

ポリマーセメントモルタルにより下面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断耐荷力

Punching Shear Capacity of RC Slabs Strengthened by Bottom Thickness Increasing with Polymer Cement Mortar

東山浩士*・松井繁之**・伊藤定之***・松本 弘****

Hiroshi HIGASHIYAMA, Shigcyuki MATSUI, Sadayuki ITO, Hiroshi MATSUMOTO

*博(工) 近畿大学講師 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

**工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

*** 近畿大学大学院 総合理工学研究科環境系工学専攻 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

****マグネ化学株式会社 (〒816-0095 福岡市博多区竹下 2-4-25)

Bottom thickness increasing method with polymer cement mortar is one of the strengthening methods of deteriorated reinforced concrete (RC) slabs. The strengthening effect significantly depends on the bond strength in the interface between concrete and strengthening materials. Polymer cement mortar has a high bond strength and low stiffness in comparison with concrete or mortar. In this investigation, static punching shear tests of RC slabs strengthened by the bottom thickness increasing with several additional mesh reinforcements were carried out to verify the strengthening effect on the punching shear capacity. And a statistical model was proposed to calculate the punching shear capacity of RC slabs strengthened by the bottom thickness increasing.

Key words: bottom thickness increasing method, polymer cement mortar, RC slab, punching shear capacity

1. はじめに

既設鉄筋コンクリート(RC)床版の耐荷性・耐久性向上のために近年適用されている補強工法として、上面増厚工法、連続繊維シート接着工法、下面増厚工法などがある。これらの補強工法について概観すると以下のようなものである。

上面増厚工法は床版の有効厚を増し、曲げ剛性およびせん断耐荷力を向上させる工法であり、輪荷重走行試験機による補強効果が確認されている¹⁾。また、静的押抜きせん断耐荷力の算定方法も提案され、疲労寿命の推定が行われている²⁾。

連続繊維シート接着工法は軽量で引張強度の高い連続繊維シートを樹脂により床版下面に接着する工法である。シート自身のせん断剛性が小さいため、主に曲げ補強となるが、ひび割れ進展の抑制、たわみの低減が図られ、耐久性が向上すると報告されている³⁾。また、静的押抜きせん断耐荷力に関する実験も行われており、連続繊維シート接着による耐荷力向上が確認されている^{3),4)}。

下面増厚工法は床版下面に配置した補強材をポリマーセメントモルタル(PCM)により一体化させ、曲げ剛性およびせん断耐荷力を向上させる工法であり、交通解放をしながら施工可能である。補強効果は輪荷重走行試験機により確認されており、既設鉄筋ひずみ、たわみが低減されると報告されている^{5),6)}。また、本著者らは RC はりを用いた疲労実験により疲労荷重下での PCM の付着特性、補強効果を調査し、実荷重レベルにおいては付着が確保されることを報告している⁷⁾。しかし、静的押抜きせん断耐荷力の算定方法は未だ提案されていない。

静的押抜きせん断耐荷力は床版の疲労耐久性を評価するうえで検討されるべき性能であり、補強後の劣化損傷予測、補強設計を行うための重要な指標であると言える。

そこで、本研究では、下面増厚補強した RC 床版の静的押抜きせん断耐荷力実験、PCM の付着引張強度試験を行い、破壊モデルの構築を試みた。本実験で用いた PCM はポリアクリル酸エステル系ポリマーをエマルジョンとして使用した。以下では、補強筋径、補強筋の間隔および PCM 厚さをパラメータとした下面増厚補強 RC 床版の押抜きせん断耐荷力実験について実験方法および結果を述べ、補強効果、破壊状態を検討する。最後に、押抜きせん断破壊モデルについて検討した結果を述べることにする。

2. 実験概要

2.1 試験体

母床版となる RC 床版の配筋図を図-1に示す。使用した鉄筋はすべて D10(SD295A)である。本実験のパラメータは補強筋径、補強筋の間隔および PCM 厚さであり、表-1に示すように基準となる RC 床版を試験体 No.1、D6 鉄

