

静荷重・走行荷重を受ける RC 床版の押し抜きせん断耐力

Punching Shear Load-Carrying Capacity of RC Slabs under Static and Running Loads

阿部 忠*・木田哲量**・高野真希子***・澤野利章****・加藤清志**

Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Makiko TAKANO, Toshiaki SAWANO and Kiyoshi KATO

* 日本大学助教授 生産工学部土木工学科(〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

** 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科(〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

*** 日本大学大学院生産工学研究科土木工学専攻(〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

**** 工博 日本大学助教授 生産工学部土木工学科(〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

To determine the maximum punching shear strength and elucidate the failure mechanism of reinforced concrete (RC) slabs, the authors conducted (1) a static load test, (2) a running load test, and (3) a running constant-load test on two types of RC slab, that is, one with tension reinforcement and the other with double reinforcements. In addition, they carried out a one-plane shearing test on control specimens to examine the shear stresses developed in concrete for theoretical analysis, and propose an equation for estimating the shear stress in the concrete member over the wider range of compressive strengths from 20 N/mm² to 80 N/mm². Thus, the present authors propose a punching shear load-carrying capacity equation, a punching shear dynamic model and a modified theoretical load-carrying capacity equation for the two types of RC slab under running loads. The experimental values were approximated to the theoretical ones by applying the new shear strength equation of concrete.

Keywords: Static load, Running load, One-plane shearing test, Punching shear strength

キーワード: 静荷重, 走行荷重, RC床版, 一面せん断試験, 押し抜きせん断耐力

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)床版は、大型自動車の輪荷重が集中的に作用する。この場合のRC床版の静的耐力は一般的に押し抜きせん断耐力によって評価される場合が多い。RC床版の押し抜きせん断耐力を支配する要因は、鉄筋の有効高さ、鉄筋量、鉄筋比、コンクリートの圧縮強度・せん断強度・引張強度、載荷板の周長、床版の支持条件、載荷位置、荷重の種類、など多くあり、これらを全て考慮して評価しなければならない。しかし、主要材料であるコンクリートの不均一性、床版厚や配筋における施工誤差のためにいくつかの要因は考慮しにくいこともある。とくに、多種にわたる荷重条件による床版の押し抜きせん断破壊メカニズムも大きな要因であるが、未だに解明されていない。

そこで本研究では、RC床版の押し抜きせん断耐力を理論的に評価するために、単鉄筋配置と複鉄筋配置した場合のRC床版2タイプを用いて、①静荷重実験、②走行荷重実験、③走行一定荷重実験を行い、それぞれの実験における最大耐力および破壊メカニズムを検証した。そして、RC床版の押し抜きせん断耐力式には松井らの提案式^{1,2)}と土木学会式³⁾を適用し、本実験値との適合

性を検証する。まず、松井らが提案する押し抜きせん断耐力式にはコンクリートのせん断強度式が適用されている。また、旧示方書ではコンクリートの圧縮強度が50N/mm²までを普通強度とし、60N/mm²以上を高強度とされていたが、新示方書¹⁾では80N/mm²までに引き上げられた。そこで、管理供試体(角柱)を用いて新一面せん断試験を行い、コンクリートの圧縮強度80N/mm²まで適用できるコンクリートせん断強度式を提案し、松井らの提案式に適用した実験値との適合性を検証した。また、本実験における破壊メカニズムから押し抜きせん断力学モデルについても検討し、本実験値と理論値を近似させるために松井式の修正を行ない、RC床版の合理的な設計法の確立の一助とするものである。

2. 押し抜きせん断耐力に関する既往の研究

2.1 松井らが提案する押し抜きせん断耐力^{1), 2)}

松井らはRC床版の押し抜きせん断耐力に関する実験より、せん断挙動および破壊機構を解明し、RC床版の押し抜きせん断力学モデルと押し抜きせん断耐力式を提案している。

(1) 静荷重載荷による押し抜きせん断耐力²⁾

床版の押し抜きせん断破壊形状は載荷版の形状と同等な面で陥没し、その角度は45°以下で引張鉄筋の位置までせん断破壊し、引張鉄筋のかぶり内は、コンクリートのダウエル効果による破壊を呈するとして、押し抜きせん断力学モデルを図-1のように提案し、押し抜きせん断耐力を式(1)として与えている。

$$V_{cp} = f_{cv0} \{2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m\} + f_i \{2(4C_d + 2d_d + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d\} \quad (1)$$

