

論文・報告

KK 合理化継手の定着特性に関する研究

～非線形解析に用いる合理化鉄筋の構成則の構築～

Study on Anchor Properties of KK Rationalized Joints

吉松 秀和 *1

YOSHIMATSU Hidekazu

鈴木 聡 *2

SUZUKI Satoshi

川口 千大 *3

KAWAGUTI Chihiro

中山 良直 *4

NAKAYAMA Yoshinao

本研究は、鋼橋 RC 床版の老朽化に伴う更新工事において用いられるプレキャスト PC 床版の RC 接合部に適用される KK 合理化継手を、数値解析により照査することを目的とする。KK 合理化継手は、鉄筋先端にナットを設置した機械式定着を用いたものであり、これまで機械式定着の体系的な照査方法が確立されていないため、実験による性能確認が行われている。そこで、本稿では KK 合理化継手で用いるナット付き鉄筋の付着特性を明らかにし、既往の付着応力-すべり-ひずみ関係式を基に機械式定着の影響を考慮した提案式を示した。さらに、提案式を適用した非線形有限要素解析を実施し、数値解析による照査の可能性を示した。

キーワード：KK 合理化継手、プレキャスト PC 床版、機械式定着、非線形有限要素解析、ナット

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された道路橋に経年による劣化や損傷が確認されており、なかでも、鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版とする）で劣化・損傷が進行している。この対応策として耐久性に優れたプレストレストコンクリート床版（以下、PC 床版とする）に取り替える更新工事が行われており、工事期間中の交通規制の長期化などの影響を抑えるため、プレキャスト PC 床版が採用されている。

プレキャスト部材の構築には部材間の接合構造が必要で、プレキャスト PC 床版の継手構造として一般的には図 1 に示すループ継手を使用されている。しかし、ループ継手は鉄筋加工の制約により薄い床版に使用できないことから、図 2 に示す先端に機械式定着としてナットを設置した鉄筋（以下、合理化鉄筋とする）を使用した継手構造（以下、KK 合理化継手とする）を開発した^{1),2),3)}。

機械式定着を用いた定着部や接合部は、照査方法が規定されていないこと、応力状態が特定されていないこと、部材としての挙動が解明されていないこと、などにより体系的な照査方法が確立されていないため、多くの時間とコストをかけた実験による性能確認を行っている。

そこで、時間やコストの削減を目的として、コンクリート標準示方書「定着破壊に対する照査」[2022 年制定／設計編：標準]⁴⁾に示される鉄筋自由端すべりの算定式を

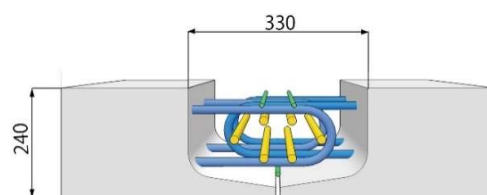


図 1 ループ継手

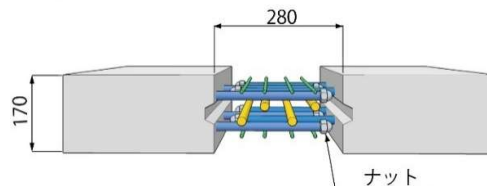


図 2 KK 合理化継手

基に合理化鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係式を提案し、数値解析による照査を目標とした。

本稿では、提案式の概要を示し、非線形有限要素解析のコンクリート-鉄筋間の付着モデルとして提案式を用いた解析結果を示し、数値解析による照査の可能性を示す。

2. 実験概要

コンクリート標準示方書の自由端すべりの算定式は、島ら⁵⁾が提案する付着応力-すべり-ひずみ関係式（式(2)、以下、島式とする）が用いられており、マッシュなコンクリートに鉄筋を定着する場合を想定している。そこで、合理化鉄筋の付着特性を確認するためにマッシュ

*1 川田建設㈱技術本部技術部技術課 課長

*2 川田建設㈱技術本部技術部技術開発課 課長

*3 川田建設㈱技術本部技術部技術課 係長

*4 川田建設㈱技術本部 本部長

表 1 試験体諸元および材料特性値

No.	試験体 名称	寸法 (mm)	付着長 (mm)	定着具 (mm)	鉄筋		コンクリート		
					径 (mm)	弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
1	D19-4d-N	500×500 300	75	—	D19 公称径	189,000	53.5	4.36	31,500
2	D19-4d-H		M18						
3	D19-n4d-4d-H								
4	D19-0d-H								
5	D19-8d-H			0					
			150				54.9	4.86	32,500
6	D19-4d-SH	300×170 ×450	75						

