

鋼箱桁とRC柱の剛結部に用いるアンカービーム定着構造の耐荷性能に関する解析的研究

Analytical study regarding the load capacity performance of the anchor-beam structural connection between the steel box girder and the RC pier

水野 浩

Hiroshi MIZUNO

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
大阪技術部技術課係長

有馬 直秀

Naohide ARIMA

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
大阪技術部設計1課

宮地 真一

Shinichi MIYACHI

川田工業(株)橋梁事業部技術本部
大阪技術部技術課課長

高田 嘉秀

Yoshihide TAKATA

川田工業(株)橋梁事業部事業推進部部长

近年、中間支点部構造の合理化、耐震性の向上を目的として、鋼上部工とRC橋脚を剛に結合した上下部一体剛結構造の研究が盛んに行われ、道路橋では多くの橋梁が建設されている。鉄道橋は道路橋に比べ迂回路の設置が困難であり、通行止めによる社会的損失を考えれば、大規模地震等で損傷を受けた場合には速やかに補修可能な構造が望まれる。本研究では、支間長が100m程度と比較的長いスパンを有する上下部一体剛結構造形式の鉄道橋を対象に、鋼箱桁とRC柱の剛結部に用いるアンカービーム定着構造の耐荷性能を検討する目的で、結合部近傍を詳細にモデル化し、弾塑性FEM解析によるパラメータスタディを行った。その結果、アンカービーム定着構造を用いた中間支点剛結部の大規模地震時における応力分布特性や応力伝達性状など、実務設計で参考になると思われる幾つかの特性が確認されたことから、ここにその結果を報告する。

キーワード：上下部一体複合橋梁、アンカービーム、弾塑性FEM解析、大規模地震

1. はじめに

上下部一体構造は支承構造に比べ①耐震性の向上（高い不静定次数による大変位発生時の安定性、落橋に対する安全性の向上）、②中間支点部の支承不要の効果（初期建設費の縮減、維持管理費の節減）、③橋脚高が比較的大きい曲げ卓越のケースで橋脚基部の作用断面力が減少（合理的な設計が可能）などの利点を有する。

本研究は、支間長が100m程度と比較的長いスパンを有する上下部一体剛結構造形式の鉄道橋を対象に、鋼箱桁とRC柱の剛結部に用いるアンカービーム定着構造(概念図を図1に示す)の耐荷性能を検討する目的で、結合部近傍を取り出した部分モデル（以下ズームアップモデルと略す）に対して弾塑性FEM解析によるパラメータスタディを行った。その結果、中間支点結合部の応力分布特性や応力伝達性状に及ぼす、RC柱主鉄筋の隅角部充填コンクリート内定着の影響、アンカービーム充填長さの影響、隅角部内充填コンクリートに軽量コンクリートを用いた場合の結合部の応力性状など、実務設計で参考になると思われる幾つかの特性が確認されたことから、ここにその結果を報告する。

2. 解析モデル概要

試設計にて断面検討を行った3径間連続複合ラーメン

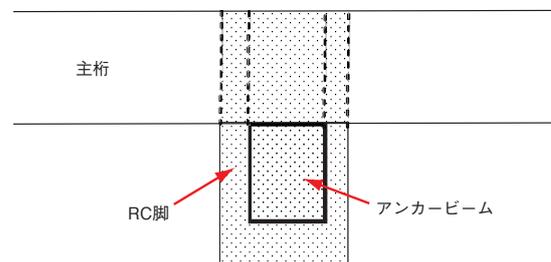


図1 アンカービーム結合方式の概念

橋（支間長：80m+100m+80m；橋脚高25m、G4地盤、図2、図3参照）を対象として、中間支点結合部近傍をズームアップした弾塑性FEM解析を行った。FEMモデルの概要を図4、5に示す。また表2にFEM解析使用要素等をまとめる。

解析モデルに荷重した荷重ケースは、常時（死+活）及び大規模地震時の慣性力（大規模地震時の設計水平程度×死荷重）を骨組モデルに荷重し、得られた境界断面力を、FEMモデルに静的に荷重を行っている。

図6に大規模地震時の荷重ケースに用いた、脚及び充填コンクリート要素の材料構成則を示す。大規模地震時の荷重ケースに、常時と同様の引張域のソフトニングを設定した材料構成則を用いた場合、結合部に接触・バネ要素を用いた構造モデルとの組み合わせにより解析が困難となった。そこで、図6に示すように、アンカービー

