

論文 波形鋼板橋に発生するハダ隙現象に着目した検討

内野 裕士^{*1}・幸左 賢二^{*2}・栗根 聡^{*3}・張 建東^{*4}

要旨：波形鋼板 PC 桁のウェブと床版の接合方式として，経済性に優れる埋込み接合方式が挙げられる。しかし，埋込み接合方式を用いた実験の結果，その接合部にハダ隙現象が生じる可能性があることが確認された。そこで，ハダ隙の生じた下床版に着目し，2 次元のフレーム解析を用いてハダ隙の発生メカニズムを明らかにした。さらに，主鉄筋・貫通鉄筋をパラメータとした解析を行うことで，これらによるハダ隙抑制効果について検討した。

キーワード：波形鋼板，埋込み接合方式，ハダ隙現象，フレーム解析

1. はじめに

波形鋼板ウェブ PC 橋において，床版とウェブの接合方式には数種類あるが，これらは大きく分けて床版方式と，埋込み接合方式とに大別できる。埋込み接合方式は，経済性に優れている反面，波形鋼板を直接コンクリートに埋込んでいるため，主桁の曲げ変形に伴って接合部のウェブと床版との間に隙間（以下，ハダ隙）が生じ，耐久性上の弱点となる事が懸念されている。このハダ隙の拡大に伴い，雨水などがコンクリート床版内に浸水して鋼板や鉄筋の腐食が進行し，長期の耐久性に悪影響を及ぼすため，ハダ隙現象の解明ならびにその抑制は埋込み接合方式の重要な課題である。

そこで本研究では，埋込み接合方式についての載荷実験を行い，耐荷力および接合部の損傷状況について確認を行った。さらに，下床版を 2 次元のフレーム解析で再現し，接合部に生じるハダ隙の発生メカニズム，および損傷状況を確認し，パラメータ解析を行いハダ隙の抑制方法を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験供試体は阪神高速道路北神戸線の中野高架橋をモデル橋梁とし，PC 箱桁の片ウェブを 1/3 縮尺でモデル化した。供試体の緊張量は，実橋と供試体断面において，PC 鋼材ひずみを合わせるように決定した。また，供試体端部には荷重の偏心に対する供試体の安定性を考慮して横桁を設けた。波形鋼板の板厚については鋼板の先行座屈を避けるため，せん断座屈強度を考慮し 6mm とした。表 - 1 に供試体諸元を，図 - 2 に供試体形状を示す。なお，実験では波形鋼板とコンクリート床版との接合方式には，従来の接合方式(No.1 供試体)と，等辺山形鋼を波形鋼板ウェブの上下端側面にボルト止めした構造形式(No.2 供試体)を採用した（図 - 1 参照）。

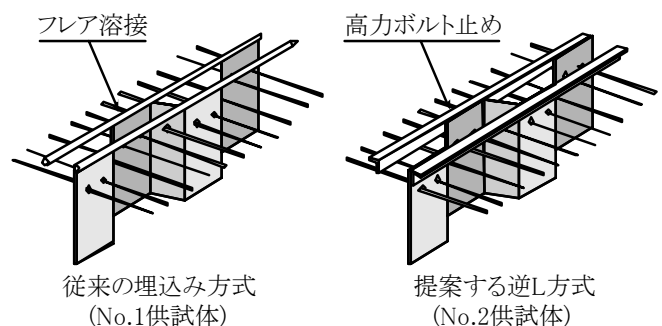


図 - 1 接合方式

*1 九州工業大学大学院 建設社会工学専攻 (学生会員)

*2 九州工業大学 建設社会工学科教授 Ph. D. (正会員)

*3 新構造技術株式会社 大阪支店 設計部 (正会員)

*4 (株)ピーエス・三菱 大阪支店 (正会員)

