

プレキャスト床版接合工法「スリムファスナー[®]」の 曲げ耐力評価に関する研究

熊崎 達郎 佐々木 一成
田中 浩一

Flexural Capacity Evaluation of Precast Deck Connection Method “Slim Fastener”

Tatsuro Kumazaki Kazunari Sasaki
Koichi Tanaka

Abstract

The precast deck connection method "Slim Fastener" can significantly shorten the construction time. However, further cost reduction is required. The rebar details of the Slim Fastener were determined without clarifying the fracture mechanism, because the Slim Fastener was developed with reference to the overseas precast deck connection method. The evaluation of the bond strength between the rebar and "Slim-Crete[®]", and the flexural capacity can shorten the rebar embedment length. This means that the cost of Slim-Crete can be reduced. A pull-out test was performed to establish an evaluation method for the pull-out rebar strength from Slim-Crete. The evaluation method was verified by bending and wheel-loading tests. As a result, the connection width of the Slim Fastener can be shortened by 20%.

概要

高速道路の床版取替工事へ適用するプレキャスト床版接合工法「スリムファスナー」は大幅な工期短縮を実現する技術であるが、その配筋ディテールは海外類似技術を参考とした安全側の思想で決定されており、接合部の破壊メカニズムを解明することにより、設計の合理化を図る余地がある。鉄筋と「スリムクリート[®]」の付着強度を合理的に評価できれば、鉄筋埋込長の最適化による接合幅の短縮とスリムクリート打設数量減による設計の合理化が可能となる。本研究ではスリムファスナーを模擬した鉄筋の引抜き実験から引抜き耐力評価式を立案し、評価式による接合部曲げ耐力の評価精度を曲げ載荷実験で検証した。さらに、接合幅を短縮したスリムファスナーの疲労耐久性を輪荷重走行試験で確認した。その結果、従来の接合幅を約20%短縮できる可能性が確認できた。

1. はじめに

別稿¹⁾で解説したとおり、わが国では建設から40～50年が経過して老朽化した道路橋床版のリニューアルプロジェクトが進められている。本稿では、大林組が開発した道路橋床版更新技術のうち、スリムファスナー[®]の曲げ耐力評価に関する研究を報告する。

スリムファスナー²⁾は、スリムクリート³⁾を重ね継手部に使用したプレキャスト床版の接合工法である。橋軸直角方向の配筋を省略することができるため大幅な工期短縮を実現する技術であり、床版取替工事での適用例が増えている (Fig. 1)。

現行のスリムファスナー (接合幅: 210mm) は米国で開発されていた類似技術⁴⁾を参考に配筋ディテールを決定し、これまで各種実験によりスリムファスナー部が破壊しないことを確認してきた。しかしながら、その破壊メカニズムには未解明な点が残されている。また、スリムクリートに埋め込んだ鉄筋の引抜き耐力と付着強度を合理的に評価できれば、鉄筋の埋め込み長さ (鉄筋埋込

長) の最適化によって接合幅を短縮してスリムクリート打設数量の削減が可能となり、経済優位性が高まる。

そこで、本研究ではスリムファスナーの曲げ耐力を鉄筋埋込長から評価する方法を確立し、スリムファスナーの接合幅を短縮することを目的とした。

上記の目的を達成するため、Fig. 2に示すフローチャートに従って検討を行った。まず、スリムファスナーを模擬した鉄筋の引抜き実験を行い、鉄筋の引抜き耐力評価

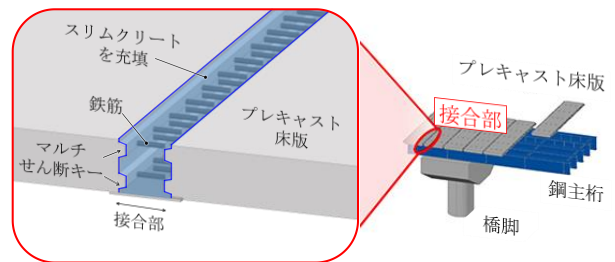


Fig. 1 スリムファスナーの構造
Outline of Slim Fastener

式を立案した。この引抜き耐力評価式は、継手の鉄筋を1本ずつ引抜いた実験結果から立案したものである。

立案した引抜き耐力評価式の精度を検証するためには、実際のスリムファスナーのように、複数本の鉄筋に同時に引抜き力を作用させる必要がある。これを模擬するため、スリムファスナーを有する梁の曲げ載荷実験を行った。ここでは、立案した引抜き耐力評価式で計算した曲げ耐力と、スリムファスナーを有する梁の曲げ耐力の実験値を比較した。この検証により、十分に安全性を確保できる範囲内で最小限のスリムファスナーの接合幅を提案した。

最後に、提案した最小接合幅のスリムファスナーを有する床版の輪荷重走行試験を行った。この試験により、最小接合幅のスリムファスナーの疲労耐久性を確認した。

2. 引抜き耐力評価式の立案

2.1 実験概要

スリムファスナーを模擬した鉄筋の引抜き実験を行った。試験体の形状寸法と載荷概要をFig. 3に示す。図中の青い数字は、鉄筋の枝番である。端部に配筋した鉄筋(枝番1, 7)を端部鉄筋と呼び、中央に近い位置に配筋した鉄筋(枝番2~6)を中央鉄筋と呼ぶこととした。この7本の鉄筋のうち、原則として4本(枝番1, 3, 5, 7)を引き抜いた。

試験体のパラメーター一覧をTable 1に示す。鉄筋の引抜き耐力を確認するため、鉄筋径 ϕ 、鉄筋被覆の有無、鉄筋埋込長さ x 、鉄筋継手長さ b 、鉄筋間隔 $2c$ 、純かぶり k を主なパラメーターとした。

使用したスリムクリートの材料試験結果をTable 2、鋼材の材料試験結果をTable 3に示す。

鉄筋の引抜きは、30t センターホールジャッキにて鉄筋1本ずつ行った。荷重はロードセルにより計測した。

2.2 実験結果

2.2.1 破壊形態 実験結果の破壊状態の観察から、破壊形態を4つ(A~D)に分類した。各破壊形態(A~C)の外観をFig. 4に示す。破壊形態の一覧をTable 1 右側に示す。

- ・表層曲げ破壊(記号:A):スリムクリートの表層曲げひび割れと引張ひび割れが同時に進展する破壊形態
- ・付着割裂破壊(記号:B):側面に割裂ひび割れを伴う付着破壊
- ・付着破壊(記号:C):引抜き荷重が付着耐力を越えて鉄筋が引抜ける破壊形態
- ・鉄筋破断(記号:D):鉄筋が先行して引張強度に達する破壊形態

