

論文 長ボルト式継手を用いたプレキャスト床版の疲労性能に関する実験的研究

吉田 健太郎^{*1}・大野 俊夫^{*2}・坂井 吾郎^{*3}・本田 智昭^{*4}

要旨：フルプレキャスト床版の継手に、現場でのコンクリート打設の必要がない長ボルト式継手を提案した。本継手はシールドセグメントでは多数の実績を有するが、変動荷重などの耐疲労性能が要求される床版の継手への適用はこれまでなかった。このため、長ボルト式継手を用いたプレキャスト床版の継手曲げ疲労試験を行った。その結果、継手部の500万回繰返し疲労試験後の静的破壊耐力は、疲労試験を行わない静的破壊耐力とほぼ同等の耐力を有していることを確認した。

キーワード：プレキャスト床版，長ボルト式継手，疲労試験

1. はじめに

プレキャスト床版（以下，PCa床版）は，現場施工の省力化，工期短縮を図るために，主に鋼橋のコンクリート系床版を対象として研究が行われてきた^{1),2)}。新設工事や疲労損傷した旧床版の更新などにより，実際の工事への採用実績も多いものとなっている。

PCa床版は，本体構造への現場でのコンクリート打設の有無から，フルPCa床版とハーフPCa床版に分類される³⁾。ハーフPCa床版は，型枠・支保工の機能を持たせるとともに，供用時には本体構造の一部として機能するPCa床版であり，現場でのコンクリート打設において型枠・支保工の設置・撤去が省略化できることに特長がある。一方，フルPCa床版は，完成された本体構造を現場で敷設するため，現場での本体構造へのコンクリート打設自体を省略化できることに特長がある。

しかしながら，フルPCa床版においても本体構造どうしを一体化するための接合部が必要となる。その接合方法は主にPC鋼材による接合方法と鉄筋による接合方法が考えられる。PC鋼材

による接合方法は，接合部への現場でのコンクリート打設は伴わないが，PC鋼材の緊張管理といった専門工が必要となる。また，将来の部分的な床版の取替えが困難となる。鉄筋による接合方法は，重ね継手か重ね継手長を短くすることを目的としたループ継手を用いることになるが，いずれの継手も接合部への現場でのコンクリート打設を伴うため，必ずしもフルPCa床版の特長を最大限に活用することができなかった。

このため，著者らは接合部のコンクリート打設を省略することが可能な長ボルト式継手のPCa床版への適用を考えた。長ボルト式継手は，シールドセグメントの継手として，これまで東京湾横断道路などで多数の実績を有している。しかしながら，床版への適用に当たっては，変動荷重に対して長ボルト式継手が耐疲労性能を有することが求められる。また，長ボルト式継手の設計においても疲労性能に対して配慮する必要がある。

本論文では，長ボルト式継手の耐疲労性能を確認するために実施した継手曲げ疲労試験の結果について述べる。

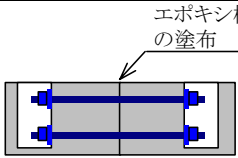
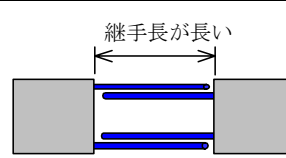
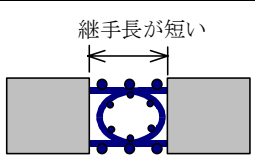
*1 鹿島建設（株）技術研究所 研究員（正会員）

*2 鹿島建設（株）技術研究所 上席研究員 博(工)（正会員）

*3 鹿島建設（株）技術研究所 主任研究員（正会員）

*4 鹿島建設（株）技術研究所 研究員 工修（正会員）

表 - 1 接合方法の比較

接合方法	長ボルト式継手	鉄筋による接合方法	
		重ね継手	ループ継手
概要図			
特長	<ul style="list-style-type: none"> 現場での作業はボルト締結のみ。 接合部へのコンクリートの現場打設がない。 シールドセグメントでは多数の実績がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 最も簡便で基本的な継手。 設計法も確立。 	<ul style="list-style-type: none"> 重ね継手に比べて継手長を短くできる。 橋梁の床版等で実績がある。
課題	<ul style="list-style-type: none"> 疲労が問題となる部材での実績がない。 設計法の確立が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> 重ね継手長が長い。 コンクリートの現場打設量も多い。 	<ul style="list-style-type: none"> 補強筋の配筋作業が必要。 コンクリートの現場打設がある。