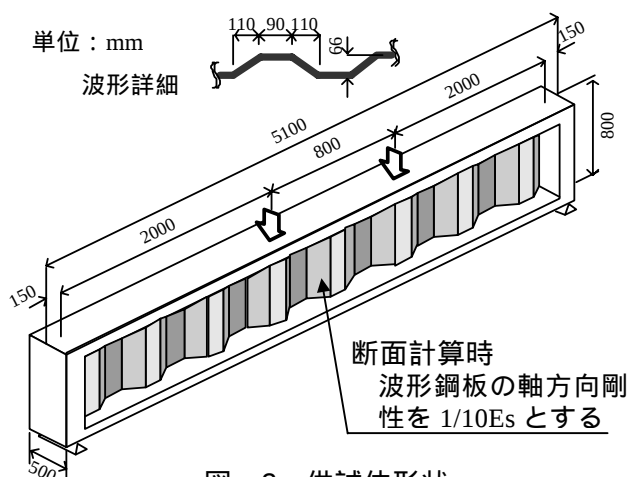


図 - 2 供試体形状

2.2 実験手法

載荷は図 - 2 に示すように、供試体を単純支持として、スパン中央部における静的 2 点載荷（せん断スパン比 = 2.5）とした。加力の制御は荷重制御で行い、支間中央近傍の下側接合部にはデジタルビデオカメラを常設し、ひび割れ発生荷重および載荷に伴うひび割れの進展傾向を観察した。さらに、接合部に生じたハダ隙を同画面上に映したクラックスケールとの比較からハダ隙量を推定した。

2.3 実験結果

No.1, No.2 供試体はともにほぼ同様の損傷状況であったので、以下には No.1 供試体の損傷状況について述べる。図 - 3 に示すように、供試体下側に発生した曲げクラックは荷重 700kN ~ 800kN にかけて下床版側面を上向きに進展し、その後ひび割れは波形鋼板の埋込み位置に向けて進展した。載荷荷重が 850kN を超えると主要なひび割れは接合部に達し、写真 - 1 に示すように波形鋼板と下コンクリート床版との間のスパン中央から左右に 600mm(支点間の 1/4)の区間にハダ隙が生じた。その後、載荷荷重が増加するに従い、曲げ変形が大きくなりハダ隙量が拡大した。

3. 解析による検討

3.1 解析モデル

曲げモーメントの増加に伴うハダ隙現象を説明するため図 - 4 に示す下コンクリート床版の

表 - 1 供試体諸元

供試体名称		No.1	No.2
接合部	形式	埋込み方式	逆L方式
	埋込み長	65mm	
	孔径	φ 20mm	
	貫通鉄筋	SD345 / D10	
	接合部材	異形鉄筋 SD345 D13 フレア溶接	等辺山形鋼 SS400 L30×30×3 高力ボルト
鉄筋	材質	SD345	
PC鋼棒	材質	SBPR 930/1080 (φ 23mm)	
	緊張力	310kN (0.8Py)	
ウェブ	材質/板厚	SS400/6mm	

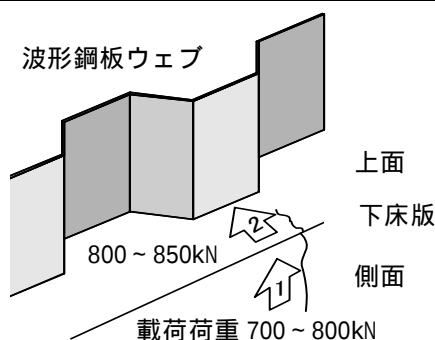


図 - 3 クラックの進展状況

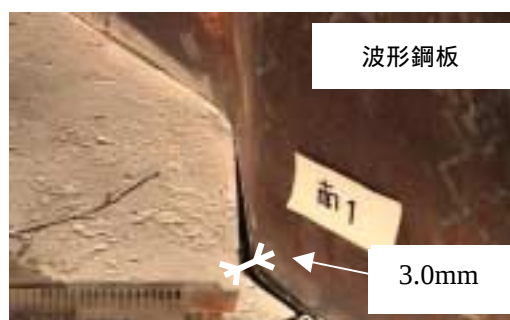


写真 - 1 接合部における損傷状況

部分モデルを取り出したフレーム解析を実施した。実験においては、載荷荷重の増加とともに床版に約 300mm 間隔のひび割れが発生している。そこで、ひび割れ間の下床版を図 - 5 に示すようなフレームとしてモデル化した。

(1) 各部材のモデル化

図 - 5 に解析モデルを示す。波形鋼板は梁要素でモデル化を行い、主鉄筋、接合棒鋼および貫通鉄筋などの抵抗は、バネ要素を用いてモデル化を行っている。ここで、バネ要素の抵抗モデルは各材料の応力度 - ひずみ関係から弾性係数 E 、断面積 A 、および部材長 l を考慮して決定した。具体的に、各部材の初期剛性 $K1$ 、耐力 P を以下に示す式を用いて算出し、バネ要素の

