求める場合、要素分割の粗さは解析精度に大きく影響する。したがって着目する部位と解析の目的に応じて適切な要素分割を行う必要がある。

一般に要素分割が粗すぎると解析精度は下がる傾向にあるが、曲げによって発生する床版上下縁の応力度を算出する場合には、ソリッド要素を用いて床版厚さ方向に3層以上の分割を行えば一般的な道路橋の床版の場合には比較的高い精度で応力を算出できることが既往の研究からわかっている（図4.2-10参照）。

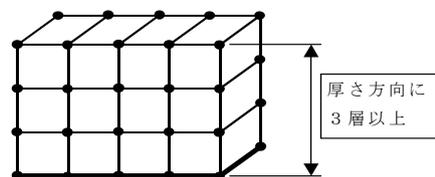


図 4.2-10 床版の厚さ方向のメッシュ分割

一方、鋼コンクリート合成床版の内部の局所的な応力状態を把握するためには、少なくとも着目点近傍ではある程度以上細かな要素分割を行わなければならない。ただし、あまりに要素分割を細かくしてもコンクリートの骨材寸法である 20mm 程度以下の要素で算出される計算応力は骨材の存在など床版コンクリート材料の不均質性を考慮すると一概に精度が高くなるとも限らず解析精度としての信頼性も向上しない。したがって、補強リブなど内部鋼材のモデル化の影響により鋼材近傍の要素分割が結果的に 20mm 以下になる場合もあるが、このように小さく分割された要素で算出される計算応力の評価にあたっては要素分割の影響について念頭に置く必要がある。

以上のように要素分割の大きさについては解析目的と構造の特性に応じて適切な水準となるように設定しなければならない。

本研究では、RC床版を対象に 3.5.2 で要素サイズを変えた場合の解析による疲労耐久性の試算の比較を行っているが、鉄筋以外に補強鋼材などが無いRC床版では床版厚さ方向の要素サイズ（分割数=5）を変えない条件では平面寸法を2倍にしても結果に大きな差異がなかった。

(2) モデル化例

一例として、リブ上の局部応力を着目点とした3次元のメッシュ分割例を図4.2-11に示す。リブ厚が16mmであり、16mm角を基準にした要素分割である。これ以上要素分割を細かくするとメッシュ分割に起因する応力集中の影響を考慮して、解析値を評価する必要があると考えられる。

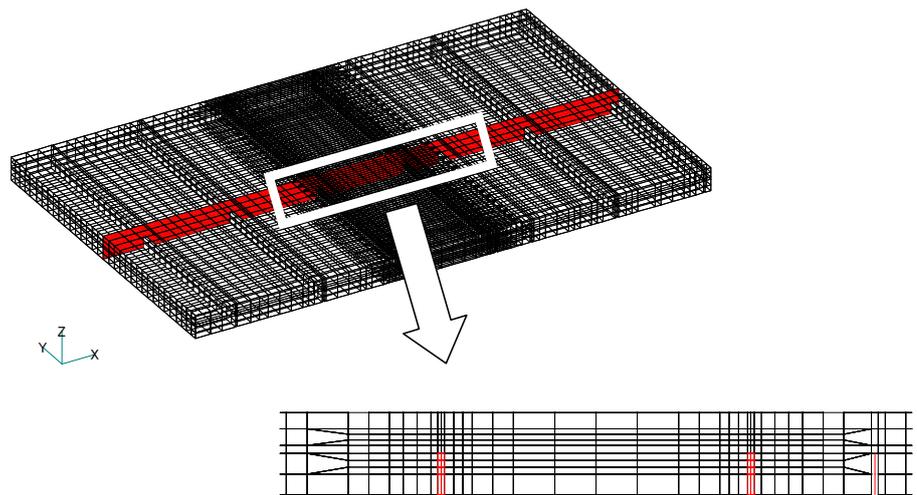


図 4.2-11 局部応力に着目した場合のメッシュ分割例
(土木研究所における輪荷重走行試験の試験体の要素分割例)

4.2.8 荷重条件

荷重については、解析目的に応じて、載荷方法を適切に選定することが必要である。

荷重強度そのものは解析目的に応じて与えられるが、解析モデルへの荷重の与え方については一般に舗装による荷重分散は安全側と考慮して無視し、輪荷重の設置面積に対応する解析モデルの接点位置に等分布荷重として与える。通常、T荷重の載荷面である20×50cmが標準である。

鋼コンクリート合成床版の場合、床版内部に様々な鋼材が配置されており疲労耐久性の照査にあたって3章に示したような各部の応力状態とその変化に着目する場合には浅い位置にある補強リブ等の鋼材近傍で局部的に大きな応力が生じたり応力状態が荷重の移動につれて複雑に変化することがある。このため荷重載荷面の要素分割が粗すぎると浅い位置では解析上荷重分散が十分でなく、床版コンクリート内部の応力状態の再現性が十分得られなくなる。このような場合には移動荷重の載荷位置にあたる部分だけ要素分割を細かくするなどの配慮が必要となる。

また、3章で提案した解析的に疲労被害則に則って床版要素の疲労ダメージの蓄積とその破壊を計算する場合には、要素毎の応力やひずみの変化量の算出精度が結果に直接影響を及ぼす。内部に鉄筋のみが配置されたRC床版では荷重の移動載荷に伴って各部で応力等の急変はないが、補強鋼材などが配置された鋼コンクリート合成床版では載荷位置によっては応力の向きや大きさが急変し、疲労耐久性の推定に用いるそれらの変動の最大値や交番が載荷位置の設定によっては適切に抽出されない恐れもある。載荷位置や載荷部のモデル化の設定にあたってはこの点にも注意が必要である。

4.2.9 2次元モデルによる解析

床版の応力をFEMで解析する場合は、3次元の立体解析を利用する 경우가一般的であるが、解析目的により着目部位が限られている場合に、経済性や設計の合理化の観点から2次元モデルの適用が検討されることがある。

たとえば、リブ周りのコンクリートの局部応力に着目しようとする場合に3次元モデルで非線形要素を用いようとするれば、計算容量や計算時間が膨大になり現実的ではない。局部応力を算出する着目位置が明らかな場合には、4.6に示すように2次元モデルが適用できると考えられる。この場合、3次元モデルとの境界条件の整合性がとれるように図4.2-12に例を示すように、2次元平面ひずみモデルを適用し、3次元モデルのせん断力や曲げモーメントが再現できるように載荷荷重や解析モデルの床版支間を調整することで3次元モデルによる場合との比較が可能なモデル化を行って解析することも考えられる。

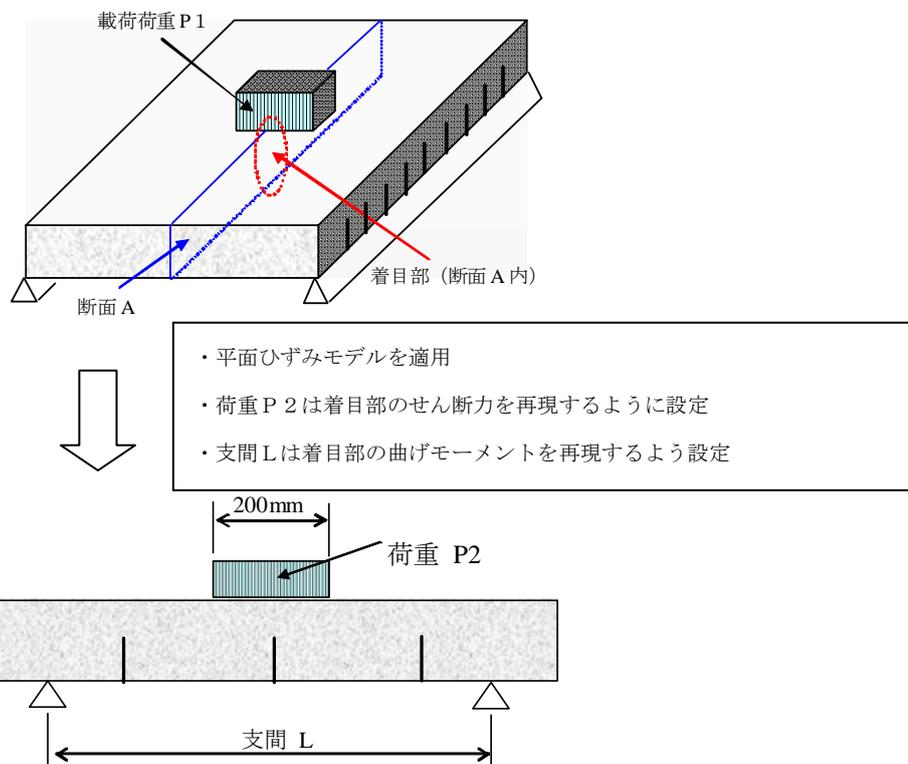


図 4.2-12 3次元モデルと2次元モデルの整合

計算容量や計算時間を少なくするために複数のモデル化手法を境界条件設定して組み合わせさせて解析する方法もある。4.6に示す方法は、図4.2-13に示すように、変形の境界条件として骨組み要素で要素分割した板に2次元のシェル要素を組み込むものである。着目断面に対してシェル要素で要素分割を行い、骨組み要素で解析した版の変形を境界条件としてシェル要素に与えるものである。このような解析は、着目する部位が限られる場合に適用できると考えられる。

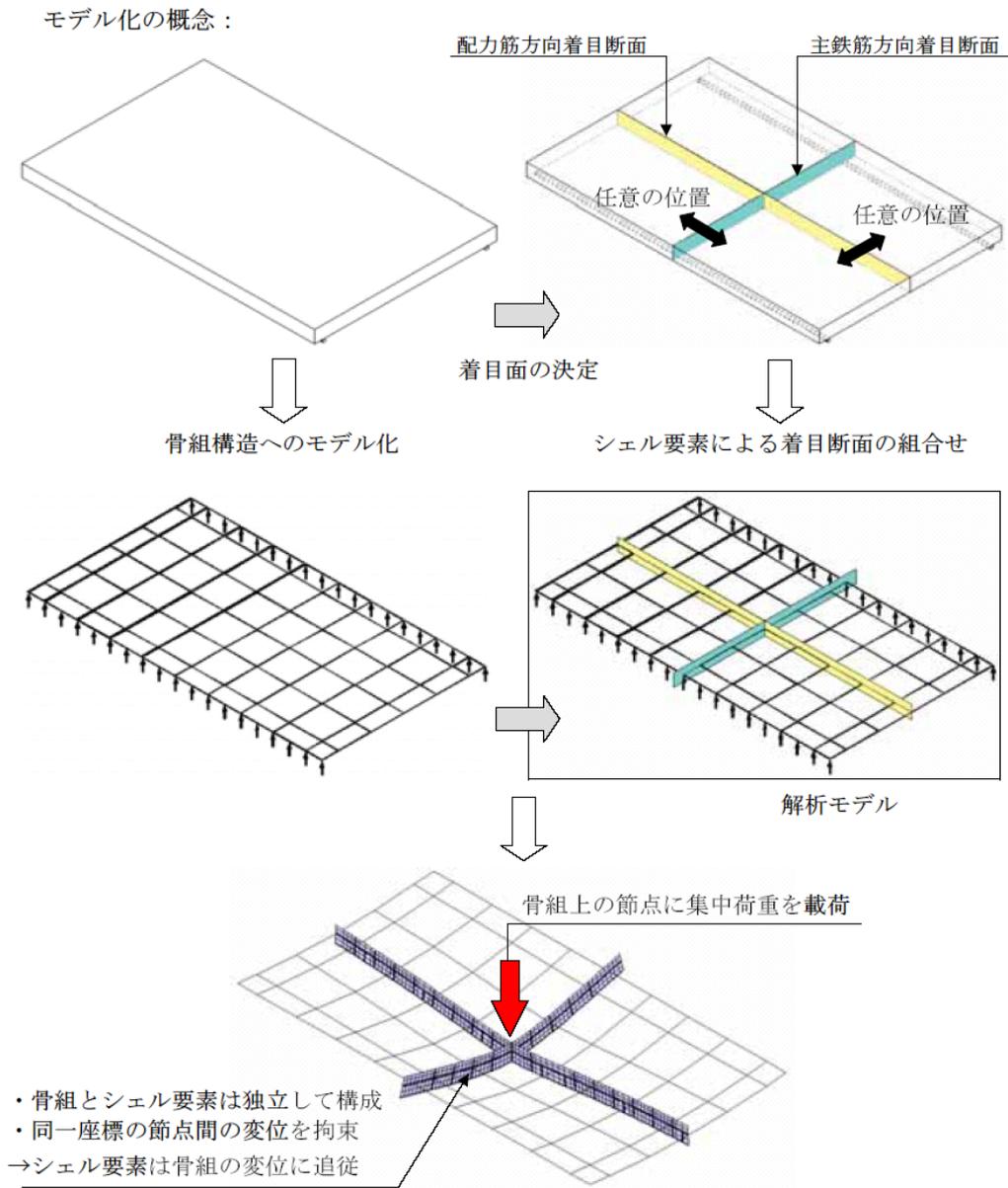


図 4.2-13 骨組要素と 2次元シェル要素による解析

4.3 モデル化条件の相違の影響についての検討

4.3.1 検証モデルと解析ケース

(1)概要

実橋床版の疲労耐久性を評価するための床版各部の応力の算出に用いる解析モデルのモデル化条件の相違が解析結果に及ぼす影響を検討する。

ここでは主として旧土木研究所で輪荷重走行試験が行われたロビンソンタイプの鋼コンクリート合成床版の供試体を対象に検討を行った。

構造のモデル化にあたって考慮すべき項目は前項に述べたとおりコンクリートと鋼部材からなる構成材料のモデル化と、鋼コンクリート合成床版に固有となるずれ止めのモデル化、鋼部材とコンクリートの結合のモデル化等がある。このうち、構成材料については材料非線形性の有無を、結合のモデル化については接触要素と剛結合とした場合の差異を中心として検討することとし、荷重条件については載荷荷重の大小の差による応答値の非線形性の影響に着目する。

なお、ずれ止めのモデル化にあたっては実験値と解析値の整合を図りながら個別のタイプ毎に妥当性を検証する必要があるが、本項で対象とする鋼コンクリート合成床版はロビンソンタイプであるため、スタッドジベルの押抜きせん断試験結果をもとにバネ剛性を設定したケースについても検討を行った。

(2)解析モデル

解析モデルの対象とする試験供試体の構造諸元は図 4.3-1、表 4.3-1 に示すとおりである。試験供試体のモデル化では、構成する部材に対して表 4.3-2 に示す要素をそれぞれ選定することとした。解析モデルは図 4.3-2 に示すとおりである。

このうち、横リブについてはソリッド要素とシェル要素を混合して使用しているが、着目する部位の近傍においてはより忠実なモデル化となるようにソリッド要素を、また着目する部位から離れた位置となる横リブは部材剛性を適切に評価したうえでモデルの簡素化のためにシェル要素を選定した。スタッドジベルはばね要素として非線形バネを考慮するケースも設定した。

