(9) 実橋でのスラブアンカーの挙動と そのモデル化に関する研究

中川 翔太1・原 尚史2・玉利 仁3・岩田 幸三4・東山 浩士5

¹非会員 川田工業株式会社 橋梁事業部 (〒550-0013 大阪府大阪市西区新町2-4-2) E-mail:shota.nakagawa@kawada.co.jp

²非会員 川田工業株式会社 橋梁事業部 (〒764-8520 香川県仲多度郡多度津町西港町17) E-mail: takafumi.hara@kawada.co.jp

³正会員 川田工業株式会社 橋梁事業部 (〒550-0013 大阪府大阪市西区新町2-4-2) E-mail: jin.tamari@kawada.co.jp

⁴正会員 川田工業株式会社 橋梁事業部 (〒550-0013 大阪府大阪市西区新町2-4-2) E-mail: kozo.iwata@kawada.co.jp

⁵正会員 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8052 大阪府東大阪市小若江3-4-1) E-mail: h-hirosi@civileng.kindai.ac.jp

非合成桁に用いられてきたスラブアンカーは、鉄筋コンクリート床版の位置確保の目的で使用されてお り、設計において合成効果を期待していなかった.しかし、平成29年改定の道路橋示方書では、合成・非 合成に関わらず合成作用の影響について考慮する必要があることを示している.本研究では、スラブアン カーの破断事例をもとに、実橋モデルを用いて、走行車両の移動に伴うスラブアンカーに作用するせん断 力の性状について検討している.その結果、桁端部に配置されるスラブアンカーは回転せん断力の作用下 にあることから、回転せん断試験による疲労寿命の推定が必要であることを示した.また、回転せん断試 験では、実験供試体サイズに制限があるため、実験前解析および静的試験においてスラブアンカー形状を 縮小した場合の評価方法について検討している.

Key Words : slab anchors, fatigue strength, horizontal shear behavior, FEM analysis

1. はじめに

平成29年に改定された道路橋示方書¹⁾(以下,道示) では、床版を桁断面に見込んで設計する場合のずれ止め として頭付きスタッドを標準としている.また、床版を 桁断面として見込まない設計を行った場合に用いられて きたスラブ止めとしてスラブアンカーが示されている.

非合成桁に用いられてきたスラブアンカーは、床版の 位置確保の目的で使用されてきたため、一般に合成効果 を期待していない.しかし、道示では、ずれ止めの種類 によらず、荷重条件に応じて床版のコンクリートと鋼桁 との合成作用の影響については適切に考慮する必要があ ることを示している.

そこで、本研究では、過去にスラブアンカーが破断し、 床版取替を行った橋梁を対象として、その挙動とモデル 化に関する検討を行った.

2. 実橋の全体解析

(1) 対象橋梁の概要

対象とした橋梁は,橋長128mの3径間連続3主鈑桁橋 である.スラブアンカーの破断は桁端部に集中しており, 特に,中桁でその範囲が広いことが確認された.なお, 使用しているスラブアンカーは径が16mmで,橋軸方向 に対して45度の角度で取り付けられていた.

(2) 全体解析

図-1に示すように端径間を対象とし,汎用FEプログラムABAQUSを用いて解析を行った. 主桁および端横桁をシェル要素,床版をソリッド要素,横構・中間対傾構・スラブアンカーを梁要素でモデル化している.スラブアンカーは主桁と床版を剛な梁要素で結合したモデルとしている.荷重は幅500mm×200mmの輪荷重を橋軸方向に475mmピッチで載荷し,着目するスラブアンカー位置に

作用するせん断力を算出した.

図-2に着目するスラブアンカー位置と車両走行位置を示す.実橋で破断が確認された桁端部を対象とし,外桁のG1桁と中桁のG2桁にそれぞれ着目した.

(3) 解析結果

輪荷重の移動に伴う桁端部のスラブアンカーに作用す るせん断力の性状を図-3に示す.グラフは、スラブアン カー位置での輪荷重移動に伴うせん断力を集計して、橋 軸方向を0度、橋軸直角方向を90度としてベクトル表示 したものである.

橋軸方向で最大を示しているが、橋軸直角方向にも橋 軸方向の50%程度の水平せん断力が作用していることが わかる.要因としては、垂直補剛材が上フランジの変形 を拘束することによるものであると考えられる.また、 G2桁では、G1-G2桁間とG2-G3桁間の載荷においてスラ ブアンカーが逆向きのベクトルを示すことにより、最大 228度回転するせん断力の影響を受けていることがわか る.