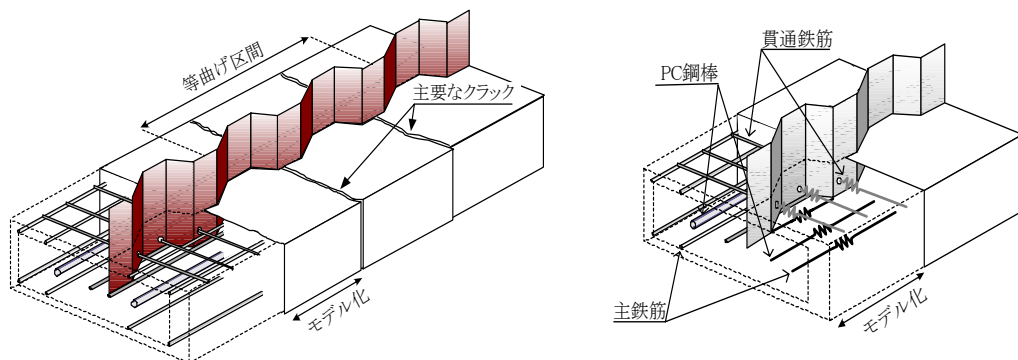


図 - 4 下床版のイメージ図

荷重 - 変位関係とした。なお、各部材の抵抗値は実験で用いた材料の物性値から計算している。

$$K1 = E \cdot A / l \quad (1)$$

$$P = \sigma \times A$$

ここに、 $K1$ ：各抵抗部材の初期剛性

E ：ヤング係数(N/mm^2)

A ：各抵抗部材の断面積(mm^2)

l ：各抵抗部材の長さ(mm)

P ：各部材の耐力(N)

σ ：鋼材の降伏応力および、コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

式(1)中の各鋼材の断面積 A は道路橋示方書¹⁾を参照している。さらに、各抵抗部材長 l は抵抗部材が一様に抵抗するとして考えている。主鉄筋・貫通鉄筋などの鉄筋の抵抗モデルは、図 - 6 に示すようにトリリニア型とした。橋軸方向に配置しているコンクリートバネの抵抗モデルは、図 - 7 に示すように引張側を考慮しないモデルとしている。また、PC 鋼棒の抵抗モデルは道路橋示方書 編¹⁾に準じトリリニア型としている。

波形鋼板とコンクリート間の界面には、すべり方向と接触方向のバネを設置した。ここで、すべり方向のバネ耐力は既往の文献²⁾から $4N/mm^2$ として考えた。また、接触方向にはコンクリートの圧縮抵抗を考慮してモデル化した。これらのバネは、波形鋼板とコンクリートが接する領域でモデル化を行っている。

