

(22) H形鋼によって周囲を拘束されたスタッドの強度特性に関する実験的研究

An experimental study on strength of stud shear Connector System Confined by Steel Member

永田 淳*, 小幡 大輔*, 明橋 克良**, 水口 和之***

Katsuyoshi Akehashi, Jun Nagata, Daisuke Obata and Kazuyuki Mizuguchi

*(株)横河ブリッジ, 技術本部研究所研技術開発課 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)

** (株)横河ブリッジ, 技術本部研究所研究課 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)

***日本道路公団, 名古屋建設局 建設第二部構造技術課 (〒460-0008 名古屋市中区栄 4-1-1)

Stud shear connector was applied to H-shaped steel member. Studs were welded on web of the H-shaped steel member. In this case, the flange plates confine the concrete around the studs. So the strength of connector was expected to be increased. Push-out tests and fatigue tests were carried out. In this paper, the result of tests was compared with the values derived by German design code, DIN. As a result, the excellent performance of the confined connector was confirmed.

Key Words: shear connector (headed stud), push-out test, ultimate strength, fatigue strength

キーワード: ずれ止め (頭付きスタッド), 押抜き試験, 終局強度, 疲労強度

1. はじめに

近年, 橋梁価格の低減および製作・架設現場における省力化に対する要望が強くなってきている。このような状況のなか, 橋梁構造の合理化に関する研究開発がさかんに行われるようになってきた。筆者らも, 新しい形式の合理化構造橋梁である「H形鋼を主体としたラチストラス橋」の開発・提案を行っている¹⁾。同橋は, 弦材等の主要部材をH形鋼で構成する, ダブルワーレン形式の上路トラス橋であり, 形鋼の多用による加工度の大幅な低減を特徴としている。また, 上弦材H形鋼はコンクリート床版と合成され, 主構作用および床組作用に抵抗する構造である。このため, 床版と上弦材との結合部には大きな水平せん断力が作用することになり, ずれ止め構造の詳細な検討が重要となる。

そこで, H形鋼に溶接される頭付きスタッドを対象とし, その配置および直径をパラメータとした実物大試験体を製作し, 静的および動的の押抜きせん断試験を行った。本論文は, 本ずれ止め構造の終局強度, 疲労強度, および破壊性状等を明らかにし, 既往の設計・強度評価式と比較・考察を行うものである。

2. ずれ止め構造の特徴と着目点

本橋の床版と上弦材との取合部の構造を図-1に示す。

本構造においてH形鋼のウェブに溶接されたスタッドは, H形鋼のフランジによって周囲を拘束される。このように周囲を拘束されたずれ止め構造においては, 鋼部材とコンクリートとの間に摩擦力が働くことによって, ずれ止めの耐荷力および変形性能が向上することが Roik らの研究²⁾において報告されている(以下では, この様な現象を称して拘束効果とよぶ)。DIN18 806Teil1³⁾には, 拘束効果を考慮したSRC柱に対するずれ止めの強度式が示されている。本研究では, 図-1に示した床版と上弦材の取合構造に作用する静的および動的な荷重に対して, この様な拘束効果が期待できるのかを検証・評価することを目的とした。