2. 長ボルト式継手を用いたプレキャスト床版

長ボルト式継手と従来の鉄筋による接合方法（重ね継手，ループ継手）の比較を表 - 1 に示す。長ボルト式継手は接合面全体に圧縮応力を導入するとともに，ボルトの経時的な締結力の低下を小さくするために，PCa 床版接合面から離れた位置でナットにより定着を行う引張接合方式の継手である。接合面の目開き防止と長ボルトに作用する変動応力の低減を図るために，長ボルト式継手には締結力を導入する。なお，接合面は，一体化と耐久性の向上を図るために，エポキシ樹脂を塗布するものとしている。

本継手は，接合部への現場でのコンクリート打設や配筋作業が不要なため，フル PCa 床版の特長を最大限に活用することが可能である。このため，坑内の限られた空間での床版施工となるシールドトンネル工法を用いた地下道路などでは，トンネル自体がフルプレキャスト化されている点も含めて，有効な継手形式であると考えられる。

3. 継手曲げ疲労試験

3.1 目的

長ボルト式継手を用いた PCa 床版の継手部の耐疲労性能を確認することを目的として，実構造物を模擬した梁状試験体を用いた曲げ疲労試験を実施した。

3.2 試験体の種類および使用材料

試験体の種類を表 - 2 に示す。長ボルト式継手の疲労試験後の静的曲げ耐力および変形性能

表 - 2 試験体の種類

ケース	試験体の種類	接合部の仕様
1	静的曲げ試験体	長ボルト式継手: ・M27 (10.9) ボルト×4本 ・定着間長600mm
2	疲労曲げ試験体	・1本当り114kNの初期締結力を導入 ・接合面にはエポキシ樹脂を両面塗布

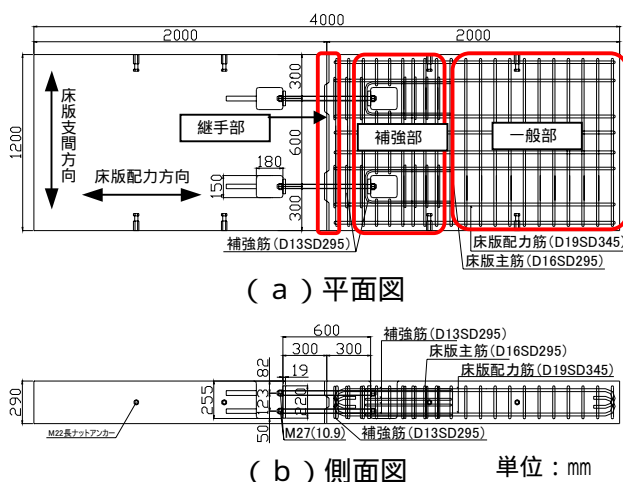


図 - 1 試験体形状図

を比較するために，各試験ケースの試験体形状および使用材料は同一とし，ケース 1 試験体は疲労試験を行わずに静的曲げ破壊試験を行い，ケース 2 試験体は疲労試験実施後に静的曲げ破壊試験を行った。

試験体は，図 - 1 に示す厚さ 290mm，幅 1,200mm，長さ 2,000mm の PCa 梁 2 本を，試験体幅方向に 600mm の間隔で 2 箇所，厚さ方向に 2 段配置した長ボルト 4 本を用いて接合した形状とした。試験体厚さは，床版支間 3.7m 程度を想定した実物の厚さとした。平面内のボルト配置間隔についても実物大を想定している。ただし，試験体幅については，試験装置の制約と長ボルト式継手の配置間隔を考慮して無限長を