(2) 解析モデルにおける外力

本解析モデルは、図 - 5 に示すように下床版を 2 次元でモデル化している。従って、解析モデルに加える外力としては、下床版中に発生す

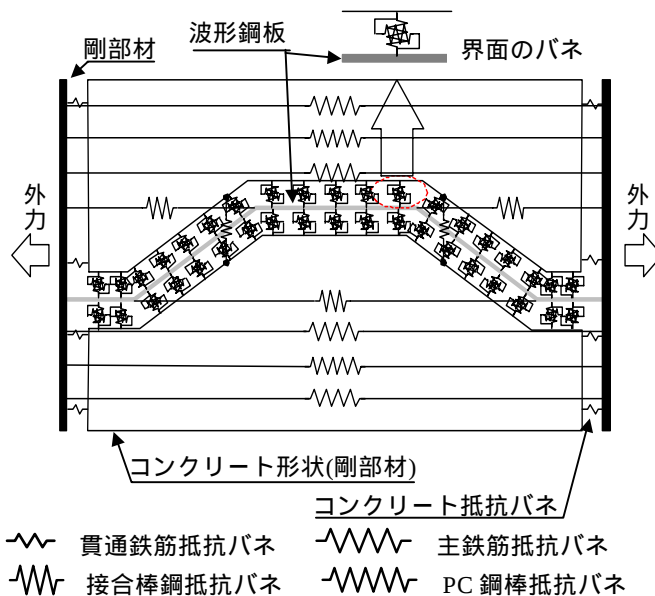


図 - 5 解析モデル

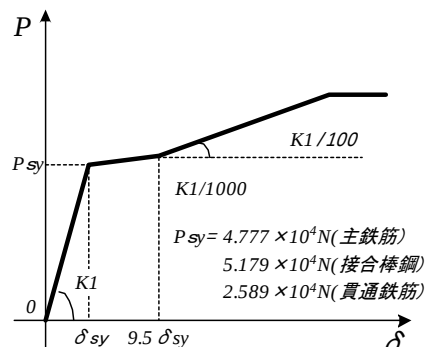


図 - 6 鉄筋の荷重 - 変位関係

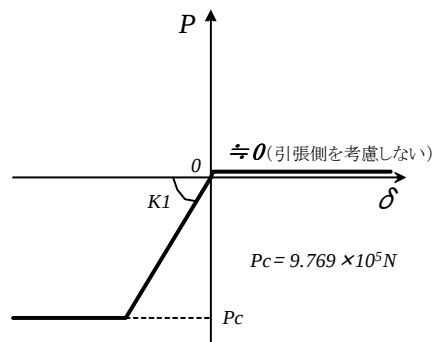


図 - 7 コンクリートの荷重 - 変位関係

る曲げ引張力を橋軸方向に加えることが考えられる。そこで、既往の研究³⁾から波形鋼板のヤング係数を $1/10E_s$ と仮定し断面計算から下床版中の曲げ引張力を算出した。具体的には、断面計算によりクラック発生・鉄筋降伏および終局状態(断面上縁のひずみが 3500μ)での各荷重と中立軸の位置を算出し、平面保持の仮定より、下床版中でのひずみ分布を求める。下床版中の各部材のひずみから応力 - ひずみ関係を用いて下床版中に発生する曲げ引張力を算出した。

3.2 解析結果

図 - 8 に実験と解析結果の各ひずみ進展について比較したものを示す。橋軸方向のひずみ進展に着目すると、実験と解析結果とも載荷荷重 550kN 程度からひずみ進展が見られる。また、橋軸直角方向に配置している貫通鉄筋のひずみ進展に着目すると、解析では載荷荷重 800kN 以降に顕著なひずみ進展が見られる。これは、載荷荷重 800kN 以降、主鉄筋などの引張りに抵抗する鋼材が降伏しているため、橋軸方向の剛性が低下し、そのため橋軸方向の変形が大きくなり、波形鋼板が平板に戻ろうとする挙動を示している。従って、橋軸直角方向の貫通鉄筋にひずみが生じ始めると考えられる。その後、載荷荷重 1000kN 程度までは実験と解析でほぼ同様のひずみ進展を示す。しかし、最大荷重時に実験のひずみは降伏ひずみ程度であるのに対し、解析は 6000μ を超える大きな値が生じている。実験は荷重が増加するに従いクラック間隔が密になるため、床版の連続性が無くなり、貫通鉄筋のひずみ進展が小さくなる。一方、解析は床版を一要素としてモデル化していることから、終局状態まで貫通鉄筋のひずみが進展したために差異が生じると考えられる。

図 - 9 にハダ隙量の進展状況について示す。ここで解析のハダ隙量は、波形鋼板の折り曲げ部とそこに対応する床版間の相対変位としている。解析では載荷荷重 700kN で 0.19mm のハダ隙が生じている。その後、ハダ隙の進展は増加傾向を示し、載荷荷重 800kN 以降に顕著なハダ