ただし、

$$f_{cv0} = 0.252f_c - 0.00251f_c^2 \leq 49\text{N/mm}^2 \quad (1.a)$$

$$f_i = 0.269f_c^{2/3} \quad (1.b)$$

ここで、 V_{cp} :押し抜きせん断耐力、 a , b :載荷版の主鉄筋、配筋方向の辺長、 X_m , X_d :主鉄筋、配筋方向の中立軸の位置、 d_m , d_d :引張主鉄筋、配筋鉄筋の有効高さ、 C_m , C_d :引張主鉄筋、配筋鉄筋のかぶり、 f_{cv0} :コンクリートのせん断強度(N/mm²)、 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

式(1)に適用されるコンクリートのせん断強 f_{cv0} は、普通コンクリート(圧縮強度49N/mm²)の場合を伊東式⁹⁾、高強度コンクリート(60N/mm²~80N/mm²)の場合は並木式⁹⁾を適用している。次に、ダウエル効果を示すコンクリートの引張強度 f_i は岡村式⁹⁾が適用されている。

(2) はり状化後の押し抜きせん断耐力³⁾

RC版がひび割れ損傷を受け、はり状化後の押し抜きせん断力学モデルを図-2のように提案し、押し抜きせん断耐力を式(2)として与えている。

$$V_{cp} = 2B(f_{cv0} \cdot X_m + f_i \cdot C_m) \quad (2)$$

$$B = b + 2d_d \quad (2.a)$$

ここで、 B :はり状化後の幅、 b :輪荷重の軸方向の辺長

2.2 土木学会式による押し抜きせん断耐力³⁾

コンクリート標準示方書によるRC床版の押し抜きせん断耐力は式(3)、(4)として与えられている。

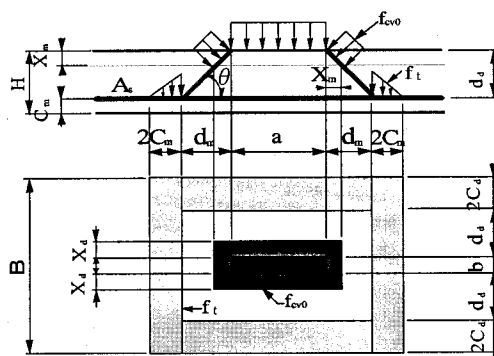


図-1 押し抜きせん断力学モデル

$$V_{pu} = V_{us} \quad (3)$$

$$V_{us} = \beta_d \cdot \beta_r \cdot \beta_p \cdot f_{pc} \cdot u_p \cdot d \quad (4)$$

ただし、

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_w} : p_w = A_s/b \cdot d$$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

$$f_{pc} = 0.20 \sqrt{f_{cd}}$$

ここで、 β_d :寸法効果の係数、 β_r :載荷板周長の影響を表す係数、 β_p :鉄筋比の影響を表す係数、 f_{pc} :コンクリートの強度の影響を表す係数、 u_p :載荷板から $d/2$ 離れた断面周長、 u :載荷面の周長、 d :有効高さ

なお、 f_{cd} には実験耐力であることからコンクリートの圧縮強度 f_c を用いる。また、本実験における理論押し抜きせん断耐力式(式(1))の寸法効果の係数 β_d は1.5を超える場合は、 $\beta_d = 1.5$ とする。

3. RC床版の押し抜きせん断実験

3.1 供試体寸法および計測方法

供試体寸法は、道路橋RC床版寸法の1/2モデルとした2タイプを用いた。なお、100×10タイプは単鉄筋配置、120×13タイプを複鉄筋配置とした。

3.2 使用材料

供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法20mmの粗骨材料を使用した。コンクリートの圧縮強度は100×10タイプの場合は30.0N/mm²、120×13タイプの場合は32.0N/mm²である。また、鉄筋にはD10を用いた。鉄筋の降伏強度は370N/mm²、弾性係数は200kN/mm²である。

