

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420485

研究課題名(和文) 鋼・コンクリート合成構造ずれ止めの破壊機構の解明とせん断耐荷力の設計評価式

研究課題名(英文) Fracture mechanism and slip strength of perfbond strip in steel-concrete composite structures

研究代表者

藤井 堅 (Fujii, Katashi)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号：60127701

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：合成構造物のずれ止め設計は、押し抜き試験などの要素試験を行い、そのずれ剛性や耐荷力結果が適用される。要素試験から得られるずれ耐荷力は種々の拘束因子に依存しており、実構造物設計においては、実構造物に対応した拘束因子のみを考慮してずれ耐荷力を評価しなくてはならない。本研究では、要素試験におけるジベルの破壊メカニズムを解明し、それに基づいて力学モデルを構築してずれ耐荷力を評価した。一方、合成桁の載荷実験を行って、孔あき鋼板ジベルの挙動を調べた結果、実際のずれ挙動は不完全合成であることを確認した。その不完全性を考慮したずれ耐荷力を求めたところ、本提案式が合成桁のずれ耐荷力を良く評価できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Actual composite structures are usually designed based on the results which are obtained by elemental tests such as push-out test. The slip strength in the elemental test depends significantly on the concrete confinements, such as friction force at the bottom, concrete covering, rebar, the size of concrete etc. Then, evaluating the slip strength of an actual structure should be evaluated by considering only the confinement factors in the real structure. In this paper, fracture mechanism of elemental test is clarified, and slip strength evaluation formula is proposed based on the fracture mechanism. On the other hand, the slip strength of composite girders is investigated and compared with that of elemental test. As result, it is concluded that the evaluation formula can be applicable to evaluate the slip strength of a composite girder.

研究分野：維持管理工学，鋼構造，複合構造

キーワード：孔あき鋼板ジベル ずれ耐荷力 コンクリート拘束因子

## 1. 研究開始当初の背景

Leonhardt によって考案された孔あき鋼板ジベル (PBL) は、孔あき鋼板の孔部コンクリートと鋼板のダボ作用によってせん断力に抵抗する機構を有し、現在、鋼-コンクリート合成構造のずれ止めとして実構造物に多用されつつある。ずれ止めの設計では、PBL 孔のせん断力の設計用値を決める必要があり、Leonhardt PBL のずれ耐荷力  $V_u$  を次式の形で与えている。

$$V_u = \alpha A f_{ck} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha$  は係数、 $A$  はジベル孔の断面積、 $f_{ck}$  はコンクリート圧縮強度であり、ずれ耐荷力は孔断面積に比例する形となっている。その後、Hosain ら(1992)、Kraus ら(1997)、西海ら、園田・鬼頭ら、保坂・平城ら、上田・古内ら、日野・山口ら、中嶋らをはじめとして、我が国および諸外国においてずれ耐荷力の多くの実験研究がなされ、幾つかの耐荷力評価式が提案された。

我が国の複合構造物標準示方書(土木学会、2009)では、保坂らが提案した評価式が採用されているが、このずれ耐荷力評価式は、Leonhardt の式(1)を、実験結果の回帰解析に基づいて修正されたもので、適用範囲が限定されているため、汎用性に欠けるという欠点がある。それは、PBL の破壊メカニズムが十分に解明されていないこと、したがって、破壊メカニズムを表現する力学モデルが構築されていないことに起因する。

申請者は、2000～2010 年にわたり、約 100 体のずれ耐荷力実験を実施し、国内シンポジウムや国際会議で発表し、それをまとめて土木学会論文集に発表した。その結果、PBL のずれ耐荷力は孔周辺のコンクリートの拘束状態に大きく依存しており、コンクリートを構想する因子としては、かぶりの有無、かぶりがある場合は、かぶりの厚さとコンクリートブロックの大きさ、孔内貫通鉄筋のほかに、載荷試験時に試験体を据え付けるために敷

かれる底部のモルタルによる摩擦力(底面摩擦)があることを明らかにした。しかし PBL のずれ耐荷力式を構築するまでには至らなかった。したがって、より汎用性が高くかつ高精度の PBL のずれ耐荷力評価式を提案するためには、上記の拘束因子を考慮した破壊メカニズムを表現できる力学モデルを構築することが、工学的重要かつ不可欠の課題として残った。加えて、例えば鋼管内部に PBL を配置するなどのコンクリートの拘束因子を積極的に活用できる構造形式の開発も期待できるとの着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、すでに PBL の破壊メカニズムはかなり解明しているため、以下について解明および提案することを目的とする。

- 1) 押抜き試験における PBL の破壊メカニズムを表現できる力学モデルの構築と、高精度かつ汎用性の高いずれ耐荷力評価式の提案
- 2) 押抜き試験におけるずれ耐荷力式に基づいた、実際の合成・複合構造物のための設計強度式の提案
- 3) コンクリートの拘束因子を積極的に活用できる複合構造形式における PBL の活用技術の提案