※試験体名称の d は鉄筋径を表している。付着長＝数値×d として 5mm ラウンドとした。
n4d は定着具側の非付着区間長，末尾の N は定着具なし，H は定着具あり，SH は床版を模擬した部材を表す。
試験体数は 2 とし，計測結果が得られたものは 2 試験体分の結果を示す。

■：ビニールホース
■：ブチルゴム系テープ

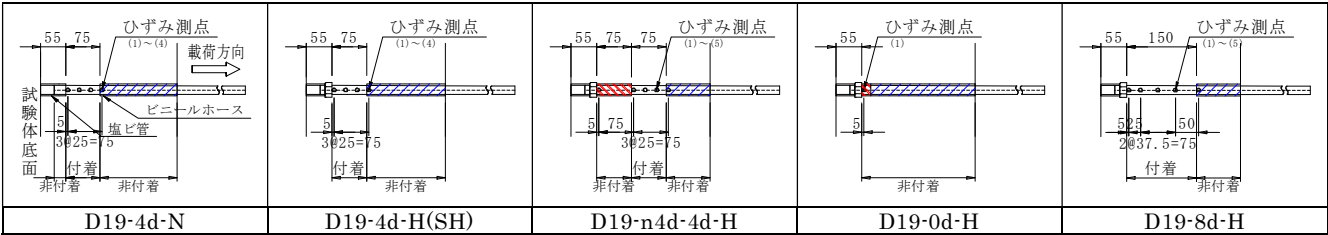


図 3 鉄筋の付着長・ひずみゲージ設置位置

なコンクリート試験体（以下，マッシュ試験体とする）に合理化鉄筋を定着した引抜き試験を実施⁶⁾し，さらに，床版の継手構造への使用を想定した薄い部材（以下，版模擬試験体とする）に定着した引抜き試験を実施した。試験体諸元と材料特性を表 1 に，鉄筋の付着長とひずみゲージ設置位置を図 3 に示す。

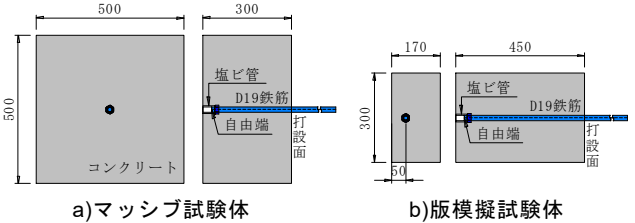


図 4 試験体形状

(1) 使用材料

コンクリートの圧縮強度は，実構造のプレキャスト PC 床版接合部を想定し，設計強度を 50 N/mm² に設定した。鉄筋は，普通鉄筋 D19 (SD345) を用いた。

(2) 試験体

試験体形状を図 4 に示す。マッシュ試験体は，鉄筋定着・継手指針 [2007 年版]⁷⁾を参考に断面を 500 mm×500 mm とし，鉄筋の付着長と表面近傍の付着劣化の影響を排除するための非付着区間長を確保できる高さ 300 mm とし，鉄筋を中央に配置した。

また，版模擬試験体は，断面を 170 mm×300 mm，高さ 450 mm とし，鉄筋はかぶりを考慮した表面から 50 mm 位置に配置した。

(3) 計測項目

荷重荷重をロードセル，鉄筋自由端の変位（すべり）を変位計，鉄筋の軸ひずみをひずみゲージにより計測した。鉄筋自由端変位は鉄筋先端から延長した全ネジボルト先端を計測した。ひずみゲージの設置位置を図 3 に測点番号を図 5 に示す。

