

令和 3 年 6 月 23 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04445

研究課題名(和文)プレストレストコンクリート有孔梁の耐震設計法

研究課題名(英文)Seismic Design of PC Beam with Opening

研究代表者

丸田 誠 (maruta, makoto)

静岡理科大学・理工学部・教授

研究者番号：30416763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：プレストレストコンクリート(以下PC)有孔梁のせん断に対する設計法の検討提案を行った。現状のPC有孔梁は円形開口でも、矩形開口に見なして、開孔上下を梁として軸筋と横補強筋を設置してせん断設計されている。一方、鉄筋コンクリート(RC)梁では、斜め筋と孔際補強のみでの補強方法が示されている。PC有孔梁でも斜め筋と孔際補強筋でせん断の許容応力度やせん断終局強度の検討と設計法を提案した。既往の実験結果の整理とPC有孔梁4体の実験、非線形有限要素解析を行い、開孔周りのせん断ひび割れ強度や終局強度は、軸方向力の1割がせん断に有効として、せん断強度に加算した評価式で、実験結果を良好に評価できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プレストレスが作用することで、PC有孔梁のせん断強度はRC梁より、せん断ひび割れ強度、せん断終局強度とも大きくなった。これは実験からもまた、弾塑性FEM解析からも分かった。また、開孔が片側に偏った場合でも、せん断強度は変化しないことも解析から分かった。PC有孔梁の円形開口の補強を、斜め筋と孔際補強筋で行い、そのせん断強度の評価の方法を示すことで新たな設計方法として世の中に提示できたことの意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：A study on a shear design method for prestressed concrete (PC) beam with an opening was perforated. Even if the current an opening of PC beam is a circular, it is regarded as a rectangular opening indicated. On the other hand, for reinforced concrete (RC) beams, a reinforcement method using only diagonal reinforcement and near-hole reinforcement is shown. Even for PC beams with a circular opening, the shear design method under the allowable stress and under the ultimate shear strength with diagonal reinforcements and reinforcements near the hole. By organizing the past experimental results, experimenting with 4 PC beams, and analyzing non-linear finite elements, the shear crack strength and ultimate strength around the opening are determined, assuming that 10% of the axial force is effective for shear. The experimental results could be evaluated well by the added evaluation formula.

研究分野：工学(建築構造学)

キーワード：プレストレストコンクリート 有孔梁 耐震設計法 円形開口 補強方法

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

昭和 25 年の建築基準法施行令に基づき、PC 造建築物の構造設計は定められ、昭和 53 年の告示設定で新耐震設計法に準じるべく詳細にその設計法は規定された。その構造設計法の中で、設備用貫通口とその補強方法（せん断補強）が示されている。現在でも PC 規準にその詳細が記述されており、一般的に設計で用いられている。具体的には、図 1 に示すように矩形の開口を基準とした上下左右への鉄筋補強方法（フィーレンディール補強）とその強度算定法が示されている。開口位置でのせん断終局強度は圧縮弦材と引張弦材のせん断終局強度の和として評価している。また、圧縮弦材と引張弦材のせん断終局強度は、それぞれ傾斜角 45 度のトラス機構のみによる耐力としている。また、中地震に対する損傷制御設計法は示されていない。開口が設備開口に多い円形であっても円を矩形と仮定して設計されている。通常の RC 梁で行われているような、円形開口（開孔）を対象とした斜め筋補強を主体とした設計法でないため、施工上は使いづらく、設計・施工者からの既成金物を用いた円形開孔補強の要望は大きい。

近年、PC 梁の構造実験も多く行われてきており、その曲げ性状やせん断性状は徐々に明確になっているが、大梁に必要な設備用貫通口の補強設計法に対する知見は少ない。RC 有孔梁での最大強度算定式は修正広沢式と呼ばれるもので約 220 体の実験結果を、開孔がない梁の評価式に変更を加え安全側にまとめたものであるが、PC 梁では実験データがこれに比べると少なく、実験式の提案も簡易ではない。ただし、PC 梁は RC 梁と異なり軸方向力が作用しているためせん断強度は RC より高く、ひび割れ等の損傷も小さいと考えられる。