表-1 試験体一覧

試験体	補強筋	メッシュ間隔	PCM厚さ
No.1	No.1-1	-	-
	No.1-2		
No.2	No.2-1	D6	50mm
	No.2-2		
No.3	No.3-1	D6	100mm
	No.3-2		
No.4	No.4-1	D10	100mm
	No.4-2		

表-2 コンクリートの材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
	28.6	2.50	25.9

表-3 PCM(Type II)の材料試験結果

PCM (TypeII)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
	16.2	1.70	22.5

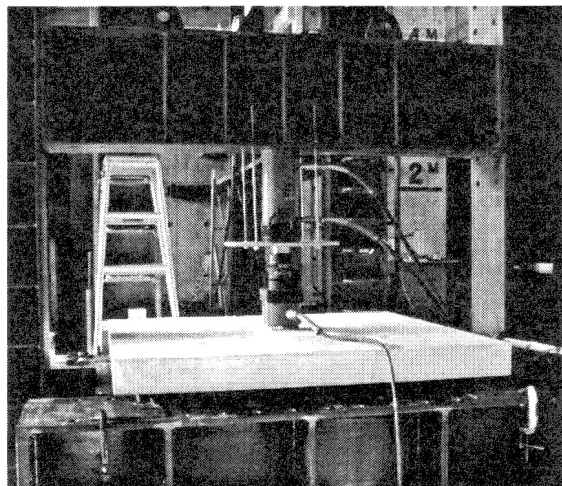


写真-1 載荷状況

筋を 50mm 間隔のメッシュにて補強した試験体 No.2, D6 鉄筋を 100mm 間隔のメッシュにて補強した試験体 No.3, D10 鉄筋を 100mm 間隔のメッシュにて補強した試験体 No.4 の 4 種類とした。それぞれの試験体は 2 体ずつ製作した。また、PCM による下面増厚は D6 鉄筋を用いた試験体では 20mm, D10 鉄筋を用いた試験体では 28mm とした。

補強方法は次の通りである。①RC 床版下面をグラインダーによりケレン, ②ケレン面の界面活性を目的とした PCM (Type I) の吹付け, ③補強筋の床版下面へのアンカー止め, ④PCM (Type II) の 1 層目 (全厚の 1/3 厚さ) コテ塗り, ⑤PCM (Type I) の吹付け, PCM (Type II) のコテ塗りを繰り返して 2 層目 (全厚の 1/3 厚さ) および 3 層目 (全厚の 1/3 厚さ) を塗り重ねる。

本下面増厚補強では吹付け用とコテ塗り用として 2 つのタイプの PCM を用いて施工しており, エマルジョンとコンパウンドとの配合比率が異なる。Type I, Type II それぞれの配合比率は 1:3.5, 1:7 である。母床版のコンクリートおよび PCM(Type II)の材料試験結果をそれぞれ表-2 および表-3 に示す。

2.2 実験方法

試験体は 4 辺単純支持の状態, 載荷板 100×100mm により床版中央に載荷を行った。載荷状況を写真-1 に示す。荷重が 20kN, 50kN に達した後, 一度除荷を行い, その後, 終局状態まで漸増載荷を行った。計測項目はたわみおよび主鉄筋, 補強筋, コンクリート上面のひずみである。