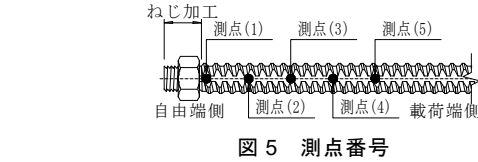


図 5 測点番号

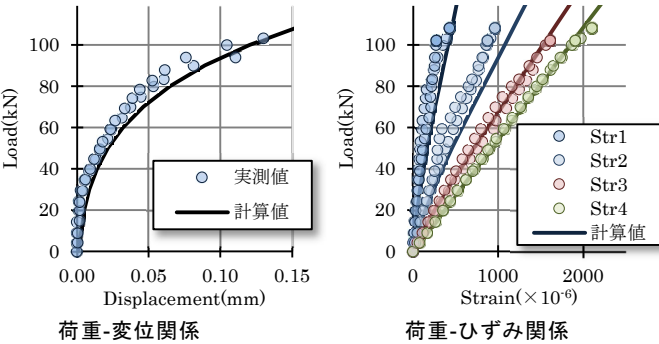


図 6 D19-4d-N

計算値と比較を行い，荷重－変位関係と荷重－鉄筋軸ひずみ関係がおおむね一致することを確認した。

(2) 定着具影響の定式化

鉄筋先端に取り付けた定着具により自由端変位が拘束されることから，その影響を考慮するため引抜き試験の定着具位置（測点(1)）の軸ひずみと自由端変位の関係から鉄筋径 D19，ナット M18 を使用した場合の定着具評価式として式(1)を導出した。

3. 付着応力－すべり－ひずみ関係

(1) 既往関係式の確認

マッシュ試験体で定着具を設置しない鉄筋による引抜き試験を実施し，図 6 に示す実測値を得た。島式による

$$\varepsilon_a = K_{exp} \times S_a + Seg \quad \text{式(1)}$$

ここに,

$$K_{exp} = 7725 \times 10^{-6} \quad Seg = 36.7 \times 10^{-6}$$

ε_a : 定着具位置の鉄筋軸ひずみ

S_a : 定着具位置の変位(mm)

定着具を設置した場合の実測値は、図 9 に示すように定着具を設置しない図 6 の実測値に比べ小さな値を示した。しかし、島式にナットの影響を境界条件として式(1)を適用すると自由端変位が定着具を設置した場合の実測値を過大に評価する結果となり、そのままの適用は困難であると考えられた。

(3) 合理化鉄筋における関係式の提案

平均付着応力の実測値に着目した結果、定着具の有無に関わらず、図 7 に示す荷重-平均付着応力関係において一致することが確認された。

$$\tau = \tau_0(s) \cdot g(\varepsilon) \quad \text{式(2)}$$

ここに,

$$\tau_0(s) = 0.73(\ln(1 + 5s))^3 \cdot f'_c \quad (\text{すべりの関数})$$

$$g(\varepsilon) = \tau/\tau_0 = 1/(1 + \varepsilon \times 10^5) \quad (\text{ひずみの関数})$$

$$s = 1000 \times S/D$$

τ : 付着応力(N/mm²), f'_c : コンクリート強度(N/mm²)

S : すべり量(mm), D : 鉄筋径(mm), ε : ひずみ

島式は、式(2)に示すように付着応力 τ をすべり量の関数 $\tau_0(s)$ と鉄筋ひずみの関数 $g(\varepsilon)$ の積で表している。 $\tau_0(s)$ は、鉄筋軸ひずみが 0 の時の任意のすべり量に対する付着応力を示しており、 $g(\varepsilon)$ は、付着応力 τ に及ぼす鉄筋ひずみの影響を表している。これらの関係から任意のすべり量に対し、ひずみの増加により付着応力 τ が減少することになる。つまり、定着具の有無に関わらず付着応力 τ が一致していることは、ひずみの増加に伴いすべりも増加していることを意味し、すべりに及ぼすひずみの影響が島式と異なることが示唆された。そこで、鉄筋ひずみの関数 $g(\varepsilon)$ の逆数と鉄筋軸ひずみの関係に着目した結果、図 8 に示す $1/g(\varepsilon)$ -ひずみ関係において、島式の場合の傾き 1.0 に対し約 0.6 となった。この傾き 0.6 を影響係数として式(2)を導出した。なお、この影響係数 0.6 は、鉄筋径 D19、ナット M18 を使用した場合の値であり、鉄筋径やナットサイズによって変化すると考えられる。

$$\frac{\tau}{f'_c} = \frac{0.73(\ln(1 + 5s))^3}{0.6 \cdot (1 + \varepsilon \times 10^5)} \quad \text{式(2)}$$

式(1)と式(2)を合理化鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係式(以下、提案式とする)として提案し、図 9 に D19-4d-H の実測値との関係を示す。計算値が実測値におおむね一致することから、マッシュ試験体に定着した合理化鉄筋の引抜きに対する挙動を評価できることを確