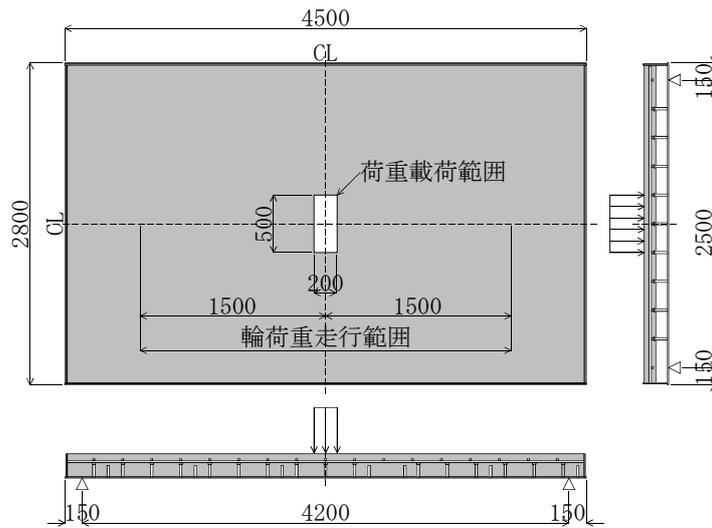


図 4.3-1 試験供試体

表 4.3-1 試験供試体の構造諸元

部材	項目	単位	構造諸元
コンクリート	版厚	mm	200
	設計基準強度	N/mm ²	30
底鋼板	板厚	mm	9
補強リブ	断面	mm	100×16
	橋軸方向間隔	mm	750
スタッド	寸法	mm	φ16×120
	橋軸方向間隔	mm	250
	橋軸直角方向間隔	mm	250
主鉄筋 (橋軸直角方向)	呼び径	—	D19
	間隔	mm	250
配力筋 (橋軸方向)	呼び径	—	D16
	間隔	mm	250

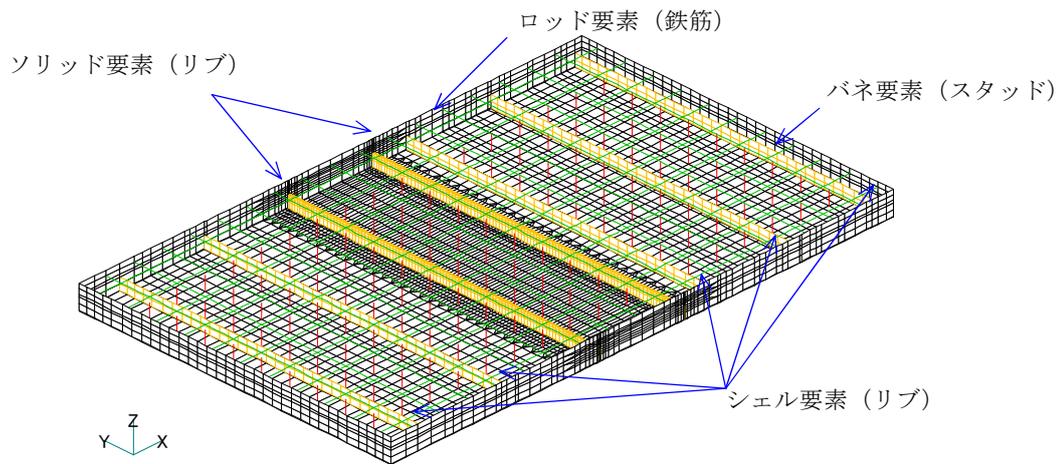


図 4.3-2(a) 解析モデル (鋼部材の配置)

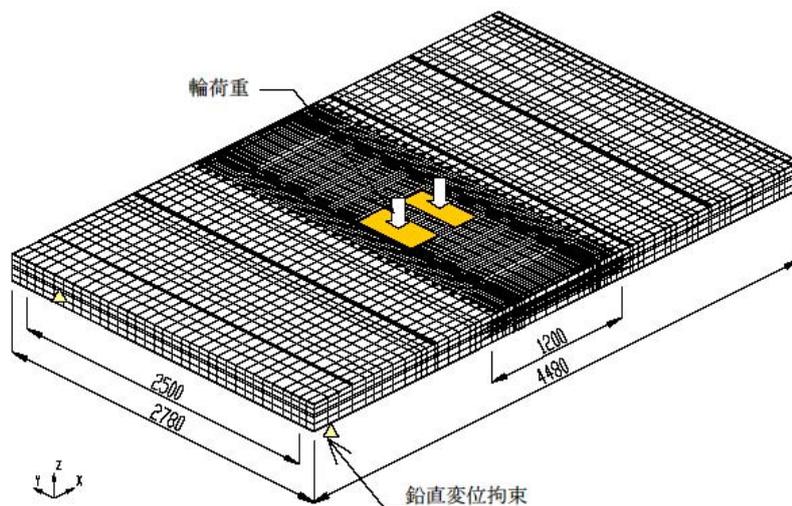


図 4.3-2(b) 解析モデル (外観)

表 4.3-2 各構造部位と適用要素

部位	要素	諸元
コンクリート	ソリッド	厚さ : 200 mm
底鋼板	シェル	板厚 : 9 mm
リブ	シェル、ソリッド	板厚 : 16 mm
スタッド	ばね	$K_x=185,000 \text{ N/mm}^*$ $K_y=185,000 \text{ N/mm}^*$ $K_z=323,000 \text{ N/mm}$
鉄筋	ロッド	主鉄筋 : D19 配力筋 : D16
※非線形バネとして相対変位 δ について $0.5\text{mm} \leq \delta < 1.0\text{mm}$: 剛性を 1/2 $1.0\text{mm} \leq \delta < 2.5\text{mm}$: 剛性を 1/3 $2.5\text{mm} \leq \delta$: 剛性を 1/4 にそれぞれ低下		

(3) 解析ケース

1) コンクリートのモデル化（材料特性）

コンクリートの材料特性は、材料非線形性を考慮しない場合とする場合の2ケースとし、試験結果より表 4.3-3 に示す特性値を設定した。材料非線形性を考慮する場合、コンクリートの破壊基準は Drucker-Prager 則によるものとし、応力とひずみの関係は図 4.3-3 に示すとおりとした。なお、鋼材の材料特性値は設計値としている。

表 4.3-3 材料特性

材料	ヤング率 (N/mm ²)	ポアソン比	降伏応力 σ_y または 引張強度 σ_t (N/mm ²)
鋼材	$E_s=2.0 \times 10^5$	0.300	$\sigma_y=245$
コンクリート	$E_c=2.88 \times 10^4$	0.167	$\sigma_t=3.68$

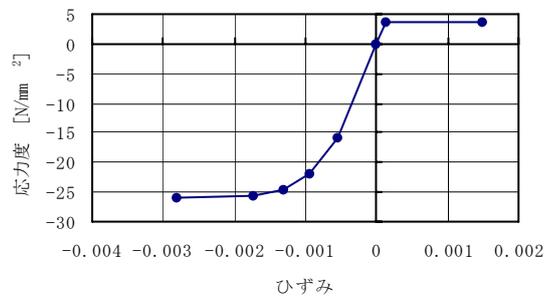


図 4.3-3 コンクリートの応力とひずみの関係

2) ずれ止め（スタッド）の特性

スタッドは、剛性の評価と大きな応力が作用した場合の非線形性の考慮の影響を検討するため、荷重-変位関係を表すバネ定数として、実験値から設定した線形ばねによるケースと、非線形ばねとしたケースを比較する。非線形ばねの設定にあたっては、既存の実験結果などを参考に、水平方向ばね定数 (K_x 、 K_y) を相対変位 0.2mm までの値から相対変位が大きくなるほど低下するように設定した。

3) 底鋼板部材とコンクリートの結合条件

コンクリートと底鋼板との境界面の条件は、表 4.3-4 に示すように、付着を無視して接触を考慮する場合と剛結合とする場合の2ケースを設定した。接触を考慮する場合の要素は、境界面が接触して面圧が発生する場合には面圧力を伝達し、境界面での力が離れる方向の場合には、両面が自由に変位する特性を持つ要素間の結合条件である。

表 4.3-4 要素の結合条件

境界面による解析ケース		接触考慮	剛結合
コンクリート	底鋼板	接触	剛結
	リブ (ソリッドおよびシェル)	接触	剛結
	鉄筋	剛結	剛結

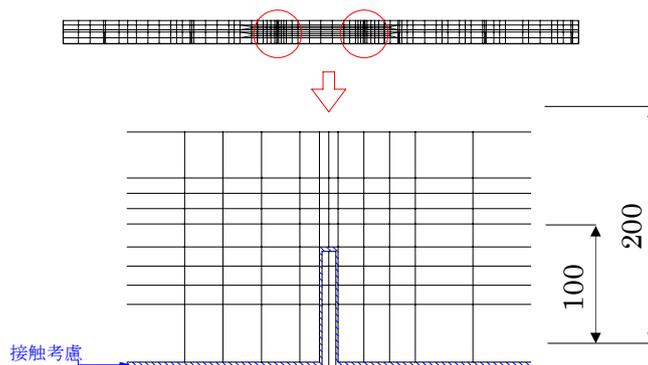


図 4.3-4 接触を考慮した要素のモデル化

4) 要素分割

解析モデルの要素分割にあたっては、リブや鉄筋、さらに荷重載荷の位置を考慮のうえ着目する部位の近傍とそれ以外の一般部で分割方法を変える。前者についてはより詳細な応力分布状況を確認することを目的として 20~30mm 程度の要素となるように、また後者については床版厚さ方向は 5 分割、供試体の軸方向および軸直角方向は 80~100mm 程度の要素となるように分割した。

5) 載荷荷重の条件

鋼コンクリート合成床版では比較的剛性の大きな鋼材が床版内部に配置される場合があり、載荷荷重の大きさによっては鋼材に接したコンクリート部分などでは局部的に応力の性状が変化したり、あるいは非線形性の影響が現れる可能性もある。そのため本検討では 98kN および 280kN の 2 ケースの荷重強度の解析を行って比較した。

6) 解析ケース総括

以上を考慮して設定した解析ケースの一覧を表 4.3-5 に示す。

なお、解析条件の相違が結果に及ぼす影響の考察にあたっては、主として底鋼板応力度とコンクリート上縁応力度に着目し、それぞれ底鋼板の補剛リブ位置とリブ間位置での値を比較する。

それぞれの値の算出にあたっては着目位置の直上に載荷位置がある条件とした。

図 4.3-5 に底鋼板応力度算出の着目位置を示す。また、図 4.3-6 にコンクリート上縁応力度の算出における着目位置を示す。

表 4.3-5 解析ケース (解析モデル 図 4.3-3 に対応するケース)

解析ケース	鋼-コンクリート間の結合条件	コンクリートの材料特性	スタッドばね定数	載荷荷重
①	剛結	弾性	—	98 kN
②	接触考慮		$K_x=K_y=1.875 \times 10^5$ N/mm $K_z=3.23 \times 10^5$ N/mm	280 kN
③	剛結	弾塑性 $\sigma_t=3.68$ N/mm ²	—	98 kN
④	接触考慮		$K_x=K_y=1.875 \times 10^5$ N/mm [*] $K_z=3.23 \times 10^5$ N/mm	280 kN

※相対変位 0.2mm までの値。0.5mm で 1/2、1.0mm で 1/3、2.5mm で 1/4 に低下する。

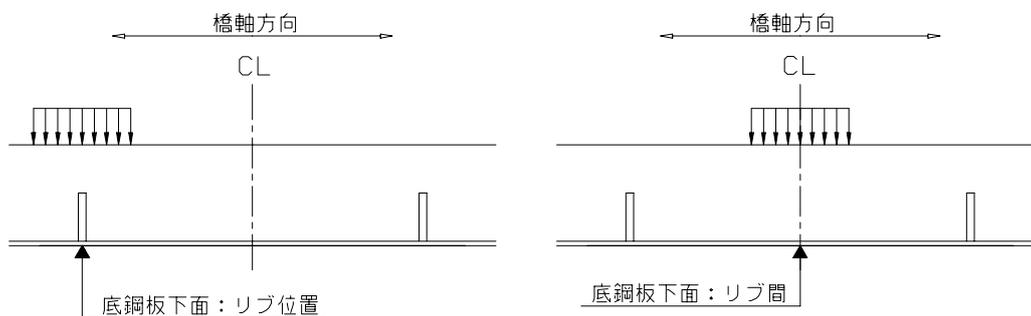


図 4.3-5 底鋼板応力度算出の着目位置

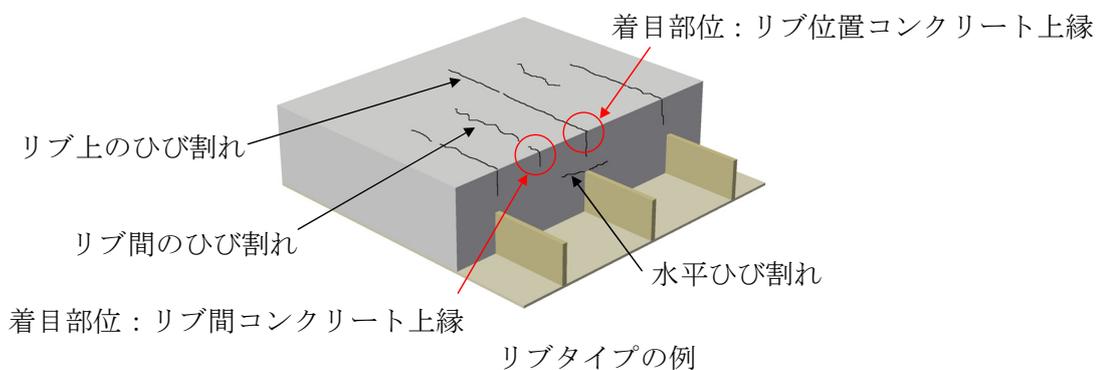


図 4.3-6 コンクリートの着目部位

4.3.2 解析結果（モデル条件の相違が解析結果に及ぼす影響について）

(1) コンクリートのモデル化（材料特性）

底鋼板パネルの構造を考慮して、底鋼板部材とコンクリートの結合条件の相違による影響を着目位置における底鋼板の橋軸方向応力度に着目して算出した。結果を表 4.3-6 に示す。

表 4.3-6 底鋼板応力度算出結果

コンクリート	着目位置	載荷荷重	剛結 N/mm ²	接触 N/mm ²
弾性①	リブ位置	98kN	11.37	8.64
		280kN	32.48	24.68
	リブ間	98kN	10.70	5.97
		280kN	30.57	17.06
弾塑性②	リブ位置	98kN	11.68	8.65
		280kN	32.55	25.08
	リブ間	98kN	11.20	6.02
		280kN	31.09	17.13
比率 ②/①	リブ位置	98kN	1.03	1.00
		280kN	1.00	1.02
	リブ間	98kN	1.05	1.01
		280kN	1.02	1.00

着目した全てのケースで、コンクリートのモデル条件の差異は 5%以内である。載荷荷重が 280kN のケースではコンクリートに発生する応力も実橋の供用条件の床版と比較してもかなり大きなレベルとなっているが、本検討で設定した程度のコンクリート特性の差異は底鋼板の応力算出にはほとんど影響が生じないと言える。

同様に、底鋼板応力度算出と同じ状態で、同じ位置のコンクリート上縁応力度について比較した。その結果を表 4.3-7 に示す。

表 4.3-7 コンクリート上縁応力度算出結果

コンクリート	着目位置	載荷荷重	剛結 N/mm ²	接触 N/mm ²
弾性①	リブ位置	98kN	-1.96	-3.39
		280kN	-5.60	-9.69
	リブ間	98kN	-1.93	-2.18
		280kN	-5.51	-6.23
弾塑性②	リブ位置	98kN	-1.98	-3.25
		280kN	-5.47	-9.24
	リブ間	98kN	-1.94	-2.09
		280kN	-5.38	-6.23
比率 ②/①	リブ位置	98kN	1.01	0.96
		280kN	0.98	0.95
	リブ間	98kN	1.01	0.96
		280kN	0.98	1.00

底鋼板応力度と同様に、コンクリートのモデル条件の差異は 5%以内である。載荷荷重が 280kN のケースではコンクリートに発生する応力も実橋の供用条件の床版と比較してもかなり大きなレベルとなっているが、本検討で設定した程度のコンクリート特性の差異はコンクリート上縁応力度の応力算出に対してもほとんど影響が生じないと言える。