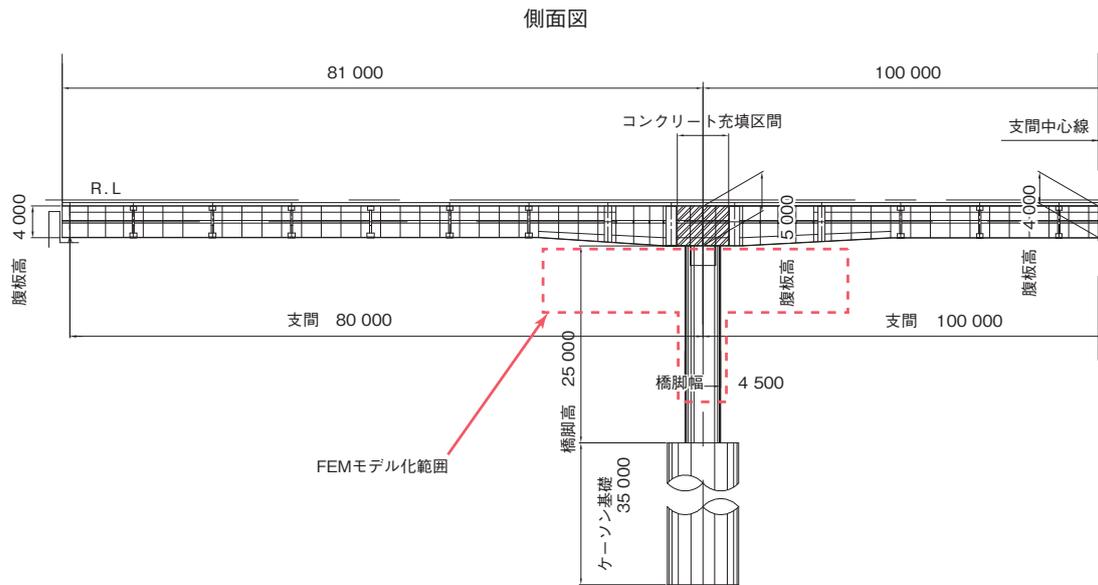


図2 対象橋梁一般形状（側面図）

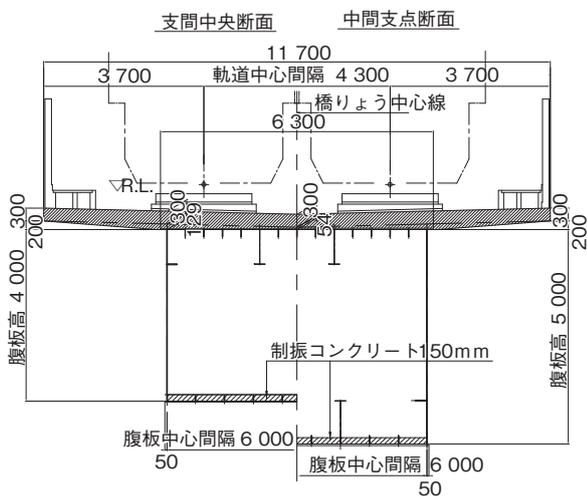


図3 対象橋梁一般形状（断面図）

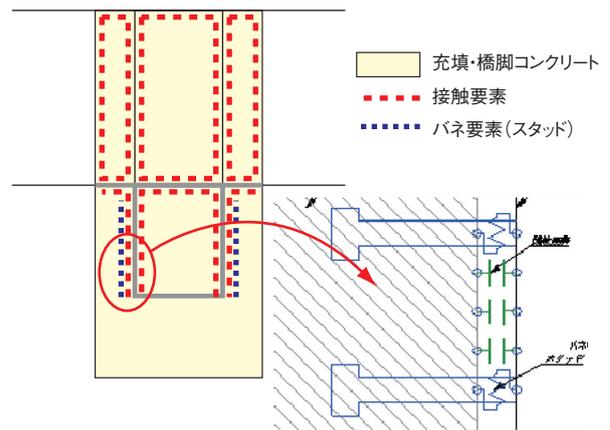


図4 結合部概要

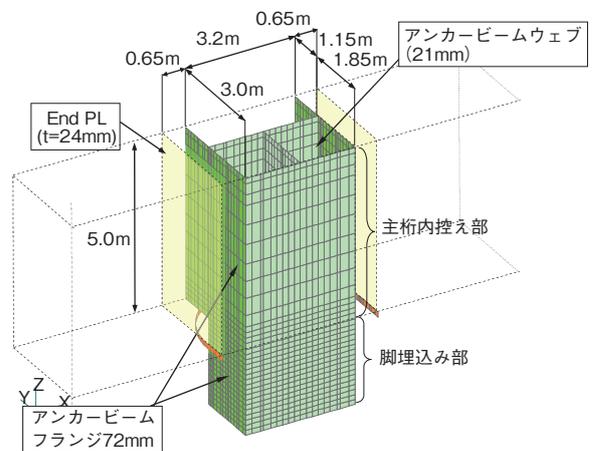
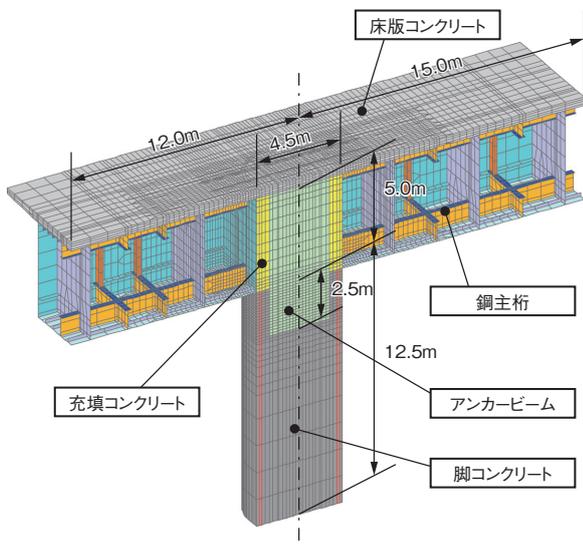


図5 モデルメッシュ分割

ム先端部におけるRC断面計算により中立軸（大規模地震時の荷重状態でRC断面計算し設定）を仮定し、その中立軸を境界として、圧縮側、引張側の材料構成則を各々設定した。引張側については、許容引張応力を超えると塑性化しヤング係数がE/100となる材料構成則とした。

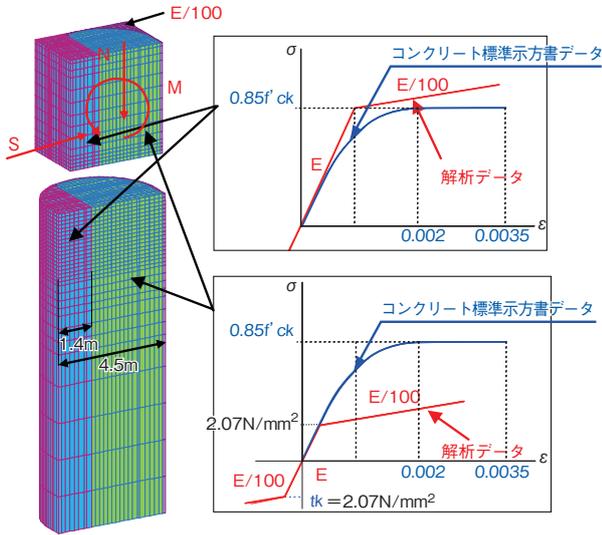


図6 脚および充填コンクリートの材料構成則

表1 解析概要，使用要素，材料諸元一覧

	解析モデル概要
解析種類	弾塑性有限要素解析
使用ソフト	MSC Marc
節点数	54 420 (基本モデル)
要素数	51 848 (々)

	要素種類	径，配置
鋼主桁，アンカービーム	シェル要素	弾塑性材料
床版コンクリート	ソリッド要素	弾性材料
RC橋脚，充填コンクリート	ソリッド要素	弾塑性材料
鉄筋（床版）	リバー要素	弾塑性材料
主鉄筋（脚）	トラス要素	弾塑性材料
せん断補強筋（脚）	リバー要素	弾塑性材料
スタッド	バネ要素	φ 22 h = 150

材料諸元	強度	ヤング係数 E (N/mm²)	ポアソン比
鋼主桁，アンカービーム	SM570	200 000	0.3
床版コンクリート	σ ck = 30N/mm²	28 000	0.17
RC橋脚，充填コンクリート	σ ck = 27N/mm²	26 500	0.17
鉄筋（床版）	SD345	200 000	0.3
鉄筋（脚）	SD390	200 000	0.3
スタッド	Kh = 224.0 [tf/cm/本] = 220 000 [N/mm/本] ※		

3. 解析ケースと検討の着目点

本研究で検討を行った解析ケースを図5に示す。また、検討の着目点について、表3に示す。

基本モデルの設定について、アンカービーム長さについては、長大スパン橋における経済性に着目し、主桁高の1/2となる2.5mと設定している。また、橋脚主鉄筋の半数程度を、主桁下フランジを貫通させ主桁内コンクリートに定着を行っている。

アンカービーム長さの比較ケース（モデル3-1，モデル3-2）として、1.0D相当¹⁾，0.75B相当²⁾の2ケースを解析し、基本ケースと比較検討を行うものとする。今回の検討モデルで1.0Dを適用した場合、アンカービーム長は約5.0mとなる。この長さは、鉄筋貫通させないケースを想定した場合、塑性ヒンジ区間を避けた位置で、鉄筋が定着可能な長さと考えられることができる。(図8参照)