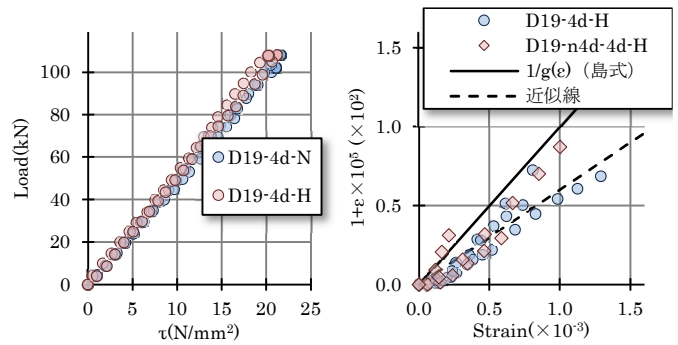


図 7 荷重-平均付着応力関係

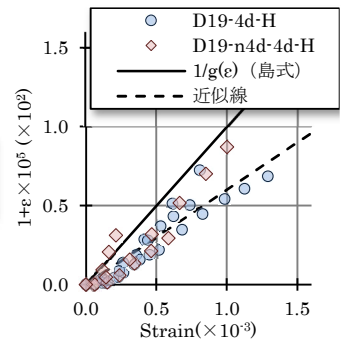


図 8 $1/g(\varepsilon)$ -ひずみ関係

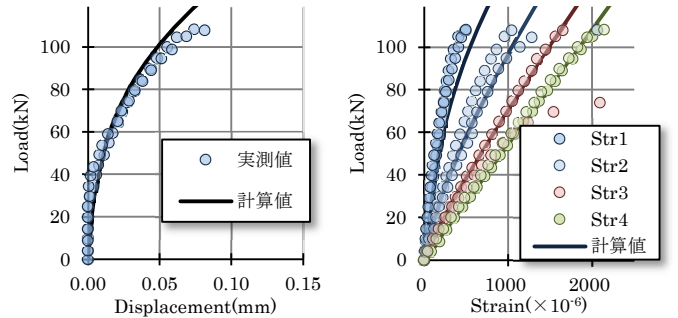
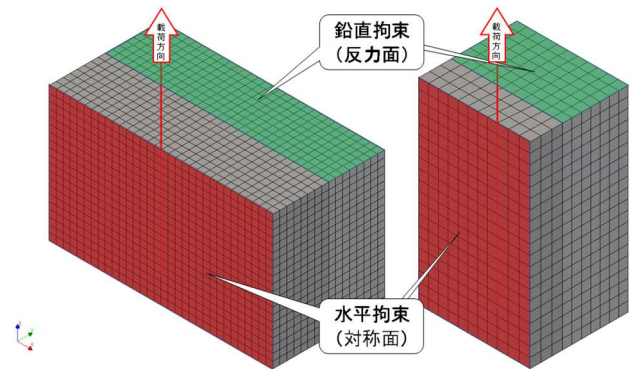


図 9 D19-4d-H



マッシュモデル

版模擬試験体

図 10 解析モデル

表 2 要素タイプ

	要素タイプ	備考
コンクリート	ソリッド要素	材料非線形
鉄筋 (付着範囲)	トラスタイプ 付着すべり埋込鉄筋要素	材料非線形
鉄筋	トラス要素	材料非線形

認した。また、版模擬試験体についても同様に計算値が実測におおむね一致することを確認した。

4. 再現解析 (引抜き試験)

提案式を合理化鉄筋の付着構成則として用いることで、上述した引抜き試験を非線形有限要素解析により再現可能なか、汎用 FEM 解析コード「DIANA(DIANAFE)」⁸⁾を用い検証した。

(1) 解析モデル概要

対象試験体は、マッシュ試験体 (D19-4d-H) と版模擬試験体 (D19-4d-SH) の 2 試験体とした。図 10 に示す

ように半断面としてモデル化し、表 2 に示す要素タイプを用い、鉄筋とコンクリートの物性値は、引抜き試験体に一致させた。鉄筋の降伏条件は von Mises 基準を用いたバイリニアモデルとし、降伏後の剛性は 1/100 とした。コンクリートのひび割れモデルには固定ひび割れモデルを用いた。応力-ひずみ関係については、圧縮側は中村ら⁹⁾による圧縮破壊エネルギーを考慮した放物線モデルとし、引張側は Hordijk モデルを用いた。このモデルで使用する引張強度には割裂試験により求めた値を適用し、引張破壊エネルギーはコンクリート標準示方書⁴⁾に従い算出した。また、コンクリートひび割れ面でのせん断伝達モデルには Al-Mahaidi モデルを適用した。ひび割れ後の圧縮強度低減にはコンクリート標準示方書に準拠したモデルを用い、ポアソン比減少を考慮した。鉄筋周囲のコンクリート要素のみ横方向ひび割れによる圧縮強度の低減を考慮しないモデルを用いた。