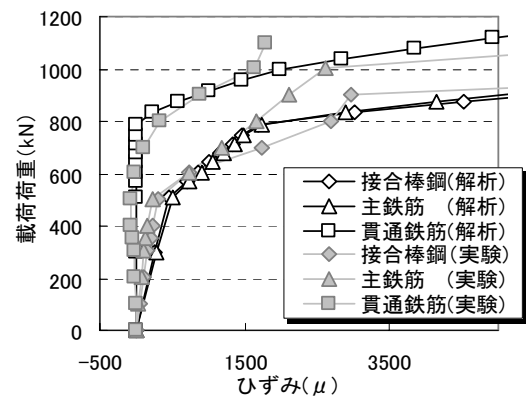


図 - 8 ひずみ進展状況の比較

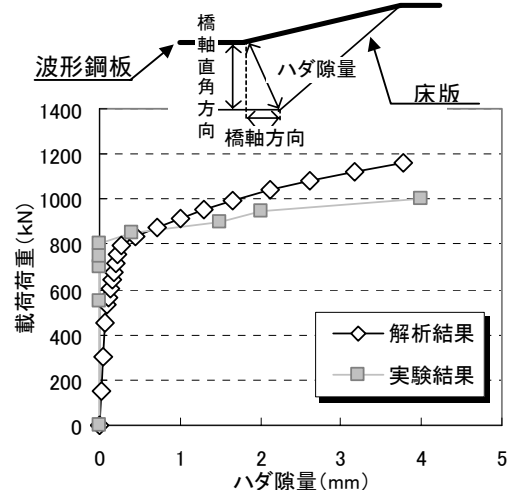


図 - 9 ハダ隙量の進展状況

隙進展が生じる結果となった。実験と解析におけるハダ隙量を比較すると、各荷重で両者に差が見られるものの、ハダ隙が増加する荷重がほぼ同程度である。さらに、ひずみ進展も実験と同様の傾向を示していることから、今回の解析モデルは概ね実験を再現できていると考えられる。

また、鉄筋が許容応力度レベルに達した荷重でのハダ隙量は、約 0.1mm 程度と小さいものであった。

図 - 10 にハダ隙進展の模式図を示す。載荷荷重 715kN 時には約 0.19mm のハダ隙が生じている。このとき接合棒鋼のひずみは 1300μ 程度と降伏までには余裕がある。この荷重レベルでは、橋軸方向のハダ隙が卓越しており、橋軸直角方向にはほとんどハダ隙は生じていなかったことが分かる。その後、曲げ引張りに抵抗する主鉄筋や接合棒鋼が降伏することで、橋軸直角方向の貫通鉄筋にもひずみが生じ始めている。このとき、徐々に橋軸直角方向のハダ隙成分も拡

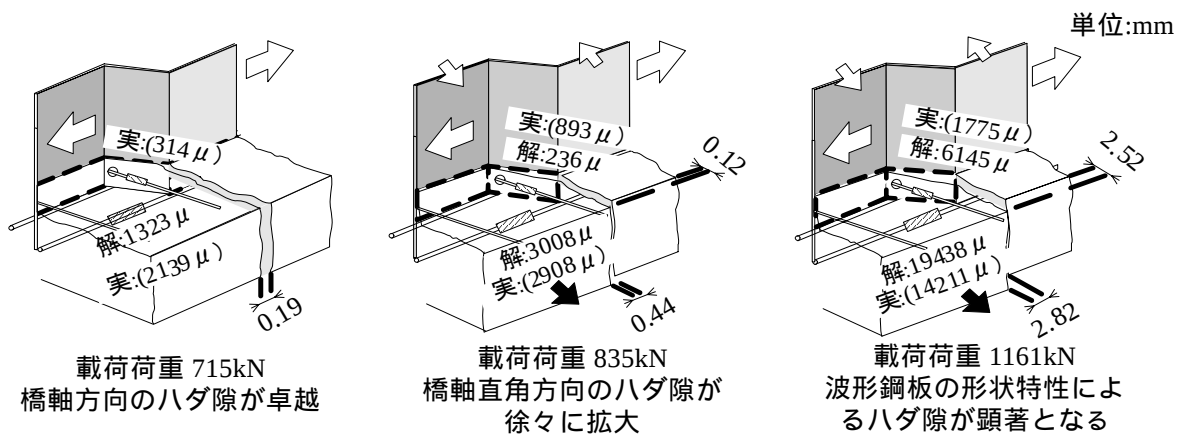


図 - 10 ハダ隙進展の模式図

大していることが伺える。すなわち、橋軸方向への変形が顕著になると波形鋼板が独自の变形挙動を示し、橋軸直角方向のハダ隙が発生、進展していると考えられる。

4. パラメータ解析

4.1 解析概要

表 - 2 に今回の解析で行ったパラメータを示す。前述した実験を再現するケースを case1 とし、case2, case3 は主鉄筋、case4 は接合棒鋼、case1-2 は橋軸直角方向に配置している貫通鉄筋をパラメータとしている。case2, 3, 4 は曲げ耐力を大きくすることで、ハダ隙進展を遅らせるものである。なお、case2, 3, 4 の終局曲げ耐力は case1 と比べてそれぞれ曲げ耐力が 15, 44, 6% 増加している。また、case1-2 は、曲げ耐力を増加させずハダ隙量のみを抑制しようとしたものである。