1,200mm とした。ボルトボックスは、締結機械の大きさから長さ 180mm，幅 150mm，深さ 255mm の形状とし，4 箇所にした。

コンクリートの材料物性を表 - 3 に示す。床版コンクリートは，設計基準強度 40N/mm^2 とした。ボルトボックスの間詰めコンクリートは床版コンクリートと同等以上の圧縮強度を確保するものとした。なお，ボルトボックスの間詰めは，実際には敷均しコンクリート施工時に併せて間詰めすることを考えている。

長ボルトおよび鉄筋の機械的特性を表 - 4 に示す。長ボルト式継手に用いるボルトは M27 (10.9) で定着間長 600mm とした。ボルトには，設計荷重作用時に継手に発生する曲げモーメントに対して，目開きを生じさせないために必要な締結力以上の締結力を導入するものとして，ボルトの許容耐力の 0.8 倍となる 114kN/本 (降伏応力度に対して安全率 3 を仮定) を目標締結力として導入した。ただし，実際の締結力は約 $140 \sim 150\text{kN/本}$ と若干大きめの締結力となった。

鉄筋は，床版では配力方向となる試験体軸方向に D19SD345 (配置間隔は標準 150mm ピッチ) を，床版では支間方向となる試験体軸直角方向に D16SD295 (配置間隔は標準 100mm ピッチ) を用いた。また，長ボルトから試験体軸方向鉄筋への力の伝達を考慮して，D13SD295 を補強筋としてボルトボックス回りに配置した。

なお，接合面には二液混合型のエポキシ樹脂を両面塗布している。

3.3 試験方法

荷重は，図 - 2 に示す 500kN アクチュエータによる荷重装置を用いた。静的曲げ破壊試験および繰返し疲労試験ともに 2 点等曲げ荷重とし，等曲げ区間 1,000mm，せん断スパン 1,400mm で支間長は 3,800mm とした。等曲げ区間は，継手部全体を等曲げ区間内とするために，長ボルトの定着間長とボルトボックスの大きさを考慮して設定している。

試験体の計算曲げ耐力 (許容曲げモーメント：弾性解析，降伏曲げモーメント：等価矩形

表 - 3 コンクリートの材料物性

項目	本体部		ボルトボックス間詰め部	
	圧縮強度	弾性係数	圧縮強度	弾性係数
	N/mm^2	kN/mm^2	N/mm^2	kN/mm^2
ケース1試験体実験時	41.2	28.3	46.2	31.4
ケース2試験体疲労試験開始時	43.4	28.1	54.4	31.2
ケース2試験体疲労試験終了時	45.5	30.4	69.3	36.9

表 - 4 長ボルト・鉄筋の機械的特性

項目	単位	鉄筋			ボルト
		D13SD295	D16SD295	D19SD345	M27(10.9)
		補強筋	床版主筋	床版配力筋	接合部
公称断面積	mm^2	126.7	198.6	286.5	459.0
弾性係数	kN/mm^2	177.2	168.8	173.9	210.0
降伏応力度	N/mm^2	331.5	336.2	375.6	935.0
引張強度	N/mm^2	487.3	498.2	572.6	1039.0
降伏ひずみ	μ	1871	1992	2160	4452