2) ずれ止め (スタッド) の特性

表 4.3-5 に示すようにケース②とケース④では、コンクリート特性と連動してスタッドのバネ定数も変えている。鋼とコンクリート間の結合条件として接触を考慮する場合は、供用後にある程度時間が経過した実橋と変形挙動がより近いと想定されたため実験に基づく非線形バネを考慮している。解析においては、コンクリート特性とスタッドのバネ定数の二つのパラメータを同時に変えているためそれぞれの影響についての考察を正確に行なうことはできないが、解析結果から発生応力度の差異は 5%以内であることからすればスタッドのバネ定数の相対変位に基づく剛性低下の影響は採用した荷重条件下においてはあまり大きくないものと推察される。

なお、解析ケース①と②では鋼とコンクリートの結合条件を剛結としているため、スタッドのばね定数は考慮していない。

3) 底鋼板部材とコンクリートの結合条件

底鋼板パネルの構造を考慮して、底鋼板部材とコンクリートの結合条件の相違による影響を着目位置における底鋼板の橋軸方向応力度に着目して算出した。その結果を表 4.3-8 および図 4.3-7 に示す。

表 4.3-8 底鋼板応力度算出結果

載荷荷重	着目位置	コンクリート	A剛結 N/mm ²	B接触 N/mm ²	比率 B/A
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	11.37	8.64	0.76
		弾塑性	11.68	8.65	0.74
	リブ間	弾性	10.70	5.97	0.56
		弾塑性	11.20	6.02	0.54
荷重② P=280kN N	リブ位置	弾性	32.48	24.68	0.76
		弾塑性	32.55	25.08	0.77
	リブ間	弾性	30.57	17.06	0.56
		弾塑性	31.09	17.13	0.55

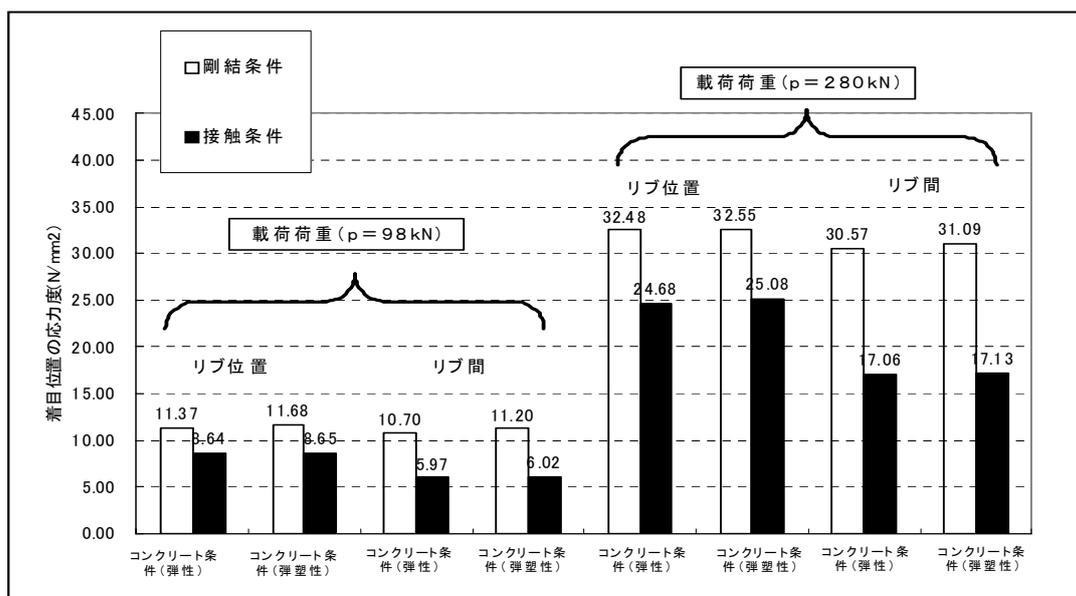


図 4.3-7 底鋼板応力度算出結果の比較

解析結果より、底鋼板の発生応力は、底鋼板とコンクリートの結合条件は接触のみを考慮するよりも剛結とした方が、底鋼板の補剛リブとの位置関係や載荷荷重の大小にかかわらず大きく算出される。また、補剛リブ間の方が補剛リブ位置での計算結果より剛結と接触の条件による底鋼板応力の乖離が大きい。これは、補剛リブ位置ではコンクリートと底鋼板の相対移動が補剛リブによって拘束されるため底鋼板とコンクリートを接触条件としても相対移動が小さくなっていることが関係していると考えられる。

このように、底鋼板の応力に着目する場合には底鋼板とコンクリートを剛結した方が安全側の評価となるが、補剛構造など床版構造によって条件の差が計算応力に及ぼす影響が

変化するため、着目位置や載荷条件との関係、底鋼板と一体となった補剛構造と床版コンクリートの拘束条件を考慮して設計に用いる計算応力を適切に見込む必要があると考えられる。

同様に、底鋼板応力度算出と同じ状態で、同じ位置のコンクリート上縁応力度について比較した。その結果を表 4.3-9 および図 4.3-8 に示す。

表 4.3-9 コンクリート上縁応力度算出結果

載荷荷重	着目位置	コンクリート	剛結 N/mm ²	接触 N/mm ²
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	-1.96	-3.39
		弾塑性	-1.98	-3.25
	リブ間	弾性	-1.93	-2.18
		弾塑性	-1.94	-2.09
荷重② P=280kN	リブ位置	弾性	-5.60	-9.69
		弾塑性	-5.47	-9.24
	リブ間	弾性	-5.51	-6.23
		弾塑性	-5.38	-6.23
②/①	リブ位置	弾性	2.86	2.86
		弾塑性	2.76	2.84
	リブ間	弾性	2.85	2.86
		弾塑性	2.77	2.98

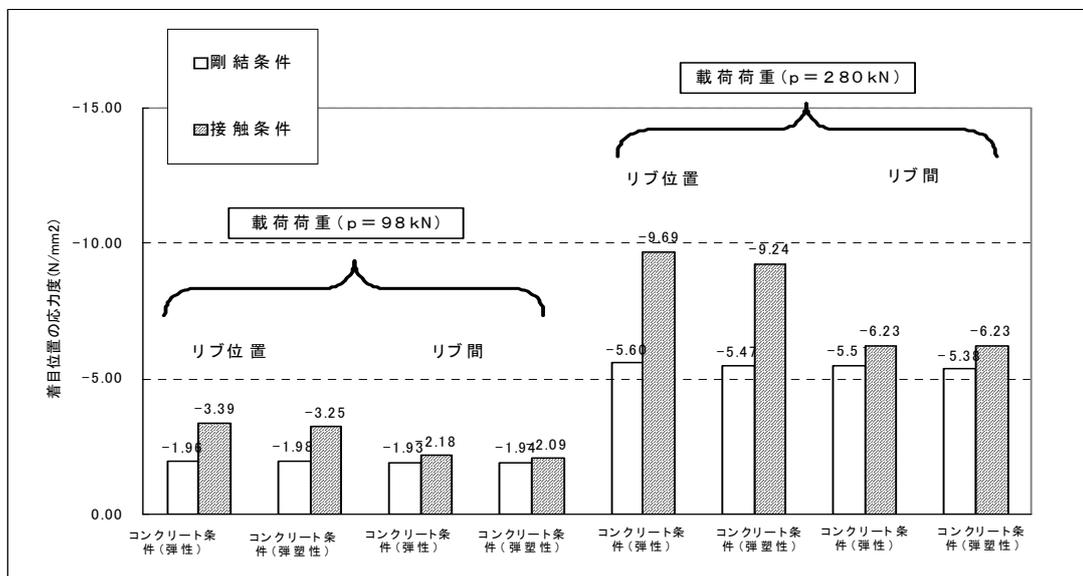


図 4.3-8 コンクリート上縁応力度算出結果の比較

この解析では、底鋼板応力度とは逆に、底鋼板とコンクリートの結合条件を剛結とするよりも接触のみを考慮した方が、底鋼板の補剛リブとの位置関係や載荷荷重の大小にかかわらず、コンクリート上縁に発生する応力は大きく算出される。また、補剛リブ間よりも補剛リブ位置での計算結果の方が剛結と接触の条件による底鋼板応力の乖離が大きい。この傾向も底鋼板の応力度とは逆の傾向である。

これらは、底鋼板と補剛リブがコンクリートとより一体となって挙動する部位では底鋼板側の剛性が相対的に高くなり中立軸が下方に下がる関係で、底鋼板に大きな応力が負担される一方でコンクリート上縁の発生応力が小さくなり、逆に底鋼板側のコンクリートとの拘束が弱い場合には底鋼板側の負担が下がる一方でコンクリート上縁側の応力が大きくなるものと考えられる。

このように、本検討の条件では影響は小さいものの、底鋼板の応力に着目する場合には底鋼板とコンクリートを剛結した方が安全側の評価となるが、コンクリート上縁の応力に着目する場合には、底鋼板とコンクリートを接触条件とした方が安全側の評価となる。また、これらの程度や傾向は、底鋼板と一体となった補剛構造による床版コンクリートの拘束条件など床版構造によっても計算応力に及ぼす影響が変化する結果となっている。

以上のことから、鋼コンクリート合成床版の応力の算出にあたっては、着目部位の計算応力に対する載荷荷重位置、底鋼板と一体となった補剛構造と床版コンクリートの拘束条件の相違やその影響の程度を考慮して、それらの条件を適切に見込む必要がある。

5) 載荷荷重の条件

底鋼板パネルの構造を考慮して、各種条件を変えて底鋼板の橋軸方向応力度に着目して載荷荷重の大きさに対する感度を比較した結果および参考としてそれらに該当する実験値を表 4.3-10 に示す。実験値の応力度は、荷重①に対しては移動輪荷重走行試験の初期の段階における 98kN 換算値を、また荷重②に対しては 24 万回走行終了時点において 280kN を静的に載荷した時の測定値をそれぞれ示す。

表 4.3-10 底鋼板応力度と載荷荷重の関係

載荷荷重	着目位置	コンクリート	剛結 N/mm ²	接触 N/mm ²
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	-1.96	-3.39
		弾塑性	-1.98	-3.25
	リブ間	弾性	-1.93	-2.18
		弾塑性	-1.94	-2.09
荷重② P=280k N	リブ位置	弾性	-5.60	-9.69
		弾塑性	-5.47	-9.24
	リブ間	弾性	-5.51	-6.23
		弾塑性	-5.38	-6.23
②/①	リブ位置	弾性	2.86	2.86
		弾塑性	2.76	2.84
	リブ間	弾性	2.85	2.86
		弾塑性	2.77	2.98

解析結果によれば、本検討で考慮した底鋼板とコンクリートの結合条件やコンクリート特性、着目位置などの条件によらず、底鋼板の計算応力の載荷荷重の相違に対する変化率（感度）はほぼ同じであった。また、リブ間における実験値との比較においては、接触を考慮した解析結果と比較的良く一致している。

同様に、底鋼板応力度算出と同じ状態で、同じ位置のコンクリート上縁応力度について比較した。表 4.3-11 に結果の一覧を示す。

表 4.3-11 コンクリート上縁応力度と載荷荷重の関係

載荷荷重	着目位置	コンクリート	剛結 N/mm ²	接触 N/mm ²
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	11.37	8.64
		弾塑性	11.68	8.65
	リブ間	弾性	10.70	5.97
		弾塑性	11.20	6.02
荷重② P=280k N	リブ位置	弾性	32.48	24.68
		弾塑性	32.55	25.08
	リブ間	弾性	30.57	17.06
		弾塑性	31.09	17.13
②/①	リブ位置	弾性	2.86	2.86
		弾塑性	2.79	2.90
	リブ間	弾性	2.86	2.86
		弾塑性	2.78	2.85

底鋼板応力度同様に、底鋼板とコンクリートの結合条件やコンクリート特性、着目位置などの条件によらず、コンクリート上縁応力度の計算応力の載荷荷重の相違に対する変化率（感度）はほぼ同じであった。

このように、ある程度以上板厚が確保されており、現行設計基準を満足する設計が行なわれる鋼コンクリート合成床版であれば底鋼板やコンクリート上縁の応力を算出する場合には、実橋で載荷が想定される最大級の荷重条件までは、着目する部位に応じて設定されるその他のモデル化の条件に対して解析上載荷する荷重の大きさによって結果の傾向が大きく影響を受けることはあまりないと考えられる。

なお一般には、弾性解析では載荷荷重の増加に比例して算出する応力度も増加するが、弾塑性解析では荷重増分以上に応力度が増加することが予測されるが、本検討ではその影響は明確でない。

4.4 モデル化レベルの相違の影響についての検討

4.4.1 検討概要

詳細に3次元でモデル化を行ったFEM解析に対して、比較的簡易なモデル化による解析を行った場合に、鋼コンクリート合成床版の計算応力等の解析結果にどのような影響が生じるのかについて検討を実施した。ここでは、3種類のモデル化レベルに対して検討を行っている。対象とする床版は4.3項の検討対象と同じである。

4.4.2 平面要素および立体要素を用いた弾性解析

鋼コンクリート合成床版を、合成構造や複合構造で実績のある鋼板を平面要素（シェル要素）、コンクリートを立体要素（ソリッド要素）としてモデル化する場合（以下、平面・立体組合せモデル）について検討を行う。この解析では底鋼板とコンクリートを剛結した場合と、底鋼板のスタッド位置とコンクリートの変位を拘束することで、擬似的にスタッドによるずれ止めを考慮した結合条件の2ケースを比較した。解析モデルを図4.4-1に示す。

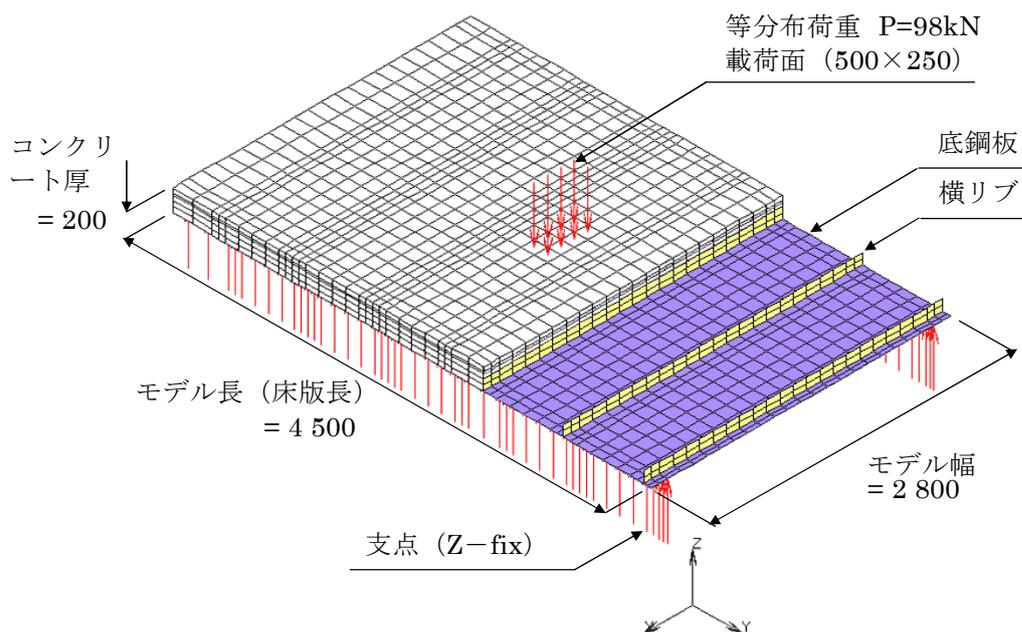


図 4.4-1 解析モデル（平面・立体組合せモデル）

解析結果を、4.3の検討に用いた詳細モデルによる結果と比較する。表4.4-1、図4.4-2に底鋼板応力度の算出結果を示す。

表 4.4-1 底鋼板応力度の比較

載荷荷重	着目位置	コンクリート	平面・立体組合せ		詳細解析	
			拘束 A	剛結 B	剛結 A	接触 B
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	7.31	12.39	11.37	8.64
		弾塑性			11.68	8.65
	リブ間	弾性	7.53	11.57	10.70	5.97
		弾塑性			11.20	6.02