充填コンクリート範囲について、基本モデルでは、橋脚幅と同幅となる4.5mとしている。これに対して、充填コンクリート範囲を広げることで、主桁とアンカービーム隅角部のシアラグによる応力の極大化を低減する効果を確認するため、モデル2ではその前後1.0mずつ伸ばし6.5mとしている。

表2 着目点

	着目点	比較対象
①	RC柱の主鉄筋を隅角部内の充填コンクリートに定着する影響	貫通鉄筋を無くした基本モデル
②	アンカービーム定着長さの影響	モデル3-1 モデル3-2
③	充填コンクリートを軽量骨材コンクリートとする影響	充填部に軽量骨材コンクリートを用いた基本モデル
④	隅角部の充填コンクリートを主桁軸方向に延長する効果	モデル2

表3 床版上面鉄筋応力の試設計との比較

	FEM(最大値)	試設計	差
床版上側鉄筋	187.0	187.3	0.3
床版下側鉄筋	167.8	177.6	9.8

4. 解析結果と考察

4.1 常時（死+活）結果について

アンカービーム前面位置近傍（アンカービームフランジより1メッシュ（150mm程度）離れた位置）と、脚躯体前面位置近傍（着目位置を図9に示す）において、常時に対する上フランジ垂直応力分布の解析結果を図10，11に示す。また、図中には先に骨組解析を行い、断面計算を行った結果（以下、試設計値と略す）を付記している。

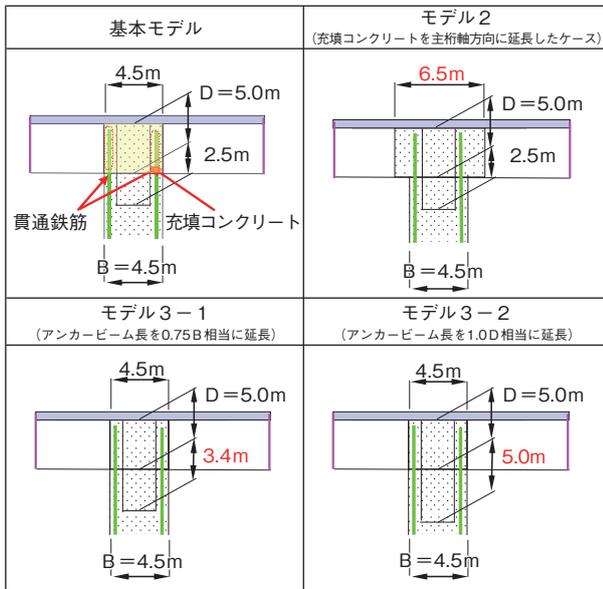


図7 解析モデルケース

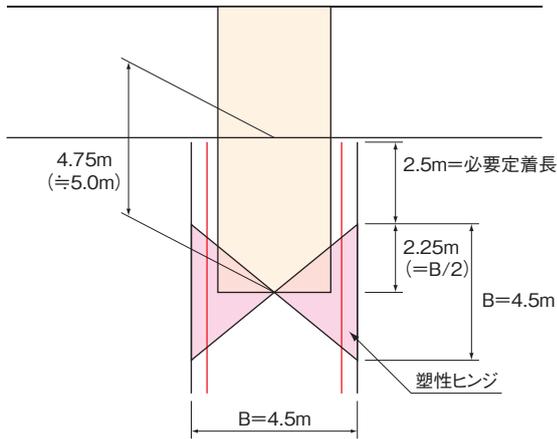


図8 塑性ヒンジ範囲とアンカービーム長の関係

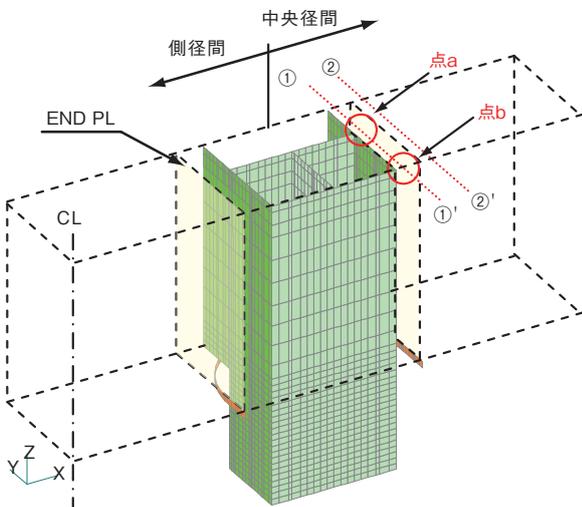


図9 上フランジの垂直応力分布着目位置

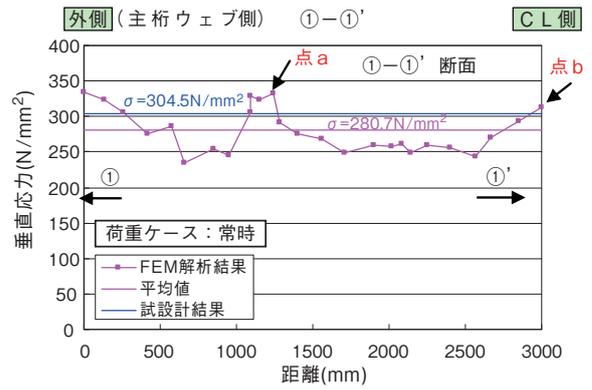


図10 上フランジの垂直応力分布 (アンカービーム前面)

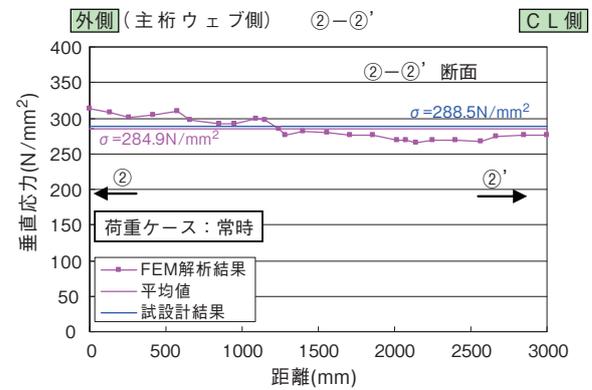


図11 上フランジの垂直応力分布 (脚躯体前面)

アンカービーム近傍と躯体前面において、図10、11に示すように、FEM解析結果の平均値と試設計値が、おおむね一致していることがわかる。なお、図10に示したアンカービーム近傍(①-①'断面)の結果において、応力値が極大化している位置と、アンカービームウェブの控え材位置が一致している。一方、脚躯体前面近傍位置(図11に示す、②-②'断面)では応力分布が均一化していることから、①-①'断面に見られた上フランジ応力の極大化は、アンカービームのウェブから伝達された力がせん断遅れ(Shear-Lag現象)となって現れたものと考えられる。

また、脚躯体前面近傍の応力分布(図11)について、外側(主桁ウェブ側)がCL側に比べて応力が若干高く、その最大値は試設計値(フランジ幅を全幅有効と考えた断面計算)に比べて大きい値を示している。この分布性状はせん断遅れの影響も幾分含まれているものと考えられる。結果の詳細は省略するが、下フランジ側は圧縮応力となるが、上述した上フランジの応力分布性状と同様の傾向が顕れている。