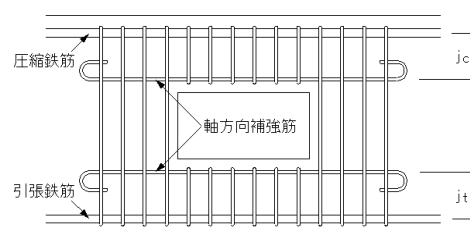


図 1 PC 開口補強法

2. 研究の目的

研究の目的は、斜め筋もしくは既成金物を用いた PC 有孔補強梁のせん断設計法の提示である。中地震時における損傷制御設計法と大地震時の終局強度設計法について明らかにする。特に終局強度設計法では、RC での修正広沢式を応用し、PC 用に変更することで簡易な設計式を提示する。また、補強量とせん断性能についての相関も提示する。

近年、円形開孔を対象とした PC 有孔梁研究は、アンボンド PC 有孔梁の構造実験がある。アンボンド PC 梁は、主方向（軸方向）の PC 鋼材に付着がなくトラス機構も成り立たないため、本研究で対象としているボンド型 PC 梁とは若干性状が異なるが、軸方向力の加わった円形開孔梁と意味では同じとなるため、最終的な評価にはこれらの実験結果も用いる。それと近年報告されている実験結果も含めて総合的に判断する。

また、非線形有限要素解析を用い、実験のシミュレーション解析を行った後、実験を実施していない開孔が中央からずれた場合の検討や長期荷重時のひび割れの検討も行う。

3. 研究の方法

構造実験を行いその性状を確認する。実験では、せん断強度を明確にするため、せん断破壊先行型で試験体は設計する。この際に開口周囲のせん断ひび割れ幅についても観察し損傷度の把握とともに、将来的に損傷制御用せん断許容応力度式、せん断修復限界設計式の提案を行えるように準備する。

— 構造実験： PC有孔梁部材の試験体4体作成し、地震時建物に作用する逆対称モーメントを載

荷し、試験体の荷重・変形・内部鋼材のひずみ性状・ひび割れパターンやその幅を観察・整理する。この中で鋼材ひずみ、ひび割れ幅(最大, 残留)及びプレストレスト力の減退力と試験体の復元力特性などの構造性能の関係も明確にする。実験因子は斜め筋の配筋方法とした。

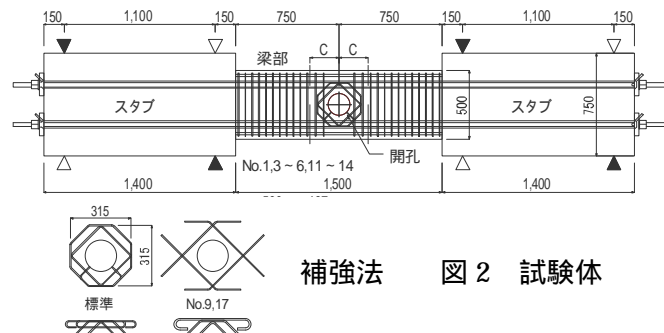
__ 弾塑性解析: 実験から得られる荷重 変形関係などの履歴, 損傷, 残留変形などを計算機上で追跡できるモデルを構築し, 実験のシミュレーション解析を行い, 各モデル定数等を調整し, 実験の妥当性を確認する。確認後, 未実施の実験因子を計算機上で数値実験として行う。数値実験因子を開孔の位置や長期荷重時の性状確認を中心に, 解析を行い, 設計法の適用範囲の拡張など成果を充実させるために行う。

__ 設計法確立: 実験及び数値実験結果から, 開孔補強法の違い(量, 強度, 形状)によるPC有孔梁部材のせん断特性が明らかになる。これらのデータを詳細に纏め, 許容せん断応力や最大強度評価(設計)式の提案などを行い, 総合的にPC有孔梁部材の設計 建物の設計が可能となる。