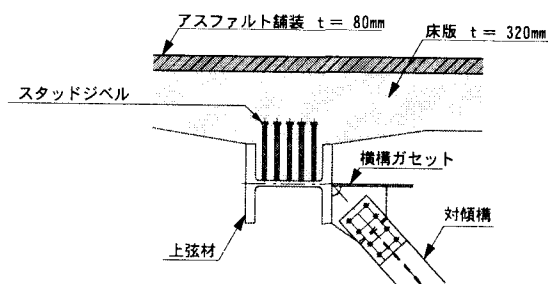


図-1 床版-上弦材取合部構造

3. 試験概要

3.1 試験体

静的押抜き試験体の一覧を表-1に, 疲労試験体の一覧を表-2にそれぞれ示す。また, 試験体の構造詳細を図-2に, 各試験体ごとのずれ止め構造の

表-1 静的押抜き試験体

試験体	ずれ止め構造	床版施工方法	鋼材表面処理	付着	
Type A1	スタッドジベル	1列2本	RC現場打設	ブラスト処理後	あり
Type A2	φ19×300 (mm)	1列3本	RC現場打設	厚膜ジンクリッチプライマ塗布	あり
Type B1	スタッドジベル	1列2本	RC現場打設	"	あり
Type B2	φ22×300 (mm)	1列3本	RC現場打設	"	あり
Type C1	スタッドジベル	1列2本	プレキャスト床版 +		あり
Type C2	φ19×150 (mm)	1列3本	充填コンクリート		あり
Type D1	スタッドジベル	1列2本	RC現場打設	ブラスト処理+厚膜ジンクリッチ剥離剤	なし
Type D2	φ22×300 (mm)	1列3本	RC現場打設	黒皮材(無処理)+剥離剤	なし

注：試験体は各3体

表-2 押抜き疲労試験体

試験体	ずれ止め構造		床版施工方法	鋼材表面処理	付着
Type FA2	スタッドジベル φ19×300 (mm)	1列3本	RC現場打設	ブラスト処理後厚膜ジンクリッチプライマ塗布+剥離剤	あり
Type FB1	スタッドジベル	1列2本	RC現場打設	"	あり
Type FB2	φ22×300 (mm)	1列3本			

注：試験体は各3体

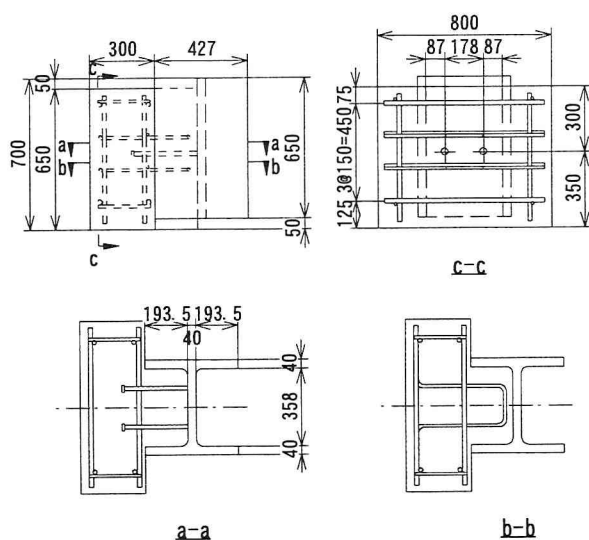


図-2 試験体形状・寸法

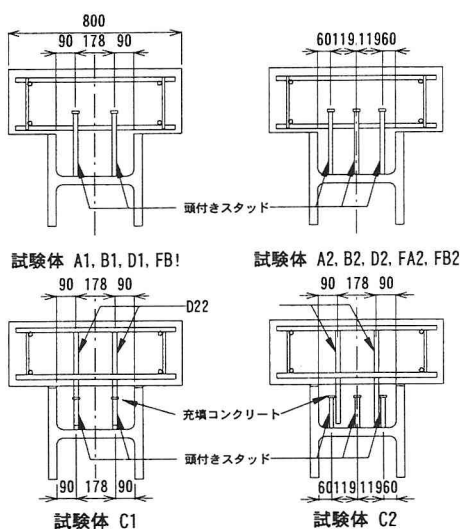


図-3 ずれ止め構造概略

概略を図-3に、それぞれ示す。

Type A (Type FA) 試験体と Type B (Type FB) 試験体との相違は、表-1に示すように使用するスタッドの直径のみである。一方、Type C 試験体はプレキャスト床版を対象としたずれ止め構造で、H形鋼とプレキャスト床版との間にコンクリートを充

填して合成した。Type A, B, C 試験体は、実橋と同様に、H形鋼にショットブラスト処理を行い、厚膜型ジンクリッチペイント（膜厚約 70 μ m）を塗布した。また、Type D 試験体は、付着作用の影響を調べるため、鋼部材表面に剥離剤を塗布してコンクリートの付着作用を取り除いてある。なお、試験体の施工においては、床版コンクリート、充填コンクリートともに実橋と同じ方向より打設した。コンクリートおよび充填コンクリートの材料試験結果を表-3に示す。また、表-4には、スタッドおよび鉄筋の降伏点、ならびに引張強度を示す。