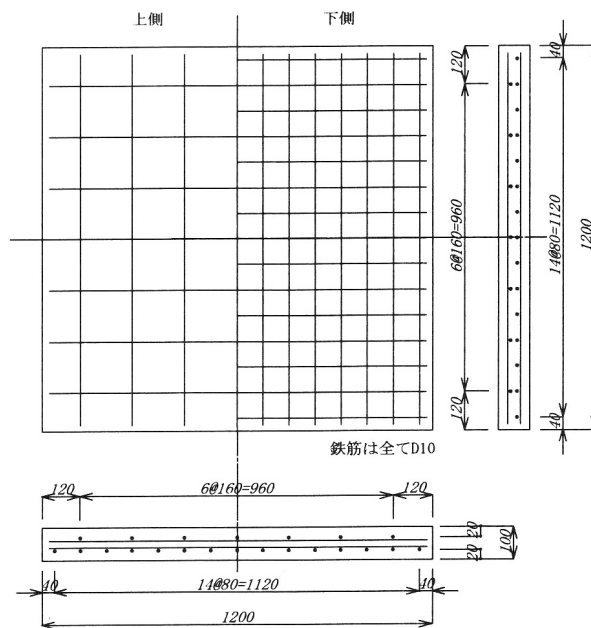


図-1 母床版の配筋図

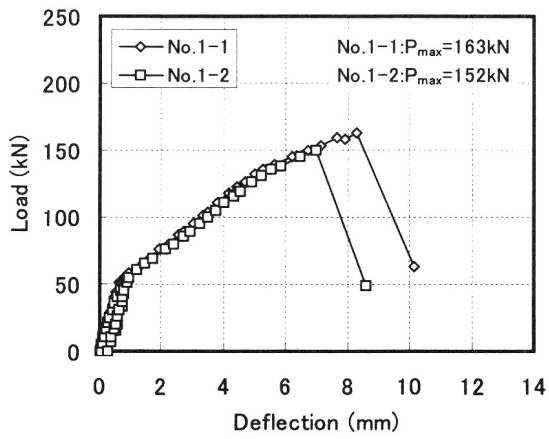
3. 実験結果

3.1 たわみ性状

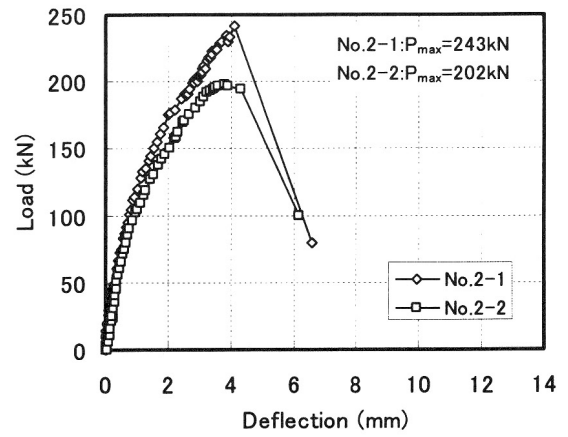
図-2 に各試験体の荷重とたわみの関係を示す。試験体 No.1 の 2 体では, 最大荷重に 7%程度の差異が生じたが, たわみ挙動に差異はほとんどなく, 変位が 8mm 前後で押抜きせん断破壊が生じた後, 荷重が急激に低下している。下面増厚補強した試験体を見ると, 全ての試験体において補強筋量に応じて曲げ剛性が増大しており, 補強筋が引張力を分担していることが分かる。また, 試験体 No.2 および試験体 No.3 の各 2 体間では最大荷重に差異が生じているが, 平均すると, 試験体 No.2 の耐荷力の方が試験体 No.3 よりも大きく, 補強筋量に応じて大きくなっている。D6 鉄筋を 50mm メッシュとした試験体 No.2 は無補強の試験体 No.1 に比べて耐荷力が 40%程度向上し, 最大たわみが約 50%低減されている。試験体 No.2 とほぼ同じ補強筋量である D10 鉄筋を 100mm メッシュとした試験体 No.4 も耐荷力, 最大たわみともに同程度改善されており, 補強筋径および間隔の違いは見られない。D6 鉄筋を 100mm メッシュとした, 補強筋量を半分に低減した試験体 No.3 の耐荷力は試験体 No.1 に比べて 20%程度向上しており, 補強筋量に比例して補強効果が得られている。