鉄筋とコンクリート間に付着構成則として式(2)を設定し、鉄筋定着端要素に式(1)を考慮した。拘束は、1/2 モデル対称面と載荷試験で反力面とした範囲に設定し、荷重は、鉄筋上端に作用させた。

(2) 解析結果

図 11 にマッシュ試験体と解析モデルの実測値と FEM 値の荷重-変位関係と荷重-ひずみ関係を示す。鉄筋やコンクリートの非線形性を考慮したことにより、図 9 に示す計算値に比べ、より実測値に近い結果となった。

図 12 にマッシュモデルと版模擬モデルの鉄筋先端付近の荷重-最大主応力関係を示す。コンクリートの引張強度を試験体に一致させたため、最大値が 0.5 N/mm^2 程度異なっているが、挙動はおおむね一致している。また、版模擬モデルのかぶり側と内部側で同一荷重時に発生する応力に最大 0.2 N/mm^2 程度の差が確認されたが、最大応力は同程度であった。

図 13 に鉄筋先端付近のコンクリート応力が引張強度程度になる 40 kN 載荷時の付着応力ダイアグラム図を示す。付着応力は、付着開始点から自由端へ徐々に小さくなっており、マッシュモデル、版模擬モデルで付着応力の分布に大きな違いは見られない。また、自由端先端

の付着応力が大きな値となっている。これは、先端要素に定着具の影響を考慮したインターフェース要素を設定したためであり、付着応力分布は定性的に評価できていると考えられる。

図 14 に最大主応力コンター図とひび割れ図を示す。載荷初期では付着開始点と定着具付近の主応力が大きな値となっており、荷重が増加するにつれ鉄筋に沿って主応力も大きくなっている。両モデルとも表面にひび割れの発生は確認できないが、版モデルはかぶり側の表面に