表-3 コンクリートの材料試験結果

材料種別	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	配合
床版コンクリート	51.9	4.63	3.30E+04	40-8-20-H (膨張材)
充填コンクリート	47.1	4.71	—	40-55-20-N

注：押抜き試験開始時と終了時に行った試験結果の平均値

表-4 鉄筋・スタッドの材料試験結果

材料種別		降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
スタッド	19×150	267	420	25.1
	19×300	282	436	25.2
	22×300	266	436	25.4
鉄筋	D19	407	596	23
	D22	405	588	21

3.2 試験方法

(1) 静的押抜き試験

静的押抜き試験は、容量 2000kN の万能型載荷試験機を用いて行った。試験体は、載荷面と支持面が平行を保ち、偏心載荷が生じないようにセットした。試験体への載荷は、文献 4)に規定されたスタッドの押抜き試験方法に従い、各試験体タイプごとに単調増加載荷法と漸増繰返し載荷法によって行った。なお、いずれの試験体も、ずれ止めが破壊して 30mm 以上の相対ずれが生じる終局状態まで継続して載荷を行った。写真-1に、静的押抜き試験における載荷状況を示す。

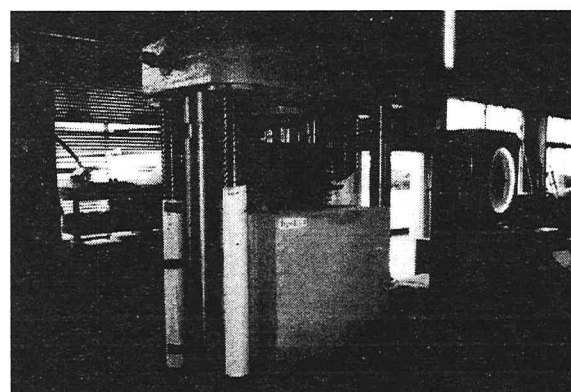


写真-1 載荷状況

(2) 押抜き疲労試験

押抜き疲労試験は、静的試験と同様の支持状態で試験体を設置し、同じ載荷位置に繰返し荷重を載荷

した。試験体への荷重には、容量 500kN の油圧サーボ型疲労試験機を使用し、ずれ止めが疲労破壊を起こすか、もしくは載荷回数が 200 万回を超えるまで載荷を行った。

3.3 計測方法

コンクリート床版とH形鋼との相対ずれ変位は、図-4 に示すように、変位計を 2 箇所に取り付けて測定し、試験データの整理には 2 箇所の平均値を用いた。また、載荷荷重強度の測定には、容量 980kN のロードセルを用いた。

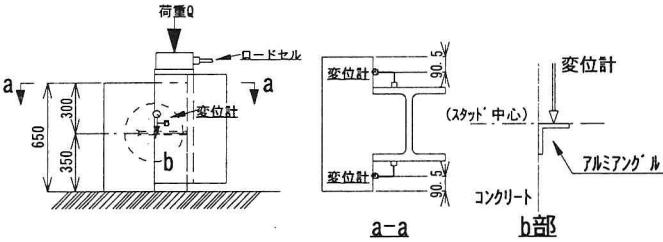


図-4 相対ずれ量および荷重の測定位置

4. 静的押抜き試験

4.1 試験結果

付着のある試験体と付着のない試験体の代表的な荷重－相対ずれ曲線を図-5 (a), (b) に示す。

同図より、付着を有する試験体では、付着が切れるまで相対ずれが生じず、鋼とコンクリートとは完全合成状態にあり、付着が切れると同時にスタッドが降伏することがわかる。一方、付着のない試験体は、通常のスタッドによるずれ止め比べ、高い初期剛性 (1215 kN/mm/stud : 試験体 D1-3) を示して変位が漸増し、明確な降伏点を示す。スタッドの