3.2 ひび割れ性状

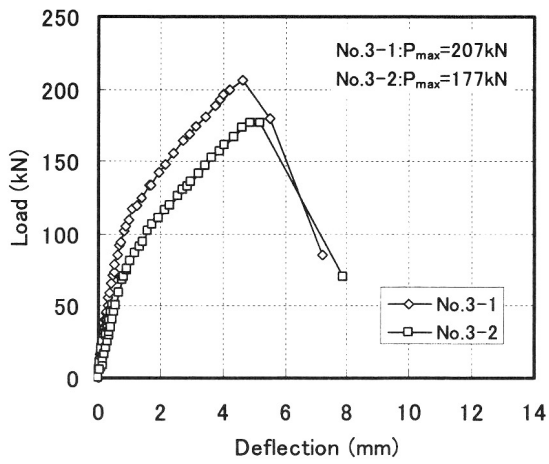
図-3 に実験終了後の床版下面 (PCM 表面) のひび割れ状態の一例を示す。通常の RC 床版のひび割れ状態と比べると PCM 表面のひび割れ発生は非常に少なく, 進展範囲も狭いことが分かる。これは PCM の伸び性状が優れていることによりひび割れの発生が少なく, ひび割れ幅も小さかったものと考えられる。また, 押抜き範囲, あるいは



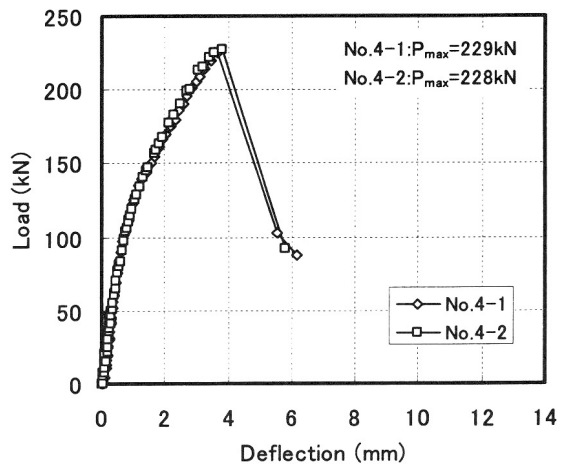
(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2



(c) 試験体 No.3



(d) 試験体 No.4

図-2 荷重-たわみ関係

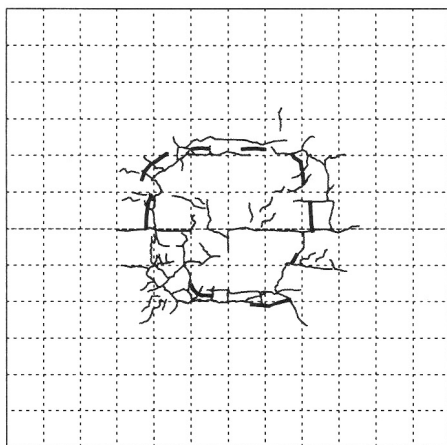


図-3 ひび割れ性状 (試験体 No.2-1)