(4) 疲労等級の算出

スラブアンカーは、そのピッチだけが定められており 疲労等級については定められていない.そこで、全体解 析より求められた水平せん断力から疲労等級の算出³を 行う.全体解析で算出された水平せん断力30.45kNを、 スラブアンカー軸部の断面積の2倍で得られる公称断面 積³で除した値に、動的作用の影響を補正するための係 数としてT荷重に考慮される衝撃係数の1/2を乗じたもの を公称応力とした.疲労設計荷重の載荷回数は、道路交 通センサスを参考として、供用期間中の日大型車交通量 を次式より算出している.

$$nt_i = ADTT_{SLi} \times \gamma_n \times 365 \times Y \qquad (\mathbf{\vec{x}}-1)$$

ここに, *nt*:設計で考慮するF荷重の載荷回数, *ADTT*₂₁:一方向一車線あたりの日大型車交通量(台/

(日・車線)), yn:頻度補正係数(=0.03), Y:設計 耐久期間(34年).

なお,ここでの設計耐久期間は,実橋の破断時期が明 確でないため,供用開始からスラブアンカー取り替えま での期間である34年としている.

上記より求めたS-N曲線を図4に示す.疲労強度等級 区分に当てはめると,E等級に近い値を示した.なお, 実橋の破断時期が明確でなく,実際の耐久期間は34年よ りも短いことが考えられること,また,大型車交通量が 建設当初から増大していることを考慮すると,スラブア ンカーが床版取替時期よりも早い段階で破断しているこ とが想定され、実際は本研究よりも低い疲労強度になる ことが予想される.







図-2 輪荷重載荷イメージ



(a) G2 桁端部
(b) G1 桁端部
図-3 輪荷重移動に伴う水平せん断力



図4 疲労強度等級との比較

3. ズーミング解析

(1) 解析概要

スラブアンカーの発生応力はその形状に起因するため, 実橋の全体解析で着目した位置において,図-5および図 -6のようにスラブアンカーの形状を考慮した部分詳細モ デルによるズーミング解析を行った.ズーミング解析で は、実橋の全体解析モデルの着目部近傍を切り出し,新 たにスラブアンカーおよび溶接部(6mmすみ肉形状)を ソリッド要素でモデル化している.そして,切り出した 境界面に全体解析で発生した変位を強制変位で与えるこ とで,走行車両の輪荷重による影響を再現している.ス ラブアンカーの形状は,実橋の施工図面を元に¢16mm の棒鋼を使用し溶接長100mmとしている.

(2) 解析結果

G2桁端部での橋軸直角方向および橋軸方向(橋軸方 向は2車線同時載荷)で発生応力が最大となるときの応 カコンターを図-7に示す.発生応力は橋軸直角方向およ び橋軸方向ともに,スラブアンカー根本の溶接部境界に 集中していることがわかる.

一般的なスラブアンカーの施工手順としては、工場で 主桁上フランジに溶接した後に現場にて立ち上げを行う ため、ズーミング解析で応力が卓越した部分の溶接の品 質確保は困難である.また、解析において溶接形状を厳 密に再現することは困難なため、ズーミング解析での発 生応力の大小については実物と差が生じることが予想さ れる.



4. 回転せん断試験モデルの実験前解析

(1) 回転せん断試験の目的

全体解析において、桁端部のスラブアンカーは、垂直 補剛材の上フランジ拘束により橋軸直角方向にも大きな 水平力が発生することがわかった.また、ズーミング解 析により、溶接品質の確保が難しいスラブアンカー根元 の溶接部境界で応力が卓越していることがわかった.

以上より,既往研究⁴で合成床版の頭付きスタッドの 疲労強度評価に使用されている回転せん断試験を用いて, スラブアンカーに作用する水平せん断力の変動作用を考 慮した疲労試験実施に向けた検討を行うこととした.

(2) 回転せん断試験の概要

回転せん断試験で使用する試験機を図-8に示す. 直径 \$\phi\$ 350mm,板厚20mmの円形鋼板(回転テーブル)の中 心より24mm偏芯した位置を回転中心とし,円形鋼板中 心から実験供試体中心を偏芯させてセットする.これに より実験供試体自体を回転させたときに,試験機に取り 付けた水平方向ばねの伸縮量を変化させることができ, 変動する水平力をスラブアンカーに与えることができる.