3.3 供試体寸法および鉄筋の配置

RC床版供試体は浮き上がり防止を設けない4辺単純支持とする正方形板とし、その寸法および鉄筋の配置を図-3に示す。

(1) 100×10タイプ床版供試体

供試体の支間長は100cmとし、供試体の張り出し部は12.5cmとし、全長125cmとする。鉄筋の配置は単鉄筋とする。軸直角方向にD10を10cm間隔、有効高さ d

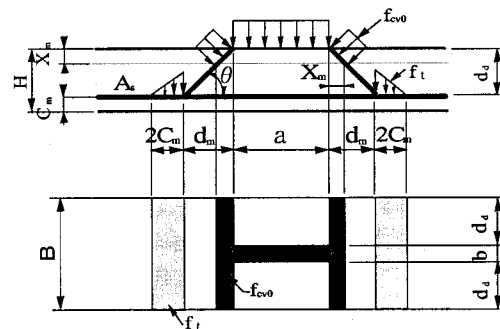


図-2 はり状化後の押し抜きせん断力学モデル

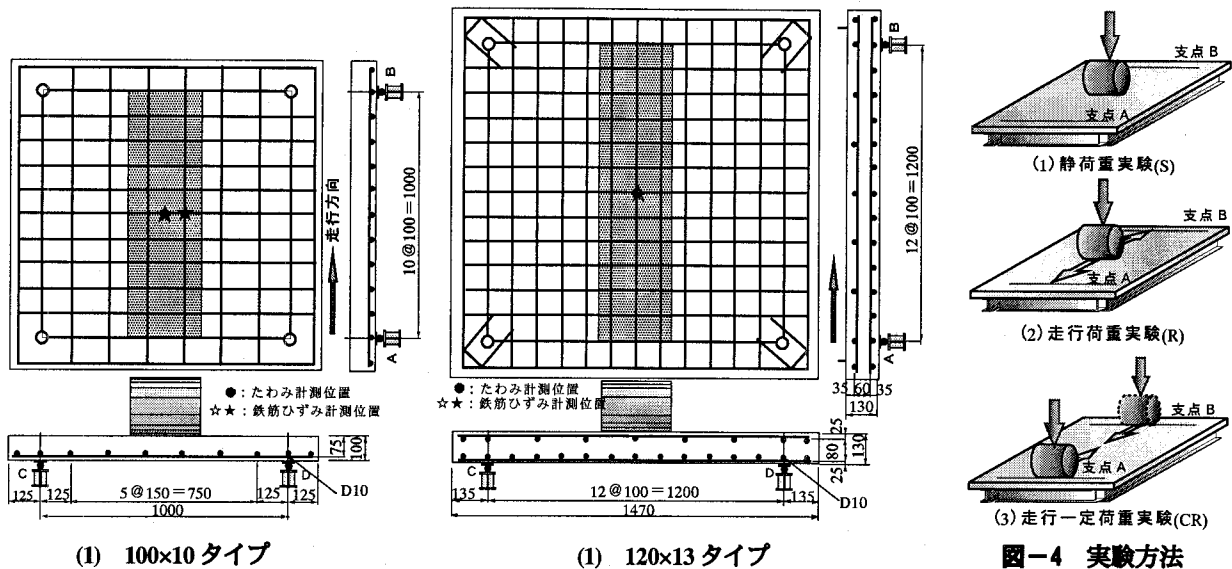


図-3 RC床版寸法および鉄筋の配置

= 7.5cm とする。また軸方向には、D10 を 15cm 間隔に配置し、有効高さ $d = 6.5\text{cm}$ とした。

(2) 120×13タイプ床版供試体

供試体は全長を 147cm、支間 120cm の等方性版とし、鉄筋は複鉄筋配置とした。引張側の軸直角方向および軸方向に D10 を 10cm 間隔で配置し、有効高さをそれぞれ 10.5cm、9.5cm とする。また、圧縮側には引張鉄筋量の 1/2 を配置する。

4. RC床版の押し抜きせん断実験

4.1 静荷重実験(S)

静荷重実験は図-4(1)に示すように、車輪を床版の支間中央に停止した状態での載荷である。荷重の大きさは 5.0kN ずつ増加する段階荷重とした。

4.2 走行荷重実験(R)