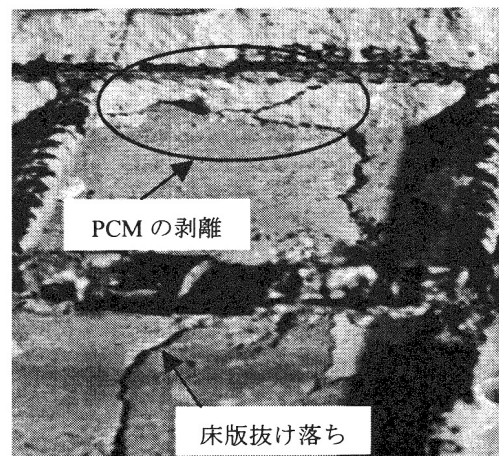
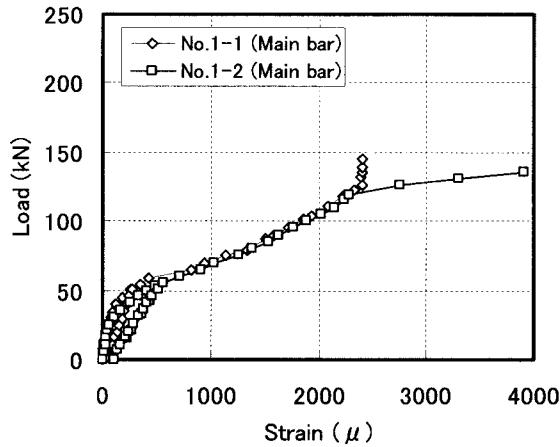
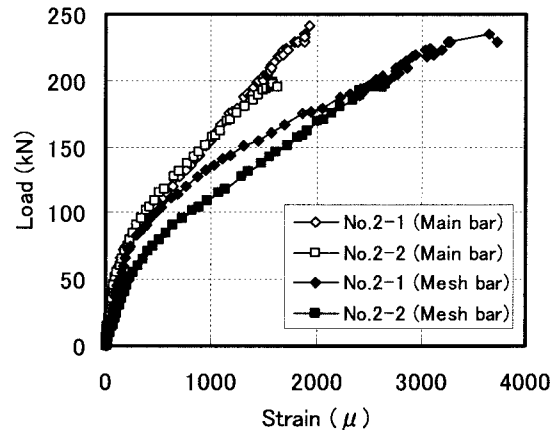


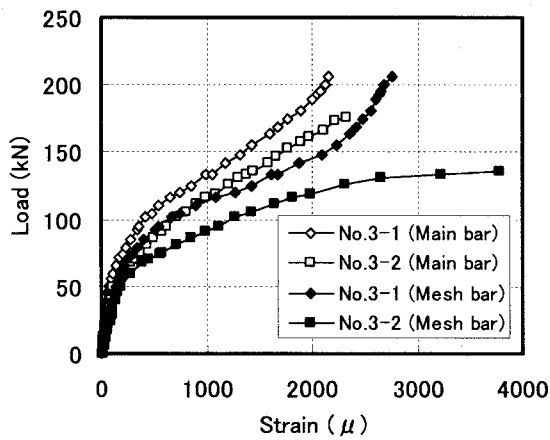
写真-2 床版抜け落ちおよびPCM剥離状況



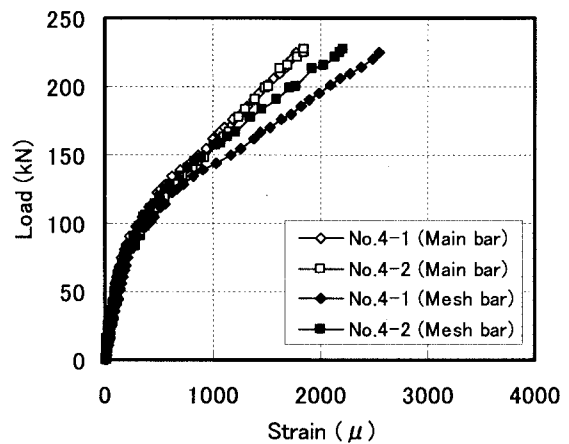
(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2



(c) 試験体 No.3



(d) 試験体 No.4

図-4 荷重-鉄筋ひずみ関係

剥離範囲を推察するために叩き検査を行ったところ、図-3の太線で示した範囲に変化が現れ、その範囲は40cm程度であった。実験終了後にPCMをはつり取り、観察した結果、写真-2に示すように床版中央から20cmをやや越える範囲で母床版の抜け落ちが見られ、抜け落ち先端からPCMの剥離が観察された。

