

(8) 上下部一体構造に用いるアンカービーム のスタッドジベルの本数と配置

横山 秀喜¹・筒井 康平²・斉藤 雅充³・土橋 亮太⁴

¹ 正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 設計第一課
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1 横浜アイランドタワー)

E-mail: yokoyama.hid-22t3@jr-tt.go.jp

² 正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 設計第一課
(〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1 横浜アイランドタワー)

tsutsui.koh-p6x4@jr-tt.go.jp

³ 正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目 8 番地 38)

E-mail: saito.masamichi.96@rtri.or.jp

⁴ 正会員 日本交通技術株式会社 札幌支店 技術第二課
(〒060-0011 北海道札幌市中央区北 11 条西 15 丁目 サンエーアインビル)

E-mail: r-dobashi@jtc-con.co.jp

結合部にアンカービームを用いた上下部一体橋梁は、アンカービームを介して RC 橋脚の断面力を鋼桁に伝達する方式であり、そのフランジの表裏面には、応力伝達用のスタッドジベルを配置する。スタッドジベルの必要本数は、アンカービームのみが断面力を伝達すると仮定して算出しているが、本数が多く施工に時間を要する。

本研究では、応力伝達の実態を把握し、より合理的なスタッドジベルの本数・配置の設定を試みた結合部の非線形 FEM 解析の結果、応力伝達はアンカービームと橋脚のコンクリートおよび鉄筋が一体 (SRC 断面) で桁に伝達していること、スタッドジベルに働くせん断力がアンカービーム先端に向かって大きくなることを明らかにした。それらを踏まえ、より効率的なスタッドジベルの必要本数および配置方法の提案を行った。

Key Words : rigid frame bridge, anchor beam, stud dowel, steel reinforced concrete (SRC), shear connector

1. はじめに

上部工と下部工を一体化した上下部一体構造物は、支承部が無い場合、耐震性、維持管理性に優れた構造形式である。なお、本報告が示す上下部一体構造とは、上部工に鋼構造 (SRC 構造含む)、下部工に RC 構造などの異種材料を採用し、結合した構造を示している。一例として、上部工に下路 SRC 桁、下部工に RC 橋脚および橋台を適用した上下部一体構造である三陸鉄道ハイペース橋りょうを写真-1 に示す。

上部工と下部工の結合部は、確実に力を伝達することが可能な構造とする必要があるが、結合する部材の剛性や材料特性が異なることから、局所的な応力の発生や、疲労による損傷などが懸念される。また、鉄道橋においては復旧性が重要であり、大規模地震時の損傷箇所が明確で容易に復旧可能な構造が求められる。そのため鉄道

橋では、これまでの実績や解析、実験等により安全性を検証した結果から、アンカービーム方式を結合部とした上下部一体橋梁を基本としている。

アンカービーム方式を用いた結合部は、アンカービームのみが応力伝達すると仮定し設計している。この場



写真-1 三陸鉄道ハイペース橋りょう

合は、アンカービームのフランジにスタッドジベル（以下、「ずれ止め」と呼ぶ）の配置が必要となるが、その本数が多く、施工に時間を要している。そこで本研究では、応力伝達の実態を解明し、より合理的なずれ止め本数と配置方法について検討した。

2. アンカービームの概要と応力伝達

(1) アンカービームの概要

アンカービームは、上部工の下フランジ下面から突出させた鋼部材（十字鉄骨など）である。アンカービームの事例を写真-2、図-1示す。アンカービームのフランジ表裏面には、ずれ止めを配置しており、応力伝達に用いている（図-2は片面配置としているが両面配置もある）。地震時に塑性化させる部位をアンカービーム先端部付近のRC断面とすることで、修復の難しい鋼桁やその周辺のコンクリートの損傷を防ぐことができる。