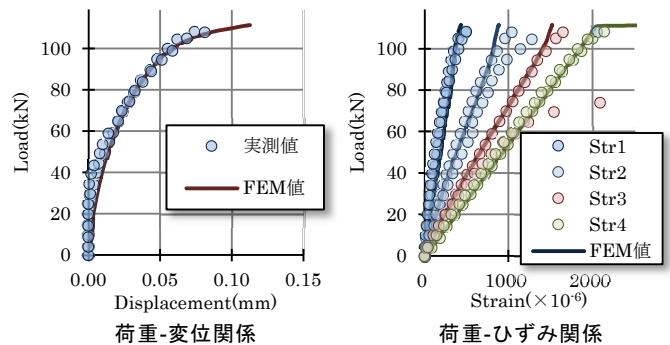


図 11 D19-4d-H

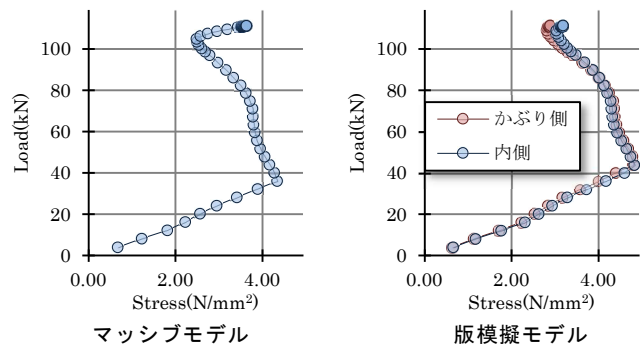


図 12 荷重-最大主応力関係

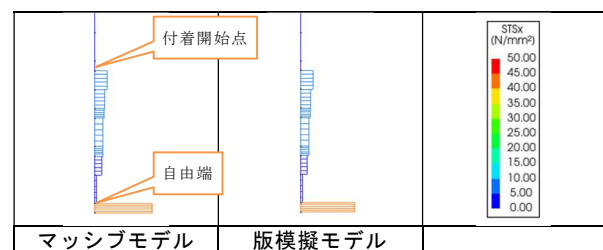


図 13 付着応力ダイアグラム図

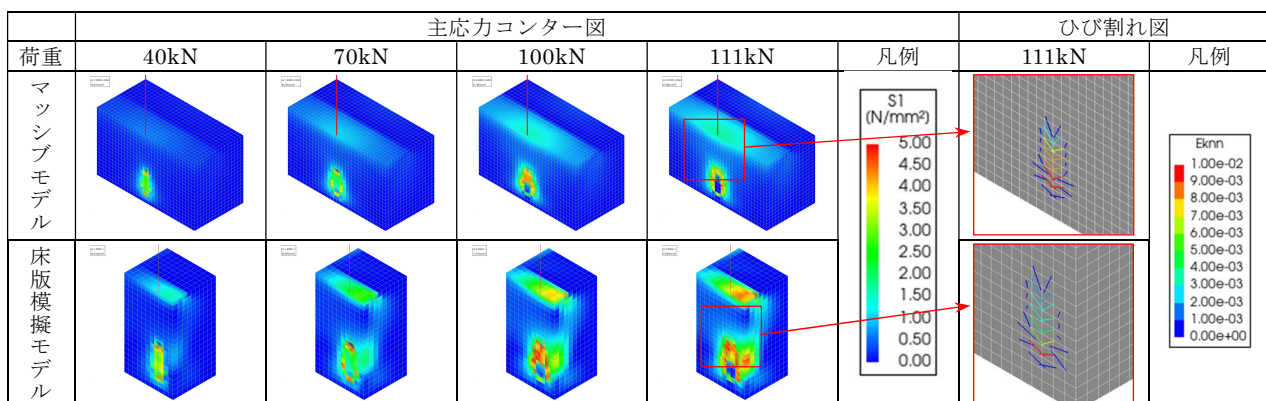


図 14 主応力コンター図

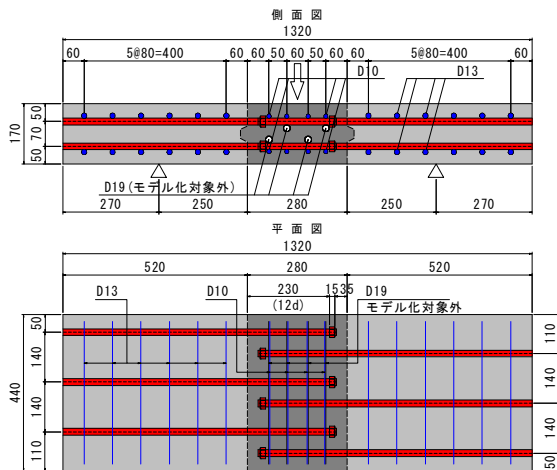


図 15 梁試験体形状

引張応力が発生している。鉄筋降伏以降も荷重を続けた実際の版模擬試験体では鉄筋に沿ったひび割れが発生したため、ひび割れ発生についても定性的に評価できていると考えられる。

これらの結果より、提案式の適用により、非線形有限要素解析による鉄筋の引抜き試験の再現性を確認した。

5. 再現解析（梁の曲げ荷重試験）

ここでは、KK 合理化継手の性能確認のために実施したプレキャスト PC 床版接合部を模擬した梁の曲げ荷重試験に対し、合理化鉄筋の付着構成則を用いた非線形有限要素解析を実施し再現可能か検証した。

(1) 解析モデル概要

図 15 に示すプレキャスト PC 床版接合部を模擬した梁試験体を解析対象とし、定着長は KK 合理化継手で採用している 12d (230 mm) とした。図 16 に示すようなモデル化を行い、物性値は、コンクリートの圧縮強度: 51.6 N/mm^2 、割裂強度: 4.54 N/mm^2 、弾性係数: $32\,000 \text{ N/mm}^2$ 、D19 鉄筋の降伏強度: 406 N/mm^2 とした。使用要素やモデル特性は引抜きモデルと同様とし、支点部に拘束条件を設定し、支間中央部上面を鉛直下向きに荷重した。

試験体は接合部を後打ちとしたが、一体化していると考え打継目地のモデル化は行わないこととした。

(2) 解析結果

図 17 に実測値と FEM 値の支間中央部の荷重－変位関係を示す。FEM 値は、実測値の履歴や最大値をおおむね再現できている。実測値は、荷重が 250 kN に達したあたりで変位が増加し、荷重の増加が困難になったため除荷を行い、約 3 mm の残留変位が生じた。一方、FEM 値は、荷重が 250 kN を超えても変位が増加し、荷重が微増している。これは荷重荷重を単調増加させているため、実際の荷重条件とは異なっているため 250 kN 以降で挙動に差異が生じていると考えられる。