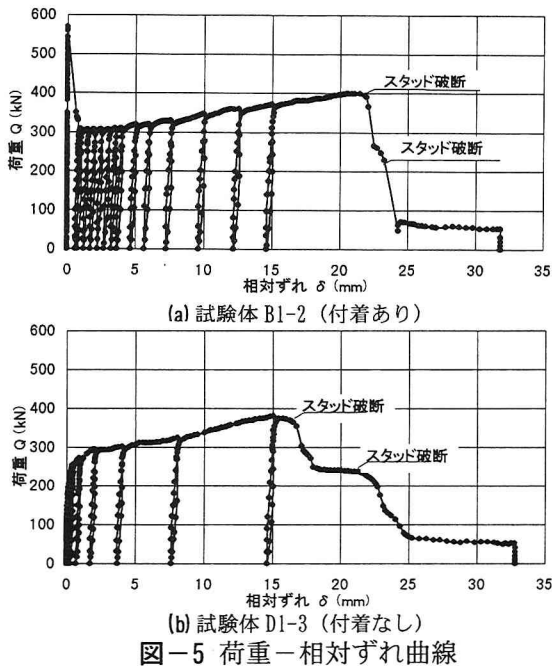


図-5 荷重－相対ずれ曲線

降伏後は、付着の有無に関わらず同傾向の挙動を示し、スタッド破断時 (最大荷重) まで荷重が漸増を続けるという特性を有することがわかった。スタッドの破断状況を写真-3 に示す。



H形鋼側破断面
写真-3 スタッドの破断状況

また、本ずれ止め構造は、スタッドの降伏後における除・載荷時においても高いずれ剛性を保持していることがわかった。ここで、図-5 に示した試験体 D1-3 を例にとると、同試験体は、残留ずれ量 15mm からの再載荷時においても、1200 kN/mm/stud のずれ剛性を示している。さらに、本ずれ止め構造は、ずれ止め降伏時までの残留ずれ量も小さいことがわかった。図-6 に試験体 D1-3 の荷重－残留ずれ曲線を示す。

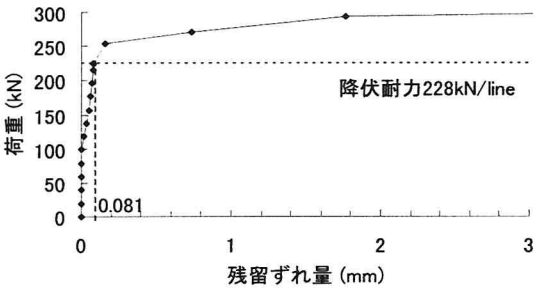


図-6 荷重－残留ずれ曲線

図-6 より、本試験体は荷重－残留ずれ曲線の急変点が明確に現れる。この急変点における荷重強度をずれ止めの降伏荷重と定義した。本試験体の降伏時残留ずれ量は 0.081mm である。

各試験体の降伏せん断耐力、終局せん断耐力 (スタッド破断時)、および付着強度の平均を、表-5 に示す。

表-5 各試験体タイプの平均強度

試験体	降伏せん断耐力 (kN/stud)	終局せん断耐力 (kN/stud)	付着強度 (N/mm ²)
A1	—	168	1.4
A2	—	144	1.4
B1	—	198	1.5
B2	—	181	1.2
C1	—	144	0.9
C2	—	131	0.9
D1	121 (1.0)	192 (1.6)	—
D2	111 (1.0)	207 (1.9)	—

()内は、降伏耐力との比

4.2 拘束効果の確認

本項では、拘束効果を考慮した DIN18 806Teil1 の強度式を用いて、本構造における終局強度を検証した。さらに、本ずれ止め構造の終局強度評価式についても若干の考察を加えた。

DIN⁵⁾ではスタッドの終局耐荷力を、式(1)と式(2)のうちの最小値と規定している。

$$Q_u = \alpha \times 0.25 \times d^2 \times \sqrt{\beta_{WN} E_c} \quad (\text{kN/stud}) \quad (1)$$

β_{WN} : コンクリートの立方体強度 ($= 1.25 f_c$)