(2) ずれ止めの設計における応力伝達の考え方

アンカービーム方式を用いた上下部一体構造は、アンカービームの鋼断面のみが応力伝達すると仮定し、柱の上部に作用する断面力をアンカービームの前面に設けたずれ止めのせん断抵抗に置き換えて鋼断面に伝達させ、それが主桁に設けたダイヤフラムを介して伝達することとしている（図-2上図）。この考え方は、安全側ではあるものの、ずれ止めの必要数が多く、設置に時間がかかるため、改良が望まれていた。

アンカービーム周辺には、柱の主筋の一部を主桁の内部まで貫通しており（以下、貫通鉄筋）、主桁内のダイヤフラムで囲まれた支点部付近には、コンクリートを充填して鋼桁部の剛性を確保している。このことから、アンカービームを有する支点部は、実際にはSRC構造として応力伝達していると想定される¹⁾。それに加え、橋脚コンクリートの支圧抵抗や貫通鉄筋の引張抵抗も応力伝達を行っていると考えられるため（図-2下図）、アンカービームを用いた場合の応力伝達の実態について、次章において確認した。

3. 応力伝達状況の確認

(1) 解析の概要

アンカービーム方式における断面力の伝達状況を確認するため、アンカービームを用いて上下部一体化構造とした既存の2径間連続合成桁をモデルとし、結合部となる中間支点部付近を対象に、三次元有限要素法解析を行