中央鉄筋では、付着破壊や鉄筋破断したものが多かった。これに対して、端部鉄筋では、大部分が付着割裂破壊だった。その理由は、端部鉄筋の方が鉄筋周辺の拘束

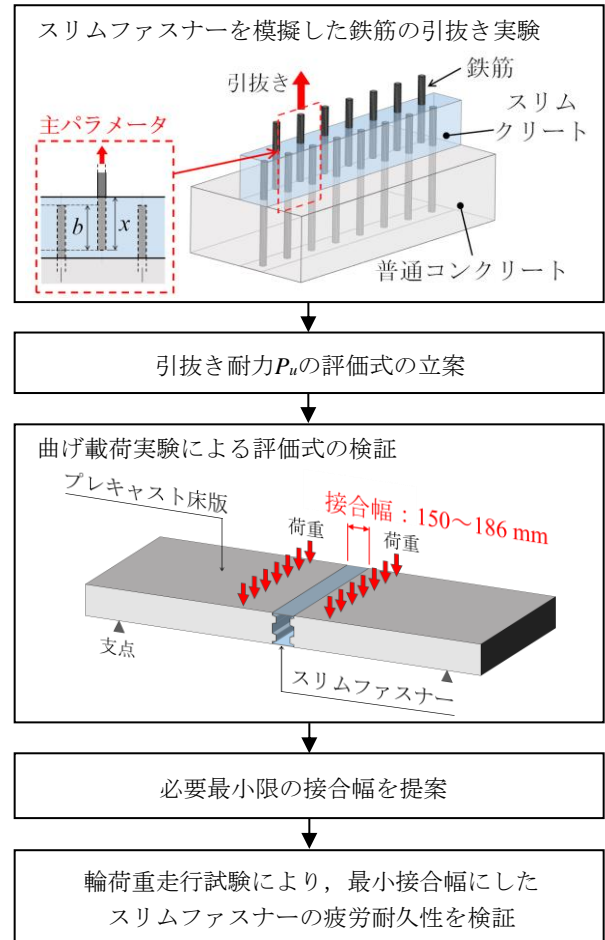


Fig. 2 本研究のフローチャート
Flow Chart of the Study

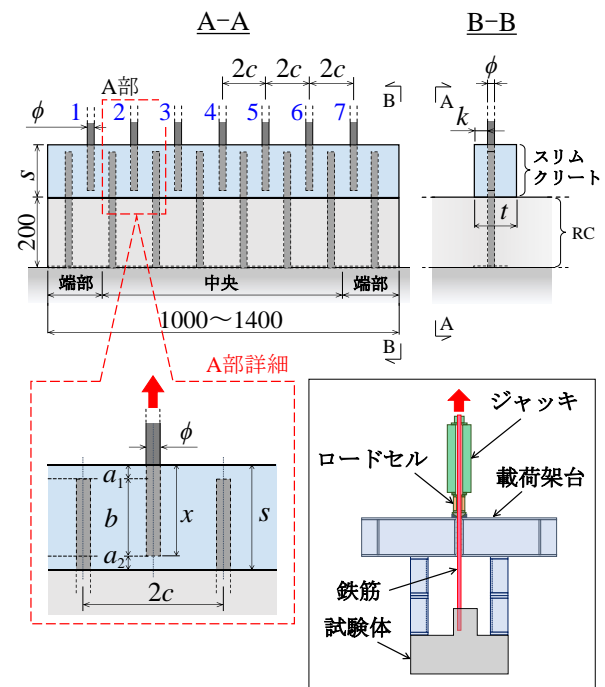


Fig. 3 試験体の形状寸法と載荷概要
Shape and Reinforcement Details of Pull-Out Test Specimen and Setup

Table 1 引抜き試験体パラメータの一覧と実験結果
Test Parameters and Summary of Experimental Results

試験体	鉄筋		接合部形状詳細					スリムファスナー			鉄筋の破壊形態 (本数)			
	径 ϕ (mm)	被覆	鉄筋埋込長 x (mm)	鉄筋継手長 b (mm)	鉄筋先端からスリムファスナー端部までの距離		鉄筋間隔 $2c$ (mm)	接合幅 s (mm)	純かぶり k (mm)	厚さ t (mm)	A	B	C	D
					a_1 (mm)	a_2 (mm)					表層曲げ破壊	付着割裂破壊	付着破壊	鉄筋破断
A1-1	D19	なし	115	95	20	20	125	135	35	120	-	-	4	3
A1-2	D19	なし	95	95	0	20	125	115	35	120	-	1	3	-
A1-3	D19	なし	115	47.5	67.5	20	125	135	35	120	4	-	-	-
A1-4	D19	なし	67.5	47.5	20	20	125	87.5	35	120	2	1	1	-
A1-5	D19	なし	115	0	115	35	125	150	35	120	1	1	-	-
A2	D19	エポキシ	115	95	20	20	125	135	35	120	-	2	2	-
A3	D19	サンドグリップバー	115	95	20	20	125	135	35	120	-	1	3	-
A4	D16	なし	100	80	20	20	125	120	35	120	-	-	1	3
A5	D22	なし	130	110	20	20	125	150	35	120	-	2	2	-
A6	D19	なし	115	95	20	20	125	135	20	120	-	2	1	1
A7	D19	なし	115	95	20	20	125	135	50	120	-	2	-	2
A8	D19	なし	115	95	20	20	150	135	35	120	-	2	1	1
A9	D19	なし	115	95	20	20	175	135	35	120	-	1	1	2

Table 2 スリムクリートの材料試験結果
Material Properties of Slim-Crete

圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度※ (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
188	34.5	12.7	45.2

※ 文献5における関係式 $f_t = (f_b - 1.54) / 2.59$ により曲げ強度から推定した値 (JIS A 1106による)

ここに、 f_t : 引張強度の推定値, f_b : 曲げ強度の実験値

Table 3 鋼材の材料試験結果
Material Properties of Steel Bars

鋼材	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D16 (SD490)	543	2842	715	191
D19 (SD490)	532	2809	669	189
D22 (SD490)	553	2913	734	190

力を期待しにくいと考慮される。

継手長 b が 2.5ϕ 以下の試験体 (A1-3, A1-4, A1-5) では、表層曲げ破壊が多く生じた。その理由は、Fig. 4 左上の図 (A) に青で示す鉄筋端部を結んだ線と鉄筋軸と直交する線が交差する角度 θ_b が小さいと、鉄筋間のコンクリートストラットが形成しにくくなるためであると考えられる。なお、 θ_b が 47° 未満となると表層曲げ破壊が生じることを実験で確認している。

2.2.2 引抜き耐力 引抜き耐力と鉄筋埋込長 x との関係 (D19, 被覆なし) を Fig. 5 に示す。いずれの破壊形態においても、鉄筋埋込長が大きくなるほど引抜き耐力も大きくなる傾向があった。同じ鉄筋埋込長の試験体のうち、表層曲げ破壊の引抜き耐力は小さくなる傾向があった。付着割裂破壊の引抜き耐力は、割裂を伴わない付着破壊よりも小さくなる傾向があった。