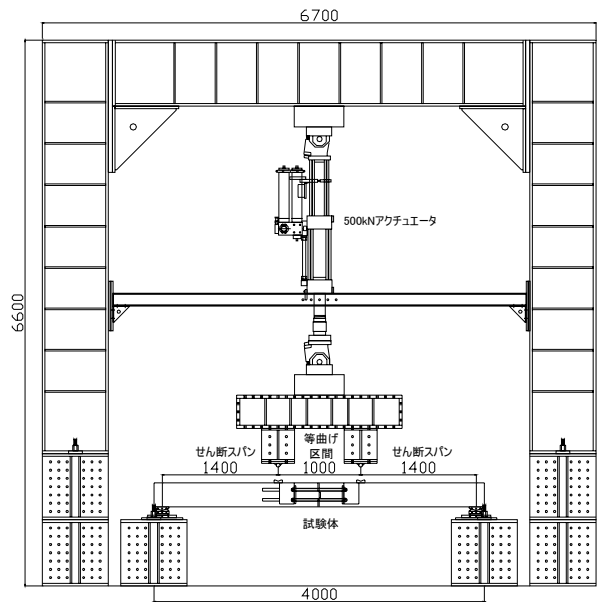


図 - 2 荷重装置図 単位：mm

表 - 5 設計曲げモーメントおよび曲げ耐力

項目	一般部	継手部	補強部
設計荷重作用時 曲げモーメント (kNm(kN))	42.5(60.7)		
許容曲げモーメント (kNm(kN))	56.7 (81.0)	58.6 (83.7)	68.4 (97.7)
降伏曲げモーメント (kNm(kN))	195.3 (279.0)	198.2 (283.0)	227.3 (324.7)

※()内は荷重荷重。

表 - 6 疲労試験荷重ステップ

STEP	荷重レベル	繰返し回数
1	42.5kNm (設計荷重作用時)	1~200万回
2	56.7kNm (一般部許容，引張側鉄筋)	~300万回
3	58.6kNm (継手部許容，引張側ボルト)	~500万回

完全片振り荷重とした

応力ブロック法) および設計荷重作用時の曲げモーメントを表 - 5 に示す。ケース 1 試験体は、一般部の許容曲げ耐力 56.7kNm まで静的に載荷・除荷を行う過程を 5 回繰り返した後、静的に破壊まで載荷を行った。ケース 2 試験体は、表 - 6 に示す各載荷レベルを上限とした完全片振り載荷とし、設計荷重作用時の発生曲げモーメント 42.5kNm で 200 万回まで、一般部の許容曲げモーメント 56.7kNm で 300 万回まで、さらに継手部の許容曲げモーメント 58.6kNm で 500 万回まで繰返し載荷を行った。さらに、疲労試験後の耐力を確認するために、静的曲げ破壊試験を行った。

3.4 試験結果

(1) 疲労試験結果

500 万回繰返し載荷終了後においても長ボルトの破断はなく、継手部の許容曲げモーメント (= 58.6kNm) 以上の疲労耐力を有していることを確認した。ケース 2 試験体の中央変位と繰返し回数の関係を図 - 3 に示す。初期の中央変位が 1.24mm に対して 200 万回繰返し載荷終了時では 2.82mm の変位を示しており、設計荷重作用時の同一の荷重に対して徐々に変位の増加が確認された。これは図 - 4 に示すように継手部以外のひび割れが繰返し数の増加に伴って徐々に進展しており、等曲げ区間内で計測した図 - 5 に示す引張側鉄筋と圧縮側コンクリートのひずみの増加傾向とも一致する。一方、ボルト軸力は図 - 6 に示すように、繰返し回数 200 万回までほとんど変化がないことから、繰返し回数の

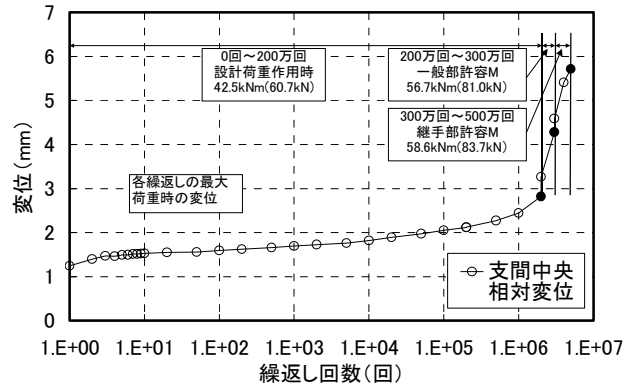
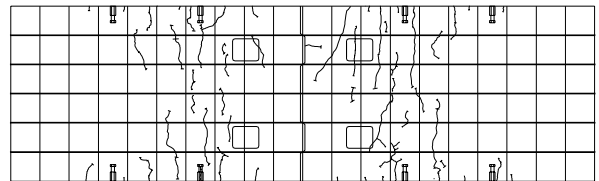