写真-2 中間支点部に用いたアンカービーム事例

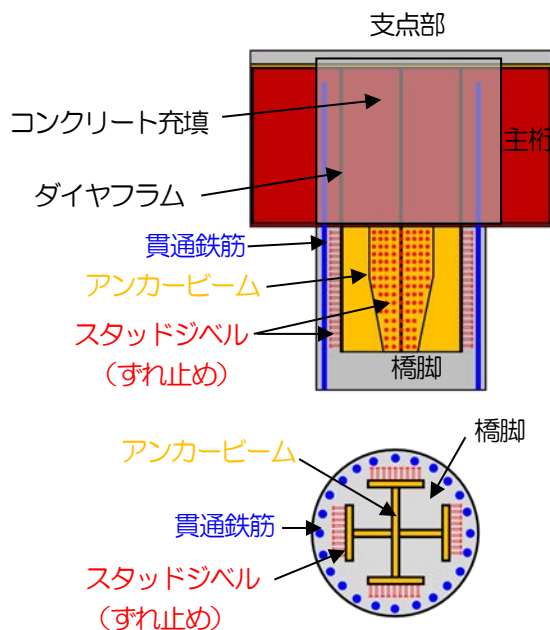


図-1 アンカービームの概要

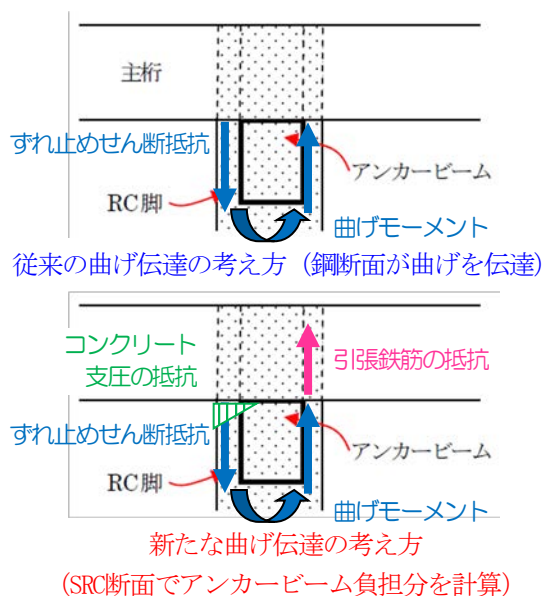


図-2 アンカービームの応力伝達の概要

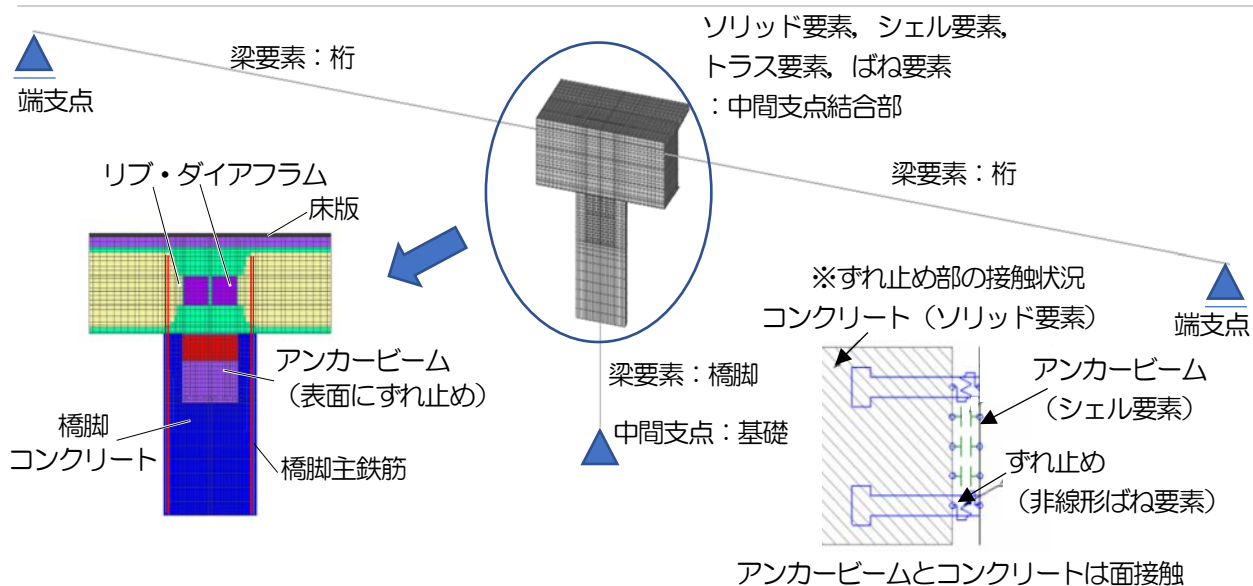


図-4 応力伝達状況確認用FEM解析モデル

表-1 発生断面力一覧表

		N(kN)	S(kN)	M(kN・m)
Case1	コンクリート	-33560.61	-708.99	47300.48
	アンカービーム	22072.14	-7847.10	36913.91
	鉄筋	6615.06	0	11818.98
	計	-4873.41	-8556.09	96033.36
Case2	コンクリート	-32948.2	-1127.55	45871.04
	アンカービーム	25646.52	-8714.49	41142.95
	鉄筋	2881.74	0	6783.03
	計	-4419.92	-9842.03	93797.01
Case3	コンクリート	-32317	-1828.96	45353.55
	アンカービーム	24949.57	-10056.35	41648.97
	鉄筋	2812.91	0	6909.93
	計	-4554.5	-11885.3	93912.45

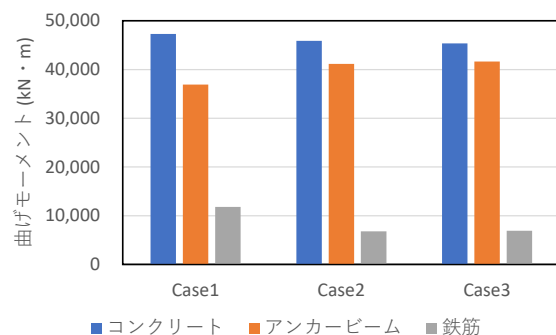


図-5 接合部の各要素が分担する曲げモーメント (M)
(中立軸まわり)