また、引抜き耐力には、鉄筋位置 (端部, 中央) も影響していた。引抜き耐力は、中央鉄筋よりも端部鉄筋の方が約10%小さかった。

2.3 引抜き耐力評価式の立案

引抜き実験の結果をもとに、鉄筋引抜き耐力 P_u の評価

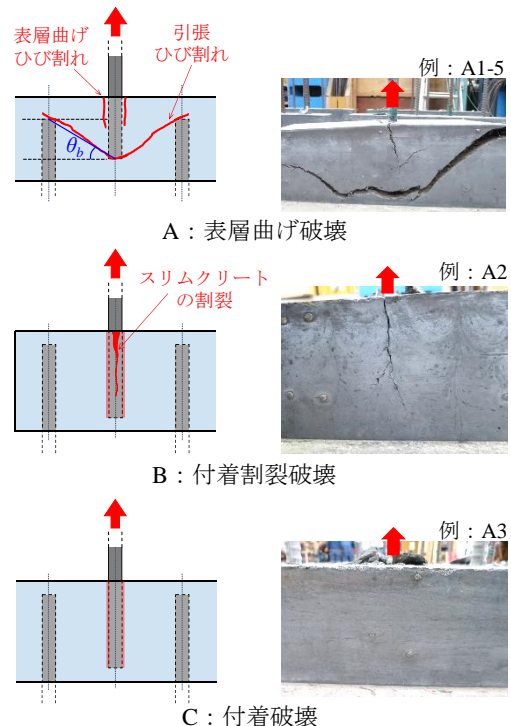


Fig. 4 スリムファスナーの破壊形態
Fracture Mode of Slim Fastener

式を以下の式(1)~(4)のように立案した。2.2.1で述べたとおり、表層曲げ破壊は θ_b が 47° 未満のときに生じるようにしている。なお、この耐力評価式は純かぶり20~50mmの場合に適用できる。

例として、試験体A1-1の中央鉄筋における耐力評価式の計算値と鉄筋埋込長との関係をFig. 6に示す。表層曲げ破壊、付着破壊、鉄筋破断の順で引抜き耐力が大きくなった。

$$P_u = \begin{cases} \min(P_1, P_2, P_3) & , 0^\circ < \theta_b < 47^\circ \\ \min(P_2, P_3) & , 47^\circ \leq \theta_b \end{cases} \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{t \cdot x^2}{3 \cdot c} \cdot \sigma_m \leq 2c \cdot t \cdot \sigma_t \quad (2)$$

$$P_2 = \phi \cdot \pi \cdot (\alpha \cdot \tau) \cdot (\beta \cdot x) \quad (3)$$

$$P_3 = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} \cdot \sigma_u \quad (4)$$

ここに、

- P_u : 鉄筋の引抜き耐力 (N)
- P_1 : 表層曲げ破壊耐力 (N)
- P_2 : 付着破壊耐力 (N)
- P_3 : 鉄筋引張破壊耐力 (N)
- θ_b : Fig. 4に示す角度 = $\tan^{-1}\left(\frac{b}{c}\right)$ (°)
- b, c, x, ϕ : Fig. 3に示すスリムファスナーの寸法 (mm)
- t : スリムファスナーの厚さ (mm)
(床版のとき、床版厚の1/2とする)
- σ_m : スリムクリートの曲げ強度 (N/mm²)
- σ_t : スリムクリートの引張強度 (N/mm²)
- τ : スリムクリートと鉄筋間の付着強度の特性値で、
被覆なし : 55.5 (N/mm²)^{*}
エポキシ樹脂 : 52.7 (N/mm²)^{*}
(^{*}:別途行ったマッシュピナスリムクリートから鉄筋を引き抜いた場合の実験値)
- α : 付着強度 τ の低減係数で
端部の鉄筋 : 0.9 その他の鉄筋 : 1.0
- β : 鉄筋埋込長 x の低減係数 = 0.5
- σ_u : 鉄筋の引張強度 (N/mm²)

2.4 引抜き耐力評価式の検証

引抜き耐力の実験値と計算値との比較をFig. 7に示す。実験値/計算値の平均値はほぼ1.0であり、ばらつきも小さかった。

表層曲げ破壊、付着破壊の計算値は、それぞれ式(2)、式(3)で計算し、耐力を概ね精度良く評価出来た。

付着割裂破壊は必ず端部鉄筋で生じていたため、付着割裂破壊の計算値は、式(3)の α (付着強度の低減係数)を

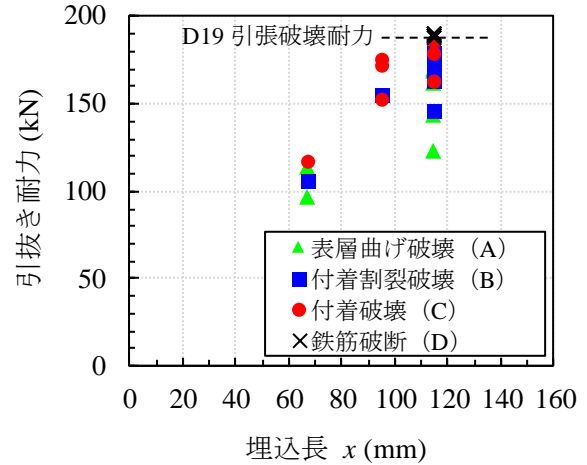


Fig. 5 引抜き耐力と鉄筋埋込長との関係
Relationship between Pull-Out Strength and Embedment Length

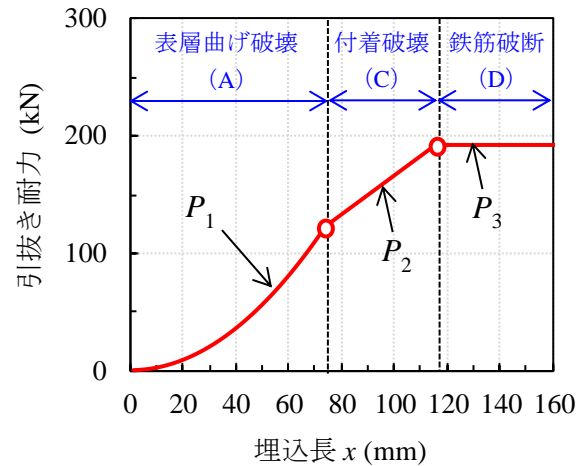


Fig. 6 引抜き耐力と鉄筋埋込長との関係 (例)
Relationship between Pull-Out Strength and Embedment Length (Sample)

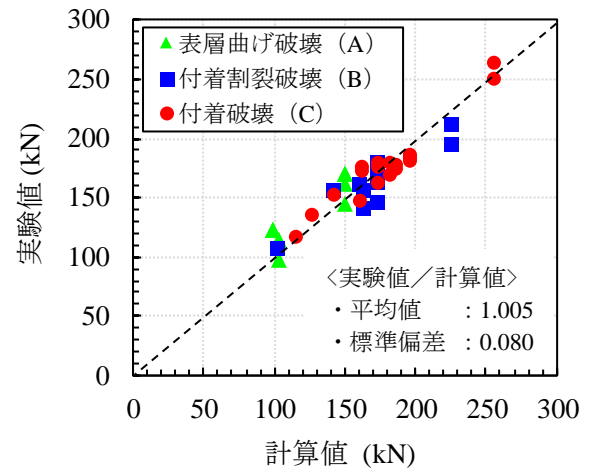


Fig. 7 実験値と計算値との比較 (引抜き耐力)
Comparison between Experimental and Calculated Pull-Out Strength