走行荷重実験は図-4(2)に示すように、走行荷重が作用した場合に最も耐力低下の著しい支間中央から両支点方向へ 1 往復走行させて元の支間中央で停止させた実験である^{7), 8)}。まず、RC 版の支間中央に車輪を停止させ、荷重後に軸方向に走行させて両支点を折り返す 1 往復を走行させて元の支間中央で停止させる。走行速度は 100×10 タイプの場合に 1 往復 2.0m を 9sec で走行する 0.22m/s とし、120×13 タイプの場合は 1 往復 2.4m を 13sec で走行する 0.18m/s とした。荷重の大きさは、1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加する段階荷重とした。

4.3 走行一定荷重実験(CR)

走行一定荷重実験は図-4(3)に示すように、供試体の支点 A に車輪を停止し、支点 A から支点 B を折り返す 1 往復を走行させる載荷である。

本実験における走行速度は 100×10 タイプの場合は 1 往復 2.0m を 9sec で走行する 0.22m/s とし、120×13 タイプの場合は 1 往復 2.4m を 13sec で走行する

0.18m/s とした。荷重の大きさは、1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加する段階荷重とした。

5. 実験・理論耐力および破壊モード

5.1 実験耐力

本実験における RC 床版の実験耐力を表-1に示す。本実験における走行一定荷重の場合の耐力とは、本実験の載荷条件のなかで、1 往復走行を維持した最大荷重とする。

(1) 100×10タイプ

静荷重の場合の平均耐力は 124.8kN、走行荷重の場合が 92.1kN となり、静荷重の場合と走行荷重の場合の実験耐力を比較すると、耐力比(R/S)は 0.74 であり、走行荷重の場合に 26 %耐力低下した。また、破壊モードは押し抜きせん断破壊となった。走行一定荷重の場合の平均耐力は 105.6kN となり、走行一定荷重の場合と静荷重の場合との実験耐力比(CR/S)は 0.85 となり、走行一定荷重の場合に 15 %耐力低下した。走行荷重の場合の耐力比に対して約 10 %大きくなっているが、これは、走行荷重の場合は版中央に停止しての載荷であり、走行一定荷重の場合は版中央をある速度で通過するためである。破壊モードは押し抜きせん断破壊となった。

(2) 120×13タイプ

静荷重の場合の平均耐力は 223.4kN、走行荷重の場合が 168.5kN となり、その実験耐力比(R/S)は 0.75 であり、走行荷重の場合に 25 %耐力低下した。破壊モードは押し抜きせん断破壊となった。

走行一定荷重の場合の平均耐力は 183.1kN となり、走行一定荷重の場合と静荷重の場合との実験耐力比(CR/S)は 0.82 であり、走行一定荷重の場合に 18 %の耐力が低下した。これは、走行荷重の場合の実験耐力比に対して約 10 %大きくなっている。破壊モードは押し抜き

表-1 実験耐力および理論耐力

供試体	実験耐力 (kN)	平均耐力 (kN)	耐力比 R / S	理論耐力				
				松井式	実験値 理論値	土木学 会式	実験値 理論値	
100×10-S-1	119.8	124.8	—	149.3	119.7	0.802	1.001	
100×10-S-2	129.7					0.869	1.084	
100×10-R-1	94.4	92.1	0.74	48.2		1.959	0.789	
100×10-R-2	89.8					1.863	0.750	
100×10-CR-1	108.5	105.6	0.85			2.252	0.907	
100×10-CR-2	102.7					2.130	0.858	
120×13-S-1	221.3	223.4	—	216.9	196.9	1.020	1.124	
120×13-S-2	225.4					1.039	1.145	
120×13-R-1	170.7	168.5	0.75	76.6		2.228	0.867	
120×13-R-2	166.2					2.170	0.844	
120×13-CR-1	184.3	183.1	0.82			2.406	0.936	
120×13-CR-2	181.9					2.375	0.924	