## 3. 研究の方法

押抜き試験における拘束因子、すなわち、コンクリートブロックの大きさ、かぶりの厚さ、孔内貫通鉄筋、底部摩擦のずれ耐荷力に及ぼす影響については、すでにかかなりの基礎データを得ているが、孔径の変化、底面摩擦、貫通鉄筋の拘束効果に着いては基礎データが十分でないため、これらの拘束因子のずれ耐荷力に及ぼす影響を解明するための要素試験を、研究期間を通して実施した。

試験は、筆者らが開発した十字柱を用いた押し抜き試験のほかに、1 枚板押し抜き試験

も実施した。載荷に当たって、供試体底面の摩擦を除去するために、供試体底面にテフロン板を敷いたものを用意したが、試験中、これでも摩擦力が幾らか発生することがわかったので、ローラー支承を新たに作成して、ほぼ無視できるほどの大きさにすることができた。また、かぶりなどの受動的に発生するコンクリート拘束効果のみならず、能動的にジャッキを用いて孔部に側圧を作用させた載荷試験も行った。加えて側圧を作用させるのではなく、破壊に伴うコンクリートの広がりを拘束した試験(変位拘束)も実施した。

要素試験で変化させたパラメータは、ジベル板の板厚と孔径である。このとき、孔内に光ファイバーを設置し、ジベル孔内のひび割れ発生荷重を求めようとしたが、結果としては、光ファイバーは高い伸び能力を有しているため、最高荷重まで破断しなかった。

一方、平成 27 年度からは、孔あき鋼板ジベルを用いた合成桁の載荷試験を実施した。試験体数は 6 体である。通常、この種の実験では、孔内貫通鉄筋を配置されるが、この実験ではあえて貫通鉄筋を入れず、破壊形態が明確に現れるようにしている。載荷は、2 点ピン支持 1 点載荷で、合成桁設計では、鋼桁の降伏やコンクリートの破壊に先行して孔あき鋼板ジベルが破壊するように断面を決定するとともに、完全合成を仮定した場合に、桁の中立軸位置が鋼桁に存在するように設計した。

最終的に、上記の要素試験結果および過去に行った要素試験をまとめて、孔あき鋼板ジベルの破壊過程と破壊メカニズムを明らかにし、それを表現できる力学モデルを構築して、孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力評価式を提案した。さらに、本提案式を合成桁載荷実験結果へ適用し、合成桁のずれ耐荷力を評価した。

#### 4. 研究成果

要素試験から得られた知見は以下のようである。

- 1) 複合構造標準示方書では、孔径が 90mm に制限されているが、200mm までの孔径を対象とした。その結果、孔径の増加に連れてずれ耐荷力も増加する。また、ジベル板厚が増えるとずれ耐荷力も増加傾向を示すが、孔径ほどの耐荷力の上昇は無い。
- 2) ジベル孔コンクリートの破壊形態は 1 面せん断破壊と 2 面せん断破壊があるが、ジベル孔径とジベル板厚の比  $d/t$  が大きいほど 1 面せん断破壊でジベルが破壊する。このとき、概ね 15 を境に 1 面せん断破壊と 2 面せん断破壊に分かれる。
- 3) 側圧が作用する場合、コンクリートかぶりが無い場合には、ずれ耐荷力は側圧にほぼ比例して上昇する。一方、かぶりがある場合には、かぶりが無い場合とほぼ同じずれ耐荷力であった。これは、側圧を作用させても、かぶりがある場合にはかぶり部のコンクリートが側圧を受け持つために、孔部コンクリート拘束効果が小さくなるためと考えられる。
- 4) 側圧が無い場合、かぶりがある場合にはコンクリートの大きさ(高さ)が大きくなるにつれてずれ耐荷力は上昇する。一方、かぶりが無い場合には、コンクリートの大きさに依存せず、ほぼ一定値のずれ耐荷力となった。
- 5) PC 鋼棒により側圧を作用させた場合、ずれ力の増加とともに PC 鋼棒のひずみが増加し、側圧が変化した。破壊時の側圧が大きいほどずれ耐荷力は大きくなる。
- 6) 以上の知見を基に、PBL の破壊メカニズムを次のように仮定した。
  - (1) 孔あき鋼板ジベルにずれ力  $V$  が作用すると、孔付近の割裂力やコンクリートの変形、微細ひび割れ発生後の骨材間の噛み合いなどによって、

周辺のコンクリートを割裂させようとする力（押し広げ力） $T$ が発生する。

- (2) 押し広げ力は、ずれ力の増加とともに増加し、これがコンクリートの破壊に起因するジベルの破壊(孔内および孔周辺のコンクリートのひび割れ)を発生させる。

- (3) 押し広げ力に対して、コンクリートの拘束因子による抵抗力が発生する。

拘束因子：ずれ耐力試験においては、孔内貫通鉄筋、上かぶり、背かぶり、かぶり内に配置された補強筋やフレーム筋、押し抜き試験ではコンクリートとテストベッドの間の摩擦力がある。もし、これらの拘束がなければ、ずれ耐力は、ジベル孔面のコンクリートのせん断強度のみで決まる。