本提案では, 実験, 数値実験から, 開孔補強形状が異なる場合のせん断性状(ひび割れ, 最大強度)が明確になり, 開孔補強法とせん断強度の関係が明確となる。このことで, PC 有孔梁部材のせん断設計法を確立することにより, 総合的に PC 建物の設計法が大きく前進し, 世の中に PC 建物を多く供することができると思う。

4. 研究成果

図2に示す1/2縮尺のPC有孔梁4体の実験を行った。一部の試験体では, 斜め筋にも上下に水平筋を設置する等工夫をして行った。4体のせん断力 変形関係を図3に示す。補強方法やコンクリート強度によってひび割れ強度や最大せん断力は異なった。それと共に非線形有限要素解析(図4参照)で, 実験結果のシミュレーション解析を行い(図5参照), 内部の応力状況, 斜め筋と孔際補強筋の負担状況を確認した。以上の結果から,



ら, 開孔周りのせん断ひび割れ発生荷重は, プレストレスト力の効果によりRC有孔梁より大きく, せん断強度も大きい傾向にあった。終局強度もRCより大きい傾向となったことが実験や解析から確認された。

開孔が片側に寄った場合の解析時のひび割れを図6に示す。中央にある場合と性状

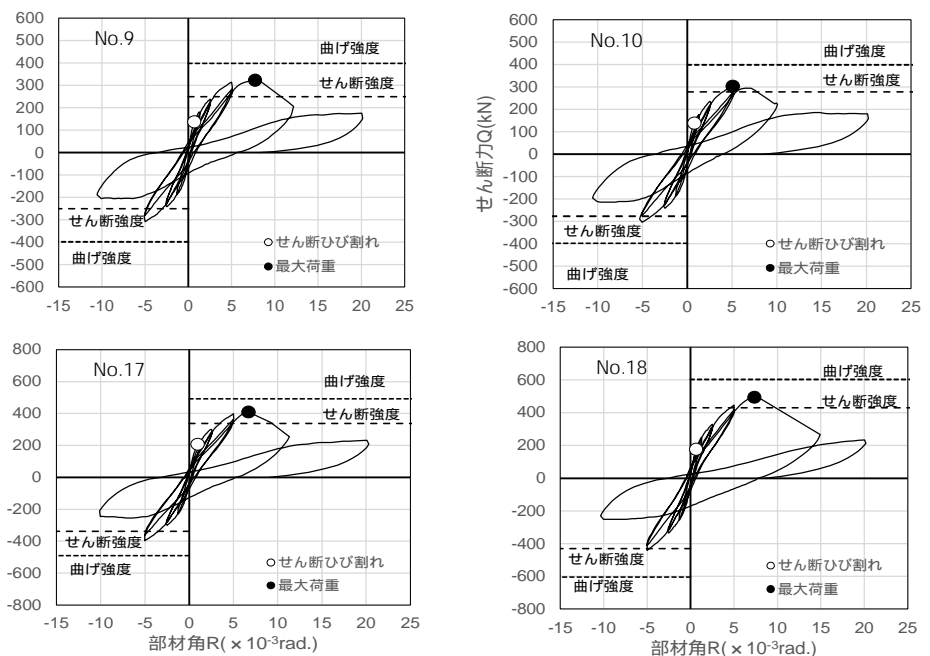


図3 せん断力 - 変形関係

は変わらなかった。長期時に開孔周辺にひび割れが生じるか，図7のモデルで検討し，ひび割れが生じないことを確認した。

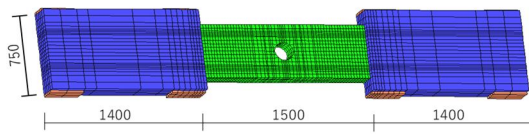


図4 有限要素解析モデル

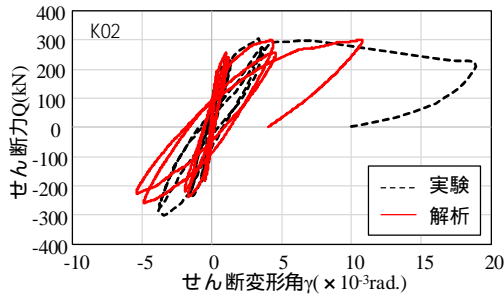


図5 シュミレーション解析

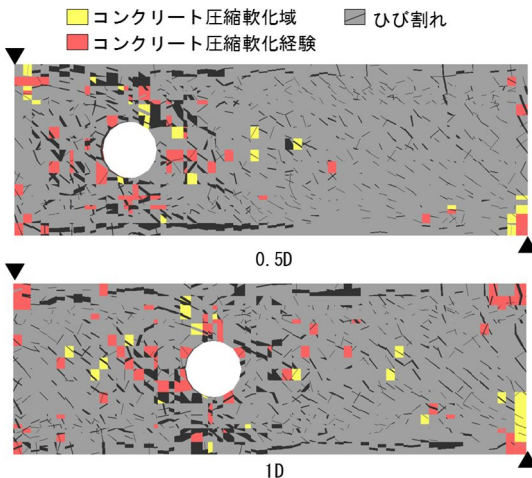


図6 偏心開孔ひび割れ

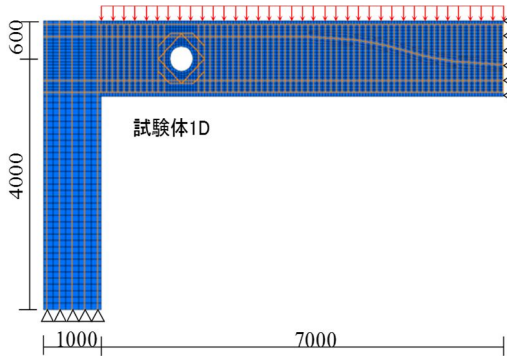


図7 長期時ひび割れ検討

ひび割れ強度を(1)式の軸力項 $0.1 \cdot \alpha \cdot \sigma_g$ の有無で評価する。軸力項の無いものは，津村式と呼ぶ。