同じく、常時における床版鉄筋応力の分布を、図12

に示す。試設計値との比較結果は表4に示す通りであり、床版鉄筋応力の最大値は、試設計値とよく一致していることがわかる。

以上より、常時の荷重に対する主桁の応力分布性状について、基本モデルのFEM解析結果と試設計値は良い一致を示しているといえる。

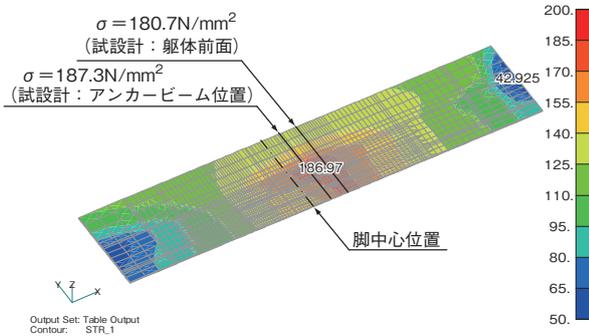


図12 床版上側鉄筋応力分布性状

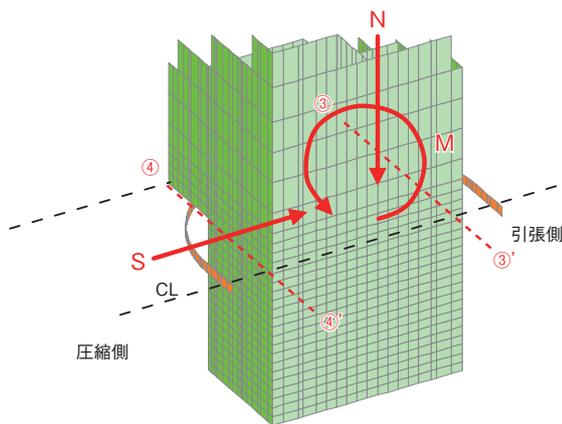


図13 アンカービームフランジの垂直応力着目位置

4.2 RC柱の主鉄筋を隅角部内の充填コンクリートに定着する影響

主桁下フランジを貫通し、充填コンクリートに定着されている鉄筋（以下、貫通鉄筋と略記）による影響を検討するため、大規模地震時の荷重ケースにて、貫通鉄筋無しモデルで解析を行い、基本モデルと比較した。

①アンカービームフランジの垂直応力について

図14に示すように、アンカービームの引張フランジの垂直応力が基本モデルと比べて増大、また、圧縮フランジの垂直応力は基本モデルと比べて減少し、ともに試設計値に近づく特性が認められた。また、図15に示すように、アンカービームフランジ垂直応力から想定したアンカービームの中立軸が、SRC方式で断面計算した場合の中立軸に近づく結果となった。

②スタッドのずれせん断力分布について

圧縮側スタッドずれせん断力分布について図16に示す。貫通鉄筋がある基本ケースでは、アンカービーム根元、先端で大きく、中間付近が小さくなる分布性状を示しており、その最大値は先端付近となっていた。貫通鉄筋を無くした場合、アンカービームフランジ応力の減少に伴い、全体的にスタッド力は減少し、先端より、根元側のほうが大きい分布性状を示している。これは、文献³⁾の設計例に示されている、アンカービーム根元を最大とした三角形分布に近づく傾向を示していると考えられる。

引張側スタッドずれせん断力分布について図17に示す。基本ケースでは、アンカー下端側に集中して発生していたスタッドせん断力が、貫通鉄筋を無くした場合、先端の突出したせん断力が減少し、根元側にも発生する結果となったが、その分布性状は三角形分布とはいえない。これは、コンクリートの材料非線形性などが影響しているものと考えられる。

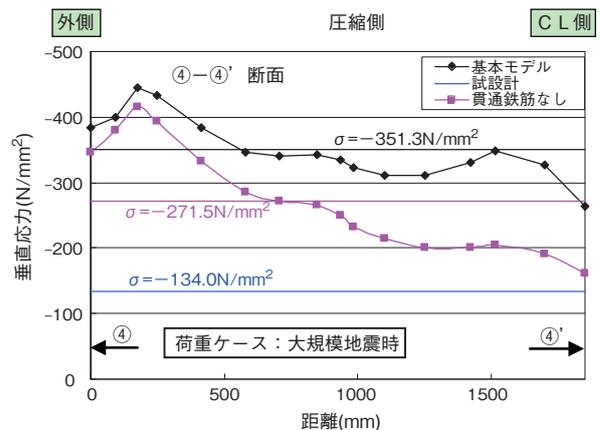
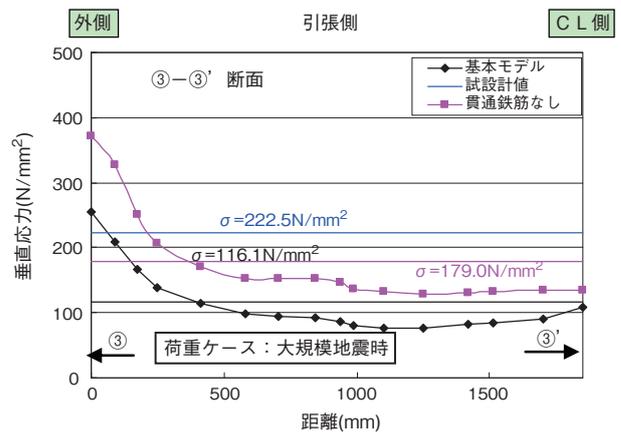


図14 アンカービームフランジ垂直応力分布

③脚主鉄筋の応力分布について

CL近傍の外側引張鉄筋と内側引張鉄筋の応力分布について、図19に基本モデルと比較して示す。

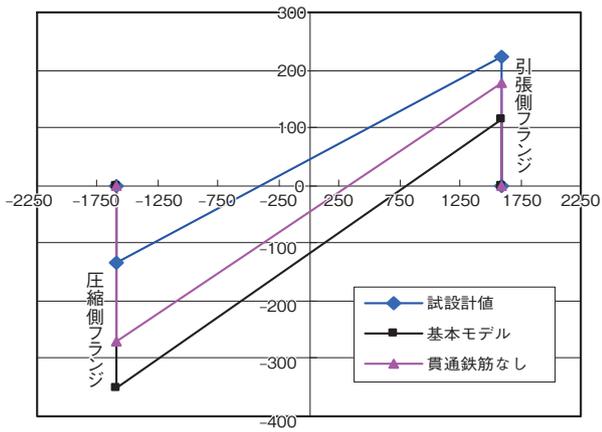


図 15 中立軸の想定

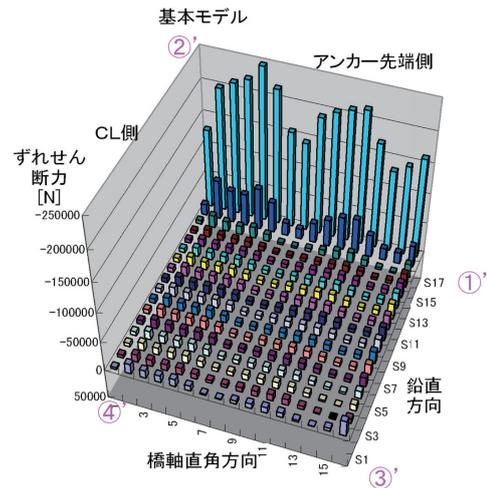


図 17 スタッド鉛直方向ずれせん断力分布 (引張側)