4.2 解析の結果

図 - 11 に主鉄筋をパラメータとした場合の解析結果を示す。主鉄筋をパラメータとした結果、同荷重で各ケースを比較すると、ハダ隙量の進展が抑えられていることが分かる。しかし、最大荷重時でのハダ隙量はどのケースにおいてもほぼ一定の値となっている。これは、主鉄筋の径を上げることで、主鉄筋の降伏荷重が高くなるが、主鉄筋が降伏した後は、どのケースも同様にハダ隙が進展するためと考えられる。

図 - 12 に貫通鉄筋をパラメータとした場合での解析結果の比較を示す。載荷荷重 800kN では、case1, 1-2 の両ケースともにハダ隙量は 0.26mm であった。しかし、その後荷重が増加

表 - 2 解析パラメータ

	パラメータ			曲げ終局耐力 (kN)
	主鉄筋	接合棒鋼	貫通鉄筋	
case1 (鉄筋比)	D10 (0.761)	D13 (0.338)	D10 (0.380)	1161.1
case1-2 (鉄筋比)	D10 (0.761)	D13 (0.338)	D22 (2.065)	1161.1
case2 (鉄筋比)	D16 (2.118)	D13 (0.338)	D10 (0.380)	1338.8 (耐力15%増)
case3 (鉄筋比)	D22 (4.129)	D13 (0.338)	D10 (0.380)	1676.7 (耐力44%増)
case4 (鉄筋比)	D10 (0.761)	D22 (1.032)	D10 (0.380)	1226.3 (耐力6%増)

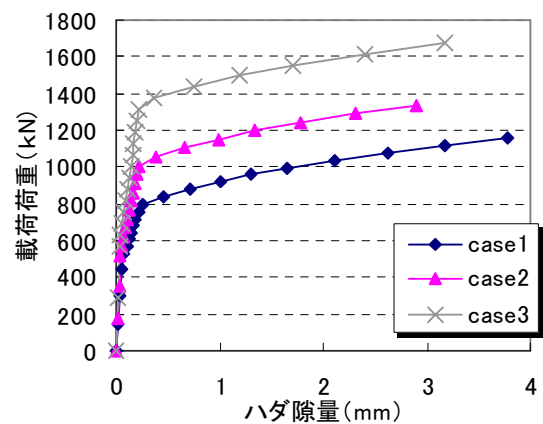


図 - 11 ハダ隙量の比較 (主鉄筋)

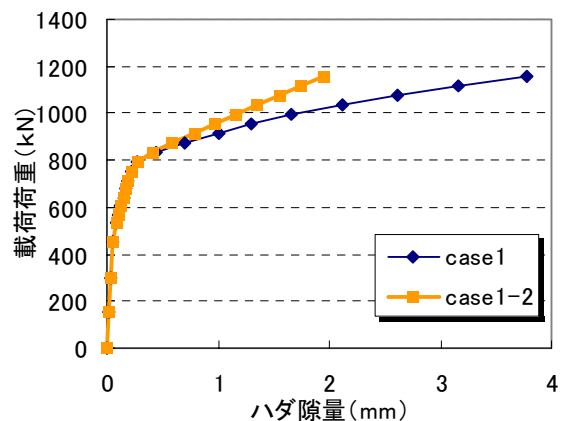


図 - 12 ハダ隙量の比較 (貫通鉄筋)