(3) 実験前解析

試験機で使用できる実験供試体のサイズには限りがあ るため、実橋梁のスラブアンカーと同サイズでの実験が 不可能である. そこで,実験可能なサイズに縮小した実 験供試体を使用することになる. これまでの検討から実 験で使用することができるスラブアンカーの形状および 寸法を図-9に、それをモデル化した実験前解析で使用す るモデルを図-10に示す. すなわち, スラブアンカーを 半分の形状に変更、先端部折れを無くす、立ち上がり長 を半分に変更することで試験機に対応する形状とした. アンカー径については、溶接品質に影響を及ぼすことが 考えられるため,再現したスラブアンカーと同径のφ 16mmとしている.上述したサイズを縮小した実験供試 体とする上での3つの変更点が発生応力に与える影響を 確認するため、それぞれをモデル化(図-11)して解析 を行った. なお, 解析モデルは, 「フルサイズモデル」 を(A), 「ハーフサイズモデル」を(B), 「ハーフサイズ +先端折れなし」のモデルを(C), 「ハーフサイズ+先端 折れなし+立ち上がり長1/2」のモデルを(D)、「ハーフサ イズ+先端折れなし+立ち上がり長1/4」のモデルを(E)と している.

全体解析結果より、橋軸方向に45度傾けたスラブアン カーに対して、橋軸方向で最大の水平力が発生すること がわかっている.そこで、図-9に示すように、全体解析 で最大水平力が発生する方向を0度とし、45度ずつ載荷



図-8 回転せん断試験機





図-10 実験前解析モデル



(d) ハーフサイズ + 先端折れなし + 立ち上がり長 1/2 (D)

図-11 スラブアンカー解析モデル



図-12 フルモデルとハーフモデルの応力コンター図

図-13 フルモデルとハーフモデルの主応力

表-1 解析結果一覧

	ハーフサイズによる影響			先端部の折れ有無による影響			立ち上がり長による影響			
載荷角度	フル (A) N/mm [*]	ハーフ (B) N/mm [®]	(A) / (B)	有(B) N/mm [®]	無(C) N/mm	(C) / (B)	1/1倍(C) N/mm [®]	1/2倍(D) N/mẩ	1/4倍(E) N/mẩ	(D) / (C)
0	5.3	6.7	0.79	6.7	6.9	0.97	6.9	6.5	6.3	1.06
45	3.2	4.1	0.78	4.1	4.0	1.03	4.0	4.0	4.0	1.00
225	-1.3	-1.3	1.00	-1.3	-1.7	0.76	-1.7	-1.7	-1.7	1.00
270	1.8	2.5	0.72	2.5	2.8	0.89	2.8	2.4	2.1	1.17
315	4.4	5.8	0.76	5.8	6.1	0.95	6.1	5.5	5.1	1.11

方向を変化させたときの主応力を確認する.なお、主応 力着目位置は、載荷角度0度で水平力を与えたときに発 生する最大主応力座標およびその方向とした.水平力は, 全モデル共通で1kNの単位荷重を与えている.

a) フルモデルとハーフモデルの比較

フルモデルとハーフモデルの応力コンターを図-12に, 主応力変化のグラフを図-13に示す、両モデルとも溶接 部との境界付近で最大主応力が発生しており、全体の応

力性状についても大きな差異がないことがわかる.以上 より、実橋で最大水平力が発生する0度のときの値を比 較すると,表-1に示すように、フルサイズモデル(A)で 5.3 N/mm², ハーフモデル(B)で6.7 N/mm²となり, その比 が0.79となることが分かった.

b) 先端部折れの有無

次に、先端部折れの有無による解析を行った.着目位 置での主応力の比は、表-1に示すように、225度や270度

の主応力値が小さいケースを除けば、概ね5%以内に収まることが分かった. 先端部折れが有る場合で6.7 N/mm², 無い場合で6.9 N/mm²となり, その比が0.97となることがわかった.

c) 立ち上がり長の変更

次に、立ち上がり長を変化させた解析を行った.なお、 立ち上がり長は3パターンとしている.すなわち、実橋 梁の立ち上がり長を158mm、その1/2および1/4とした. 表-1に示すように、載荷角度45度、225度では立ち上が り方向に対して真横から水平力を受けるため立ち上がり 長による変化はほとんど見受けられなかったが、それ以 外の角度では、差は小さいものの線形関係が見受けられ る.0度のときの値を比較すると、実橋梁長さで69 N/mm²、実橋梁長さの1/2サイズで6.5 N/mm²、実橋梁長さ の1/4サイズで6.3 N/mm²となり、実験供試体で採用する 1/2サイズではその比が1.06となることがわかった.

(4) 実験前解析結果まとめ

スラブアンカーの形状変更による影響値は, (2) a)-c) の解析結果から次式のように表すことができる...

 $0.79(^{B}/_{A}) \times 0.97(^{C}/_{B}) \times 1.06(^{D}/_{C}) = 0.81$ (式-2)

ここに、A~Dは解析ケースを示している.