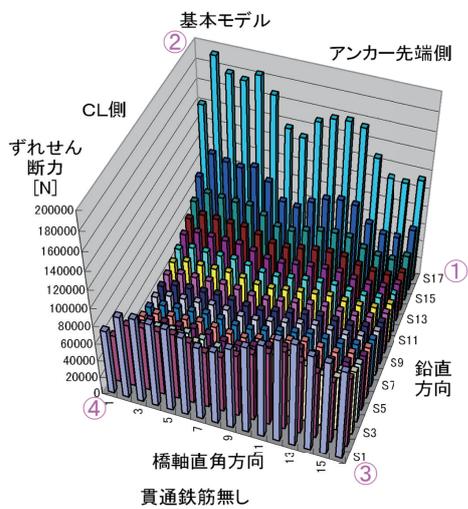


図 16 スタッド鉛直方向ずれせん断力分布 (圧縮側)

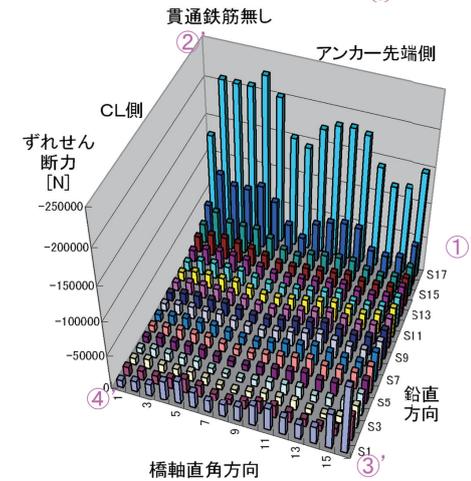
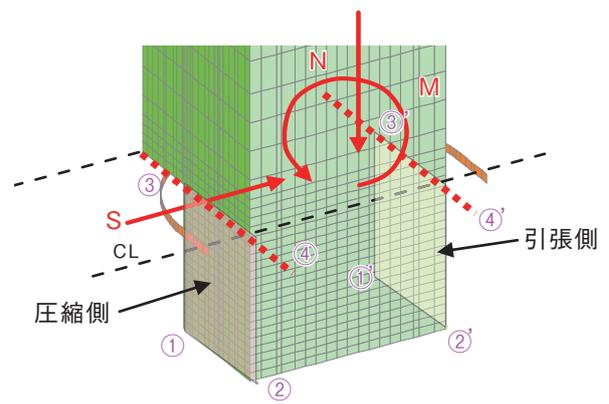
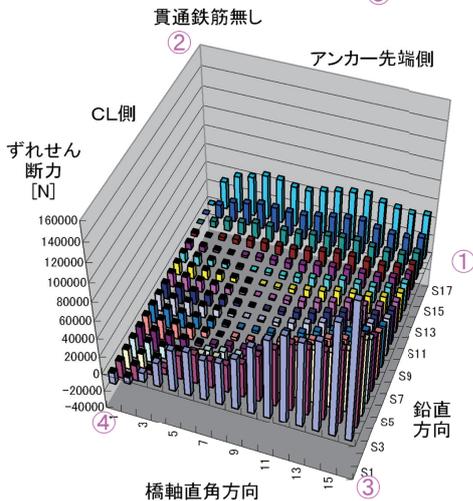


図 18 アンカービームスタッドずれせん断力着目位置



元々主桁下フランジを貫通していない内側鉄筋の応力性状については、基本モデルと大きく変わらない結果となった。また、外側鉄筋の応力分布性状について、主桁を貫通している基本モデルでは、主桁下フランジ貫通部近傍に応力のピーク ($\sigma = 396.9\text{N/mm}^2$) があってのに対して、貫通鉄筋を無くした場合、応力のピークがアンカービーム下縁より若干下方の位置に移行している。し

かしその最大値は $\sigma = 242.4\text{N/mm}^2$ と小さく塑性化していない。アンカービーム下縁より下方の応力分布に着目すると、基本モデルとは大きな差がないことがわかる。

この結果より、鉄筋を主桁内の充填コンクリートに定着させない方が、鉄筋の応力分布は設計思想(アンカービーム先端に引張鉄筋応力の最大値を発生させ塑性ヒンジをアンカービーム先端に設ける)に近い分布性

状となる。

4.3 アンカービーム定着長の適切性

アンカービーム定着長を変化させた3種類の解析結果から、RC脚の主鉄筋応力、主鉄筋周りのコンクリート応力、アンカービームの応力分布性状などを対比し、アンカービーム定着長の適切性を検討した結果について述べる。なお検討は、貫通鉄筋がある条件で比較を行った。

①アンカービームフランジの垂直応力について

アンカービーム根元部のフランジ垂直応力分布について、図20に基本ケースとモデル3-1、(0.75 B相当)、モデル3-2 (1.0D相当)を比較し示す。基本モデル(アンカービーム長2.5 m)に比べると、モデル3-1、3-2とも、引張側、圧縮側で、ほぼ同様の分布性状となり、その最大値もほとんど変わっていない。すなわち、アンカービームの長さは、アンカービーム断面に対して有意な影響を及ぼさないものと考えられる。

②脚主鉄筋の応力分布について

CL近傍の外側引張鉄筋と内側引張鉄筋の応力分布について、図19に基本モデルとモデル3-1、3-2を比較し示す。内側鉄筋応力が最大となる位置は、両ケースとも、アンカービーム先端位置に移行している。また、その最大値は基本モデルと大きく変わっておらず(約300N/mm²)であり降伏には至っていない。下フランジを貫通している外側鉄筋では、最大値は若干減少するものの、その分布性状において基本モデルから大きな差異は見られない。