するに従い，ハダ隙量に差が見られ，最大荷重時には case1 で 3.78mm，case1-2 では 1.94mm のハダ隙量を示している。図 - 14 に模式図を示す。ハダ隙を橋軸方向および，橋軸直角方向の成分に分解して考えると，貫通鉄筋径をパラメータとすることにより，主に橋軸直角方向のハダ隙成分が小さくなっていることが分かる。すなわち，波形鋼板が平板に戻ろうとする挙動を示し始めることで，貫通鉄筋はその効果を発揮すると考えられる。これは，波形鋼板が平板に戻ろうとする挙動を示す際，波形鋼板の両側に位置するコンクリート床版が，波形鋼板の独自の挙動により，橋軸直角方向に押し出される。しかし，コンクリート床版間の貫通鉄筋が抵抗することにより橋軸直角方向のハダ隙量が抑制されていると考えられる。

図 - 14 に接合棒鋼をパラメータとした解析結果を示す。接合棒鋼をパラメータとすることで，同荷重でのハダ隙量は減少することが分かる。しかし，case4 も case1 と同様のハダ隙量の進展が見られたことから，接合棒鋼が降伏した後は case1 と同様にハダ隙が進展すると考えられる。

なお，現行の接合部の設計荷重前後では，各解析結果ともに 0.1mm 程度と非常に小さいハダ隙量であった。また，終局状態では大きなハダ隙が発生するが，桁としては，曲げ終局後に顕著なハダ隙が生じることから，構造上の問題は少ないと考えられる。

5. まとめ

本解析モデルを用いて，接合部に発生するハダ隙現象について検討した結果を以下に示す。

(1) 曲げモーメントが増大することで主鉄筋など橋軸方向の鉄筋が降伏し，波形鋼板が形状保持できなくなる。そのため，波形鋼板が平板に戻ろうとする挙動を示し顕著なハダ隙が発生すると考えられる。

(2) ハダ隙には橋軸方向と橋軸直角方向の成分があり，橋軸方向への変形が大きくなること

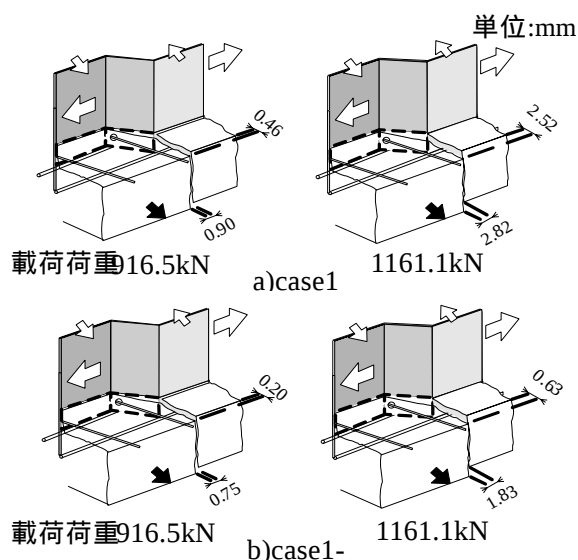


図 - 13 ハダ隙量の比較模式図

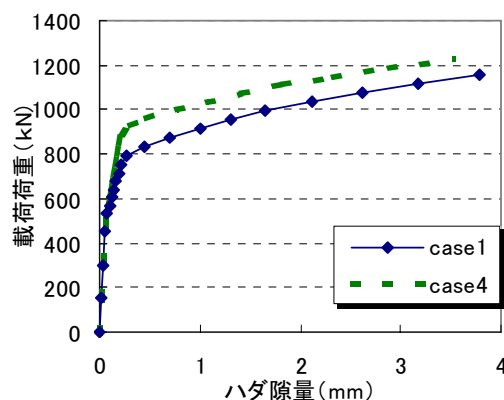


図 - 14 ハダ隙量の進展状況（接合棒鋼）

で橋軸直角方向のハダ隙が進展する。

(3) 貫通鉄筋径を上げることで橋軸方向の鉄筋が降伏した後もハダ隙量の抑制の効果がある。

(4) 現行の接合部の設計荷重時に接合部に発生するハダ隙量は 0.1mm 程度と小さいものであると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 編，2002.3
- 2) 上村知範，松本貴宏，依田照彦：孔あきジベルを有する波形鋼板ウェブのせん断耐荷力に関する数値解析的検討，土木学会第 57 回年次学術講演会，第 57 pp.33-34，2002.9
- 3) 藤林健二，幸左賢二，栗根聡：波形鋼板ウェブの埋込み接合部性状に関する解析的検討，コンクリート工学論文集，第 25 巻第 2 号 pp.1615-1620，2003.1