$$Q_{SC2} = \left\{ \frac{0.085 \cdot k_c \cdot (50 + \sigma_B)}{(M/Q \cdot d) + 1.7} \cdot \left(1 - 1.65 \cdot \left(\frac{H}{D} \right) + 0.1 \cdot \alpha \cdot \sigma_g \right) \right\} \cdot b \cdot j$$

$$\sigma_g = \frac{Pe}{b \cdot D} \quad \alpha = \frac{4}{(M/Q \cdot d) + 1} \quad 1 \leq \alpha \leq 2$$

$$f_s = \min \left(\frac{\sigma_B}{30}, 0.49 + \frac{\sigma_B}{100} \right)$$

(1)

またRC規準では，有孔梁の長期許容度は式(3)で与えられている。第2項の横補強筋の効果を反映するのは，長期でひび割れ許容をすることとなることなど、疑問な点を鑑み今回は無視し式(3)を，また式(1)と同様に $0.1 \cdot \alpha \cdot \sigma_g \cdot bj$ を考慮した式(4)を用いて，せん断ひび割れ強度と比較した。

$$Q_{A0} = \left\{ \alpha \cdot f_s \cdot \left(1 - \frac{H}{D} \right) + 0.5 \cdot \right.$$

$$\left. wf_t \cdot (p_e - 0.002) \right\} \cdot b \cdot j.$$

(2)

$$Q_{SC3} = \left\{ \alpha \cdot f_s \cdot \left(1 - \frac{H}{D} \right) \right\} \cdot b \cdot j \quad (3)$$

$$Q_{Cr4} = \left\{ \alpha \cdot f_s \cdot \left(1 - \frac{H}{D} \right) + 0.1 \cdot \alpha \cdot \right.$$