③橋脚コンクリートの垂直応力分布性状について

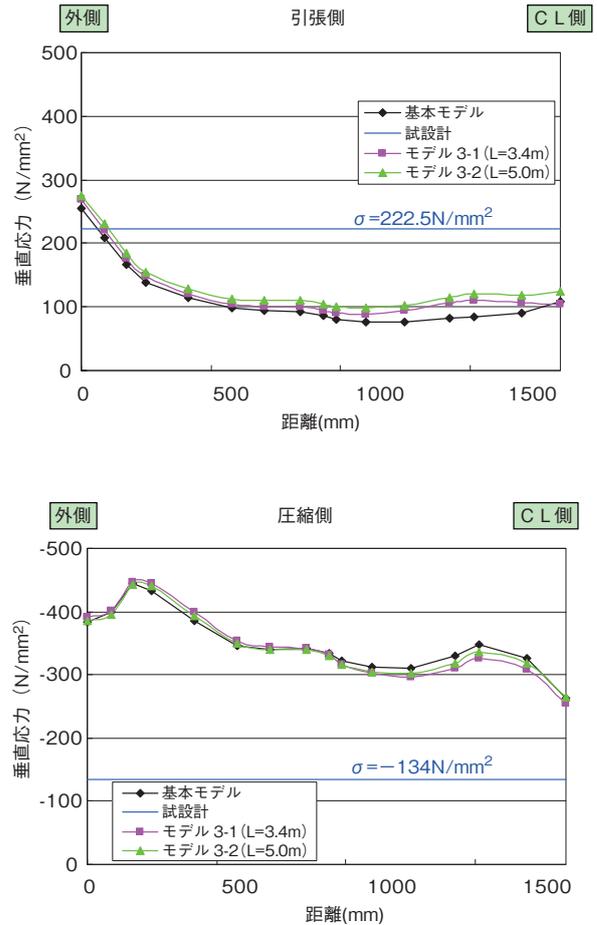


図20 アンカービームフランジの応力分布

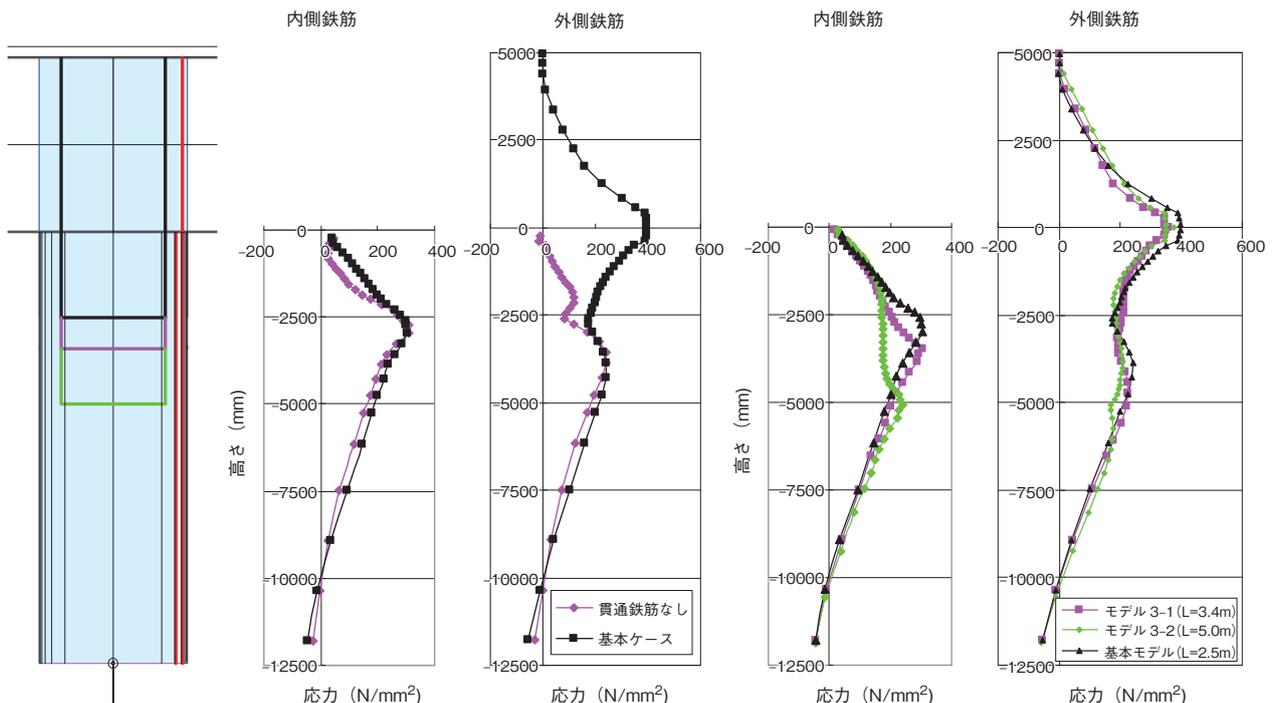


図19 橋脚引張鉄筋の応力分布

脚コンクリートの平均垂直応力コンターを、図 21 に示す。基本モデルの圧縮側垂直応力分布に着目したとき、アンカービーム先端部分の範囲で塑性化しており、RC 柱主鉄筋の必要定着長 (2.5 m) を十分に確保出来ないことが考えられる。それに対して、モデル 3-1、3-2 については、先端部で塑性化する性状は変わっていないが、その上部で、RC 主鉄筋の必要定着長を十分に確保できていると考えられる。地震時、正負交番する荷重により圧縮側部分にも引張り応力が発生する。その時、脚の引張主鉄筋からアンカービームへは、コンクリートを介して応力伝達されることを考えると、塑性ヒンジを外れた部分の鉄筋定着部では、コンクリートは塑性化していないことが理想的と考えられる。従ってアンカービーム長が 2.5 m である基本モデルでは、正負交番の繰り返し荷重が載荷される途中で、必要定着長が確保されないことによる耐力低下が生じる可能性も考えられる。

一方、引張側について、基本モデルに比べると、モデル 3-1 では、アンカービーム先端部にくさび形の許容引張応力 ($\sigma_{ta}=2.07\text{N/mm}^2$) を超える領域が発生しており、その上部では必要定着長が確保可能な健全域が残存している。このモデル 3-1 の応力性状は、終局時における、理想的な塑性ヒンジの形成を示唆するものと考えられる。

モデル 3-2 では、アンカービーム先端部にくさび形の応力性状を示すものの、アンカービームフランジ面に沿って、許容引張応力を超過する領域が発生している。これらの結果より、本ケースのアンカービーム長は、0.75B 相当である 3.4 m 程度が妥当と推察される。

4.4 鋼桁隅角部内の充填コンクリートに軽量骨材コンクリートを用いた場合の特性

主桁内の充填コンクリートを軽量骨材コンクリートとした場合の特性を、普通コンクリートの場合 (基本モデル) と比較を行い考察する。このモデルは、基本モデルの充填コンクリート要素を、軽量骨材コンクリートのヤング係数 ($E = 15\,000\text{N/mm}^2$) の弾塑性材料とした。また、比較は大規模地震時の荷重ケースで行ったが、軽量骨材コンクリート使用による死荷重減少 (全上部工死荷重に対して 2.5% の減) を反映した。軽量骨材コンクリートを用いた場合、スタッドのバネ剛性は普通コンクリートの場合とほとんど変わらないという既往の研究結果⁶⁾より、充填部分に設置したスタッドのバネ剛性は基本モデルと同様とした。

図 22 に、基本モデルと、軽量骨材コンクリートを用いた場合の、アンカービーム部分の von Mises 降伏条件でのコンター図を示す。応力分布性状および応力の最大値は、普通コンクリートの場合と比べて大きな違いが無いことがわかる。詳細な結果は省略するが、アンカービー