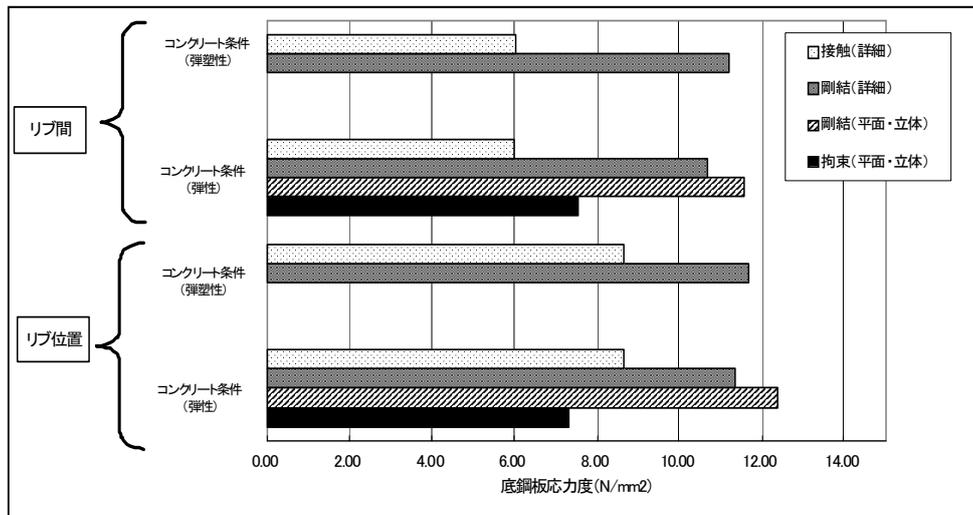


図 4.4-2 底鋼板応力度の比較

本検討で用いた平面・立体組合せモデルでは、底鋼板応力度については、底鋼板とコンクリートを剛結した条件では図 4.3-2 に示す解析モデル（以下、詳細モデルという）による場合と概ね一致した結果が得られる。一方、底鋼板をスタッド位置でのみ拘束したモデルによる場合は、詳細モデルの接触モデルに近い底鋼板応力が算出され、着目位置によって詳細モデルによる場合との応力の大小関係の傾向が異なる結果となった。同様に、コンクリート上縁応力度を算出比較した結果を表 4.4-2、図 4.4-3 に示す。

表 4.4-2 コンクリート上縁応力度の比較

載荷荷重	着目位置	コンクリート	平面・立体組合せ		詳細解析	
			拘束 A	剛結 B	剛結 C	接触 D
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	-2.43	-2.16	-1.96	-3.39
		弾塑性			-1.98	-3.25
	リブ間	弾性	-2.18	-1.96	-1.93	-2.18
		弾塑性			-1.94	-2.09

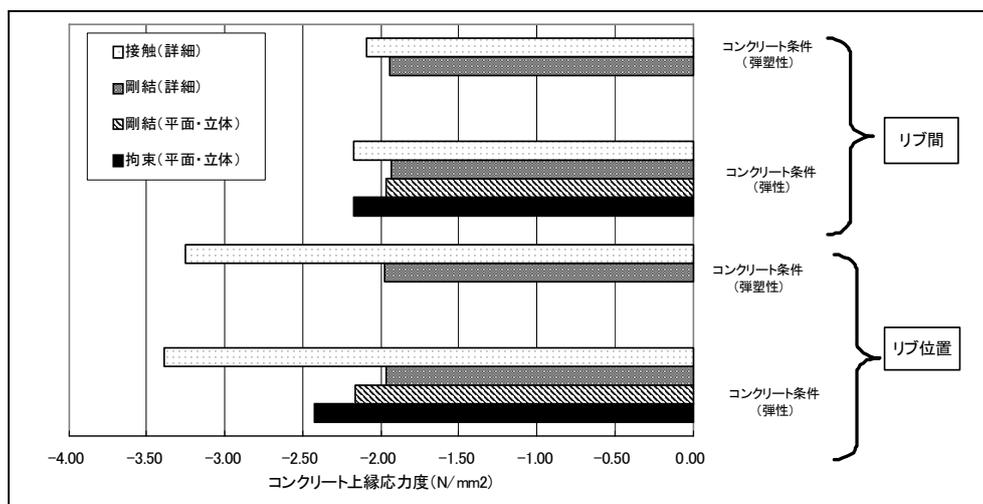


図 4.4-3 コンクリート上縁応力度の比較

コンクリート上縁応力度は、底鋼板応力度と同様に、底鋼板とコンクリートを剛結した条件では詳細モデルによる場合と概ね一致した。また底鋼板をスタッド位置でのみ拘束したモデルの場合、底鋼板応力度と異なり、リブ位置では詳細モデルによる接触条件よりは剛結条件に近い応力が算出された。

以上より、平面立体組合せモデルでも、本検討の条件ではスタッドを擬似的に表現した部分拘束を行うことで床版コンクリートと底鋼板は強く拘束され床版全体としては底鋼板が剛結された場合に近い挙動が得られ、コンクリート上縁部の応力算出にずれ止めの部分的な拘束状態を詳細にモデルに反映することで有意な差は生じていない。

なお、ずれ止めの影響を部分的な拘束条件で表現する場合には、底鋼板の計算応力が一様にならないことに注意が必要である。

4.4.3 立体要素を用いた弾性解析

鋼板、スタッド、コンクリートなど部材を構成する要素に全て立体要素（ソリッド要素）を用いた場合について検討を行った。鋼とコンクリートの結合条件は、剛結またはスタッド頭部のみ剛結した2ケースとした。解析モデルを図4.4-4に示す。

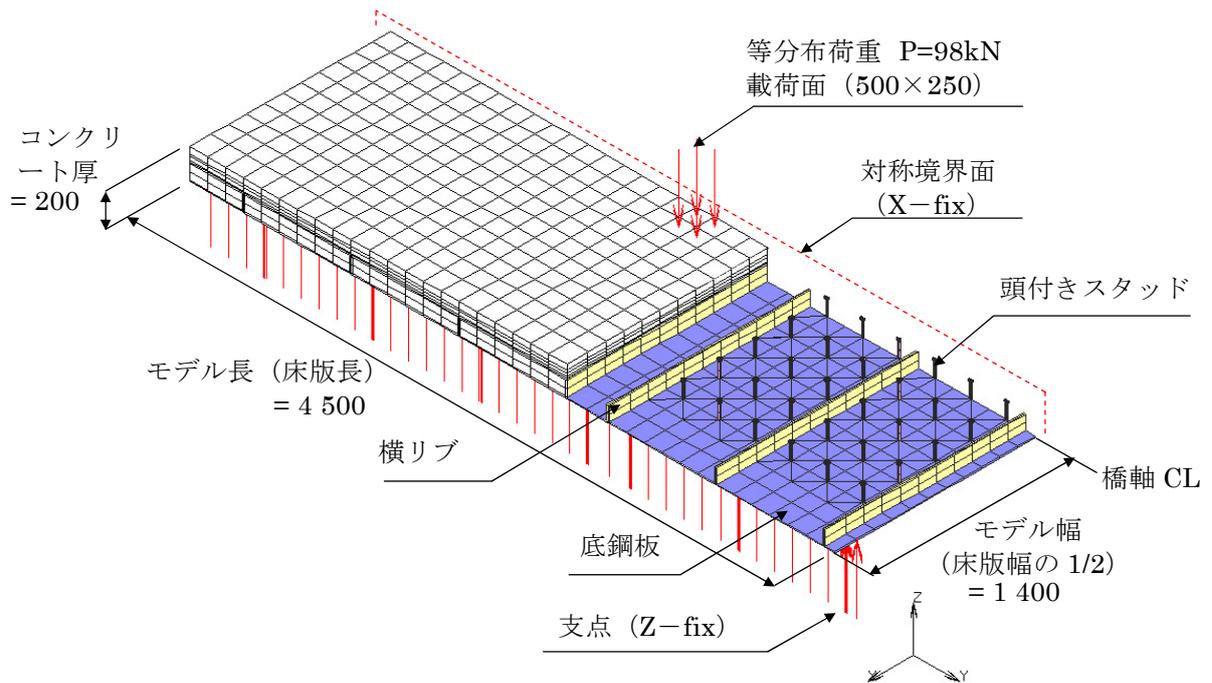


図 4.4-4 解析モデル (1/2 モデル)

解析結果を、4.3 項の検討に用いた詳細モデルによる結果と比較する。表 4.4-3、図 4.4-5 に底鋼板応力度の算出結果を示す。

表 4.4-3 底鋼板応力度の比較

載荷荷重	着目位置	コンクリート	立体要素		詳細解析	
			ずれ止め A	剛結 B	剛結 A	接触 B
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	6.37	12.07	11.37	8.64
		弾塑性			11.68	8.65
	リブ間	弾性	16.66	15.45	10.70	5.97
		弾塑性			11.20	6.02

注) 立体要素のケースの、リブ間の底鋼板応力はスタッド中心を除く軸径範囲の平均値

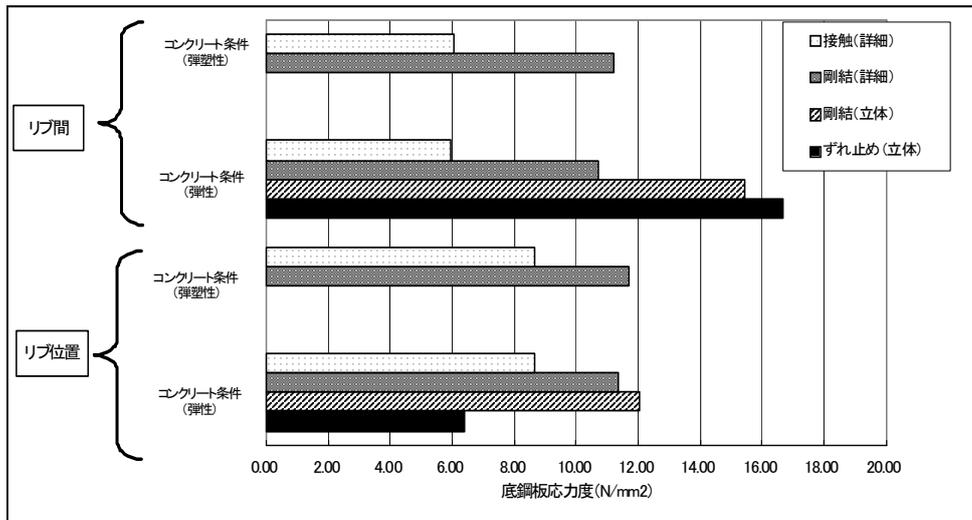


図 4.4-5 底鋼板応力度の比較

本検討で用いた立体要素モデルでは、底鋼板応力度についてリブ位置における剛結条件では詳細モデルに近い応力が算出されるのに対して、スタッド頭部のみ剛結したモデルにおける底鋼板の応力は詳細モデルより小さめの値となった。この傾向は、平面要素および立体要素を用いた弾性解析と同様であり、解析上立体モデルとの有意な差はないものと考えられる。

一方、リブ間では底鋼板とコンクリートを剛結した条件とスタッド頭部のみを剛結した条件でいずれも詳細モデルより大きな応力が算出され、また、平面要素と立体要素を用いた弾性解析との比較においても応力値はかなり大きく、上述とは異なる傾向が見られる。同様に、コンクリート上縁応力度を算出比較した結果を表 4.4-4、図 4.4-6 に示す。

表 4.4-4 コンクリート上縁応力度の比較

載荷荷重	着目位置	コンクリート	立体要素		詳細解析	
			ずれ止め A	剛結 B	剛結 C	接触 D
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	-3.08	-2.10	-1.96	-3.39
		弾塑性			-1.98	-3.25
	リブ間	弾性	-2.45	-2.12	-1.93	-2.18
		弾塑性			-1.94	-2.09

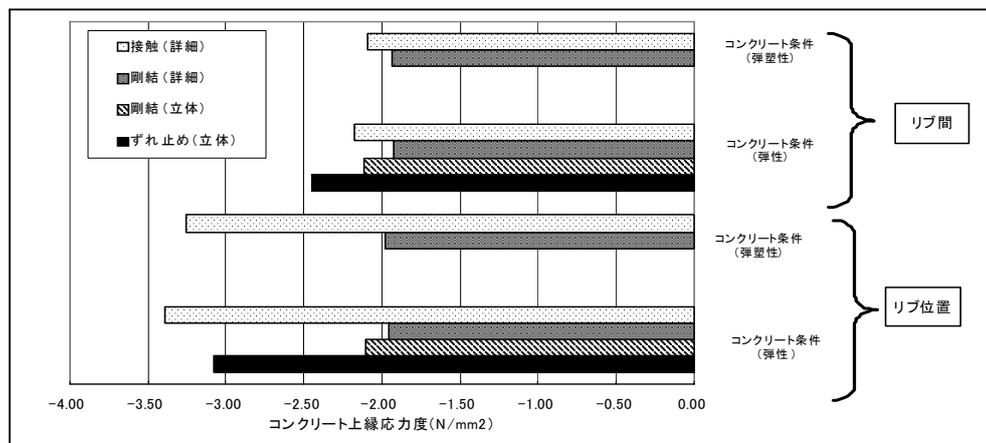


図 4.4-6 コンクリート上縁応力度の比較

コンクリート上縁応力度については、底鋼板応力度と同様に、底鋼板とコンクリートを剛結した条件では詳細モデルによる場合と大きな乖離はない。また、スタッド頭部のみが剛結されたモデルによる場合は、リブ位置およびリブ間において詳細モデルによる接触条件と多少の差はあるものの比較的近い応力が算出された。

以上より、すべて立体要素でモデル化した本検討の条件では、スタッド頭部のみで床版コンクリートとの剛結を行うと、コンクリート上縁応力については詳細モデルと比較的に近い解析結果が得られるが、底鋼板応力については詳細モデルとの比較において危険側となることもあり得る。ただし、底鋼板に発生する応力レベルは比較的小さいので定性的な傾向を把握したうえで検討に使用するにあたっては大きな問題はないものと思われる。

4.4.4 骨組と平面要素を組み合わせた弾性解析

ここでは、床版を骨組部材（はり要素）で構成し平面要素（シェル要素）を用いた着目断面を組み合わせたモデルによる解析を行う。これは任意の位置の応力度を比較的簡易なモデル化によって算出することを意図したものである。解析モデルを図 4.4-7 に示す。