った。解析条件を以下に示す。

- 解析モデル：3次元有限要素モデル（ソリッド要素：コンクリート関連，シェル要素：鋼材関連，トラス要素：鉄筋，ばね要素：すれ止め，梁要素：鋼桁，コンクリート橋脚）（図-4）
- なお，すれ止めは既設計の結果に準拠し，アンカービームフランジの表裏に配置している。
- 解析方法：材料非線形性および鋼とコンクリートの接触を考慮した静的非線形解析
- 解析コード：ABAQUS Ver.2018
- 荷重条件：自重及び橋軸方向の地震時慣性力（値は既設計の数値を適用し，地震時慣性力は0.64Gとした）
- 材料条件：鋼材－主桁SMA490W，アンカービームSM570，鉄筋SD390，コンクリート－24.0N/mm²。
- 解析ケース：貫通鉄筋およびすれ止めの本数をパラメータとした3ケース
- Case1：基本ケース（既設計と同等の数量）

Case2：Case1から貫通鉄筋の本数を半数に低減

Case3：Case2からさらにすれ止め本数を半数に低減

なお，貫通鉄筋の本数は，既設計では橋脚の軸方向鉄筋の半数であるため，Case2, 3では橋脚軸鉄筋の1/4の本数とした。

(2) 解析結果

a) 発生断面力

接合部に働く断面力は，橋脚コンクリートのソリッド要素，アンカービームのシェル要素，および鉄筋のトラス要素の応力・面積から要素ごとの軸方向力およびせん断力を算定し，これをすべて足し合わせることで，断面力としての軸力（N）およびせん断力（S）を算出した。また，要素ごとの軸方向力に中立軸から要素中心までの距離を掛け合わせて，個々の要素によるモーメントを算出し，これをすべて足し合わせることで，断面力として

表-2 ずれ止めに働く鉛直方向せん断力の合計値および最大値

(a) 解析結果				(b) 計算値		
項目	Case1	Case2	Case3	項目	鋼断面仮定	SRC 断面仮定
圧縮側ずれ止め発生力最大	-104.1 (kN)	-104.1 (kN)	-104.1 (kN)	圧縮側フランジ応力 σ_c	-885.0 (kN/m ²)	-110.7 (kN/m ²)
引張側ずれ止め発生力合計	-2986.8 (kN)	-3182.0 (kN)	-3402.5 (kN)	圧縮側フランジ軸方向力 $\sigma_c \cdot Af$	-41418.4 (kN)	-5183.0 (kN)
圧縮側ずれ止め発生力最大	87.4 (kN)	91.4 (kN)	96.0 (kN)	引張側フランジ応力 σ_t	766.8 (kN/m ²)	287.8 (kN/m ²)
圧縮側ずれ止め発生力合計	10622.6 (kN)	11724.6 (kN)	9668.8 (kN)	引張側フランジ軸方向力 $\sigma_t \cdot Af$	35886.5 (kN)	13468.0 (kN)

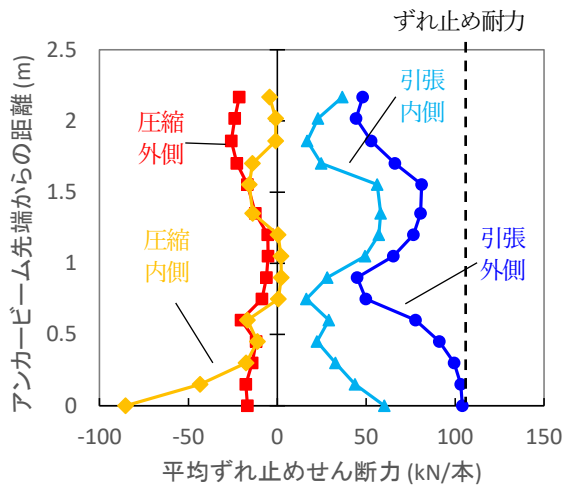


図-6 ずれせん断力の分布 (Case2)