以上より,実験結果を実橋に適用する場合は,応力を 0.81倍することで,実橋サイズと同等の応力を評価でき ることを示した.

5. 静的試験

(1) 静的試験の概要

実験前解析と回転せん断試験の妥当性の確認方法とし て、回転せん断試験では実験供試体自体を連続回転させ ることから、荷重載荷中の実験供試体の応力性状を計測 することが困難なため、静的試験による確認を採用した.

静的試験では、図-14に示すように回転せん断試験機 に設置した実験供試体に対して、載荷角度0度の位置に 水平ジャッキを取り付け、水平力を5kNごとで最大30kN まで漸増載荷させた.水平力載荷時には、既往の回転試 験同様に実験供試体の浮き上がりを防止するために天端 を押さえつけるためのバネを設置している.試験体の挙 動確認には、図-15に示す実験供試体の円形鋼板上面に3 軸ひずみゲージを貼り付けることで、供試体の主応力を 算出し、実験前解析と比較した.

(2) 静的試験結果

各測定箇所における静的試験結果と解析結果の比較を



図-14 静的試験機



図-15 ひずみゲージ貼付位置

図-16に示す.測定箇所によっては、実験前解析に比べ て静的試験における荷重の増加に対する主応力の増加が 小さかった.要因としては、円形鋼板とコンクリートの 付着により円形鋼板の応力の増加が抑えられたと考えら れる.しかし、実験値と解析値の乖離が大きくないこと、 また、水平力をスラブアンカーの断面積で除した公称応 力では水平力が約12kNでE等級の打切り限界を超え、そ の2倍以上の荷重範囲まで比較的精度よく再現できてい ることを考慮すると、疲労試験に向けた実験前解析の妥 当性が示せたと考えられる.

6. まとめ

本研究では、実橋でのスラブアンカーの挙動およびそ のモデル化方法に関する検討を行った.

本研究により得られた知見を以下に示す.

 垂直補剛材上の上フランジに設置されるスラブアン カーは、上フランジの変形拘束により橋軸直角方 向にも大きな水平力が発生する.



(d) ひずみゲージ No. 4

図-16 静的試験結果と解析結果の比較

- 2) 中桁に設置されたスラブアンカーは、桁を跨いだ輪 荷重の載荷により、作用力方向が交番し、回転せ ん断力の作用下にある.
- 3) スラブアンカーの形状を縮小した実験供試体におい て、各種形状をパラメータとしたときの係数を乗 じることで、実橋梁のサイズと同様の応力評価を 行うことができる.

本論文の範囲では、回転せん断試験までのプロセスと しての解析および実験としている. 今後は、回転せん断 試験によりスラブアンカーの疲労寿命を解明し、現存す るスラブアンカーを対象とした床版の取り替え時期の推 定を行っていく.

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017.
- 2) 日本道路協会:鋼道路橋疲労設計便覧, 2020.
- 3) 中島章典, 溝江慶久, 廣田篤, 吉原知佳, 西園広之, 大江浩 一:押抜きおよび桁試験によるスラブ止めの水平せん断ず れ性状と疲労強度の検討,構造工学論文集, Vol.44A, pp.1505-1514, 1998.3.
- 4) 吉田賢二, 東山浩士, 馬場 敏, 松井繁之: 鋼・コンクリー ト合成床版内のスタッドの疲労耐久性評価と疲労強度向上 に関する研究, 土木学会論文集 Al (構造・地震工学), Vol.74, No.3, 306-318, 2018.

(Received September 10, 2021)

A STUDY ON BEHAVIOR OF SLAB ANCHORS AND MODELING FOR ROTATING FATIGUE TESTS

Shota NAKAGAWA, Takafumi HARA, Jin TAMARI, Kozo IWATA and Hiroshi HIGASHIYAMA

The slab anchors that have been used for non-composite girders are used for the purpose of securing the position of the bridge slab, and are not expected to have a composite effect. However, the Specifications for Highway Bridges revised in 2017 states that the composite effect should be considered regardless of whether it is composite or non-composite. In this paper, the behavior and stress properties of the slab anchors with the running wheel load are investigated using ananalysis model for a bridge based on the fracture case of the slab anchors. As a result, it was shown that it is necessary to carry out the fatigue life assessment by the fatigue test machine giving a rotating shear force because the slab anchors placed at the end of the girder is under acting the rotating shear force. In addition, because the fatigue test is limited to the shape of the experimental specimen, we are investigating the evaluation method when using a test model with a reduced slab anchor shape in the pre-experimental analysis and static test.