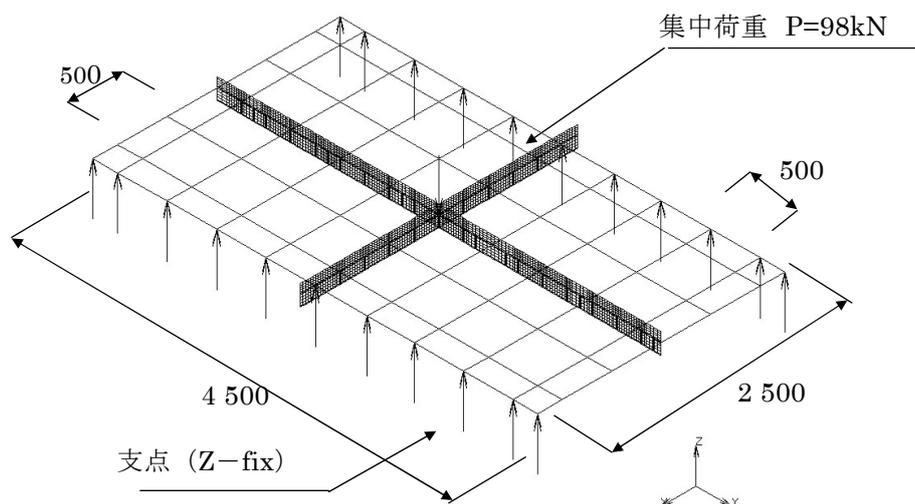


図 4.4-7 解析モデル（1/2 モデル）

解析結果を、4.3 項の検討に用いた詳細モデルによる結果と比較する。表 4.4-5、図 4.4-8 に底鋼板応力度の算出結果を示す。

表 4.4-5 底鋼板応力度算出結果（P=98kN）

載荷荷重	着目位置	コンクリート	骨組・平面モデル (剛結)	詳細解析	
				剛結 A	接触 B
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	6.92	11.37	8.64
		弾塑性		11.68	8.65
	リブ間	弾性	10.32	10.70	5.97
		弾塑性		11.20	6.02

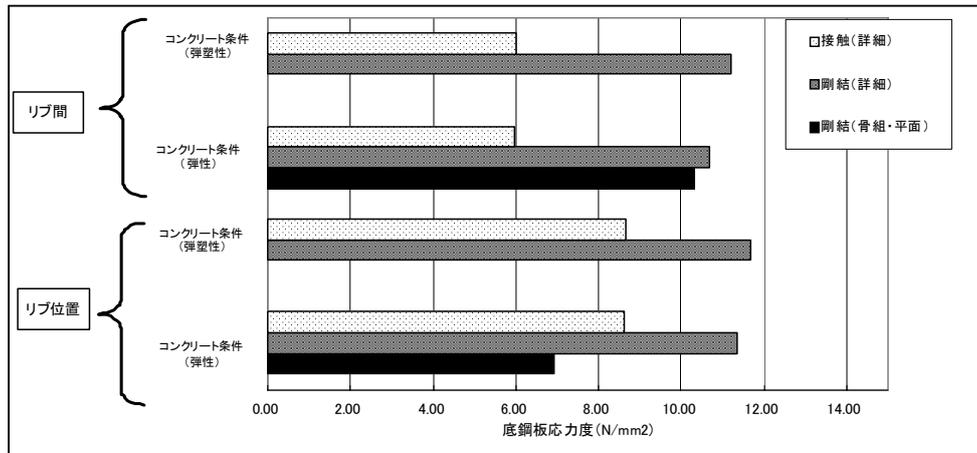


図 4.4-8 底鋼板応力度の比較

本検討で用いた骨組と平面要素モデルの組み合わせによる解析では、底鋼板応力がリブ間では詳細モデルと近いものとなったが、リブ位置では接触モデルのそれを下回る値が算出され、詳細モデルの剛結条件とは乖離が大きい結果となった。理論的には、剛結の結合条件とすることによって底鋼板への応力分担が詳細モデルにおける接触要素を考慮した場合と比較して大きくなるため、本解析条件は底鋼板については応力伝達の機構が十分に評価できていない可能性がある。

同様に、コンクリート上縁応力度を算出比較した結果を表 4.4-6、図 4.4-9 に示す。

表 4.4-6 コンクリート上縁応力度の比較

載荷荷重	着目位置	コンクリート	骨組・平面モデル (剛結)	詳細解析	
				剛結 C	接触 D
荷重① P=98kN	リブ位置	弾性	-1.48	-1.96	-3.39
		弾塑性		-1.98	-3.25
	リブ間	弾性	-2.64	-1.93	-2.18
		弾塑性		-1.94	-2.09

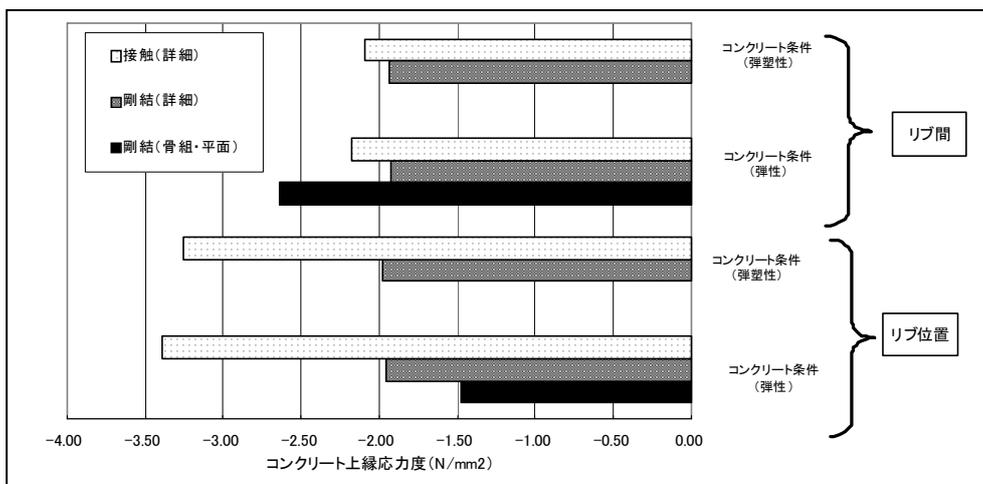


図 4.4-9 コンクリート上縁応力度の比較

コンクリート上縁応力度については、リブ間では詳細モデルに比べて大きな値となり、リブ位置では逆に詳細モデルより小さな応力となった。条件によっては、危険側の評価となるので適用にあたっては注意を要する。

以上より、本検討のように骨組モデルと平面モデルを組み合わせるモデル化された解析は、モデル化の作業が容易であり計算の負荷が小さいことは大きなメリットとなるが、解析結果については危険側の応答値を与えることもあり得るので、特性をよく検討したうえで適用する、あるいは評価の対象を限定することが必要である。

4.4.5 解析検討のまとめ

輪荷重走行試験の試験体を対象として、解析モデル化の水準を変えた場合にそれが計算応力などの結果に及ぼす影響について各種の検討を行なった。本検討で得られた結果をまとめると次のとおりである。

(a) 平面要素および立体要素を用いた弾性解析

- ・底鋼板応力について、底鋼板とコンクリートを剛結とした場合は詳細モデルの剛結モデルに、また、底鋼板をスタッド位置でのみ拘束したモデルとした場合も詳細モデルの接触モデルに概ね近い結果となった。
- ・コンクリート上縁応力について、底鋼板とコンクリートを剛結とした場合は詳細モデルの剛結モデルとほぼ同等の、また、底鋼板をスタッド位置でのみ拘束したモデルとした場合、詳細モデルの接触モデルに対してリブ間ではほぼ同等の、またリブ位置では小さな値を示した。

- ・これらの結果より、平面要素および立体要素を用いた弾性解析は、詳細モデルと比べてモデル化が容易であり比較的精度の良い結果が得られるため、部分的に評価には注意を要するものの検討にあたっては有効な手段となり得る。

(b) 立体要素を用いた弾性解析

- ・底鋼板応力について、底鋼板とコンクリートを剛結とした場合は、詳細モデルの剛結モデルと比較してリブ間では大きく、リブ位置ではほぼ同等の値となった。また、ずれ止めの評価としてスタッドの頭部のみ拘束したモデルでは詳細モデルの接触モデルと比較してリブ間では大きく、リブ位置では小さな値となった。
- ・コンクリートの上縁応力について、底鋼板とコンクリートを剛結とした場合は詳細モデルの剛結モデルにほぼ同等の、またずれ止めの評価としてスタッドの頭部のみ拘束したモデルでは詳細モデルの接触モデルと概ね近い結果となった。
- ・これらの結果より、立体要素を用いた弾性解析は、詳細モデルと比較してコンクリート上縁応力に着目する場合は概ね同等の結果が算出されるが、底鋼板応力については境界条件によってはばらつきが大きくなるので、評価にあたっては注意が必要である。

(c) 骨組と平面要素を組み合わせた弾性解析

- ・底鋼板応力について、リブ間では詳細モデルの剛結モデルとほぼ同等の、またリブ位置では小さな値となった。
- ・コンクリート上縁応力について、リブ間では詳細モデルの剛結モデルより大きく、またリブ位置では逆に小さな値となった。
- ・これらの結果より、骨組と平面要素を組み合わせた弾性解析は、詳細モデルの剛結モデルと比較してリブ間の底鋼板応力を除いてばらつきが大きい結果となったので、評価にあたっては注意が必要である。

以上のように底鋼板に発生する応力度を安全側に評価するという視点からは、鋼とコンクリートの結合条件は結果の評価に大きな影響を及ぼすことがわかった。その他、コンクリートの材料特性については弾性と弾塑性とする場合では有意な差が生じないこと、また、照査荷重として与えた 1 組の輪荷重として 98kN と 280kN ではその変形挙動において底鋼板やコンクリート上縁応力に着目した場合、接触要素を考慮することの影響はあまり生じていないことなどが確認できた。

4.5 鋼コンクリート合成床版の応力状態の算出

4.5.1 概要

鋼コンクリート合成床版は、鉄筋やP C鋼材のみが配置されたコンクリート系の床版と異なって、底面に鋼板が種々の形式のずれ止めで床版コンクリートと一体化されていること、鉄筋以外のさまざまな形式の鋼材が床版コンクリート内部に配置される場合が多いことが特徴である。そのため自動車荷重の荷重によって生じる床版各部の応力などの応答を求める場合、着目している応答に対して、適切に解析モデルの条件やモデル化の水準を選択する必要があり、前節までで条件等の差異が解析結果に及ぼす影響について試算を行って考察した。

ここでは、輪荷重走行試験によって床版コンクリートの内部でひびわれが生じるなど破壊により近い状態までの挙動が得られている鋼コンクリート合成床版の実験供試体を対象に、前節の検討を踏まえた比較的詳細なモデル化を行い解析を行った。

本検討で比較対象とした床版供試体の構造の概要と輪荷重走行試験後に切断した供試体の断面を図 4.5-1 に示す。

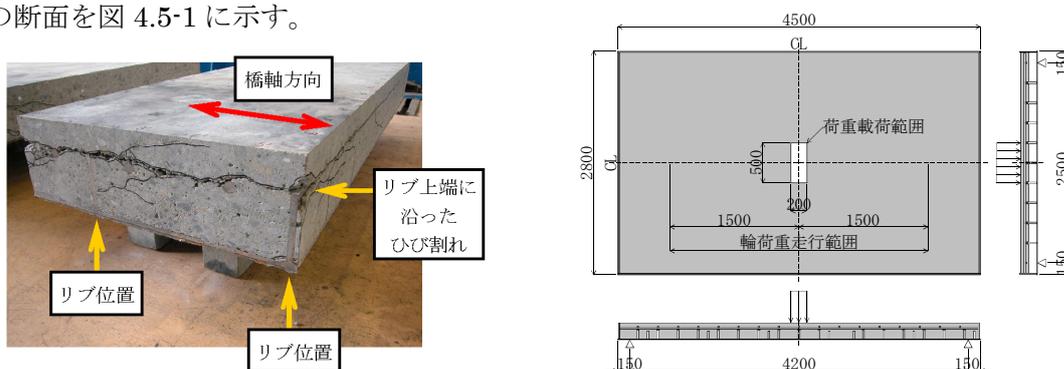


図 4.5-1 水平ひび割れとせん断により生じる局所的な応力

図 4.5-2 に解析モデルの概要を示す。

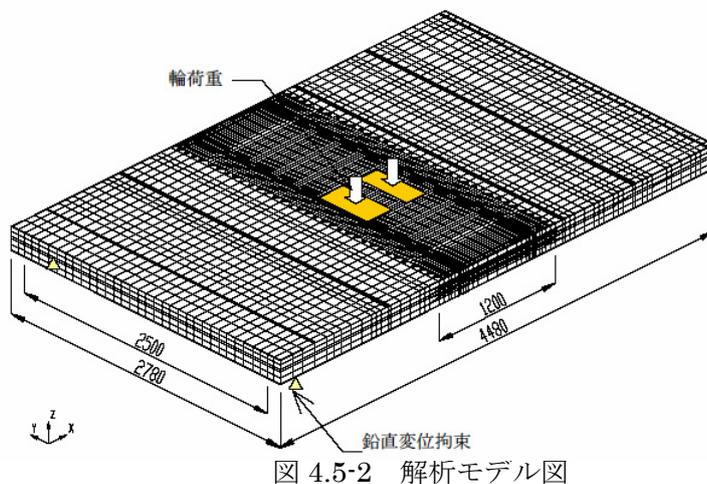


図 4.5-2 解析モデル図

鋼-コンクリート間の結合は、剛結と接触の両方の条件で試算を行った。図 4.5-3 に剛結と接触の各条件でリブのほぼ直上に輪荷重 (98kN)が載荷された同状態の試算結果を示す。

剛結モデルでは圧縮応力ベクトルが載荷点を中心に放射状に広がっているのに対して、接触モデルでは引張応力が支配的であり、リブ天端位置において橋軸方向にベクトルの方向が傾いている。これは剛結モデルではリブとコンクリートが一体に挙動したのに比べ、接触モデルではリブとコンクリートが離れる方向に抵抗しないため載荷位置でリブがコンクリートの支点となったような挙動になったものと考えられる。

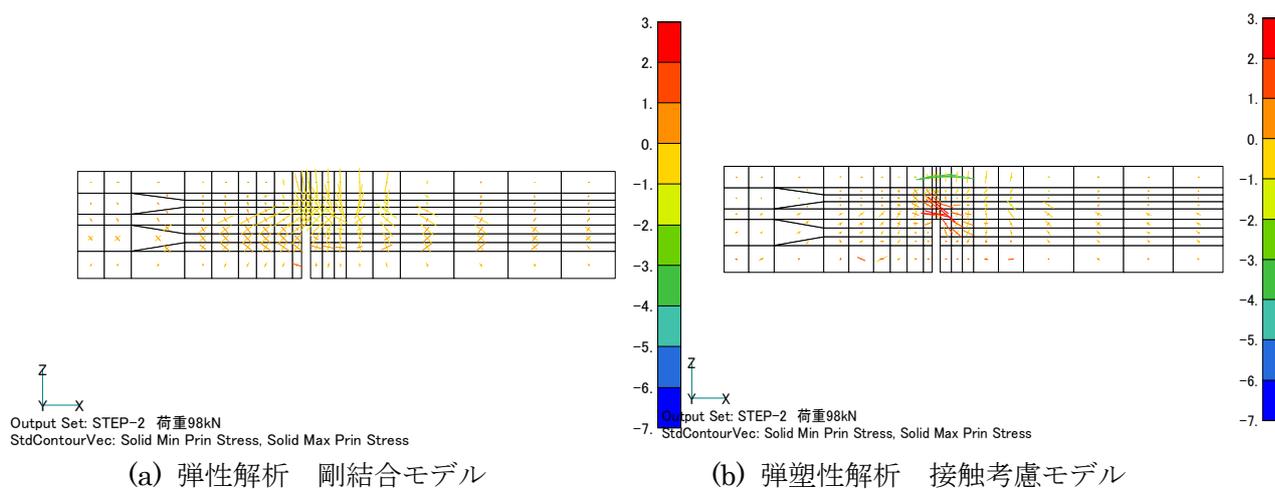


図 4.5-3 主応力ベクトル図

鋼コンクリート合成床版ではずれ止めによって機械的に結合されている部位以外では鋼部材とコンクリートの付着が積極的にとられてはいない。したがって長期的には応力履歴や変形によって一般部における両者の付着は失われる可能性が高く、剛結モデルによるリブ周辺の内部応力の算出結果はこの点からは過少評価となる危険性があることがわかる。