0.9とすることで評価できた。

3. 曲げ載荷実験

3.1 曲げ耐力の評価方法

3.1.1 試験体パラメータ 立案した引抜き耐力評価式を検証するため、曲げ載荷実験を行った。検証に使用した曲げ試験体のパラメーター一覧をTable 4に示す。

鉄筋埋込長さ x は、Fig. 4で定義した各破壊形態を観察できるように決めた。鉄筋の純かぶり k は、プレキャスト床版を橋軸方向に繋ぐ横目地を対象に50mmを基本とした。鉄筋径は、D19のみならずD22への展開も想定し、D19とD22の2種類とした。エポキシ樹脂塗装鉄筋は、融雪剤を多く使用する地域への適用性を考慮して使用した。なお、高強度の鉄筋やPC鋼材を用いた理由は、鉄筋降伏よりも想定した破壊形態を先行させるためである。

3.1.2 鉄筋最大応力の計算値 鉄筋最大応力の計算値 $\sigma_{s,cal}$ は式(5)により算定した。

$$\sigma_{s,cal} = \frac{P_u}{A_s} \quad (5)$$

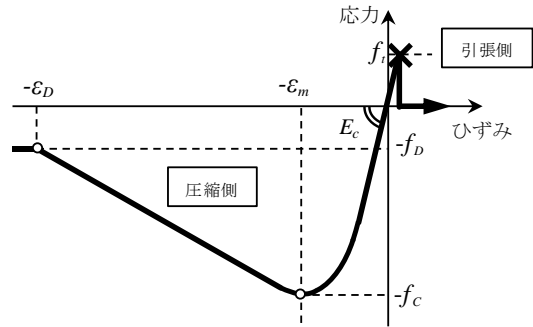
ここに、

- $\sigma_{s,cal}$: 鉄筋最大応力の計算値 (N/mm²)
- P_u : 式(1)により計算される引抜き耐力 (N)
ただし、式(4)の σ_u には鉄筋の材料試験結果を用いる。
- A_s : 鉄筋断面積 (mm²)

曲げ載荷実験では、鉄筋の応力が降伏強度で頭打ちとなる。このため、全ての鉄筋が降伏したときの破壊形態を、

鉄筋降伏（記号：Y）と呼ぶこととした。なお、スリムファスナー内の鉄筋の引抜き耐力は中央の鉄筋で決まると考え、 α （付着強度の低減係数）は1.0とした。

3.1.3 曲げモーメント-曲率関係の計算方法 予め積層モデル⁶⁾などを用いて $M-\phi$ 関係を計算した。コンクリートの応力-ひずみ関係をFig. 8に示す。圧縮強度到達点までの応力-ひずみ関係には、高強度コンクリートにも適用性が高いFafitis-Shah 式⁷⁾を用いた。また、鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性（パイリニア型）としてモデル化した。積層モデルの計算に用いた鉄筋の降伏点強度は式(5)で計算した値とした。鉄筋のヤング係数、コンクリートのヤング係数、材料強度、圧縮強度時のひずみ ϵ_m



- f_i : コンクリートの引張強度 (N/mm²)
- f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
- f_D : コンクリートの軟化強度 (=0.2 f_c) (N/mm²)
- ϵ_m : f_c 時のコンクリートひずみ
- ϵ_D : f_D 時のコンクリートひずみ (=4 ϵ_m)
- E_c : コンクリートのヤング係数 (kN/mm²)

Fig. 8 コンクリートの応力-ひずみ関係
Relationship between Stress and Strain of Concrete

Table 4 曲げ試験体パラメータと実験結果
Test Parameters and Summary of Experimental Results

No.	試験体 名称	鉄筋			接合部形状詳細				スリムファスナー		実験結果と推定結果との比較 ^{※2}									
		径 ϕ (mm)	規格 降伏点 (N/mm ²)	被覆	鉄筋 埋込長さ x (mm)	鉄筋 ^{※1} 先端の あき a (mm)	鉄筋 継手長 b (mm)	鉄筋 間隔 $2c$ (mm)	接合幅 s (mm)	純 かぶり k (mm)	破壊形態		中央鉄筋の最大応力 (N/mm ²)			曲げ耐力 (kN・m)				
											推定 結果	実験 結果	計算 結果	実験 ^{※3} 結果	実験 ^{※3} 計算	計算 ^{※4} 結果	実験 ^{※4} 結果	実験 ^{※4} 計算		
1	T19H-72S	D19	490	なし	90	20	70	125	170	50	C	C+B	526	540	1.03	162	155	0.96		
2	T19H-90S				91	5	86		156		C	Y	532	540	1.02	163	173	1.06		
3	T19H-52S				70	20	50		150		A	A+B	355	399	1.12	110	118	1.07		
4	T19H-92S				106	20	86		186		Y	Y	540	540	1.00	210	176	0.83		
5	T19N-72S				345	90	20		70		170	Y	Y	386	386	1.00	159	156	0.98	
6	T22P-82Le	D22	930	エポキシ	100	20	80	150	180	50	C	C+B	479	453	0.95	168	148	0.88		
7	T22P-62Le				80	20	60		160		A	C+B	288	358	1.24	102	121	1.19		
8	T22P-81Le				90	10	80		160		C	C+B	431	416	0.97	151	141	0.93		
9	T22P-62Se				80	20	60		160		A	C+B	346	329	0.95	140	129	0.92		
10	T22P-82L				100	20	80		180		C	A+B	505	620	1.23	177	182	1.03		
11	T22N-62L			なし	345	なし	80	20	60	150	160	50	A	A+B	288	379	1.32	102	132	1.29
12	T22N-82L						100	20	80		180		Y	Y	379	379	1.00	177	162	0.91
13	L22P-82Le						930	エポキシ	100		20		80	180	35	C	A+B	479	448	0.93

※1 Fig. 9に示す鉄筋の先端からスリムファスナー端部までの距離 ※2 Fig. 4に破壊形態の記号を示す。鉄筋降伏点は材料試験の値とした。
 ※3 最大曲げモーメント時の鉄筋応力 ※4 A,B,C破壊の場合、降伏曲げモーメント Y破壊の場合、最大曲げモーメント

は3.2節で後述する材料試験結果の値とした。

3.1.4 曲げ耐力の計算値 鉄筋降伏と評価した試験体の曲げ耐力は、上記の積層モデルで計算した曲げモーメントの最大値とした。これに対して、その他の破壊形態、すなわち、鉄筋降伏しないと評価した試験体の曲げ耐力は、鉄筋応力が式(5)で計算した最大応力に達したときの曲げモーメントとした。

3.2 実験概要

試験体の形状寸法をFig. 9に示す。主な試験体パラメータは3.1.1項で前述した。

使用した普通コンクリート、スリムクリートの材料試験結果をそれぞれTable 5, Table 6に示す。鋼材の材料試験結果をTable 7に示す。

スパン 2500 mm の試験体に対し、等モーメントスパンを 600 mm (せん断スパン 950 mm) とし、2 点集中単調載荷実験を行った。荷重 (P) はロードセルにより計測した。変位はスパン中央で計測した。