合理化鉄筋のひずみ測点位置を図 18 に示し、荷重－鉄筋ひずみ関係を図 19 に示す。FEM 値は、各測点にお

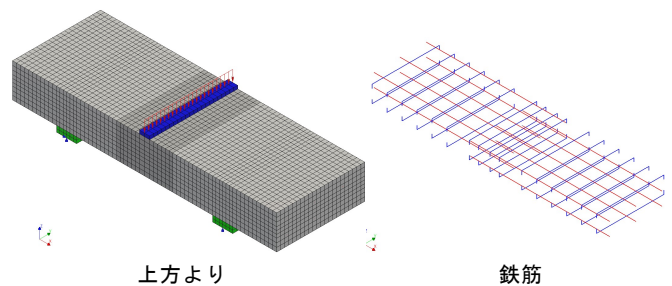


図 16 解析モデル

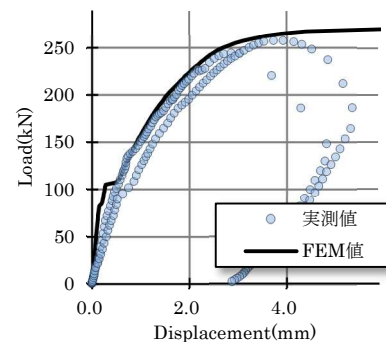


図 17 荷重-変位関係

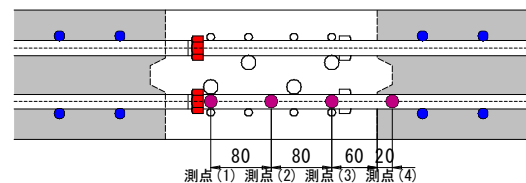


図 18 合理化鉄筋ひずみ測点位置

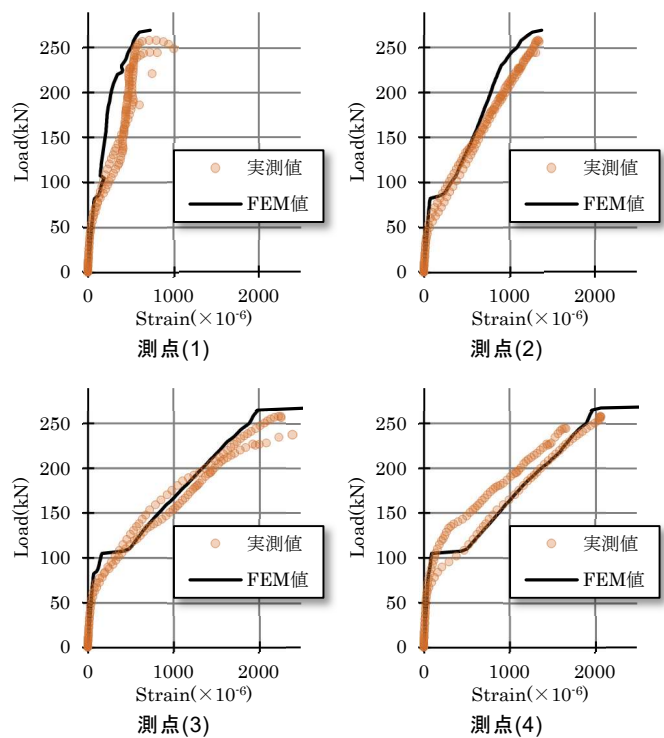


図 19 荷重-鉄筋ひずみ関係

いてひずみの挙動をおおむね再現しており、80 kN～100 kN で生じるひび割れによるひずみの増加も再現できている。

ひび割れ図を図 20 に示す。側面では、載荷板縁から斜め方向に発生するひび割れが再現されており、底面では、接合部付近の打継目地と定着具付近のひび割れ位置などおおむね評価できている。

これらの結果より、提案式の適用により、非線形有限要素解析による梁試験の再現性を確認した。

6. 結論

KK 合理化継手に用いる先端部にナットを設置した鉄筋（合理化鉄筋）に対して引抜き試験を実施し、島らの提案する付着応力-すべり-ひずみ関係式を基に合理化鉄筋に適用可能な関係式を提案した。さらに、この関係式を付着構成則として用いた非線形有限要素解析による検証を行い、実測値におおむね一致することを確認した。