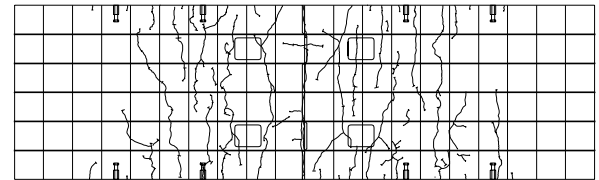
図 - 3 中央変位 - 繰返し回数 (荷重載荷時)



(a) 10 万回繰返し時



(b) 200 万回繰返し時



(c) 300 万回繰返し時



(d) 500 万回繰返し時

図 - 4 疲労試験中のひび割れの進展

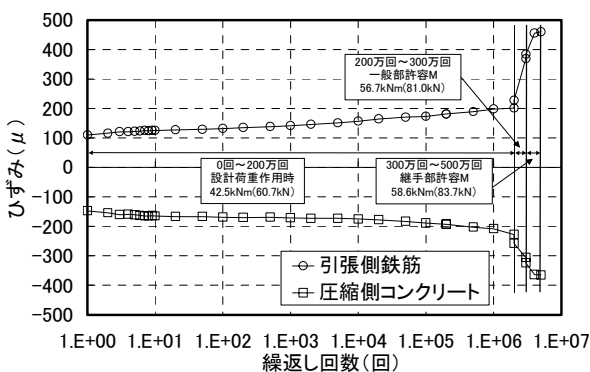


図 - 5 ひずみ - 繰返し回数 (荷重載荷時)

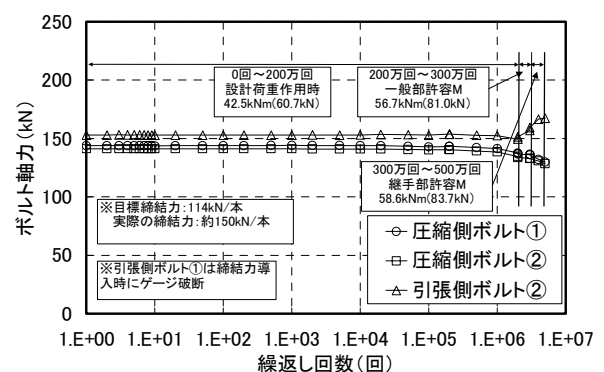


図 - 6 ボルト軸力 - 繰返し回数 (荷重載荷時)

増加に伴う変位の増加は、継手部ではなく一般部のひび割れの進展によるものと考えられる。なお、各グラフとも、繰返し回数 200 万回以降は載荷荷重を大きくしているため、それに伴って値が変化している。

一般にねじ部品の引張疲労試験では、有限疲労領域（あらかじめ定めた応力繰返し数に達する前にすべての試験体が破壊）から遷移疲労領域（無限寿命領域、あらかじめ定めた応力繰返し数までに破壊する場合と破壊しない場合が生じる）に移行する回数が 500 万回～1,000 万回⁴⁾と言われている。また、M27 (10.9) ボルト単体の素材平滑丸棒の疲労限（引張強さの約 40%， 421 N/mm^2 ）とネジ部の切欠き係数からボルト単体の疲労限の推定値は 45.1 N/mm^2 と計算される⁵⁾。

これに対して、試験体から得られた実測の長ボルトの応力振幅は、設計荷重作用時において約 6 N/mm^2 （0～200 万回）、一般部許容曲げモーメント作用時は約 24 N/mm^2 （～300 万回）、継手部許容曲げモーメント作用時は約 43 N/mm^2 （～500 万回）であった。ボルトの初期締結力によりフルプレストレス状態にあるコンクリートの弾性変形分による応力変動，すなわち長ボルトの計算上の応力変動は 8.9 N/mm^2 であり，実測の設計荷重作用時の応力振幅がこれ以下（約 $6 \text{ N/mm}^2 < 8.9 \text{ N/mm}^2$ ）であることから，想定通り設計荷重作用時においてフルプレストレス状態であることが確認できた。また，いずれの荷重状態においてもボルト単体の疲労限の推定値に対して小さな応力振幅である（ $45.1 \text{ N/mm}^2 > 約 6, 24, 43 \text{ N/mm}^2$ ）ことから，遷移疲労領域に掛かる 500 万回繰返し載荷終了後でも長ボルトが破断せず，継手部の許容曲げモーメント以上の疲労耐力を有することができたものと考えられる。