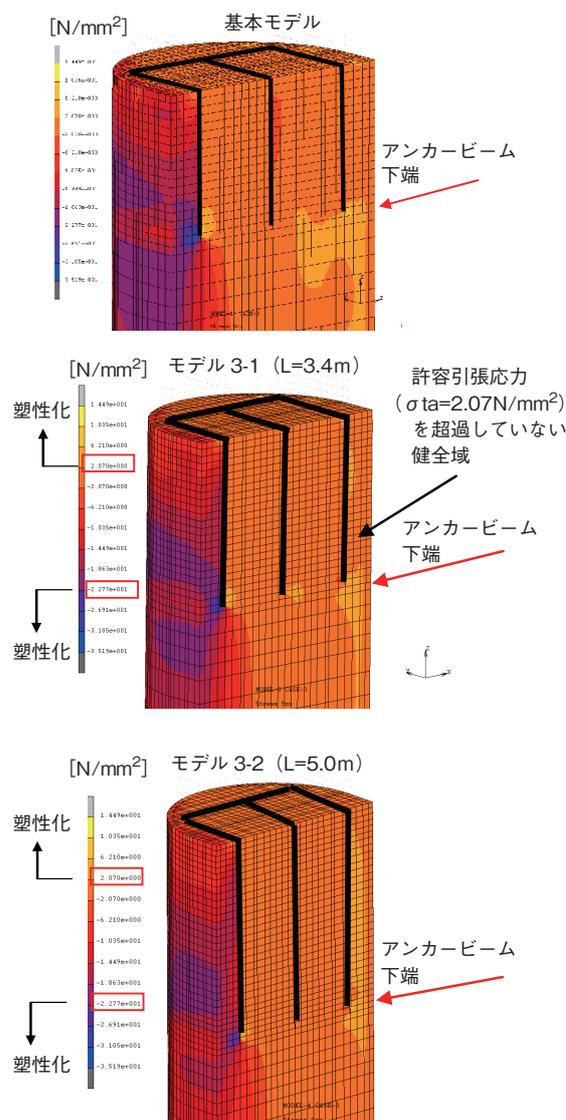


図 21 橋脚コンクリートの垂直応力コンター図

ムの応力分布、想定される中立軸位置について、基本モデルと大きく変わらない結果となった。また、スタッドの鉛直方向ずれせん断力分布、引張側の鉄筋応力は、基本モデルに比べると若干増加傾向にあるが、その分布は基本モデルと大きく変わっていない。

これらの結果から、充填部に軽量骨材コンクリートを用いた場合、普通コンクリートを充填した場合との応力伝達特性の差異は少なく、軽量骨材コンクリートを用いるのは、構造的に問題ないものと考えられる。

4.5 隅角部の充填コンクリートを主桁軸方向に延長する効果

充填コンクリート区間を広げたモデル-2 について、基本モデルと比較し検討を行った。充填コンクリート区間を広げた場合、慣性力増大により地震に対して不利になると考え、モデル-2 は、軽量コンクリートを用いる条件とした。

図 23, 24 に、常時 (死+活) における、主桁上フラ

ンジの垂直応力分布を基本モデルと比較し示す。着目位置は、4.1に示した結果と同位置にて比較を行う。

図23の結果より、基本ケースと大きく変わらない結果となった。これは、アンカービームウェブから伝達された力によるせん断遅れ現象による応力の極大化に対しては、充填コンクリートを軸方向に延長することによる応力低減効果はほとんど無いといえる。従って、このせん断遅れによる応力の極大化に対しては、主桁内の補強など、別の対策を施す必要があると考えられる。しかし、図24の脚躯体前面位置では、基本モデルで見られた傾向（外側がC L側に比べて応力が高い傾向にあり、その最大値は試設計値に比べて大きい値を示している。）が解消され、応力の分布が均一化する傾向にあり、その最大値も試設計値より小さくなっている。

5. まとめ

中間支点結合部の応力分布特性や応力伝達性状に着目し、弾塑性FEM解析を行った結果を以下にまとめる。

- ①常時の荷重に対する主桁の応力分布性状について、基本モデルのFEM解析結果と骨組解析による試設計値は良い一致を示すことがわかった。大規模地震時の荷重ケースに対して、アンカービームの垂直応力、想定される中立軸位置は、SRC方式にて断面計算を行った試設計値とは一致しない傾向が認められた。
- ②RC柱の主鉄筋を隅角部内の充填コンクリートに定着する影響について、FEM解析結果より考察を行った。その結果、主桁下フランジを貫通し、隅角部内の充填コンクリートに定着されている鉄筋（以下、貫通鉄筋）を無くした場合、アンカービームフランジの垂直応力の解析値及びその応力分布より想定される中立軸位置が、SRC方式として断面計算を行った試設計値に近づく傾向が認められた。また、RC脚の引張主鉄筋応力についても、貫通鉄筋が無い方が、より設計思想に近い応力分布（アンカービーム先端に引張鉄筋応力の最大値を発生させる）に近づく結果となったが降伏応力は超過していない。なお、鋼主桁直下において、脚コンクリート要素に、設計基準強度（ $\sigma_{ck} = 27\text{N/mm}^2$ ）を超過する圧縮側の垂直応力が発生しており、貫通鉄筋を充填コンクリートに定着しないことにより、局部的とはいえ、コンクリートの応力増加が生じている。そこで、貫通鉄筋の有無がアンカービーム定着部の終局耐力や破壊性状に影響を及ぼす可能性の有無については、今後、模型載荷実験により慎重に検討する必要があると考えている。
- ③アンカービーム定着長の適切性について、大規模地震時に対するFEM解析結果より考察を行った。その結果、アンカービーム定着長を2.5m（橋脚幅Bの0.55