$\alpha = 0.85 \quad h/d = 3.0$

$\alpha = 1.00 \quad h/d \geq 4.2$

$$Q_u = 0.70 \times \frac{\pi d^2}{4} \beta_s \quad (\text{kN/stud}) \quad (2)$$

β_s : スタッドの引張強度 (N/mm^2)

d : スタッドの直径 (mm)

本研究において実施した試験体は、式(2)によって定まることがわかった。また、式(2)については、文献 2)に示されている拘束効果を考慮した強度式を次式のように与えている。

$$Q_u = 0.7 \times \left(1 + \frac{1}{2n}\right) \frac{\pi d^2}{4} \times \beta_s \quad (\text{kN/stud}) \quad (3)$$

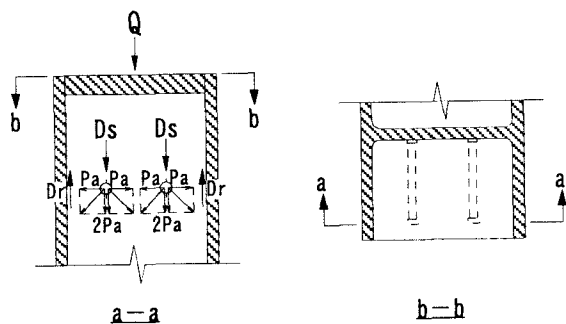


図-7 拘束効果概念図

拘束効果とは、図-7において、スタッドに作用するせん断力 D_s の水平分力 P_a によって、鋼部材とコンクリートの間に摩擦抵抗 D_r が発生し、ずれ止めの耐荷力が $2D_r$ 増大する現象を示している。なお DIN では、水平分力を $P_a = D_s/2$ 、摩擦係数を $\mu = 0.5$ とそれぞれ定めている。

ここで、式(3)における係数 0.7 は、安全率であることから、試験データとの比較には、これを除いた次式(4)を用いることとする。

$$Q_u = \left(1 + \frac{1}{2n}\right) \times \frac{\pi d^2}{4} \times \beta_s \quad (\text{kN/stud}) \quad (4)$$

静的押抜き試験結果を式(4)とともにプロットしたものを、図-8に示す。

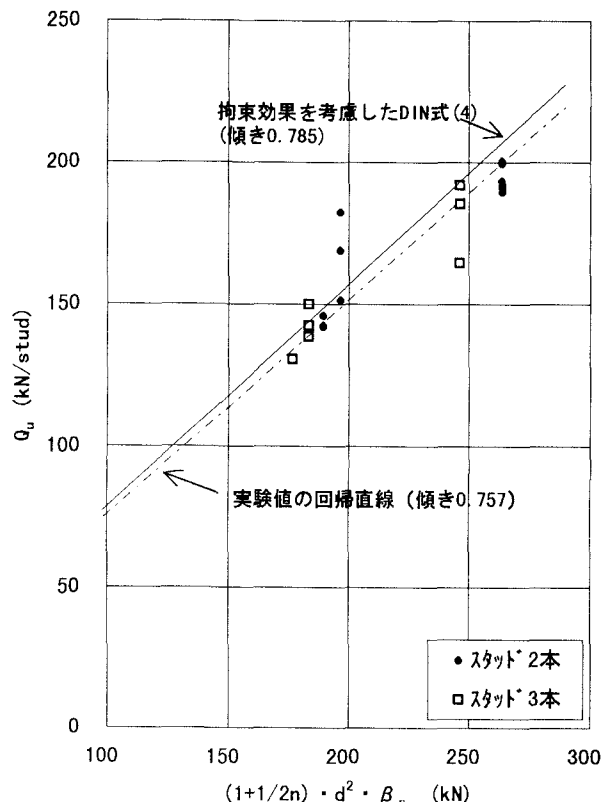


図-8 強度直線の検討

同図より、実験値は、若干のバラツキはあるものの、おおむね式(4)の直線を中心に分布していることがわかる。また、実験値の回帰直線と式(4)の傾きがほぼ等しいことから、本実験値は式(4)によって適合性良く評価されていると考えられる。