3.3 鉄筋ひずみ性状

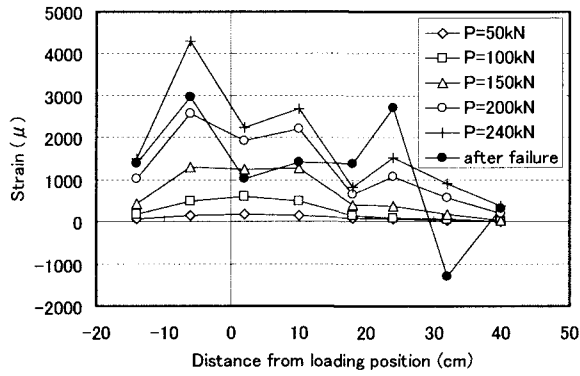
図-4に各試験体の荷重と載荷板直下における主鉄筋ひずみおよび補強筋ひずみの関係を示す。試験体No.1の主鉄筋は荷重110kN付近で降伏ひずみに達している。試験体No.2および試験体No.4の補強筋は荷重170~200kN程度で降伏ひずみに達しているが、主鉄筋は押抜きせん断破壊まで降伏ひずみに達することはなかった。試験体No.3は破壊時において主鉄筋、補強筋ともに降伏ひずみに達している。また、主鉄筋ひずみと補強筋ひずみとの間に値が大きく逆転することはなく、PCMの付着により補強筋が母床版と一体化され、主鉄筋とともに引張力を分担してい

たことが分かる。

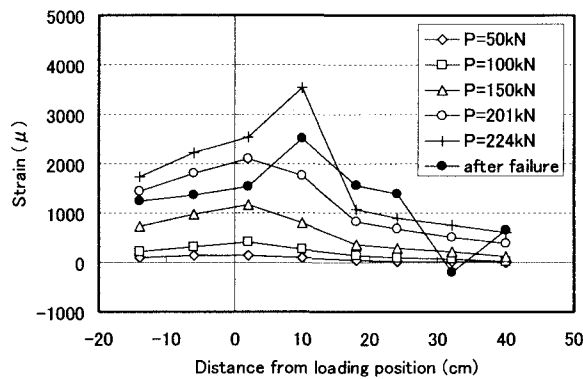
次に、各試験体の各荷重段階における補強筋の主鉄筋方向ひずみ分布を図-5に示す。最大荷重に至るまで荷重の増加とともに補強筋ひずみは増加していることが分かる。このことから破壊に至るまで母床版とPCMとの間に剥離は生じていなかったものと考えられる。また、破壊直後のひずみ分布を見てみると、床版中央の載荷位置付近では母床版が押抜かれたことにより最大荷重時に比べてひずみが低下しており、逆に、ひずみゲージを貼付した18cm~32cmの範囲においてひずみ勾配が他の箇所より大きくなっている。これはせん断破壊に伴う母床版のせん断ずれによりダウエル力が補強筋へも伝達されたためと推察される。そして、母床版とPCMとの間で付着が切れたものと思われる。

3.4 押抜きせん断破壊モデル

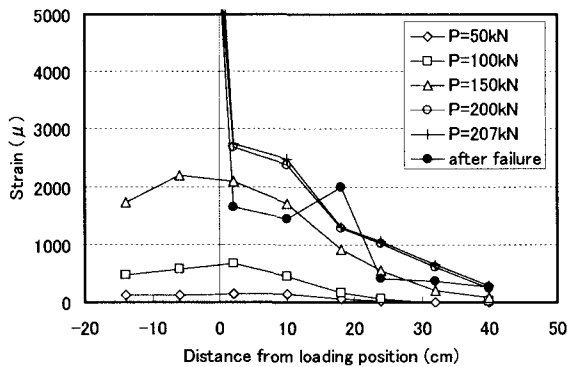
下面増厚補強したRC床版の押抜きせん断耐荷力を算定するために、実験結果をもとに図-6に示すような破壊モ



(a) 試験体 No.2-1



(b) 試験体 No.3-1



(c) 試験体 No.4-1

図-5 補強筋ひずみ分布

デルを仮定した。母床版断面内における破壊時の応力状態は松井ら⁹⁾が提案した破壊モデルをそのまま用い、母床版とPCMとの界面における剥離応力状態を重ね合わせたモデルを考えた。すなわち、引張側主鉄筋位置におけるダウエル力による引張応力分布(かぶり深さの2倍の範囲)の先端から母床版とPCMとの界面においてPCMの剥離応力を三角形分布させている。剥離応力の分布範囲についてはRC床版の場合に準じてPCM厚さの2倍($\alpha=2$)とした。このような破壊モデルから押抜きせん断耐荷力算定式