よって本節の検討では全て接触を考慮したモデルによる解析を基本とする。

4.5.2 解析方法

ここでは荷重位置を変えた場合に床版コンクリート内部の補剛リブ周りの局部応力が解析的にどのように評価されるかについて検討した。

解析モデルは、4.3 の検討と同様である。解析ケースを表 4.5-1 に示す。

表 4.5-1 解析ケース

比較対象モデル	弾塑性／200mm	弾性／200mm	弾塑性／160mm	弾性／160mm
床版厚	200mm	200mm	160mm	160mm
解析方法	弾塑性解析	弾性解析	弾塑性解析	弾性解析
載荷荷重	280KN	280KN	280KN	280KN
鋼-コンクリート結合条件	接触考慮	接触考慮	接触考慮	接触考慮

コンクリートの材料特性については、弾性、弾塑性、床版厚については 200mm、160mm のそれぞれについて実施した。なお本解析については材料非線形／線形が内部の応力振幅に与える影響を比較するため、載荷荷重については 280KN とした。

荷重載荷位置は、図 4.5-5 に示した○印のリブに着目して STEP-A～H の 8 カ所について 280kN を載荷した。

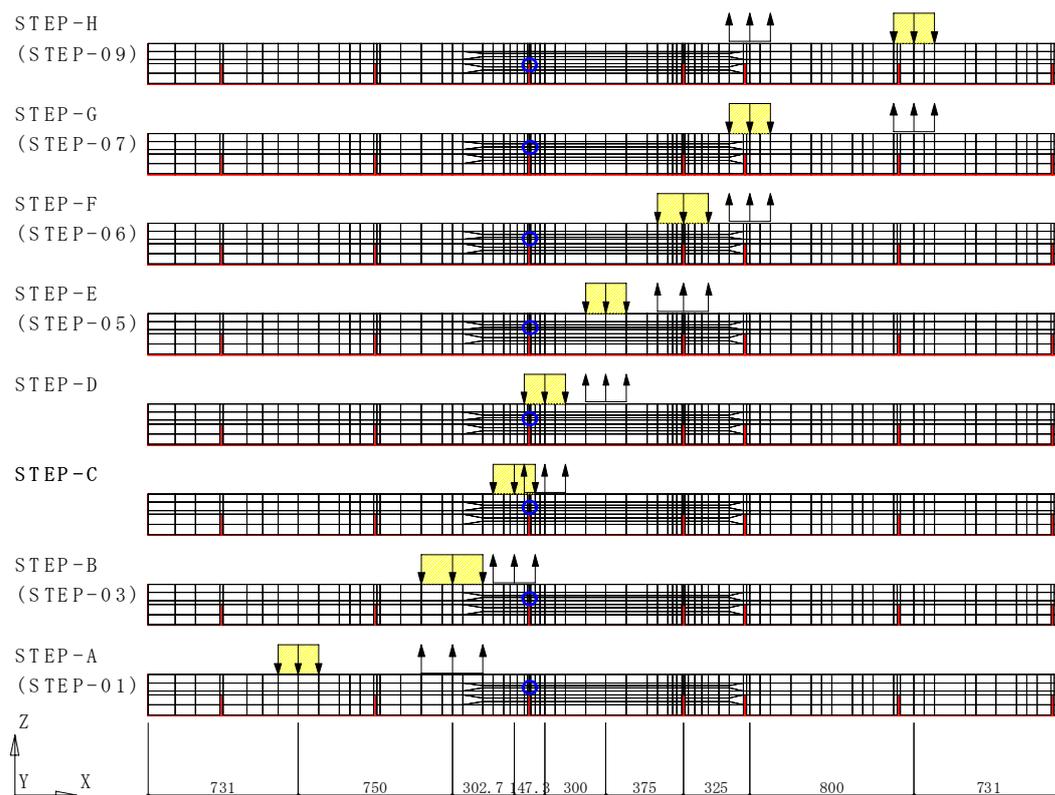


図 4.5-4 載荷ステップ図

4.5.3 解析結果

着目したリブ直上位置での応力状態が、荷重位置の変化に対してどのような傾向で変化するのかについて比較した。以下に結果を示す。

a) リブ直上位置応力振幅 —せん断応力—

荷重位置毎の計算応力の比較から移動による応力変化は精度よく把握出来ているものと考えられる。ただしリブ位置近傍では荷重位置がずれると着目位置によっては（本ケースではリブ直上）発生応力が大きく異なることから、疲労耐久性の評価に用いる応力等の算出にあたっては床版内部のリブ配置など構造の特性に応じて適切に荷重位置を設定する必要がある。（図 4.5-5）

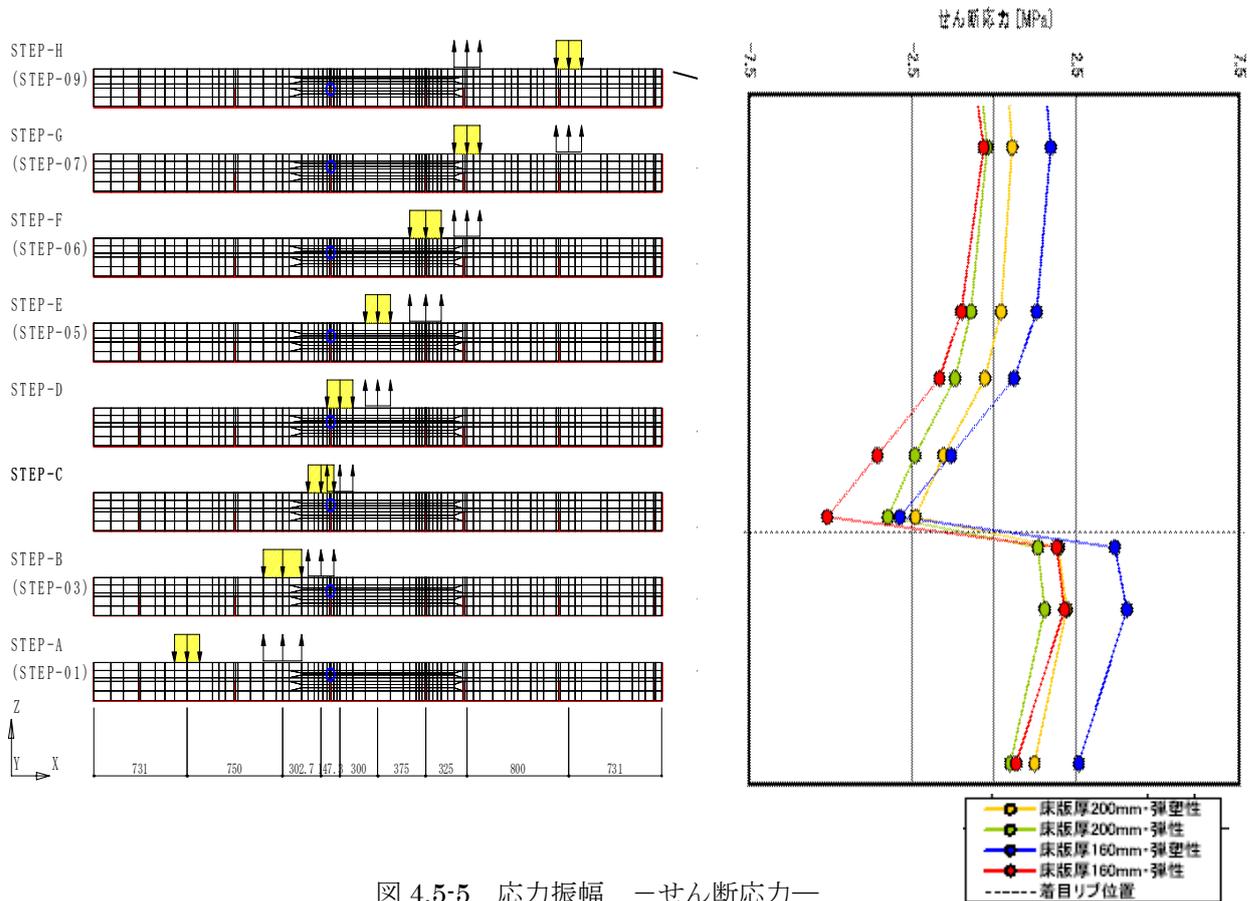


図 4.5-5 応力振幅 —せん断応力—

b) リブ直上位置応力振幅 — 橋軸方向応力 —

載荷位置毎の計算応力の比較から移動による応力変化は精度よく把握出来ているものと考えられる。ただしせん断応力同様に、リブ位置近傍では載荷位置がずれると着目位置によっては（本ケースではリブ直上）発生応力が大きく異なることから、疲労耐久性の評価に用いる応力等の算出にあたっては床版内部のリブ配置など構造の特性に応じて適切に載荷位置を設定する必要がある。（図 4.5-6）

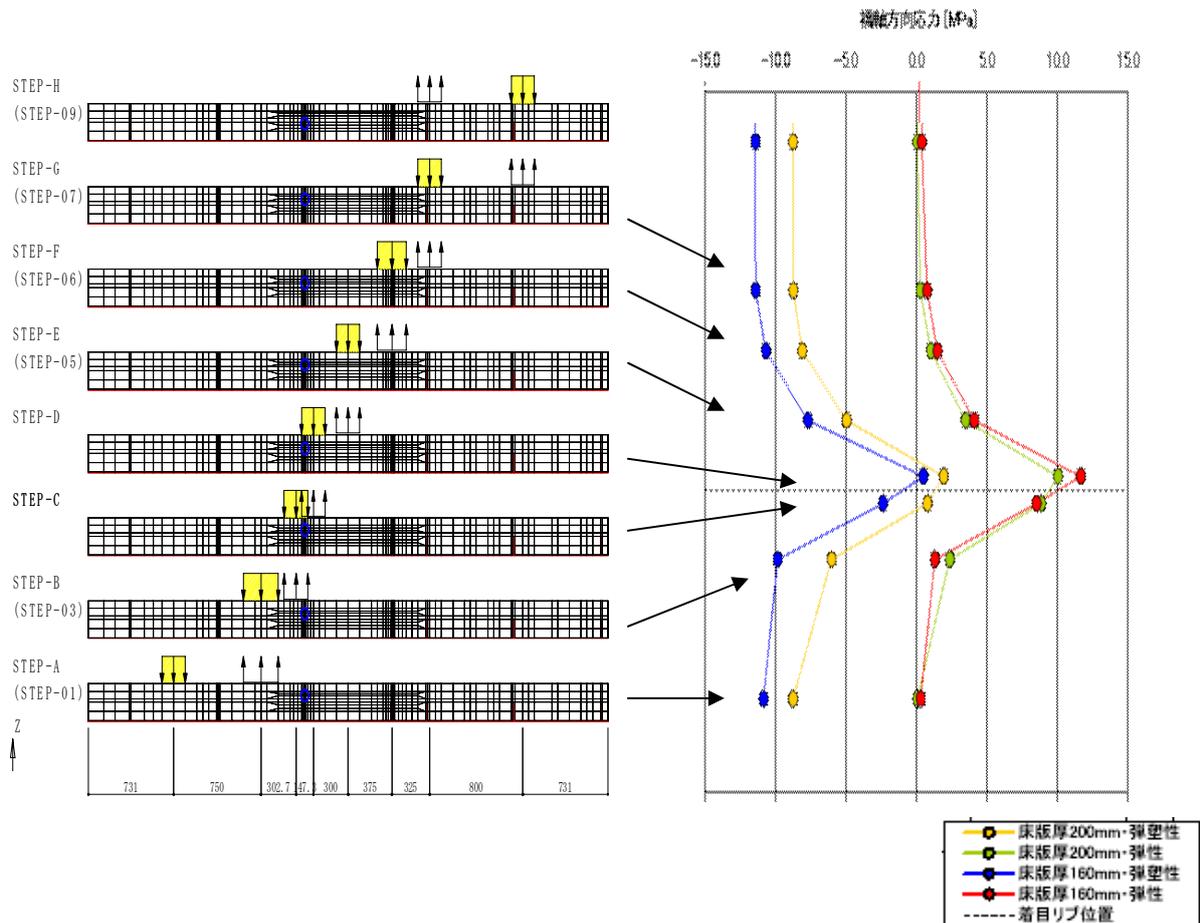


図 4.5-6 応力振幅 — 橋軸方向応力 —

c) リブ直上位置応力振幅 —鉛直方向応力—

荷重位置毎の計算応力の比較から移動による応力変化は精度よく把握出来ているものと考えられる。ただしせん断応力、橋軸方向応力同様に、リブ位置近傍では荷重位置がずれると着目位置によっては（本ケースではリブ直上）発生応力が大きく異なることから、疲労耐久性の評価に用いる応力等の算出にあたっては床版内部のリブ配置など構造の特性に応じて適切に荷重位置を設定する必要がある。（図 4.5-7）

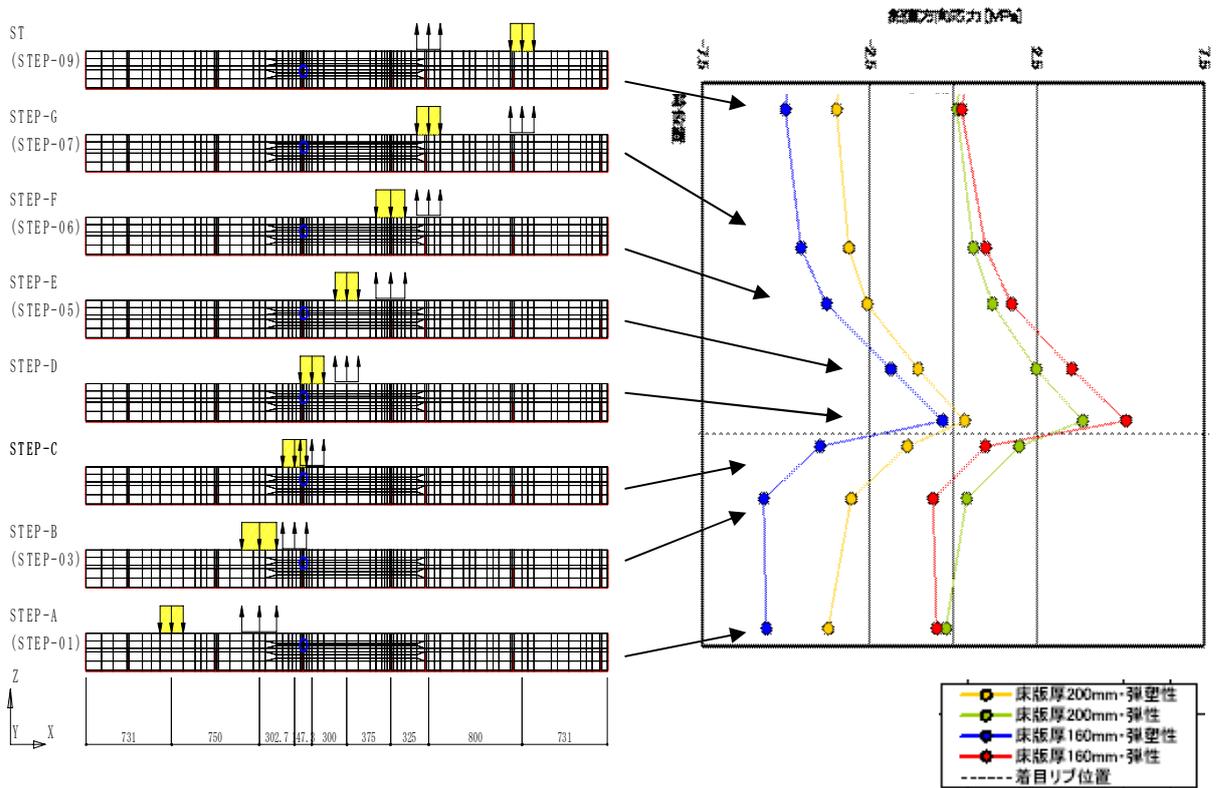


図 4.5-7 応力振幅 —鉛直方向応力—

以上のように、適切な解析モデルを構築することで、載荷位置の変化に伴って大きく変化する鋼コンクリート合成床版の床版内部の各部の応力状態とその変化をある程度詳細に評価することができるものと考えられる。特に解析的に床版内部の応力状態から疲労耐久性を評価する場合には、応力等の状態の変化の最大値を確実に把握する必要があるため解析モデルの構築と載荷位置の設定にあたっては構造の特性に応じて適切なモデルとなるように慎重な配慮が必要である。