したがって、DIN18 806Teil1 において、主に SRC 柱のずれ止め構造に適用されている評価式を、本ずれ止め構造の終局強度評価式として安全に採用できるものとする。

4.3 静的押抜き試験のまとめ

H形鋼によって周囲を拘束されたずれ止め構造に関する、静的な押抜きせん断試験を行い、本ずれ止め構造の終局耐荷力に関する諸特性を確認した。本試験で得られた結果を以下に要約する。

- ①本構造の鋼・コンクリート間には、 1.2 N/mm^2 の付着強度があり、付着が切れるまで相対ずれは生じない(完全合成状態にある)。
- ②本ずれ止め構造の終局強度は、スタッドの引張強度および拘束効果を影響因子とすることが確認された。
- ③DIN18 806Teil1 に示されている SRC 柱に対する考え方を、本構造に適用することの妥当性を確認した。

5. 押抜き疲労試験

5.1 試験結果

押抜き疲労試験によって得られた、各試験体の破

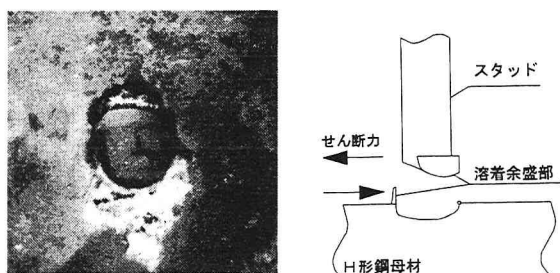
壊までの载荷繰返し回数および応力範囲を表-6に示す。

表-6 疲労試験結果一覧

試験体	最大応力 N/mm ²	最小応力 N/mm ²	応力範囲 N/mm ² (MPa)	破壊回数N (×10 ⁶ 回)
FA2-1*	334	11	323	破壊せず
FA2-2	185	11	174	破壊せず
FA2-3	207	11	196	0.81
FB1-1	205	13	192	1.45
FB1-2	211	13	198	0.88
FB1-3	187	13	174	破壊せず
FB2-1	250	9	241	0.078
FB2-2	250	9	241	0.116
FB2-3	250	9	241	0.152

*: 付着あり

スタッドの疲労破面は、溶着余盛の止端部を起点とし、鋼部材側にクレター状に進展していることがわかった。スタッドの疲労破面の一例を写真-4に示す。



H形鋼側破断面

破断位置模式図

写真-4 疲労破壊状況

5.2 既往の疲労強度評価式との比較

これまでに、国の内外において各種のスタッドの疲労強度評価式が提案されている。本研究ではこれらの中から、我が国における標準的な疲労設計指針である日本鋼構造協会の指針⁶⁾と、松井・平城・福本⁷⁾の提案式を用いて、試験結果の評価を行うこととする。