$$\left. \sigma_g \right\} \cdot b \cdot j \quad (4)$$

有孔梁のせん断終局強度については，RC規準に示されている修正広沢式(以下に示す式(5))とひび割れ強度でも用い

た軸力項0.1を加算した式(6)を用いて検討を行う。

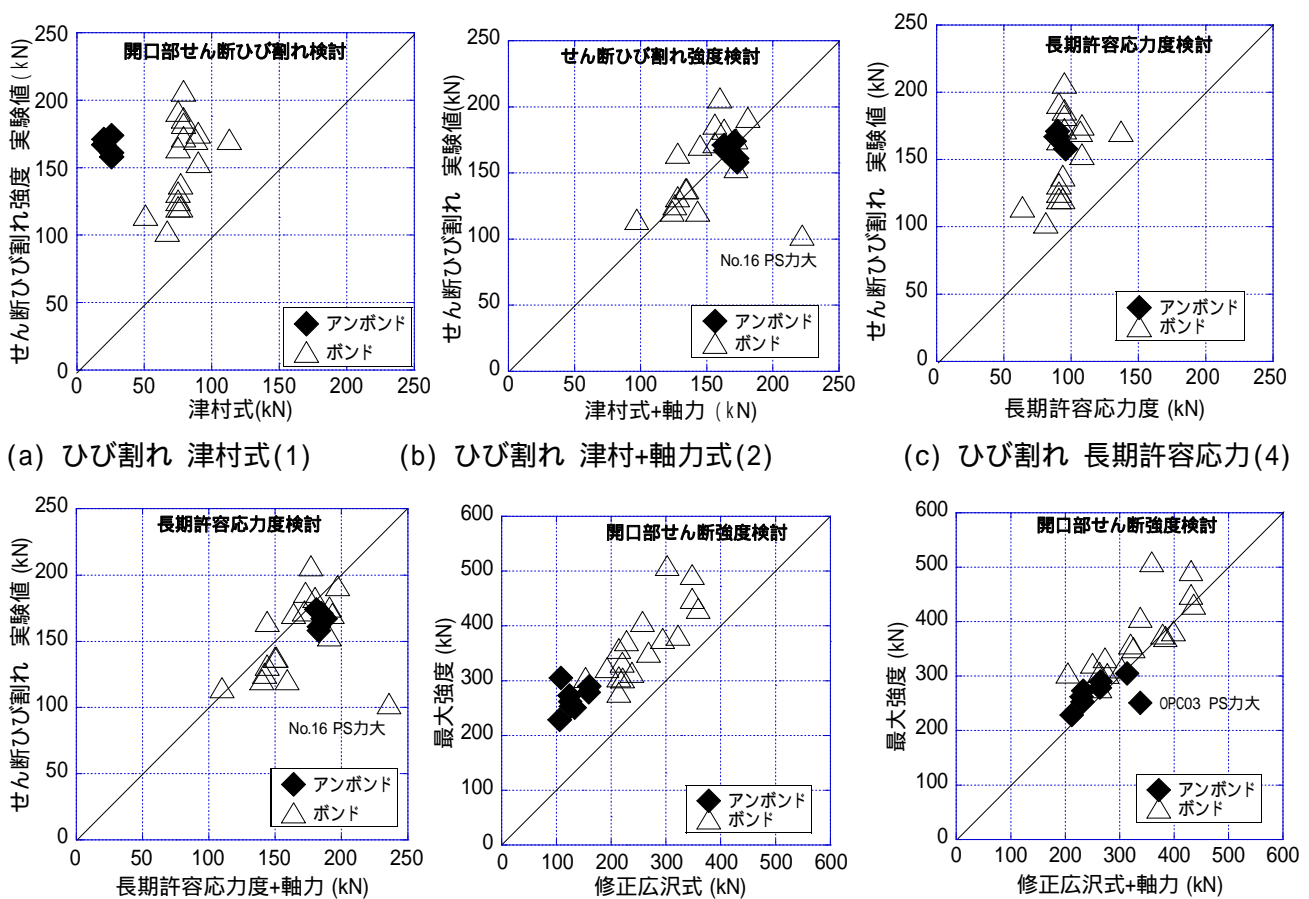
$$Q_{SU1} = \left\{ \frac{0.053 \cdot p_t^{0.23} \cdot (\sigma_B + 18)}{(M/Q \cdot d) + 0.12} \cdot \left(1 - \frac{1.61 \cdot H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{\sum p_s \cdot \sigma_{sy}} \right\} \cdot b \cdot j \quad (5)$$

$$Q_{SU2} = Q_{SU1} + 0.1 \cdot \alpha \cdot \sigma_g \cdot b \cdot j \quad (6)$$