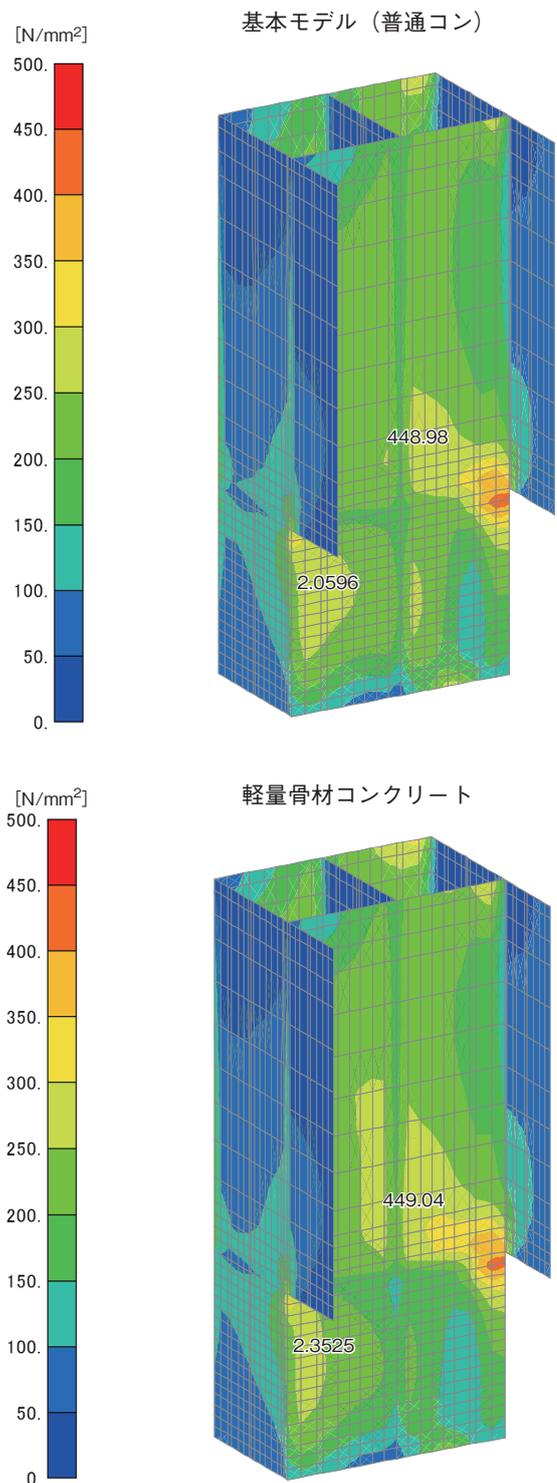


図22 von Mises 応力コンター

倍)基本モデルに比べると、モデル3-1、3-2とも、アンカービーム根元部の垂直応力性状、およびその最大値はほとんど変わらない結果となった。また、アンカービーム長を3.4m（橋脚幅Bの0.75倍）としたモデル3-1では、アンカービーム先端部にくさび形の許容引張応力（ $\sigma_{ta} = 2.07\text{N/mm}^2$ ）を超える領域が発生し、その上部では必要定着長が確保可能な健全域が残存し

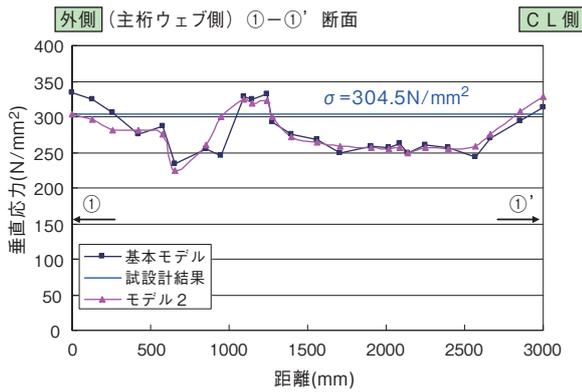


図 23 主桁フランジの垂直応力分布 (アンカービーム前面)

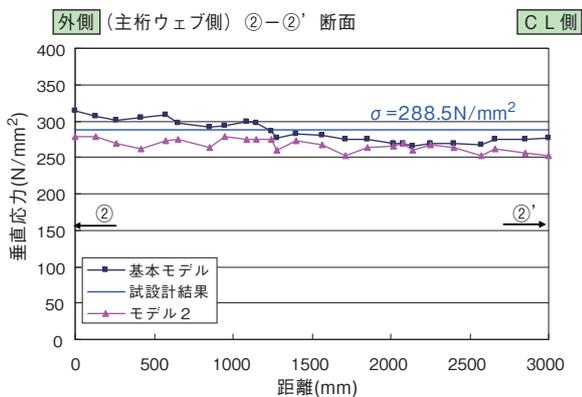


図 24 主桁フランジの垂直応力分布 (脚躯体前面)

ている。この応力分布性状から、モデル3-1の破壊時における、理想的な塑性ヒンジの形成を示唆するものと考えられる。従ってアンカービーム長は、橋脚幅Bの0.75倍程度確保するのが妥当と考えられる。

- ④鋼箱桁隅角部内の充填コンクリートに軽量骨材コンクリートを用いた場合の特性として、アンカービームなどの鋼断面などの応力分布性状は、普通コンクリートの場合と比べて大きな差異が無いことがわかった。これらの結果から、充填部に軽量骨材コンクリートを用いるのは、構造的に問題ないものと考えられる。
- ⑤隅角部の充填コンクリートを主桁軸方向に延長する効果について、常時の荷重状態において、アンカービームウェブからのせん断遅れ現象による応力の極大化に対しては、ほとんど効果が無いことがわかった。しかし、それを少し離れた位置では、応力の分布が均一化する傾向にあり、充填コンクリート延長の効果が顕れていることがわかった。

6. あとがき

本研究では、長大スパンを有し複線箱桁となる鉄道橋に、上下部一体構造を適用するため、アンカービーム結

合方式を対象にズームアップ弾塑性FEM解析を行い、貫通鉄筋の有無、アンカービーム長、充填コンクリートの種類、充填コンクリートの範囲などを変化させ、中立軸など仮定した一定の条件下でパラメータスタディを行った。これらの結果は、道路橋や、中規模スパンの鉄道橋梁であっても、鋼箱桁にアンカービーム定着構造を適用する場合には参考となると考えている。

今後、縮小モデルによる、地震荷重を想定した正負交番繰り返し載荷試験を行い、結合部近傍の応力性状、スタッドのずれせん断力分布などを確認することで、本研究で得られた結果の妥当性の確認、設計方法の提案などを、行っていく予定である。

最後に本研究を行うにあたり貴重なご意見を頂いた共同研究者の方々、北海道大学の林川俊郎教授、鉄道建設・運輸施設整備支援機構の藤原良憲氏、財団法人港湾空港建設技術サービスセンターの保坂鐵矢氏、パシフィックコンサルタンツ株式会社の八巻康博氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 保坂, 依田, 岩崎, 岡田: アンカービームを用いた上下部一体構造の地震時を想定した静的交番繰り返し載荷試験, 構造工学論文集, Vol. 47A pp. 1391-1400, 2001.3.
- 2) 鈴木, 保坂, 依田, 八巻, 久保田: アンカービームを有する上下部一体構造の繰り返し交番荷重による破壊性状, 土木学会年次講演論文集, pp. 433-434, 2002年9月.
- 3) 鋼・コンクリート複合橋梁の最近の進歩, 土木学会鋼構造委員会, 2001.11.
- 4) コンクリート標準示方書, 土木学会, 2002年3月. 鉄道構造物等標準設計・同解説, 鉄道総合技術研究所, 2002.12.
- 5) 鈴木, 安部, 平城, 児島, 橋: 軽量骨材コンクリートを用いたずれ止めのせん断特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 50A pp. 1165-11172, 2004.3.
- 6) 鈴木, 藤原, 平城, 児島, 辻角, 橋: 軽量骨材コンクリートを用いたずれ止めのせん断疲労特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 51A pp. 1493-1500, 2005.3.
- 7) 保坂, 平城, 小枝: 鉄道用連続合成桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, 1998.3.
- 8) 藤原, 保坂, 林川, 八巻, 水野: 鋼箱桁とRC柱の剛結部に用いるアンカービーム定着構造の耐荷性能に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.54A 2008.3.