鉄筋のひずみゲージは、スリムクリートとコンクリートの鉛直打継目界面をまたぐように貼付した (Fig. 9 B部参照)。なお、端部および中央に配筋した鉄筋をそれぞれ端部鉄筋、中央鉄筋と呼ぶこととした (Fig. 9 A-A矢視図参照)。

3.3 実験結果

3.3.1 破壊形態 破壊形態の一覧をTable 4 右側に示す。鉄筋降伏以外の破壊形態 (A, B, C) は、Fig. 4で定義した各破壊形態のひび割れを参考に目視で判定した。

本実験では、破壊形態を1つに決めるのが難しかった。その主な理由は、平面における鉄筋位置 (端部、中央) によって破壊形態が異なるためである。例えば、Fig. 10, Photo 1に示すようにスリムファスナーの中央部では表層曲げ破壊 (A) や付着破壊 (C) が生じやすく、端部では付着割裂破壊 (B) が生じやすかった。

3.3.2 鉄筋の応力 実験における鉄筋応力は、ひずみゲージで計測したひずみを用いて式(6)で算定した。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

ただし、

$$|\varepsilon_x| > |\varepsilon_y| \text{ のとき } \sigma = \sigma_y \text{ とする}$$

Table 5 普通コンクリートの材料試験結果
Material Properties of Concrete

使用した試験体	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度時のひずみ (μ)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
No.1~5	48	81.2	-2493	4.94	40.1
No.6~13	37	77.9	-2547	4.07	46.3

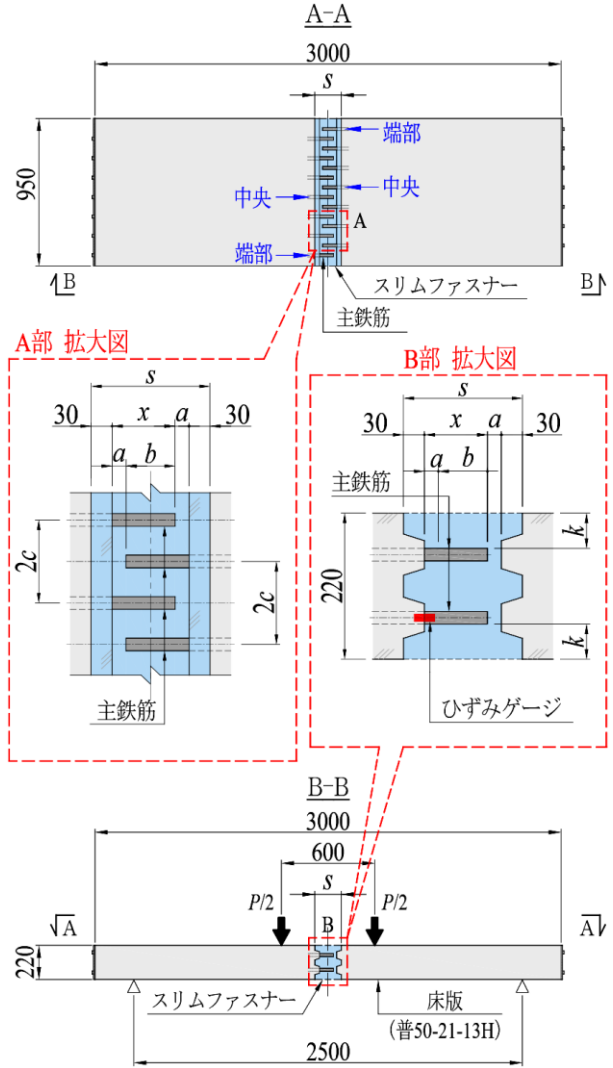


Fig. 9 試験体の形状寸法
Setup of Bending Test

Table 6 スリムクリートの材料試験結果
Material Properties of Slim-Crete

使用した試験体	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度* (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
No.1~5	40	195	39.1	14.5	46.6
No.6~13	30	196	37.2	13.8	46.3

* 文献5における関係式 $f_t = (f_b - 1.54) / 2.59$ により曲げ強度から推定した値 (JIS A 1106による)
ここに、 f_t : 引張強度の推定値、 f_b : 曲げ強度の実験値

Table 7 鋼材の材料試験結果
Material Properties of Steel Bars

鋼材	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D19 (SD345)	386	2000	582	193
D19 (SD490)	540	2755	729	196
D22 (SD345)	379	1984	602	191
φ22 (SBPD930/1080)	1002*	4960	1138	202

* 0.2%永久伸びに対する応力

ここに、

- σ : 鉄筋の応力
- σ_y : 鉄筋の降伏強度 (Table 7 参照)
- ε : ひずみゲージで計測した鉄筋のひずみ
- ε_y : 鉄筋の降伏ひずみ (Table 7 参照)
- E : 鉄筋のヤング係数 (Table 7 参照)

各試験体の鉄筋応力の最大値と破壊形態をTable 8に示す。鉄筋ひずみは、鉄筋側面にそれぞれ2枚貼ったひずみゲージの値の平均とした。

鉄筋降伏の場合、中央鉄筋の応力と端部鉄筋の応力は等しく、全ての鉄筋が降伏強度で頭打ちとなった。これに対して、鉄筋降伏以外の場合、端部鉄筋の応力は中央鉄筋の応力よりも小さくなるケースが多かった(2~23%)。このことから、2章の引抜き実験と同様に、鉄筋全数に引抜き力を同時に作用させても、端部鉄筋の応力は中央鉄筋の応力よりも小さくなる場合があることがわかった。

3.3.3 曲げモーメント-変位関係 各試験体の曲げモーメント-変位関係をFig. 11~Fig. 12, 曲げ耐力の値をTable 4 右側に示す。

曲げモーメントは、ロードセルにより定まる作用せん断力 ($P/2$) にせん断スパン (0.95m) を乗じて求めた。

Fig. 11に示すように、D19 (SD345) を用いた試験体 T19N-72S (No. 5) では、スリムファスナーの接合幅を170 mmと短くしても鉄筋降伏が先行し、曲げ破壊した。

Fig. 12に示すように、D22 (SD345) を用いた試験体 T22N-82L (No. 12) では、スリムファスナーの接合幅を180mmと短くしても鉄筋降伏が先行し、曲げ破壊した。

3.4 実験結果と推定結果との比較

3.4.1 破壊形態 実験結果と推定結果との比較一覧をTable 4 右側に示す。鉄筋降伏 (Y) を推定した試験体は、必ず鉄筋降伏していた。これに対して、その他の破壊形態 (A, C) を推定した試験体は、推定結果と実験結果が一致しないものが多かった。3.3.1項で前述した通り、スリムファスナーのひび割れは複雑であり、破壊形態の推定も難しいので、その推定精度の向上が必要である。