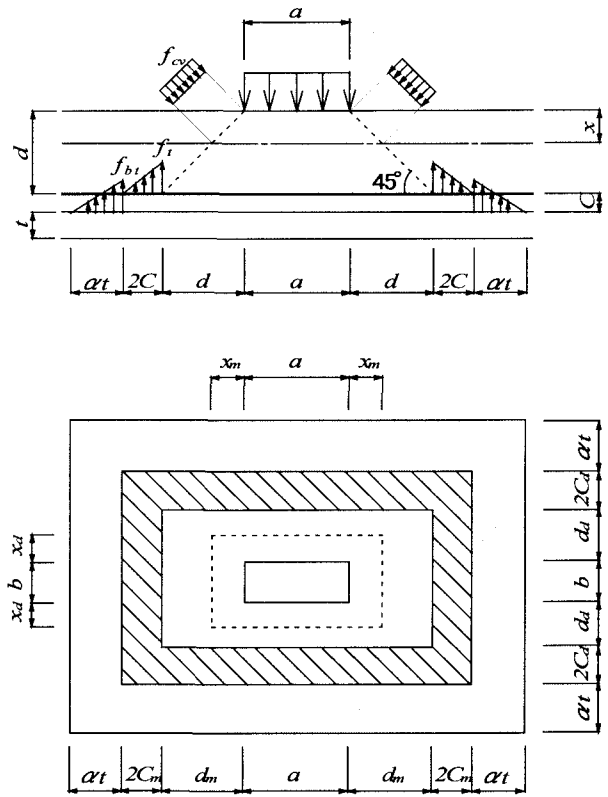


図-6 押抜きせん断破壊モデル

は次式のように表すことができる。

$$P = f_{cv} \{2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m\} + f_t \{2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m\} + f_{bt} \{2(a + 2d_m + 4C_m)t + 2(b + 2d_d + 4C_d + 4t)t\} \quad (1)$$

ここに、

- a, b : 荷板の主鉄筋, 配力鉄筋方向の辺長
- x_m, x_d : 主鉄筋, 配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した時の中立軸深さ
- d_m, d_d : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋の有効高さ
- C_m, C_d : 引張側主鉄筋, 配力鉄筋のかぶり深さ
- t : PCM厚さ
- f_{cv} : コンクリートのせん断強度
- f_t : コンクリートの引張強度
- f_{bt} : コンクリートとPCMとの界面における付着引張強度

コンクリートのせん断強度¹⁰⁾および引張強度¹¹⁾は次式により求めた。

$$f_{cv} = 0.656f_c^{0.606} \quad (2)$$

$$f_t = 0.267f_c^{0.667} \quad (3)$$

また、コンクリートとPCMとの界面における付着引張強度は建研式引張試験により得られた結果($f_{bt}=0.54\text{N/mm}^2$)を用いた。

表-4に式(1)による計算値と実験値との比較を示す。表

表-4 押抜きせん断耐荷力

試験体	実験値 (kN)	計算値 (kN) (剥離応力無視)	実験値/計算値	計算値 (kN) (剥離応力考慮)	実験値/計算値
No.1-1	163	151	1.079	151	1.079
No.1-2	152		1.007		1.007
No.2-1	243	188	1.293	205	1.185
No.2-2	202		1.074		0.985
No.3-1	207	171	1.211	187	1.107
No.3-2	177		1.035		0.947
No.4-1	229	194	1.180	218	1.050
No.4-2	228		1.175		1.046
			Ave. 1.132	Ave. 1.051	