きせん断破壊となった。

5.2 理論耐力

本供試体における松井，土木学会式による理論耐力の結果を表-1に併記した。

(1) 松井式による押し抜きせん断耐力

1) 100×10タイプ

静荷重の場合の押し抜きせん断耐力式(1)による理論値と実験値との比は，供試体 100×10-S-1 で 0.802，100×10-S-2 で 0.869 と，いずれも実験値が下回った。また，走行荷重の場合，すなわちはり状化後の押し抜きせん断耐力式(2)による理論値と実験値との比は，供試体 100×10-R-1，2 で 1.959，1.863，走行一定荷重の場合の供試体 100×10-CR-1，2 で 2.252，2.130 となり，実験値が上回った。

2) 120×13タイプ

静荷重の場合の理論値と実験値の比は供試体 120×13-S-1，2 で 1.020，1.039 となり近似した。また，走行荷重の場合の比は 120×13-R-1，2 で 2.228，2.170，走行一定荷重の場合の比は 120×13-CR-1，2 で 2.406，2.375 となり，かなり安全側となった。

これらのことから松井式は，静荷重における複鉄筋配置の場合の理論押し抜きせん断耐力値は実験値と近似するが，単鉄筋配置の場合理論押し抜きせん断耐力値は実験値とかなり差が生じ実験値が下回った。また，走行荷重においてはかなり差が生じた。走行一定荷重の場合も単鉄筋配置および複鉄筋配置の場合はかなり安全側に設定されている。

(2) 土木学会コンクリート標準示方書による押し抜きせん断耐力

1) 100×10タイプ

静荷重の場合の RC 版の実験押し抜きせん断耐力と土木学会コンクリート標準示方書による理論押し抜きせん断耐力(式(3)，(4))との比(実験値/理論値)は，供試体 100×10-S-1 で 1.001，100×10-S-2 で 1.084 となり，理論値との適合性が良い。また，走行荷重の場合には，供試体 100×10-R-1，100×10-R-2 で，それぞれ 0.789，0.750 となり，21%，25%実験値が下回った。

2) 120×13タイプ

静荷重の場合の供試体 120×13-S-1，2 は 1.124，1.145

となり，走行荷重の場合は，供試体 120×13-R-1 が 0.867，120×13-R-2 の場合が 0.844 と危険側を示した。また，走行一定荷重の場合は供試体 120×13-CR-1，2 で 0.936，0.924 となり，実験値が下回った。

コンクリート標準示方書における押し抜きせん断耐力は，単鉄筋配置においては近似するものの複鉄筋配置の場合はかなり安全側に設定されている。しかし，走行荷重が作用する場合は実験値が理論値よりかなり下回ることから，ひび割れ幅の影響を考慮する必要がある。

5.3 破壊状況

(1) 各実験における断面方向のひび割れ状況

本実験における RC 床版の上・下面のひび割れ状況を図-5に示す。また，断面方向のひび割れ状況を図-6に示す。

1) 100×10タイプ

図-5(1)，1)，および図-6(1)に示す静荷重の場合は，降伏線方向にひび割れが発生している。車輪の設置面は 25cm×4cm であるが，降伏線の影響により 25×25cm で押し抜かれている。また，下面は降伏線方向にひび割れが発生し，破壊面はダウエル効果によりコンクリートがはく離している。したがって，静荷重の場合は軸直角方向および軸方向ともに，松井式の破壊モデルと同様である。しかし，単鉄筋配置の 100×10 タイプでは，破壊状況からダウエル効果は全面考慮することができないと考えられる。また，走行荷重の場合，床版の上面のひび割れ間隔は図-5(1)，2)および図-6(1)に示すように，スラブ中央の荷重位置付近から軸直角方向に 10cm ～ 13cm 間隔で発生し，とくに走行面が著しい。しかし，静荷重と異なって降伏線の影響による正方形の抜け落ちはみられない。また，床版の下面のひび割れは，軸直角方向に 10cm 間隔，軸方向にも 15cm 間隔で発生し，格子状を形成している。最終的には，支間中央で荷重増加中に破壊した。次に，走行一定荷重の場合は図-5(1)，3)および図-6(1)であり，常に連続的に走行することから，破壊位置も床版中央とは限らず，せん断領域(はりと同様に支点 A からせん断スパン比 $a/d = 3.0$ 以内)で破壊している。しかし，はり状化は走行荷重の場合と同様である。