(2) 静的曲げ試験結果

載荷荷重と中央変位の関係を図 - 7 に示す。ここで，ケース 2 試験体は疲労試験時に生じた残留変位（ $=2.84 \text{ mm}$ ）を除いた値を示している。いずれのケースでも試験体は継手部と補強部の

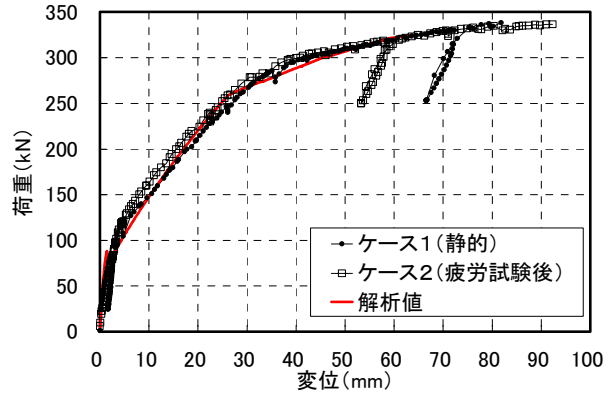


図 - 7 載荷荷重 - 中央変位関係

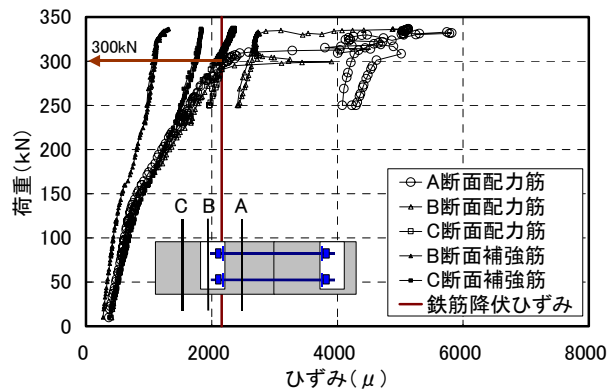


図 - 8 載荷荷重 - 鉄筋ひずみ関係

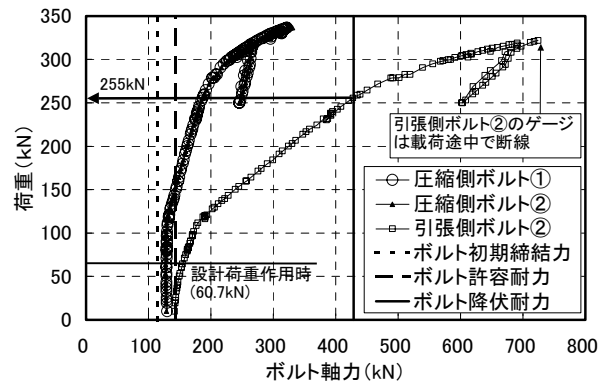


図 - 9 載荷荷重 - ボルト軸力関係

コンクリートの圧壊により破壊しており，ケース 1 試験体の最大荷重は 338 kN （変位 81.8 mm ），ケース 2 試験体の最大荷重は 336 kN （変位 92.3 mm ）で，疲労試験後においても疲労試験前と同等の耐力を有していることを確認した。また，荷重と変位の関係もほぼ同じであり，疲労試験後においても同程度の変形剛性を有していることも確認した。このため，これ以降はケース 2 試験体の結果についてのみ示す。