本検討において評価された各解析ケースの応力変化の最大・最小の値を表 4.5-2 に示す。

せん断応力、鉛直方向応力については弾塑性解析よりも弾性解析の方が応力振幅が大きく算出され、橋軸方向応力ではその逆の傾向となっている。これは、弾塑性解析についてはコンクリートの塑性化に伴い引張応力の絶対値が弾性解析ほど大きく算出されないことによるものと考えられる。また引張応力による材料の塑性化の影響で、中立軸位置が下がるなど構造系の変化の相違が影響しているものと考えられる。

表 4.5-2 解析ケース別 応力振幅比較 : Mpa

	弾塑性／200mm			弾性／200mm			弾塑性／160mm			弾性／160mm		
	MAX	MIN	振幅	MAX	MIN	振幅	MAX	MIN	振幅	MAX	MIN	振幅
せん断応力	1.4	-2.4	3.9	1.3	-3.2	4.5	3.4	-3.0	6.4	2.4	-4.7	7.1
橋軸方向応力	3.7	-7.9	11.6	10.0	0.1	9.9	2.9	-12.2	15.1	13.2	0.5	12.7
鉛直方向応力	0.4	-3.0	3.4	3.7	-0.6	4.3	-0.4	-5.8	5.4	5.1	-1.2	6.7

表 4.5-3～表 4.5-5 に載荷位置毎のせん断応力分布図、橋軸方向応力分布図、鉛直方向応力分布図の詳細を示す。

せん断応力については、弾性解析と弾塑性解析では載荷位置の相違による応力分布の傾向に大きな差異はない。ただしリブ直上載荷時の最大応力の大きさとその範囲は弾性解析でやや大きくなっている。

橋軸方向応力と鉛直方向応力についても、弾性解析と弾塑性解析の応力分布の傾向は概ね近似しているが、リブ直上直近の極狭い領域で弾性解析と弾塑性解析で応力の正負が逆転する場合があります材料特性のモデル化の相違の影響が現れたものと考えられる。

以上より、コンクリートの内部応力の状態や変化にはモデル化手法による相違が現れるためその影響を考慮して適切なモデル化を行う必要があるが、本検討においてはその差は小さくなく、評価の着目によっては弾性解析によっても十分である場合も多いと考えられる。ただし、浅い位置にある補強リブの天端など応力集中が著しい部位では弾塑性解析と弾性解析で正負が逆転するなど局所的な応力状態の評価を行う目的で解析する場合には、弾塑性解析によるなど、実現象がより忠実に表現できる手法による必要がある場合もある。

表 4.5-3 ②-②断面 せん断応力 τ_{zx} [MPa] : +圧縮 -引張

	STEP-B	STEP-C	STEP-D	STEP-E
荷重				
弾塑性床版厚 20 cm				
弾性床版厚 20 cm				
弾塑性床版厚 16 cm				
弾性床版厚 16 cm				

表 4.5-4 ②-②断面 橋軸方向応力 σ_x [MPa] : +圧縮 -引張

	STEP-B	STEP-C	STEP-D	STEP-E
荷重				
弾塑性床版厚 20 cm				
弾性床版厚 20 cm				
弾塑性床版厚 16 cm				
弾性床版厚 16 cm				

表 4.5-5 ②-②断面 鉛直方向応力 σ_z [MPa] : 十圧縮 -引張

	STEP-B	STEP-C	STEP-D	STEP-E
荷重				
弾塑性性床版厚 20 cm				
弾性床版厚 20 cm				
弾塑性性床版厚 16 cm				
弾性床版厚 16 cm				

4.6 2次元 FEM 解析による解析事例

4.6.1 概要

数値解析モデルによる構造物の応力状態などの評価を行う場合、ある程度までは実構造物をできるだけ忠実にモデル化に反映させることが精度の向上には寄与する。一方、3次元モデルによって詳細な FEM 解析を実施することは構造物の規模や複雑さなどの形式によってはモデル化作業などの解析労力や計算機的能力による制約が生じることも多い。ここでは内部鋼材が複雑に配置されている鋼コンクリート合成床版について汎用性が高く3次元モデルに比べて制約が少ない2次元のモデルの FEM 解析による応力評価方法について検討する。

ここではコンクリート要素と鋼材要素の境界の取り扱い方について着目し、鋼材とコンクリートの境界節点を剛結したモデルと両者の境界節点で接触機能を定義したモデルとの比較を行った。解析対象は、土木研究所にて輪荷重走行試験を行った孔あきジベルタイプの鋼コンクリート合成床版とした。

4.6.2 解析の対象

輪荷重走行試験に用いた供試体の構造諸元を以下に示す。

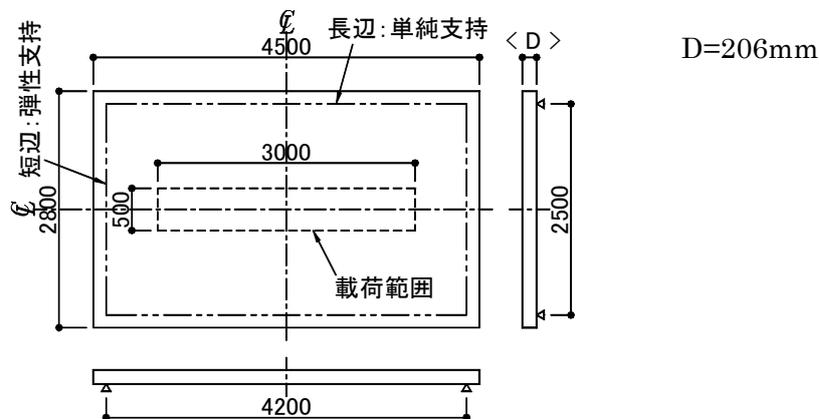


図 4.6-1 試験供試体

この床版は、階段載荷による輪荷重走行試験では最大荷重 392kN まで破壊に至っていない。しかし、試験終了後に供試体を切断したところ、リブの頂部を起点とする水平ひび割れが発生していることがわかっている（写真 4.6-1）。



写真 4.6-1 床版断面のひび割れ

4.6.3 解析モデル

本解析では、床版（3次元）を梁（2次元）に置き換えて解析する手法を適用する。この手法の概要を手順①～手順③に示す。

<手順①> 版モデル（3次元）での線形 FEM 解析の実施

解析対象の床版の 3次元線形 FEM モデルを作成する。

床版支間中央に移動輪荷重の最大載荷荷重に相当する荷重 $P_1 (=392\text{kN})$ を $200\text{mm} \times 500\text{mm}$ の領域に載荷して線形解析を実施する。

なお、輪荷重の移動は橋軸方向に荷重載荷位置を変化させることで表現する。検討対象の床版寸法は図 4.6-1 に示す。

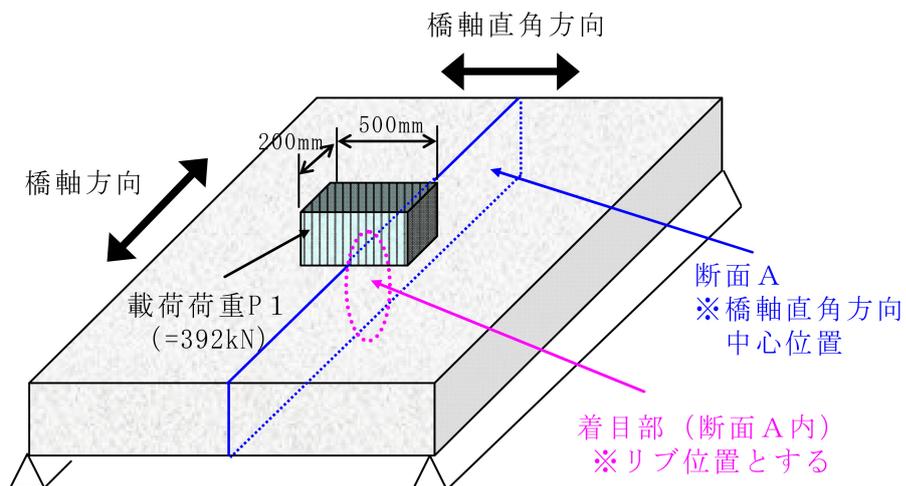


図4.6-2 3次元モデル(線形FEM解析モデル)

<手順②> 着目部の断面力の算出

手順①の FEM 解析結果から、橋軸方向に関する着目部の曲げモーメントおよびせん断力を算出する。なお、曲げモーメントは版の断面 A 内において平面保持が成り立つも

のと仮定し、床版上下面の橋軸方向の軸応力から、次式により算出する。

$$M = \sigma \cdot I / y \quad \dots \text{(式 4.5-1)}$$

ここに、M：橋軸方向曲げモーメント

σ ：橋軸方向の軸応力（床版上下面の平均値）

I：版の断面剛性

y：床版厚/2

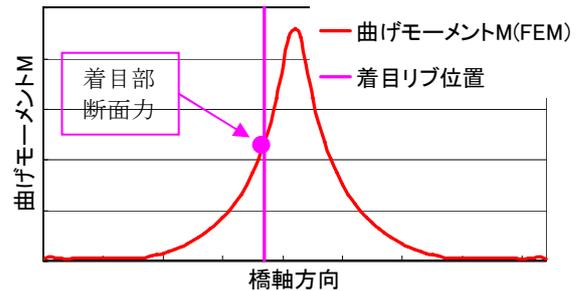
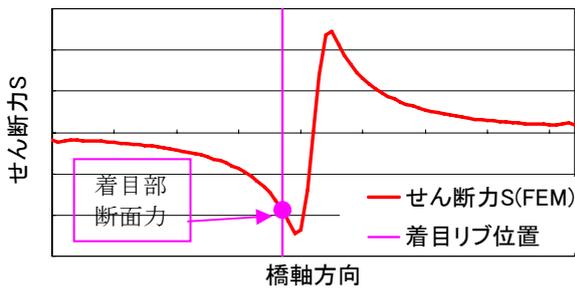


図4.6-3 断面A内の橋軸方向せん断力分布

図4.6-4 断面A内の橋軸方向曲げモーメント分布

<手順③> 梁モデル（2次元）のモデル化と非線形 FEM 解析の実施

断面 A を 2 次元梁モデル（平面ひずみモデル）でモデル化し、着目部の断面力が手順②で算出した断面力と一致するように、図 4.6-5 に示す分布荷重 P2 と支間 L を決定する。

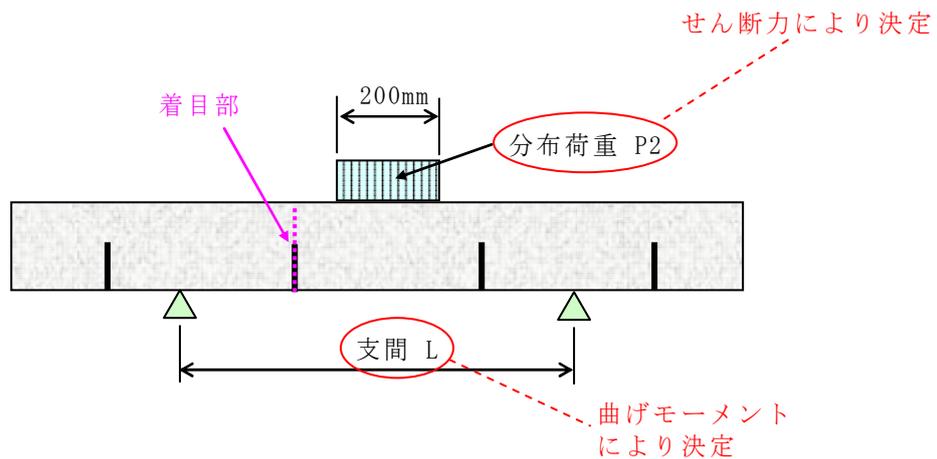


図4.6-5 2次元梁モデル（非線形FEMモデル）

4.6.4 解析パラメータおよび解析ケース

本解析では、載荷荷重ケースとして図 4.5-11 に示す、リブ近傍に最大の応力が発生すると考えられるリブ上に載荷分布端が載るようにした。

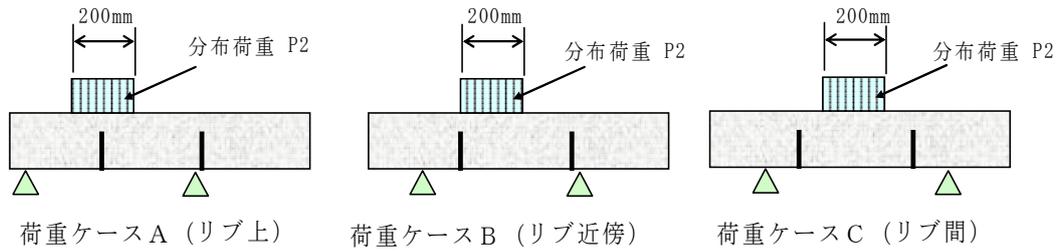


図4.6-6 載荷荷重ケース

前節で述べた手法によりモデル化した、梁モデルの構造寸法 L 、分布荷重 $P2$ はそれぞれ以下ようになる。

$$L=855\text{mm}, \quad P2=2.35\text{N/mm}$$

解析モデルは、コンクリート、鉄筋および鋼板部材で構成される。次の条件で非線形 FEM 解析のモデル化を行った。

- 解析ソフト：Marc2005r3
- 要素種類：鋼板およびコンクリート
 - ⇒ 4 節点平面一次要素（平面ひずみを適用）
- 鉄筋
 - ⇒ 2次元梁要素
- 材料構成則：鋼板および鉄筋
 - ⇒ Von-Mises 弾塑性材料（図 4.6-7）
- コンクリート
 - ⇒ Von-Mises 弾塑性材料（引張軟化考慮）（図 4.6-8）