2) 120×13タイプ

図-5(2)，1)および図-6(2)より，静荷重の場合は，降伏線方向にひび割れが発生している。車輪の設置面は 25cm×4cm であるが，降伏線の影響により 25×20cm で押し抜かれている。また，下面は降伏線方向にひび割れが発生し，破壊面はダウエル効果によりコンクリートがはく離している。また，120×13 タイプは複鉄筋配置であることから，静荷重の場合は軸直角方向および軸方向ともに，圧縮鉄筋により荷重が分布され，引張鉄筋のかぶり内はダウエル効果の影響が全面にでている。また，走行荷重および走行一定荷重においても

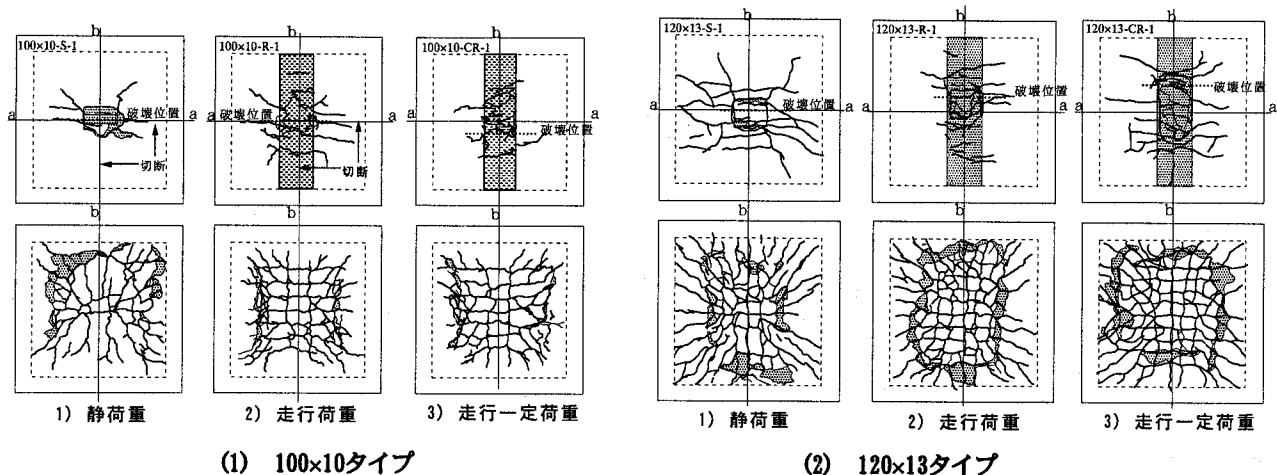


図-5 各実験供試体の破壊状況（上面，下面）

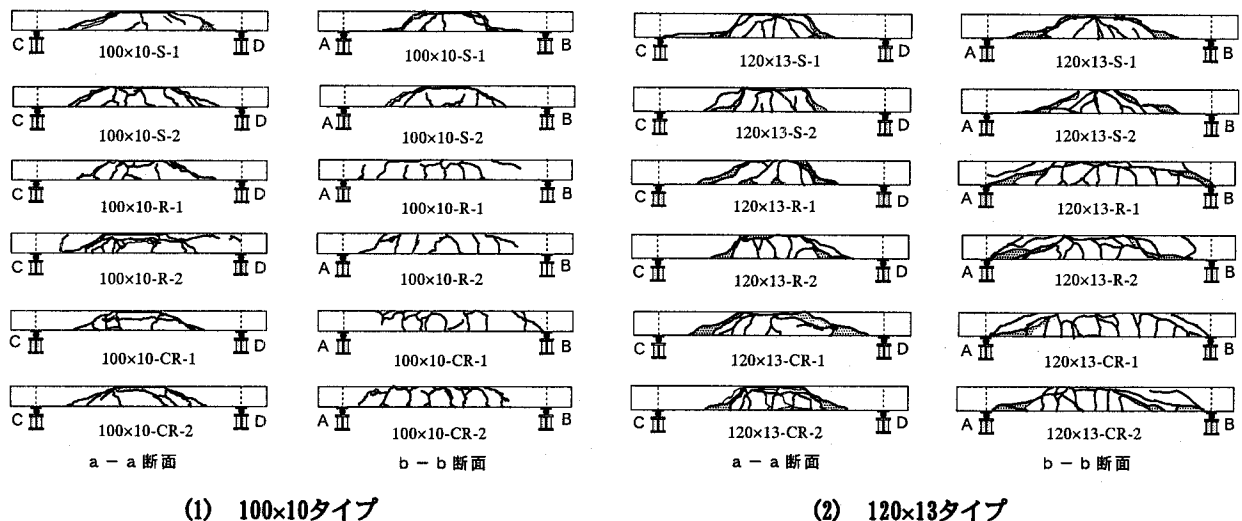


図-6 各断面の破壊状況

100x10 タイプと同様の破壊形状であるが、圧縮鉄筋の影響によりはり状化における分布幅が異なっている。

6. 押し抜きせん断耐力の修正

本実験の最大耐力と押し抜きせん断耐力式は、走行荷重の影響を考慮している松井式に着目し、修正式を検討する。修正式においては、①コンクリートのせん断強度、② RC 床版の破壊状況から力学モデルを再検討した理論式を提案する。

6.1 コンクリートの力学特性値

(1) コンクリートのせん断強度⁹⁾

松井式の押し抜きせん断耐力式(1), (2))には、コンクリートのせん断強度が適用されている。このせん断強度式では、圧縮強度が 49N/mm² までを伊東式(5)が適用されているが、圧縮強度が 40N/mm² 以上になるとせん断応力度の上昇は見られない。また、圧縮強度が 60N/mm² から 80N/mm² までは並木式(6)が適用されている。しかし、松井らは伊東・並木らの実験式における圧縮強度 50N/mm² 付近のデータが不足しているとして、

管理供試体（角柱；100x100x4000）を用いて二面せん断試験を行い、圧縮強度 20N/mm² ～ 80N/mm² までのせん断強度式(7)を提案している。

伊東式；($f_c \leq 49\text{N/mm}^2$)

$$f_{cv0} = 0.252f_c - 0.00251f_c^2 \quad (5)$$

並木式；($60\text{N/mm}^2 \leq f_c \leq 80\text{N/mm}^2$)