3.4.2 鉄筋の最大応力 中央鉄筋の最大応力の計算値と実験値との比較をTable 4 右側に示す。計算値は式(5)で計算した。実験値は最大曲げモーメント時における式(6)の値である。

計算値は、実験値と概ね一致しているものが多かった。しかしながら、試験体T22P-62Le (No. 7), T22P-82L (No. 10), T22N-62L (No. 11) の計算値は、実験値よりも小さかった。2章の引抜き実験でD22を使用した試験体はA5のみであり、引抜き耐力評価式の精度がD19に比べて低く、小さめに評価したと考えられる。

3.4.3 曲げ耐力 曲げ耐力の計算値と実験値との比較をFig. 13, Table 4 右側に示す。曲げ耐力の計算値は、実験値よりもやや小さくなる傾向があった。その理由は、

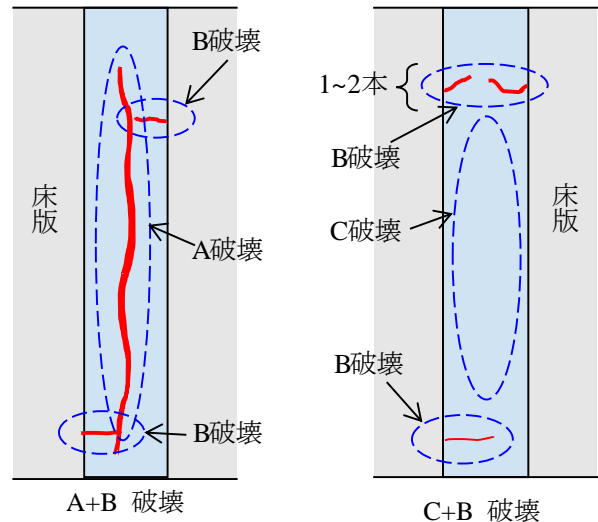


Fig. 10 複合型の破壊形態
Complex Type of Fracture Mode

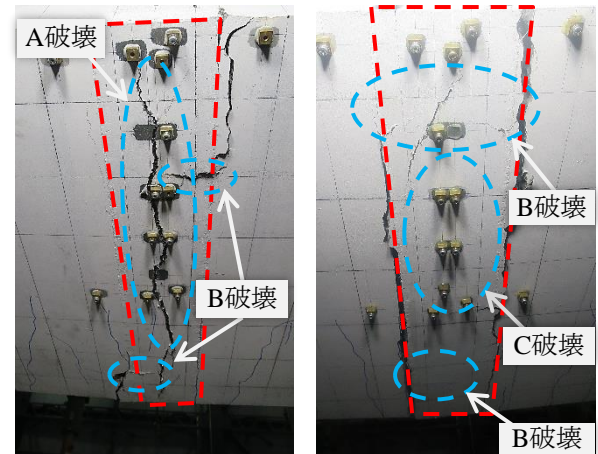


Photo 1 スリムファスナーの下面
Bottom Surface of Slim Fastener

Table 8 鉄筋応力の最大値
Maximum Value of Rebar Stress

No.	試験体 名称	応力の最大値 (N/mm ²)		応力の比 中央 端部	破壊 形態
		中央 鉄筋	端部 鉄筋		
1	T19H-72S	540 ○	495	0.92	C + B
2	T19H-90S	540 ○	540 ○	1.00	Y
3	T19H-52S	399	349	0.87	A + B
4	T19H-92S	540 ○	540 ○	1.00	Y
5	T19N-72S	386 ○	386 ○	1.00	Y
6	T22P-82Le	453	413	0.91	C + B
7	T22P-62Le	358	341	0.95	C + B
8	T22P-81Le	416	406	0.98	C + B
9	T22P-62Se	329	353	1.07	C + B
10	T22P-82L	620	476	0.77	A + B
11	T22N-62L	379 ○	372	0.98	A + B
12	T22N-82L	379 ○	379 ○	1.00	Y
13	L22P-82Le	448	380	0.85	A + B

○ : 鉄筋降伏強度 (材料試験結果) に達したものの

全ての鉄筋に中央鉄筋と同じ応力が発生すると計算で仮定したためである。そこで、鉄筋降伏以外の試験体では端部鉄筋の応力が小さくなることを考慮して、鉄筋最大応力 $\sigma_{s,cal}$ を0.95倍して曲げ耐力を計算した (Fig. 14)。この方法で計算した曲げ耐力をさらに部材係数1.1で除すと、実験値をおおむね安全側 (すなわち、Fig. 14の青線より左側) に評価できることがわかった。

上記の修正をしても、試験体T19H-92S (No. 4), L22P-82Le (No. 13) の計算値は、実験値よりも大きくなった。試験体T19H-92S (No. 4) は鉄筋降伏と推定した試験体だが、上縁コンクリート圧壊より前に鉄筋が引抜けた。その理由は、スリムクリートの曲げひび割れが大きくなり、継手間の応力伝達機構が崩れた (付着力が小さくなった) ためである。このため、曲げ耐力の計算値に到達しなかった。試験体L22P-82Le (No. 13) は、他の試験体と比べて純かぶりが小さい。純かぶりが35mmと小さいと、端部鉄筋の応力も小さくなりやすい (Table 8) ため、0.95より小さい値で鉄筋最大応力 $\sigma_{s,cal}$ を補正する必要がある。

T22P-62Le (No. 7), T22N-62L (No. 11) の実験値は、計算値よりも大きかった。これは3.4.2項で前述したとおり鉄筋最大応力の計算値が小さかったためである。一方、T22P-82L (No. 10) では中央鉄筋の応力が計算値よりも1.23倍大きかったが、曲げ耐力は実験値と計算値は概ね一致していた。中央鉄筋よりも端部鉄筋の方が鉄筋の応力が大幅に小さかったことが一因と考えられる。

4. 輪荷重走行試験

4.1 実験概要

試験体の形状寸法をFig. 15, 3章の結果をもとに決めた試験体のパラメータをTable 9に示す。スリムファスナー接合幅は、エポキシ樹脂塗装鉄筋、被覆なし鉄筋におい