図8に既往の文献からの実験データと今回の実験結果も含め，縦軸に実験値，横軸に計算値を

とり比較した。(a)から、軸力項がない津村式の場合、評価式の値は実験より小さい。一方、津村式に軸力項を付加した(b)では平均値1.03、標準偏差0.16と相関がよくなる。せん断ひび割れ強度と長期せん断許容応力度は直接関係ないが、(c)ではひび割れより小さい値だが、(d)からは実験と計算が概ね一致していることが分かる。

図 8(e)に、開口部せん断終局強度の実験値と式(5)による計算値の比較を示す。RC 対象の修正広沢式では、実験値に比べ値は小さく、実験値/計算値の平均値は 1.67、変動係数は 0.38 となった。(f)に実験値と式(6)による計算値の比較を示す。実験値/計算値の平均値は 1.11、変動係数は 0.15 で平均的に安全側の評価となり、実験値に対する計算値のばらつきが少なく、実験値を精度良く評価できた。せん断ひび割れ強度(長期許容応力度式)やせん断終局強度はプレストレスト力の効果を軸方向力とし、その 1 割がせん断に有効として、せん断強度に加算した評価式で、実験結果を良好に評価できた。



(a) ひび割れ 津村式(1) (b) ひび割れ 津村+軸力式(2) (c) ひび割れ 長期許容応力(4)
 (e) ひび割れ 長期許容応力 + 軸力(5) (f) 最大強度 修正広沢式(6) (g) 最大強度 修正広沢+軸力(7)

図 8 ひび割れ、最大強度と評価式

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 月成真隆、丸田誠、渡邊一弘、長沼一洋	4. 巻 Vol. 41
2. 論文標題 プレストレストコンクリート有孔梁のせん断強度に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 169-174
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 月成真隆、丸田誠、長沼一洋	4. 巻 28
2. 論文標題 開口補強金物を用いたプレストレストコンクリート有孔梁のせん断性状	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第28回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム	6. 最初と最後の頁 203-208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 月成真隆、丸田誠、渡邊一弘、長沼一洋	4. 巻 Vol. 42
2. 論文標題 開口補強筋を用いたPC有孔梁のせん断強度に関する研	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 409-414
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 多久和大海、岩見遼平、重松謙佑、丸田誠	4. 巻 Vol. 42
2. 論文標題 プレストレストコンクリート有孔梁のせん断強度に関する実験研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 373-378
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 開孔補強金物を用いた PC 有孔梁のせん断性状確認実験	4. 巻 29
2. 論文標題 開孔補強金物を用いた PC 有孔梁のせん断性状確認実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 第29回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 209-216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 ○渡邊、染谷、立花、岩倉、寒川、丸田
2. 発表標題 既製開孔補強金物を用いたプレストレストコンクリート有孔梁のせん断耐力に関する実験的研究 その1 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ○岩見、重松、大迫、岩倉、染谷、丸田
2. 発表標題 既製開孔補強金物を用いたプレストレストコンクリート有孔梁のせん断耐力に関する実験的研究 その2実験結果
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ○重松、新石、岩見、岩倉、染谷、丸田
2. 発表標題 既製開孔補強金物を用いたプレストレストコンクリート有孔梁のせん断耐力に関する実験的研究 その3ひび割れ強度およびせん断耐力
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 多久和大海, 染谷俊章, 立花弘, 岩倉知行, 渡邊一弘, 丸田誠
2. 発表標題 既製開孔補強金物を用いたプレストレストコンクリート有孔梁のせん断耐力に関する実験的研究 その4 実験概要
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 重松謙佑, 新石雅文, 岩見遼平, 岩倉知行, 多久和大海, 丸田誠
2. 発表標題 既製開孔補強金物を用いたプレストレストコンクリート有孔梁のせん断耐力に関する実験的研究 その5 実験値と計算値との比較
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------