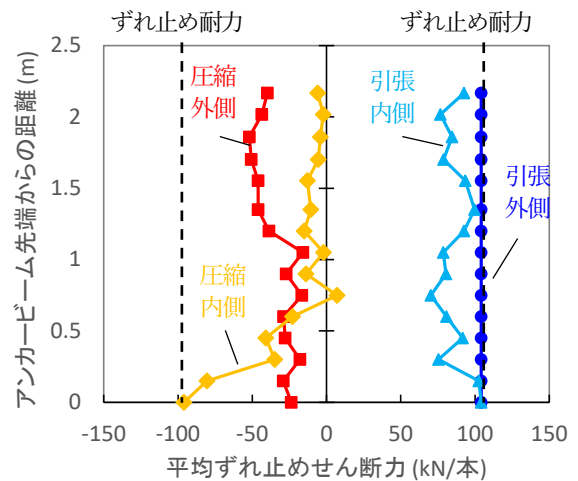


図-7 ずれせん断力の分布 (Case3)

の曲げモーメント (M) を算出した。表-1に各ケースの断面力を示す。また、曲げモーメント (M) については、同じものを図-5にグラフとして示す。

貫通鉄筋本数を半減させたCase2およびCase3では、基本ケースとなるCase1と比べて、鉄筋による断面力の伝達量が半減している。曲げモーメントの割合は、コンクリート：アンカービーム：鉄筋の順に、Case1が0.5：0.4：0.1、Case2および3が0.5：0.45：0.05であった。これは、鉄筋が伝達する曲げモーメントの減少分をアンカービームが負担したことによって考えられる。アンカービームが負担する曲げモーメントは、全体の半分以下であり、これまでのずれ止めの設計での想定よりはるかに小さいものと考えられる。

アンカービームのずれ止め本数を半減させたCase3では、Case2と比べて、伝達する曲げモーメントの差異は1%未満である。両者の違いはずれ止めの本数であるが、b)にみられるように、ずれ止めの本数が減った分、各々のずれ止めが負担するせん断力が増加したことで、同じ水平震度において同程度の曲げモーメント負担となったと考えられる。

b) ずれ止めに働く鉛直方向のせん断力

ずれ止めに働く鉛直方向せん断力の合計値および最大値を表-2(a)に示す。比較として設計時のL2地震時の断面力を用いて算出した鋼断面およびSRC断面でのフランジ応力およびフランジ軸方向力を表-2(b)に示す。鋼断面の設計値と解析結果を比較すると、設計値に比べ圧縮側で1割程度、引張側で3割程度の解析結果となっている。また、SRC断面での設計値と比較すると圧縮側で4割程度、引張側で8割程度の値となっており、鋼断面で算出した値に比べて解析値に近い値となることが確認できた。いずれも計算値より小さな合計せん断力となったのは、橋脚からアンカービームに伝達される曲げモーメントのすべてがフランジに配置したずれ止めを介して伝達されるわけではなく、橋軸直角方向のフランジや、アンカービーム先端での支圧など、他の要素でも伝達されているためであると推察される。特に、圧縮側のせん断力が小さいのは、圧縮側のフランジ先端において直接コンクリートに支圧力を伝達していることによると考えられる。

解析ケース同士を比較すると、貫通鉄筋を半減させたCase2では、基本ケースとなるCase1に比べて、ずれ止め発生力の合計値が圧縮側で6%程度、引張側で10%程度増加している。これは、a)でみられたように、貫通鉄筋