中には母床版と PCM との界面に作用する剥離応力を無視した、補強筋との合成作用による床版中立軸深さの変化のみを考慮して算出した結果も示してある。この計算値と実験値との比較では、計算値は 10%程度過小に評価していることから、母床版と PCM との界面における剥離破壊を取り入れる必要があると言える。剥離応力範囲を PCM 厚さの 2 倍とすることで実験値に近い結果となり、実験結果に基づいた破壊モデルの妥当性を示すことができたと言える。

4. まとめ

本研究で行った下面増厚補強した RC 床版の押抜きせん断耐荷力実験の結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 補強筋量に伴ってたわみは低減され、耐荷力は増大する。本実験ではほぼ同じ鉄筋量となる D6 鉄筋 50mm 間隔メッシュと D10 鉄筋 100mm 間隔メッシュで補強した試験体の力学性状に差異はほとんどなく、無補強床版に比べて耐荷力は約 40% 向上し、たわみは約 50% 低減した。
- (2) 主鉄筋ひずみおよび補強筋ひずみ分布から最大荷重時まで母床版と補強筋の合成が保持され、引張力の一部を分担していた。また、最大荷重時まで母床版と PCM との界面にずれや剥離は発生していなかった。
- (3) 母床版は床版中央から 20cm をやや越えた範囲で押抜けており、その位置から母床版と PCM との界面に剥離が観察された。また、押抜きせん断破壊直後の補強筋ひずみ分布においてひずみ勾配が急激に変化し、母床版の抜け落ちにより補強筋にもダウエル力が作用していたと考えられる。
- (4) 下面増厚補強した床版の押抜きせん断破壊モデルとして、破壊時に母床版と PCM との界面で補強筋に作用するダウエル力によって剥離応力が作用すると仮定した。剥離強度には建研式付着引張試験から得られた付着引張強度を用い、剥離範囲を PCM 厚さの 2 倍として三角形分布させた算定結果とよい一致を得ることができた。
- (5) 本実験では、損傷していない母床版に対して下面増厚

補強を施し、その耐荷力について検討を行ったが、すでに損傷を受けた RC 床版に対する補強後の耐荷力、ならびに耐久性に関する評価・検討を今後も実施していく必要がある。

参考文献

- 1) 松井繁之・木村元哉・養毛 勉：増厚工法による RC 床版補強の耐久性評価、構造工学論文集, Vol.38A, pp.1085-1096, 1992.
- 2) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針(案), コンクリートライブラリー95, pp.113-117, 2000.
- 3) 森 成道・若下藤紀・松井繁之、西川和廣：炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究、橋梁と基礎, 95-3, pp.25-32, 1995.
- 4) 高橋義裕・佐藤靖彦：炭素繊維シート補強 RC スラブのせん断耐力に関する実験的研究、コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.721-726, 2000.
- 5) 佐藤貢一・渡辺裕一・松井繁之・高井 剣：下面増し厚工法による RC 床版補強の耐久性、橋梁と基礎, 96-9, pp.23-29, 1996.
- 6) 軽尾助夫・末田彰助・松井繁之・財津公明：PP モルタルを用いた下面増し厚工法の床版補強効果確認実験、橋梁と基礎, 97-5, pp.23-29, 1997.
- 7) Higashiyama, H., Matsui, S., Ogushi, Y., and Matsumoto, H.: Strengthening Effect of RC Beams by Bottom Thickness Increasing Method with Polymer Cement Mortar, 6th International Conference on Short & Medium Span Bridges 2002, Vol.2, pp.1401-1408, Vancouver, 2002.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編], pp.244-246, 2002 年制定
- 9) 前田幸雄・松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式, 土木学会論文報告集, 第 348 号, pp.133-141, 1984.
- 10) 東山浩士・松井繁之・水越陸視：PC 床版の押抜きせん断耐荷力算定式に関する検討, 構造工学論文集, Vo.47A, pp.1347-1354, 2001.
- 11) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法, コンクリートセミナー 4, 共立出版, pp.17-18, 1979.