(1) 日本鋼構造協会疲労設計指針⁶⁾との比較

日本鋼構造協会の指針において、せん断応力を受けるスタッドのS-N曲線は、次式によって与えられる。

$$S^5 \cdot N = D_0 \quad (5)$$

$$D_0 = 2 \times 10^6 \cdot \Delta \tau_f^5$$

$$\Delta \tau_f : 80 \text{ (MPa)}$$

本試験データと上記S-N曲線の比較を図-9に示す。

図-9より明らかなように、全ての試験データが式(5)を上回っており、本ずれ止め構造は同評価式に対して、十分安全側の疲労強度を有している。

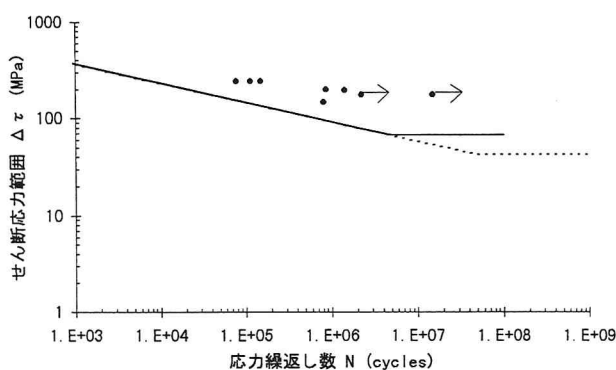


図-9 日本鋼構造協会指針との比較

(2) 松井・平城・福本の研究⁷⁾との比較

国内外で実施された数多くのスタッドの疲労試験結果を、統計的に処理した松井らの研究におけるスタッドの疲労強度評価式を以下に示す。

$$R/Q_u = 1.28 \cdot N^{-0.105} \quad (6)$$

R : スタッドに作用するせん断力の範囲

Q_u : スタッドの静的強度

N : 疲労破壊に至るまでの繰返し回数

本試験データと式(6)の比較を図-10に示す。同図には、式(6)から両側に標準偏差の2倍をとって示した曲線も併記した。

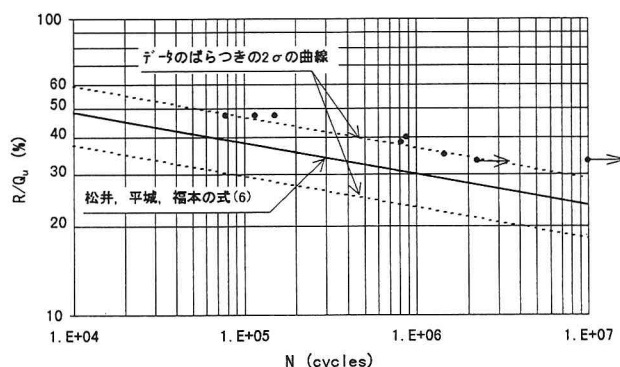


図-10 文献7)との比較

図-10より明らかなように、本試験データは式(6)を大きく上回っていることがわかった。さらに、実験値は標準偏差の2倍の曲線上に分布していることもわかる。試験データが、連続して標準偏差の2倍以上に分布する確率はきわめて低いことから、本構造は、通常のスタッドに比べ高い疲労強度を有しているといえる。この事は、H形鋼による側方拘束効果が、疲労強度特性においても有効に働いている事を表すものと考えられる。

5.3 押抜き疲労試験のまとめ

押抜き疲労試験結果について以下にまとめる。

- ①鋼とコンクリート間の付着作用は、繰返し载荷によって失われなかった。
- ②本構ずれ止め構造は、日本鋼構造協会の指針に対して、十分安全な疲労強度を有する。
- ③H形鋼による拘束効果が、疲労強度に関しても有効に働くことが確認された。

6. あとがき

H形鋼によって周囲を拘束されたスタッドについて、押抜きせん断試験を実施した。その結果、本構造の静的なせん断強度は、側方拘束効果を考慮したDINの評価方法により、合理的に評価できることがわかった。また、H形鋼による側方拘束効果によって、本ずれ止め構造が通常のスタッドによるずれ止めに比べ、高い疲労強度を有することも確認した。

今後の課題としては、スタッドの周囲を拘束するH形鋼のサイズや表面処理状態と拘束効果の関係についても検証する必要があるものと考えられる。

参考文献

- 1) 白水, 奥原, 尾下: 形鋼を主体とした鋼合成桁
ストラ橋の提案, 横河ブリッジグループ 技報, No.28,
pp27-34, 1999.1
- 2) Roik,Hanswille: Beitrag zur Bestimmung
der Tragfähigkeit von Kopfbolzendubeln,
Der Stahlbau, jahr.52, H.10, S.301-308,
Okt.1983
- 3) DIN18806Teil 1: Verbundkonstruktionen
- 4) 社) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験
方法(案)とスタッドに関する研究の現状, 平成 8
年 11 月
- 5) DIN: Richtlinien für die Bemessung und
Ausführung von Stahlverbundtragern, 1981
- 6) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同
解説, 1993 年
- 7) 松井, 平城, 福本: 頭付きスタッドの強度評価
式の誘導 - 疲労強度評価式 -, 構造工学論
文集, Vol.35A, pp1233-1244, 1989 年 3 月