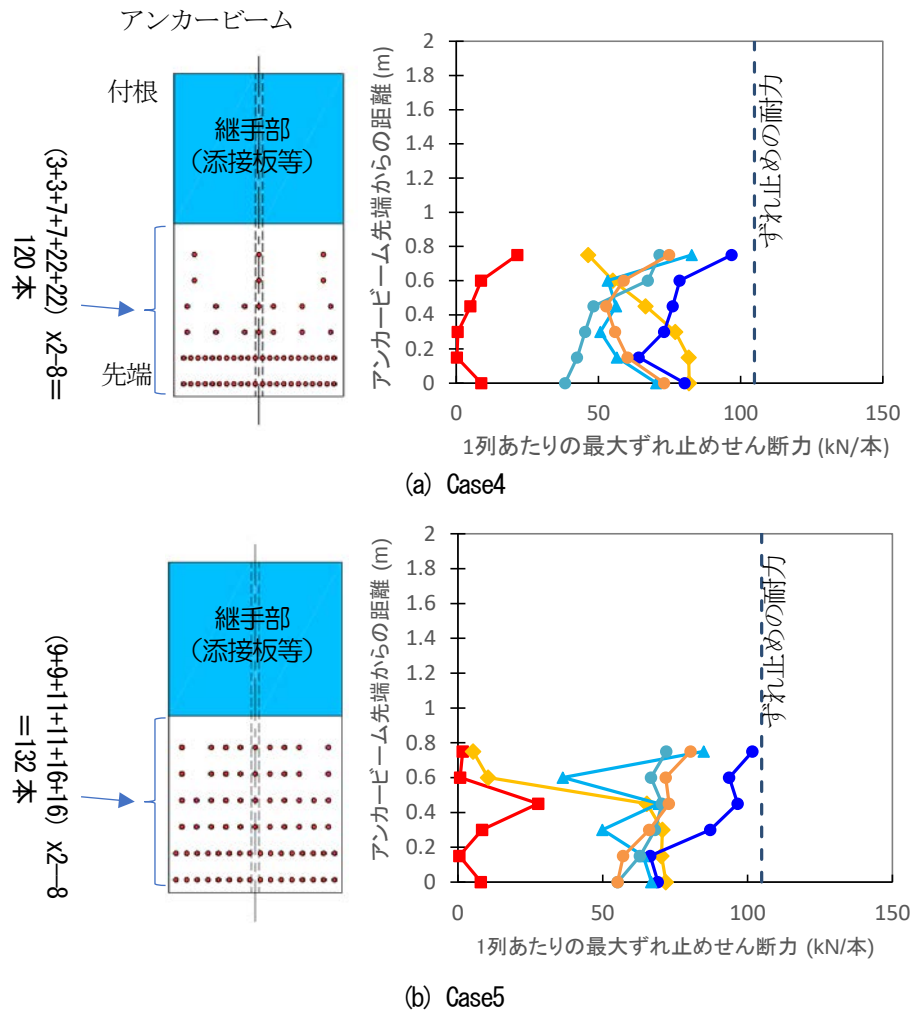


図-8 ずれ止め本数および配置とずれ止めに働くせん断力の発生状況

の減少により、アンカービームが負担する曲げモーメントが増加したことによると考えられる。また、Case2からずれ止めの本数を半減させたCase3では、Case2と比べて圧縮側で6%程度増加し、引張側で17%程度減少した。これは、ずれ止め本数の減少により一本当たりのずれ止めに働くせん断力が増加したことによると考えられる。

図-6にCase-2、図-7にCase3の、ずれ止めせん断力の列ごとの分布図を示す。なお、Case1はCase2と同様の傾向であるため省略する。部位別のせん断力分布をみると、引張側のずれ止めでは、アンカービーム先端に近づくほど大きなせん断力となっている。これは、文献2)や文献3)で見られた傾向と一致する。

圧縮側（外側）のずれ止めでは、アンカービーム根元に近づくほど、大きなせん断力となっている。これは、文献3) 4)の「圧縮側、先端固定」と同傾向である。一方、圧縮側（引張側）のずれ止めは、アンカービーム先端付近で大きなせん断力となっている。これは、文献3) 4)の「圧縮側、先端フリー」と同傾向である。