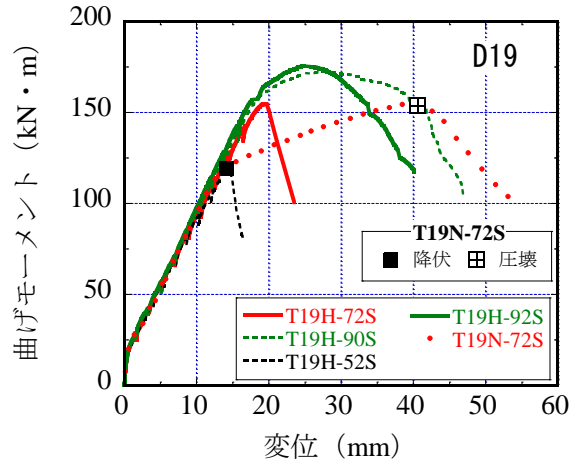


Fig. 11 曲げモーメントー変位関係 (D19)
Relationship between Bending Moment and Displacement

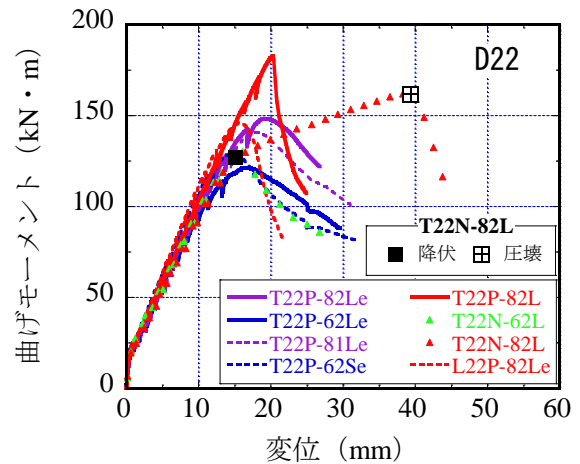


Fig. 12 曲げモーメントー変位関係 (D22)
Relationship between Bending Moment and Displacement

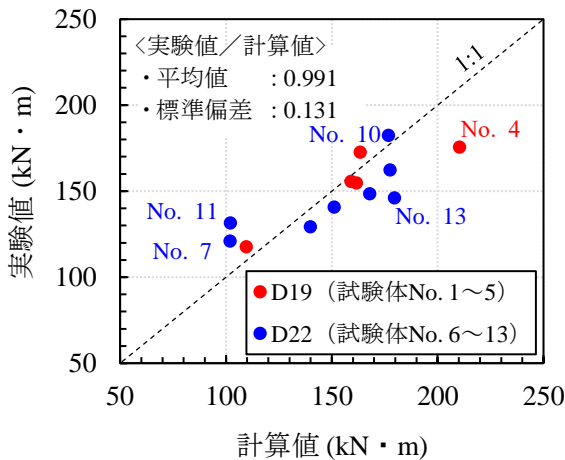


Fig. 13 曲げ耐力の実験値と計算値との比較
(鉄筋の最大応力: $\sigma_{s,cal} \times 1.0$)
Comparison between Experimental and Calculated
Bending Strength ($\sigma_{s,cal} \times 1.0$)

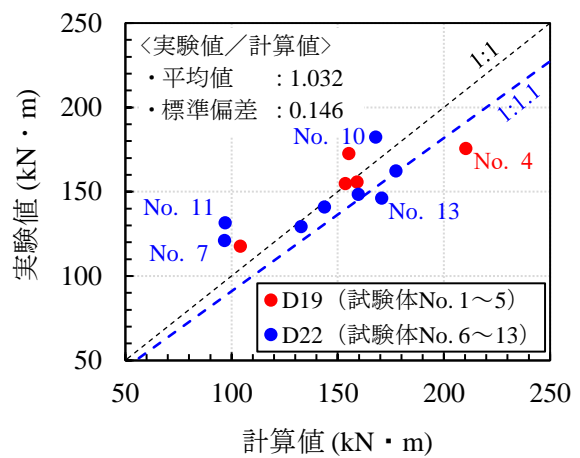


Fig. 14 曲げ耐力の実験値と計算値との比較
(鉄筋の最大応力: $\sigma_{s,cal} \times 0.95$)
Comparison between Experimental and Calculated
Bending Strength ($\sigma_{s,cal} \times 0.95$)

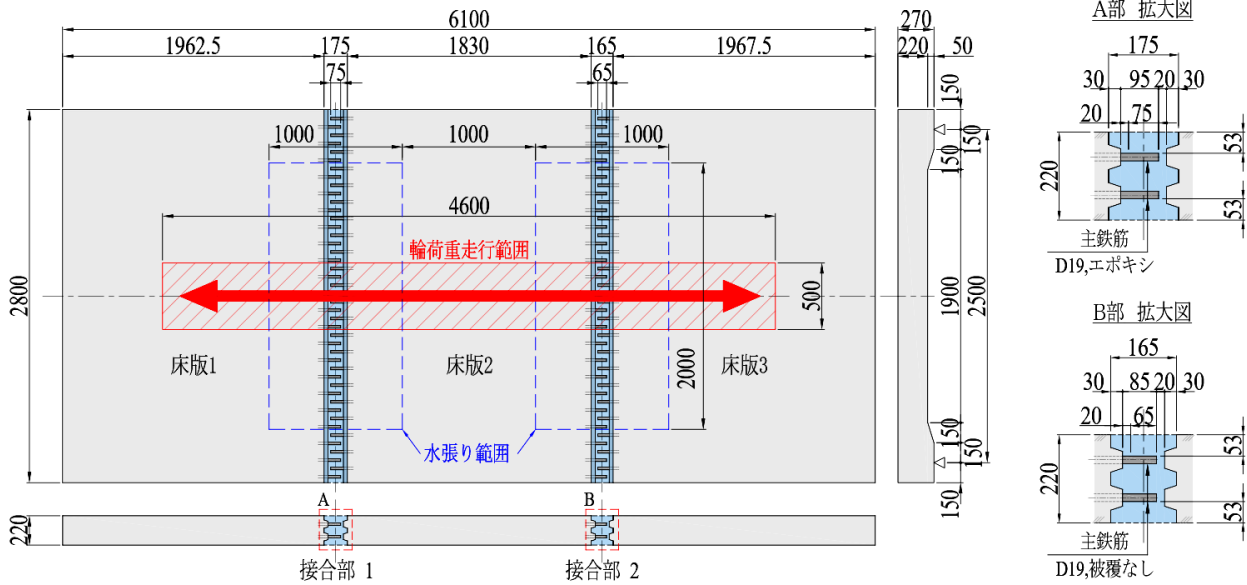


Fig. 15 輪荷重試験体の形状寸法
Shape and Reinforcement Details of Wheel Loading Test Specimen

Table 9 輪荷重試験体のパラメータ
Test Parameters

接合部	鉄筋			接合部形状詳細			スリムファスナー
	径 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	被覆	鉄筋埋込長 (mm)	鉄筋継手長 (mm)	鉄筋間隔 (mm)	
1	D19	345	エポキシ	95	75	125	175
2			なし	85	65		

※ 施工誤差を考慮し、実用化を目指す寸法よりも10mm短くした

Table 10 コンクリートの材料試験結果
Material Properties of Concrete and Slim-Crete

		圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	引張強度 [*] (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
床版部 (普通コン)	開始時	83.0	-	-	40.7
	終了時	88.1	-	-	44.2
接合部 (スリム)	開始時	198	39.8	14.8	47.1
	終了時	196	39.4	14.6	46.9

※ 文献5における関係式 $f_t = (f_b - 1.54) / 2.59$ により曲げ強度から推定した値 (JIS A 1106による)

ここに、 f_t : 引張強度の推定値、 f_b : 曲げ強度の実験値

それぞれ175mm, 165mmとした。いずれの場合も施工時の誤差±10mmを考慮し、実用化を目指す接合幅の寸法よりも10mm短くした。なお、エポキシ樹脂塗装鉄筋の場合に接合幅が長い理由は、被覆の影響で引抜き耐力が低いためである。