載荷荷重と引張鉄筋ひずみの関係を図 - 8 に，

載荷荷重とボルト軸力の関係を図 - 9 に示す。載荷荷重が 255kN においてボルトが降伏耐力に達した後、300kN を上回ったところで鉄筋が降伏しはじめて、最終的に圧縮側コンクリートの圧壊で破壊しており、長ボルトの破断は生じなかった。表 - 5 の計算上の耐力（載荷荷重、ボルト降伏：283.0kN，鉄筋降伏：324.7kN）と試験結果を比較すると、いずれも計算値により試験結果をほぼ評価できることを確認した。

静的曲げ試験の変形挙動のシミュレーションを行うために、ボルトをアウトケーブル方式でモデル化したファイバーモデルにより非線形解析を行った。解析に用いた応力とひずみの関係を図 - 10 に、解析結果を図 - 7 に併せて示す。解析結果は、試験結果を比較的精度良く再現できた。これにより、長ボルト式継手の曲げ剛性に対して長ボルトをアウトケーブルとしてモデル化することにより、変形性状をシミュレートできることが分かった。

4. まとめ

締結力を導入した長ボルト式継手の耐疲労性能を確認するために、実物大を模擬した梁状試験体を用いた曲げ疲労試験を実施した。本試験を通して得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 継手曲げ疲労試験では、設計荷重作用時の曲げモーメントによる 200 万回繰返し、および引き続き行った許容曲げモーメントによる 500 万回繰返しに対してもボルトの破断はなく、長ボルト式継手は十分な耐疲労性能を有していることを確認した。
- (2) 疲労試験後の静的曲げ耐力は、疲労試験を行わずに静的曲げ試験を行った試験体と同等であることを確認した。
- (3) ボルトを外ケーブル方式でモデル化した非線形ファイバーモデルを用いた解析により、静的曲げ試験の荷重と変位の関係を精度良く再現することが可能である。

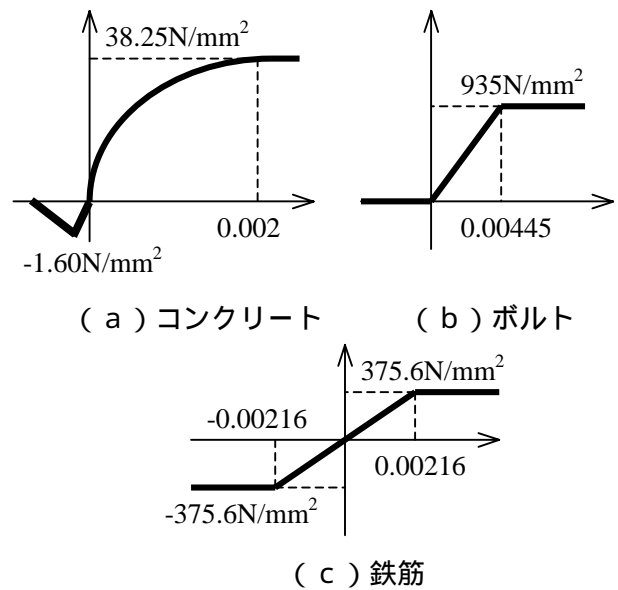


図 - 10 応力 - ひずみ関係

- (4) コンクリートを被締結体とした引張接合方式である長ボルト式継手は、ボルトに適切な締結力を導入して変動応力を小さくすることで、十分な耐疲労性能を確保できることを確認した。

今後、PCa 床版への長ボルト式継手の適用を図るために、長ボルト式継手に導入する締結力や定着部構造の設計法の提案を行い、実験および解析により設計法の検証を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 松井繁之：床版の技術開発，橋梁と基礎，pp.84-94，1997.8
- 2) 鳥海右近，倉本健一：プレキャスト床版による施工の合理化，橋梁と基礎，pp.91-97，1992.8
- 3) 土木学会コンクリート委員会：プレキャストコンクリート部材の力学的特性，コンクリート技術シリーズ，No.43，pp.11-14，2001.6
- 4) 日本規格協会：ねじ JIS ハンドブック No.4，pp.531-543，2001
- 5) 西口公之ほか：新版 接合技術総覧，産業技術サービスセンター，pp.623，1994.11