Case2と比べずれ止め本数を半減させたCase3において

は、圧縮フランジ側（正側）のずれ止めの全数で耐力に達していた。これは、前述のように、ずれ止めの本数が減ったことにより、1本当たりがずれ止め負担するせん断力が増加したことによるものと考えられる。

c) ずれ止め本数の低減案

解析の結果、従来の仮定のように、アンカービームの鋼断面のみが応力伝達しているのではなく、SRC断面として応力伝達し、コンクリート支圧や貫通鉄筋も分担していることが確認できた。ずれ止めが負担する値としては、SRC断面として評価して設定したフランジの軸方向力であれば解析結果に比べ安全側であることが確認できたが、貫通鉄筋本数による負担割合の影響、アンカービームの先端付近でせん断力が増加することや、引張側圧縮側といったずれ止めの位置によるせん断力の違い等も考えると、ずれ止めの配置を均等としたまま本数のみ一律に低減させても効率の面で課題があると考えられる。そのため、次章では、ずれ止めの配置を工夫することによる効率の向上について検討する。

4. ずれ止め本数および配置の効率向上

(1) 解析モデルの設定と判定方法

アンカービームに配置したずれ止めは、アンカービーム先端付近のせん断力が大きくなることが確認されたため、本数および配置を変更し、効率的なずれ止めの配置を検討することとする。ずれ止め配置の検討は、図-4に示す3次元有限要素解析を行い、ずれ止めの応力状態を把握した。応力分担にも影響する貫通鉄筋は、既設計の本数を半減したCase2の数量を基本としている。

アンカービームの付根部付近は、発生せん断力が小さいため、製作性を考慮し、付根部付近に現場接合（ボルト接合）箇所を設け、その影響範囲外にずれ止めを配置する計画とした。ずれ止めの配置に関しては、これまでの解析結果を踏まえ、先端側に多く、付根部に向かって減少する配置を基本とし、ずれ止め本数と配置をパラメータとして、解析ケースを設定した。解析ケースは図-8に示すずれ止めの配置を変えた2ケースとした。その他解析条件等は、3章で実施した条件と同様としている。

(2) 解析結果

解析結果のうち、各ずれ止めの最大せん断力を図-8に示す。Case4は、ずれ止め本数をこれまでの解析結果を参考に120本とし、先端部付近に多数配置したことにより、アンカービーム先端側のせん断力は耐力に対して余裕がある結果が得られたが、付根部側（継手部との境界部）ではずれ止め耐力相当の値となった。Case5はCase4に比べ先端側のずれ止め配置間隔を広げ、付根側の本数を増やした。その結果、付根部側のせん断力は、若干耐力に対して余裕を持った配置となった。

(3) ずれ止めの配置の提案

ずれ止め数の設置効率の向上を目的に、これまでの解析結果より、合理化の検討を行った。本検討の条件においては、以下に示すずれ止め配置方法とすることで、非線形の領域も含めて各ずれ止めに働くせん断力を平均化でき、効率的な配置が可能であることがわかった。

- ・アンカービームのフランジの応力から算定されるずれ止めの必要本数に、ずれ止めに働くせん断力のばらつきを考慮して本数を割り増すことにより、設置するずれ止め本数を算出する。
- ・設定した本数のずれ止めを、アンカービーム先端付近にのみ配置する。ずれ止めは、アンカービーム先端で最多の本数とし、先端から遠ざかるほど1列の本数を減じる。本検討の条件では、6列のずれ止めを2列×3ブロックに分け、各ブロックの本数比率は、アンカービ

ーム先端側から1.0 : 0.75 : 0.5とする程度の操作で、十分に効率的な配置とすることができた。

以上の方法をとることで、既設計の構造物で1フランジ当たり434本のずれ止めから、133本相当に本数を減じてもすべてのずれ止めが耐力以下であることが確認できた。そのため、約3割程度のずれ止め本数に軽減することが可能となり、施工性の向上が図れると考えられる。