- (4) PBL の破壊は、押し広げ力が種々の拘束因子による抵抗力を上回ったときに起こる。PBL のずれ耐力(最高荷重)は、ジベル孔コンクリートにひび割れが発生した時点、あるいは孔あき鋼板ジベルプレートの天端にひび割れが発生した時点に対応する。

- (5) ひび割れ発生後、ジベル孔内コンクリートは周辺のコンクリート中を移動する。このとき、ひび割れ面の骨材の噛み合いも押し広げ力の発生要因となる。

- (6) 最高荷重後は、押し広げ力がその時点での拘束因子が保有する抵抗力に釣り合うまで、ずれ耐力は低下し、ずれは増加する。もしも、最高荷重後において、抵抗力がなければ急激なずれ耐力低下を起こす。貫通鉄筋などにより抵抗力が持続できる場

合には、ずれ耐力は緩やかに低下する。

- 7) 上述の破壊メカニズムに基づいて、ずれ耐力評価式を提案した。

$$V_u = V_{int} + 2.5T$$

ここに、 $V_u$  はジベルのずれ耐力、 $V_{int}$  はコンクリート拘束が無い場合のずれ耐力で、

$$V_{int} = 2 \left\{ \frac{pd^2}{4} + (n-1)A_s \right\} f_{ct}$$

ここで、 $n$ :鋼-コンクリート弾性係数比、 $d$ :ジベル孔径、 $f_{ct}$ :コンクリート引張強度、 $A_s$ :貫通鉄筋断面積

また、 $T$  は、コンクリート拘束力で、

$$T = T_s + T_{cb} + T_f + P$$

$T_s$  : 貫通鉄筋の拘束力

$T_{cb}$  : 背かぶりによる拘束力

$T_f$  : 底面摩擦による拘束力

$P$  : 破壊時の側圧

- 8) 要素試験結果と本評価式を比較して、本評価式は、極めてよい精度で実験結果を表現できることが確認された。

一方、合成桁については、

- 9) コンクリートフランジは、ジベル板に沿って2つに割れて破壊した。破壊後は、重ねはりの剛性に近い挙動となった。

- 10) 通常、完全合成を仮定して設計されるが、実際は不完全合成となる。その不完全合成度を合成率の概念を取り入れて、桁のひずみ分布から合成率を求めたところ、0.6程度となった。荷重の増加とともに合成率は低下していき、破壊時には0.3~0.4程度であった。したがって、ジベルに作用するせん断力は、完全合成の場合よりも小さくなる。

- 11) 不完全合成状態でのジベルのずれ耐力を求めたところ、本評価式が適用できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5件)

- 1) 谷慎太郎, 藤井堅, 河金甲, 湯藤洋丈: 孔あき鋼板ジベルを用いた複合床版の力学的挙動, 構造工学論文集 (査読有) Vol.63, pp.943~953, 2017.
- 2) 實田雅人, 藤井堅, 民家洋輔: コンクリート拘束力と孔径の変化が孔あき鋼板ジベルに及ぼす影響, 第11回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム論文集, (査読無) Vol.11, pp.19~25, 2015.
- 3) 藤井堅, 道菅裕一, 岩崎初美, 日向優裕, 森健太郎, 山口詩織: 孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力評価式, 第10回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム論文集, (査読無) Vol.10, pp.68-1~68-8, 2014.
- 4) 民家洋輔, 藤井堅, 道菅裕一: コンクリートが側圧拘束された孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力に関する研究, 第10回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム論文集, (査読無) Vol.10, pp.69-1~69-6, 2014.
- 5) 藤井堅, 道菅裕一, 岩崎初美, 日向優裕, 森健太郎, 山口詩織: 孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力評価式, 土木学会論文集 A1, (査読有) Vol.70, pp.II-53~II-68, 2014.

[学会発表](計 3件)

- 1) 實田雅人, 藤井堅, 民家洋輔: コンクリート拘束力と孔径が変化した場合の孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力, 土木学会第70回年次学術講演会, 広島工業大学, 2016.5.21
- 2) Masato Jitsuda, Katashi Fujii: Ultimate slip behavior and strength of Perforated Strip with a different hole sizes under explicit concrete confinements, Proc. of ICCEE2015,

NCU Taiwan, 2015.11.8.

- 3) 本多潤一, 民家洋輔, 藤井堅: 能動的側圧によるコンクリート拘束が孔あき鋼板ジベルのずれ耐荷力に及ぼす影響, 土木学会中国支部研究発表会, 松江工業高等専門学校, 2014.5.31.

[図書](計 0件)

[産業財産権]

○出願状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

藤井 堅 (Fujii, Katashi)

広島大学・工学研究院・教授

研究者番号: 61027701

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

( )

研究者番号：

(4)研究協力者

( )