本検討の範囲内において以下の知見を得た。

- ・ 合理化鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係式を適用することにより、定着体の破壊および鉄筋降伏に至るまでの範囲において、鉄筋自由端のすべりの算出が可能となった。これにより、自由端すべりの限界値を設定することで、コンクリート標準示方書〔2022 年制定／設計編：標準〕に示される「定着破壊に対する照査」の実施が可能であると考えられる。
- ・ 合理化鉄筋の引抜き試験における自由端すべり、鉄筋ひずみ分布、付着応力分布について、提案式による計算値と非線形有限要素解析の解析値を比較した結果、材料の非線形性や合理化鉄筋の付着構成則を適用した非線形有限要素解析が、実測値に近い結果を示すことを確認した。また、床版を模擬した部材においても、同解析手法による照査が可能であると考えられる。
- ・ 梁の曲げ載荷試験に対する再現解析において、変位やひずみの挙動、ひび割れの発生状況が実測値と一致していることを確認した。この結果から、非線形有限要素解析により、部材としての照査が可能であると考えられる。

おわりに

KK 合理化継手の開発にあたり、大阪大学名誉教授 松井繁之先生には、実験方法をはじめとする多方面にわたりご指導を賜りました。また、合理化鉄筋の付着構成則の提案および非線形有限要素解析の実施に際しては、秋田大学大学院理工学研究科 徳重英信教授、北海学園大学工学部 高橋良輔教授より貴重なご助言とご指導をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉松秀和, 松井繁之, 大澤浩二, 中山良直, 水野浩, 表真也：床版取替え用プレキャスト PC 床版の合理化継

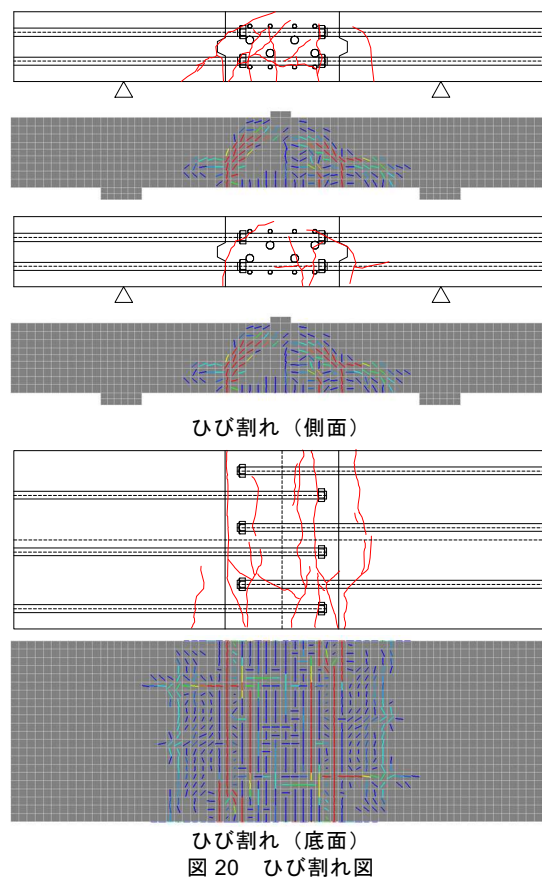


図 20 ひび割れ図

手の開発, 構造工学論文集 Vol.60A, pp.1159-1168, 2014.3

2) 表真也, 吉松秀和, 中山良直, 松井繁之, 林川俊郎：床版取替え用プレキャスト床版の合理化継手の開発, 構造工学論文集 Vol.60A, pp.1169-1177, 2014.3

3) Hidekazu Yoshimatsu, Ryosuke Takahashi, Hidenobu Tokushige : Load bearing performance of Pre-cast PC slab using rationalized joints, IABSE congress, pp.679-686, 2020

4) コンクリート標準示方書〔2022 年制定／設計編：標準〕

5) 島弘, 周礼良, 岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集第 378 号／V-6, pp.165-174, 1987.2

6) 吉松秀和, 水戸健介, 高橋良輔, 徳重英信：鉄筋端部にナットを設置した機械式定着の定着特性に関する研究, コンクリート工学論文集 第 34 巻, pp.117-127, 2023

7) コンクリート・ライブラリ 156 鉄筋定着・継手指針 [2020 年版]

8) DIANA10.7 (DIANA FEA),

9) Hikaru NAKAMURA, Takeshi HIGAI : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001