5. まとめ

アンカービーム式結合方式を用いた中間支承を省略した連続合成桁のずれ止め配置の効率向上を目的に、非線形有限要素解析により、接合部における応力伝達状況を把握し、接合部の構造合理化の検討を行った。その結果、以下のことが確認できた。

- ・アンカービーム方式を適用した場合の応力伝達は、従来のずれ止め設計上の仮定のようにアンカービームの鋼断面（ずれ止めのせん断力）のみが応力を伝達しているのではなく、SRC断面（コンクリート支圧、貫通鉄筋およびアンカービーム）により応力伝達されていることが確認できた。
- ・ずれ止めが負担するせん断力の値としては、SRC断面として評価して設定したフランジの軸方向力であれば解析結果に比べ安全側であることが確認できたが、貫通鉄筋本数による負担割合の影響やせん断力の分布状況の観点より一律に本数を低減させるのは難しいと考えられる。
- ・ずれ止め本数を低減するには、せん断力が大きくなるアンカービーム先端付近で多くしたりするなど、ずれ止めの配置の工夫が必要と考えられる。
- ・アンカービームのフランジの応力から算定されるずれ止めの必要本数に、ずれ止めに働くせん断力のばらつきを考慮して本数を割り増すことにより、設置するずれ止め本数を算出するのがよい。
- ・今回の検討の条件においては、ずれ止めを6列配置とし、それを2列×3ブロックに分け、各ブロックでずれ止め本数を設定する。なお、各ブロックの本数比率は、アンカービーム先端側から1.0 : 0.75 : 0.5とすることで効率的な配置とすることが可能であった。
- ・以上の応力伝達の考え方の整理および最適配置の検討により、今回の条件では鋼断面でずれ止め本数を設定したものより約3割程度のずれ止め本数に軽減することが可能となり、施工性の向上が図れると思われる。

参考文献

- 1) 齊藤 雅充, 南 邦明, 横山 秀喜, 林川 俊郎, 八巻 康博, 水野 浩 : 鋼箱桁橋と RC 柱の結合部に用いるアンカービーム定着構造に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.897-907, 2012.

- 2) 横山秀喜, 清水健志, 南邦明, 八巻康博, 杉浦忠治, 水野浩: 上下部一体剛結の結合部におけるスタッドのずれせん断力載荷試験, 第 64 回土木学会年次学術講演会, CS2-015, pp.69-70, 2009.
- 3) 藤原良憲, 八巻康博, 保坂鐵矢, 水野浩, 林川俊郎: 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ずれ止めに関する一考察, 土木学会第 63 回年次学術講演会, CS02-40, pp.127-128, 2008.

(Received September 10, 2021)

NUMBER AND FORMATION OF STUD DOWELS IN ANCHOR BEAM TYPE CONNECTION FOR RIGID FRAME BRIDGE WITH COMPOSITE GIRDER AND RC PIER

Hideki YOKOYAMA, Kohei TSUTSUI, Masamichi SAITO and Ryota DOBASHI

In the anchor-beam type connection of rigid frame bridge with composite girder and RC pier, the section forces are transmitted via the steel made anchor-beam. In order to transmit the force between the steel anchor beam and the concrete of the RC pier, stud dowels are installed on the flanges of the anchor beam. In the conventional design, the number of the stud dowels is calculated under the assumption that the bending moment of the column is transmitted to the girder only via the anchor beam. As a result, the number of the stud dowels can be large, and it may be inefficient in time and cost.

In this study, authors attempted to grasp the stress transmission in the girder-column connection by finite element analyses. The analysis results showed that the anchor beam, concrete and reinforce bars transmits the bending moment together as an SRC cross section. It was also clarified that the shear force acting on the stud dowels gradually increases toward the tip of the anchor beam. Based on the latter result, authors proposed the method of deciding the number and the formation of the stud dowels on the flanges of the anchor beam.