使用した普通コンクリート・スリムクリートの材料試験結果をTable 10, 使用した鋼材の材料試験結果を

Table 11 鋼材の材料試験結果
Material Properties of Steel Bars

鋼材	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D19 (SD345)	371	1912	588	194

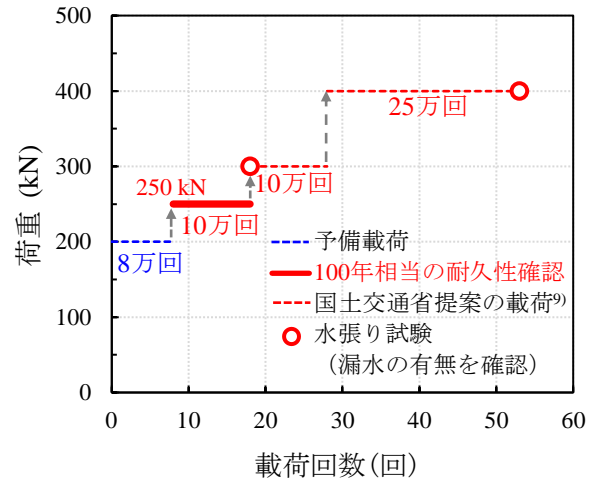


Fig. 16 載荷荷重レベルと載荷回数との関係
Loading Program of Wheel Loading Test

Table 11に示す。

載荷荷重レベルと載荷回数との関係をFig. 16に示す。載荷幅は500mmとし、載荷荷重は各回数に達したときに200kN, 250kN, 300kN, 400kNと輪荷重を順次増加させた。なお、輪荷重 250kNを10万回作用させると100年相当の耐久性を有すると評価できる⁸⁾。250kNでの載荷終了後に試験体上面に水を張り、その6時間後、漏水の有無を確認した。また、全載荷終了後も、水張り試験で漏水の有無を確認した。

4.2 実験結果

250kN, 10万回の輪荷重(耐用年数100年相当の輪荷重)を受けても床版は漏水しなかった(Photo 2)。また、十分な耐久性があるだけでなく、スリムファスナー部にひび割れが生じないことが確認された。

400kNまで輪荷重を大きくしたものの、載荷終了時にもスリムファスナー部にひび割れが生じなかった(Photo 3)。また、載荷終了時にも床版は漏水しなかった。これらの検証により、接合幅を短くしてもスリムファスナーの高い疲労耐久性が確保できることがわかった。

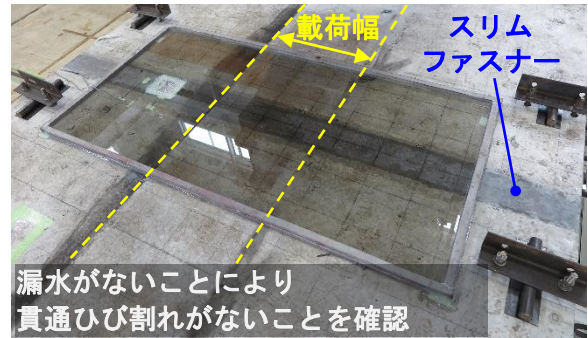


Photo 2 水張りによる漏水の確認
Test of Water Leakage

5. まとめ

プレキャスト床版接合法「スリムファスナー」の曲げ耐力評価に関する検討を行い、以下のことがわかった。

- 1) スリムファスナーを模擬した鉄筋の引抜き実験結果から接合部の破壊形態を分類し、それぞれの破壊形態の引抜き耐力を精度良く算定できる引抜き耐力評価式を立案した。
- 2) 立案した引抜き耐力評価式の妥当性を梁の曲げ載荷実験で検証した。鉄筋最大応力の実験値と引抜き耐力評価式による計算値は、ほぼ一致した。
- 3) 引抜き耐力評価式を用いて計算した曲げ耐力は、実験値よりもやや小さくなる傾向があった。そこで、端部鉄筋の応力が中央鉄筋の応力より小さくなることを考慮すると、その傾向を修正できることがわかった。
- 4) 純かぶりが小さくなると端部鉄筋の応力も小さくなる傾向があった。この影響を曲げ耐力評価に反映する必要がある。
- 5) D19(被覆なし, SD345)を用いた場合、接合幅を165mmと短くしたスリムファスナーでも輪荷重250kNの走行回数10万回に対し、目視できるひび割れは発生せず、漏水もなかった。
- 6) D19(エポキシ樹脂塗装, SD345)を用いた場合、接合幅を175mmと短くしたスリムファスナーでも輪荷重250kNの走行回数10万回に対し、目視できるひび割れは発生せず、漏水もなかった。

以上より、D19(被覆なし, SD345)の場合、接合幅を従来の約20%短くした175mmでも十分な耐久性を有している。本検討はプレキャスト床版を橋軸方向に繋ぐ横目地のスリムファスナーを対象としており、純かぶり50mmを中心に検討した。今後は、縦目地のように純かぶりが35mmと小さな場合に対しても曲げ耐力評価を適用できるようにする必要がある。

参考文献

- 1) 川西貴士, 他: 床版取替工法「DAYFREE®」におけ

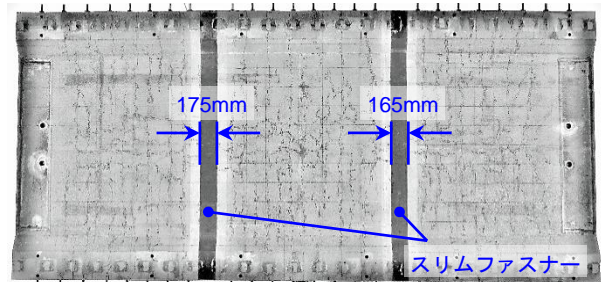


Photo 3 床版下面のひび割れ(載荷終了時)
Cracks at Bottom Surface of Test Specimen
(After the experiment)

- る「スリムクリート®」の圧送による合理化施工技術, 大林組技術研究所報, No. 85, 2021
- 2) 佐々木一成: 急速施工を可能にしながら高い耐久性を発揮するプレキャスト床版接合法「スリムファスナー®」の開発, セメント・コンクリート, No. 862, pp. 26-31, 2018.12
- 3) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo. 10, 2017.1
- 4) Federal Highway Administration: Design and Construction of Field-Cast UHPC Connections, TECHNICAL NOTE, FHWA-HRT-14-084, 2014
- 5) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー, 第113号, 2004
- 6) 白井俊榮, 田中良弘, 畑明仁, 趙唯堅: ファイバーモデルによる非線形フレーム解析とその検証, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 123-128, 1997
- 7) Fafitis, A. and Shah, S. P.: Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, Publ. ACI, No. SP-87, pp. 213-232, 1985
- 8) 後藤俊吾, 長谷俊彦, 本間淳史, 平野勝彦: PC床版の疲労耐久性評価方法の提案, 構造工学論文集, Vol. 60A, pp. 762-773, 2020
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2012