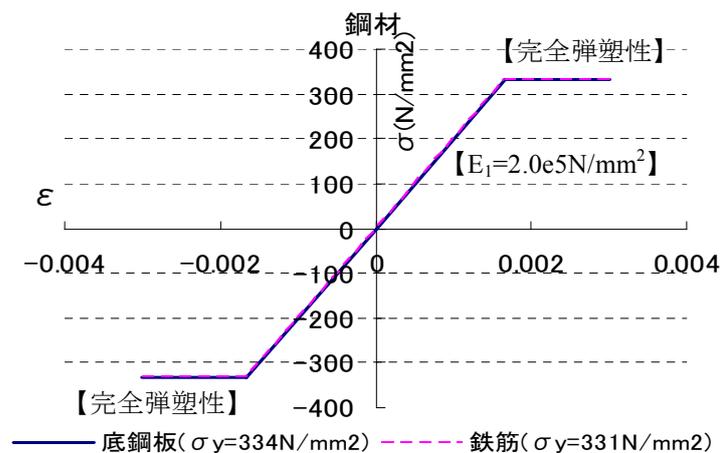


図4.6-7 鋼材に適用した構成則

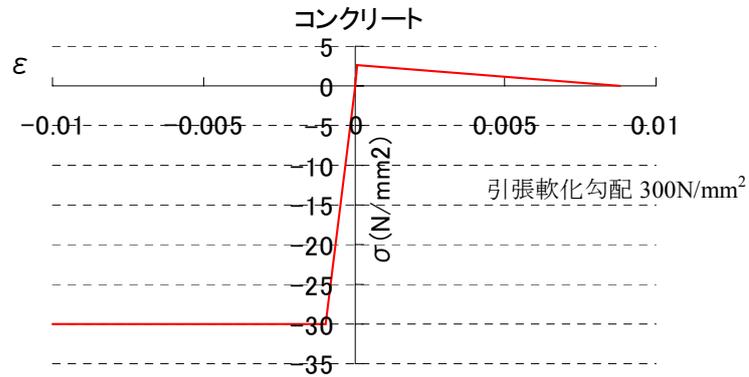


図4.6-8 コンクリートに適用した構成則

コンクリート要素と鋼材要素の境界の取り扱い方については、以下の2タイプを設定した。(図 4.6-9)

タイプ X : 鉄筋とコンクリートの境界節点は剛結、底鋼板とコンクリートの境界は接触機能を定義 (接触機能: 定義された二つの要素を互いに貫通することはなく、要素境界面において両者を引き離す方向には無抵抗であるが、押し付ける方向に対しては抵抗する。)

タイプ Y : 鉄筋、コンクリート、底鋼板すべての境界節点を剛結 (コンクリートと鋼材のずれは生じない。)

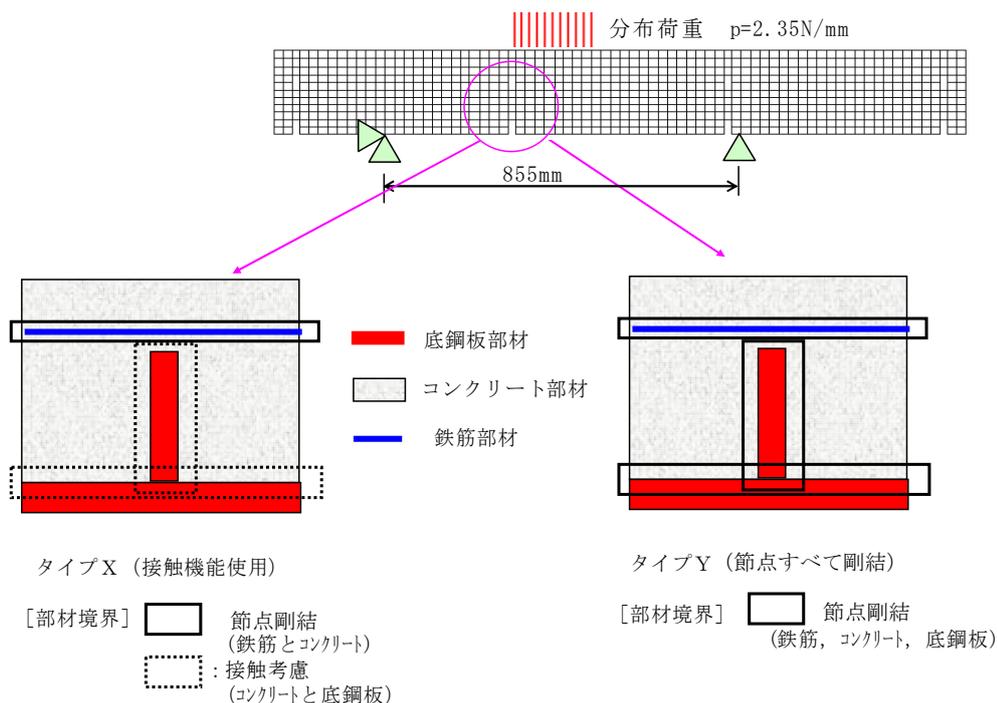


図4.6-9 接触機能検証モデル

4.6.5 解析結果

解析結果を図4.6-10に示す。

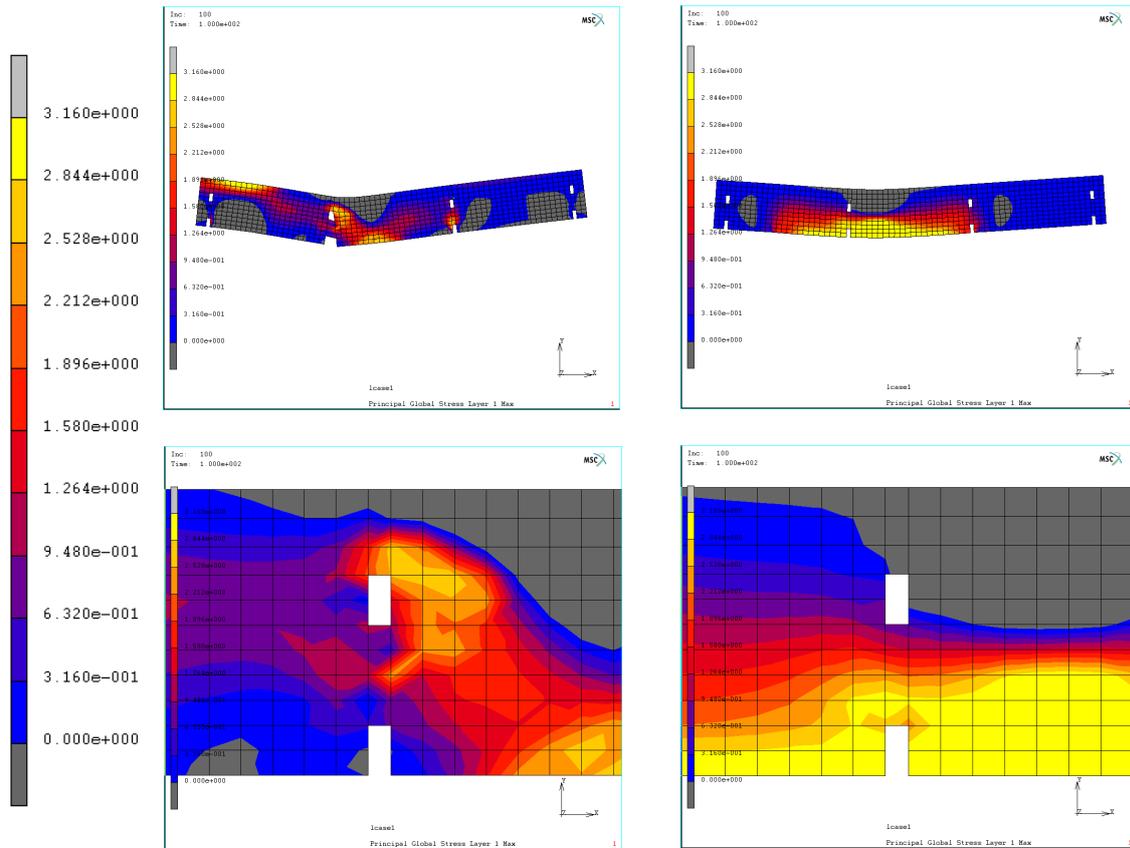
節点をすべて剛結したタイプY (剛結モデル) では、底鋼板側が引張応力、コンクリート上面側が圧縮となり、リブ頂部付近においても応力は一様に圧縮を示している。

リブなしの単純梁が支間中央に荷重を受ける場合に予想される応力分布と同様の応力状態を示しており、リブ頂部でひび割れを生じさせる応力状態となっていない。

これに対し、接触機能を使用したタイプXではタイプYにおいて圧縮領域となっていたリブ頂部付近で引張領域が発生していることが分かる。

このようにリブとコンクリートのモデルの節点の結合条件によって解析結果が異なるためモデル化にあたっては着目する内容に応じて適切なモデルによる必要がある。

なお、2次元モデルでは着目断面については3次元モデルとも整合させてある程度の精度で応力等を算出できるといえるが、それ以外の各部の応力等は評価できないため3章で提案したような床版全体の疲労耐久性を解析によって定量的に評価する手法にはそのままでは用いることができないことに注意が必要である。



タイプX
(接触機能使用)

タイプY
(節点すべて結合)

図4.6-10 最大主応力のコンター図

4.7 総括

4.7.1 モデル化に関するまとめ

4章では、移動荷重を受ける鋼コンクリート合成床版の各部応力を算出する解析手法について検討した。

はじめに、鋼コンクリート合成床版のモデル化については、コンクリートのモデル化、鉄筋のモデル化、鋼板のモデル化、ずれ止めのモデル化、鋼部材とコンクリートの結合のモデル化、それぞれについて既往の研究で用いられている事例をレビューした。また、着目部位を限定した2次元モデルによる解析手法の事例を示した。つぎに、モデル化の違いや載荷位置が床版の各部応力度に与える影響を検討した。最後に、実験で破壊した鋼コンクリート合成床版の解析事例を示した。

4章で得られた知見から、鋼コンクリート合成床版のコンクリートの疲労評価においては、鋼材によるコンクリートの不連続性や鉄筋とは異なる付着性状となる鋼材とコンクリートとの境界部の影響を適切に考慮できる解析モデルによって床版を構成する鋼部材や床版コンクリート、ずれ止め等の各部の応力状態をある程度精度よくかつ効率的に求めることが重要であり、経済性や精度も考慮した場合、現状において有力な手法は次のようなものと考えられる。

- ①コンクリートはソリッド要素とし、材料の非線形性は考慮せず、ひび割れの発生、進展の影響は3章で示した疲労被害則を用いて評価する。また鉄筋についてはトラス要素または梁要素とし、コンクリートと鉄筋との結合は埋め込み要素または節点剛結とする。
- ②鋼板はシェル要素またはソリッド要素とし、シェル要素を用いる場合は鋼板の板厚分の断面欠損をコンクリート要素に考慮する。鋼板とコンクリートとの結合は、両者の境界部付近の応力集中を評価できること、ならびにずれ止めによる合成作用を適切に評価するためにも接触を考慮することが良いと考えられる。
- ③頭つきスタッドについてはコンクリートの応力度を算出する場合はバネ要素または梁要素を用いれば良く、スタッド基部の鋼材について疲労照査する場合には別途ソリッド要素を用いたモデルで検討を行うことが望ましい。
- ④荷重の載荷位置と移動間隔については、補強リブ等の床版内部に配置される鋼材と荷重との位置関係を考慮して応力振幅が過小に評価されないように事前に検討する必要がある。

なお、本報告書の範囲では以上の手法を用いた場合の、疲労損傷過程を解析的に求めてその影響をモデル化の違いとの関係で検証するまでには至っていないが、3，4章の検討からは載荷荷重が極端に大きくならない範囲においてはこの手法で概ね適切な評価が可能であると考えられる。

4.7.2 鋼コンクリート合成床版の応力算出における課題

3章で示した解析手法によりコンクリート系床版の統一的な概念での疲労耐久性の評価の可能性が示された中、4章では鋼コンクリート合成床版の構造上の特殊性を考慮した場合の解析におけるモデル化の留意点や解析結果に与える影響を中心に検討した。

これは、コンクリート要素の疲労と鋼部材の疲労を個別に照査し、どちらも耐久性基準を満足すれば床版としても疲労耐久性があるという仮定に基づいた設計概念による設計法の確立の一環として、採用例が増えつつある鋼コンクリート合成床版などの多様なコンクリート系の床版に対して疲労耐久性を実験のみによらず解析的にも定量的に検証できる手法を確立する意図で実施したものである。

その結果、鋼コンクリート合成床版の場合、例えばコンクリート内部に配置された鋼部材のエッジ近傍における応力の集中や鋼部材とコンクリートの付着切れに伴う影響等、鉄筋コンクリート床版にはないような応答値の敏感さがあるため解析結果の評価にあたっては注意を要することが明らかとなった。

一方で、本章に示すように解析の対象とする形式を適切にモデル化するとともに、解析値と実験結果の整合を図る等検証の精度を向上させる措置を講ずることによって弾性挙動範囲内の応力状態はある程度の信頼性をもって解析的に評価できることが示された。

しかし鋼コンクリート合成床版の場合、輪荷重走行試験でも破壊までに至った例が少なく、現在のところ実橋の条件における疲労耐久性を解析や実験結果との対比から検証した事例もない。したがって、鋼コンクリート合成床版の疲労耐久性について解析的に評価を行う場合には、少なくとも一定水準以上の精度で各部位の応力状態を評価できる解析手法によって行うとともに耐久性の基準となる対照床版との相対比較による確認も行うなど慎重に行う必要がある。

本研究ではできるだけ適切かつ合理的に多様な鋼コンクリート合成床版の応力状態を算出できるよう解析手法の相違による結果への影響について試算により考察を試みたが検証ケースは限られている。

解析的に鋼コンクリート合成床版の各部位の応力状態を算出して設計に反映させる場合にはさらに解決すべき検討課題には次のようなものがある。

- ①本研究で対象としなかったずれ止め形式では、その力学的特性、設計思想、力の伝達機構などを明確にするとともに、モデル化にあたっては実験による補足を行なう等別途その妥当性を検証する必要がある。
- ②本研究では比較的簡易な構造の補強鋼材とずれ止めからなる床版で検討を行ったが、複雑な形状や機構の鋼材が配置される場合では、その影響によりコンクリート要素の応力状態や種々の解析条件の相違による影響の程度が大きく異なることも考えられるので細部構造をモデル化に反映するとともにその妥当性を検証する必要がある。

③鋼部材とコンクリートとの接触面における境界条件のモデル化の違いで、コンクリート内部応力が比較的大きく影響を受けることが判明した。また、作用荷重の大きさによってもこの境界条件のモデル化の影響が変化する。このため検討しようとする床版の条件に応じて、疲労耐久性の評価に用いる荷重の大きさやモデル化の方法を適切に設定する必要がある。

【4章 参考文献】

- 1) 街道浩, 渡辺滉, 橋吉宏, 松井繁之, 堀川都志雄: 鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および3次元有限要素解析による疲労耐久性評価, 構造工学論文集 Vol. 50A, pp1119-1130, 2004年3月, 土木学会
 - 2) 平城弘一: 「頭付きスタッドの静的および疲労強度と設計法に関する研究」, 大阪大学博士論文, 平成2年2月
 - 3) 建設省土木研究所, 他: 道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その2) -標準試験方法および第2回試験報告-, 平成11年10月
 - 4) 倉田幸宏・鈴木統・橋吉宏・小林潔・上村明弘: 鋼・コンクリート合成床版の解析のモデル化に関する検討、第5回床版シンポジウム、平成18年8月、土木学会
-
- 1) Chen, W.F.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill International Book Company, 1982.
 - 2) Chen, W.F. 著, 色部誠他監訳: コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985
 - 3) Chen, W.F.: Constitutive Equations for Engineering Materials Vol.2, Elsevier, 1994.
 - 4) Yamaguchi, E. and Chen, W.F.: Cracking model for finite element analysis of concrete materials, J. Engrg. Mech., ASCE, Vol.116, No.6, pp.1242-1260, 1990.
 - 5) 町田(編) 町田、丸山、関、檜貝(共著): 鉄筋コンクリート工学、第4章 構造解析、オーム社、平成9年8月
 - 6) 平城弘一: 「頭付きスタッドの静的および疲労強度と設計法に関する研究」、大阪大学博士論文、平成2年2月