$$f_{cv0} = -264 + 53.1L(f_c) \quad (6)$$

松井式⁹⁾；($f_c \leq 80\text{N/mm}^2$)

$$f_{cv0} = 0.656f_c^{0.606} \quad (7)$$

ここで、 f_{cv0} ：コンクリートのせん断強度(N/mm²)、 f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

松井式(7)は、コンクリート標準示方書の規定と同様にコンクリートの圧縮強度 80N/mm² までとしている。

コンクリートのせん断強度について筆者^{10), 11)}らは、従来型のスリット挿入によるせん断試験とともに、一面せん断試験装置(円柱)を開発して、20N/mm² ～ 100N/mm² までのせん断強度式を提案してきた。これによると、伊藤、並木らが提案するせん断応力度式(5), (6))を上回っ

た結果が得られた。また、松井式(7)は、伊東・並木の実験と併せたせん断強度式であるために、同一試験から得た結果でないために差が生じたものと考えられる。

そこで、コンクリート標準示方書における力学特性値は 80N/mm^2 まで示されたことと、近年のコンクリート材の高品質、高強度化されていることから、せん断強度についても再検討する必要があると考えられる。よって、新一面せん断試験装置による、一面せん断実験を行い、圧縮強度が $20\text{N/mm}^2 \sim 80\text{N/mm}^2$ までのせん断強度式を提案する。

(2) 新一面せん断試験法によるせん断応力度

コンクリートのせん断試験方法は、破壊モードからその試験方法が多種開発されている。従来的一面せん断試験法に対して「縦ずれ」、すなわちモードⅡ型を考慮して供試体にスリット挿入する一面せん断試験を行ってきた¹⁰⁾。さらに実験が容易にできるモードⅡの一面せん断試験装置(円柱)を開発し、普通強度から高強度までのせん断応力度を推定した¹¹⁾。そこで、コンクリートの圧縮強度とせん断強度との関係を明確にするために、角柱供試体 $100 \times 400\text{mm}$ の管理供試体を用いるモードⅡ型の新一面せん断試験装置を開発し、その装置を用いてせん断試験を行うことにした。ここで、モードⅡ型による新一面せん断試験装置(角柱)を図-7に示す。

図-7に示すモードⅡ型一面せん断試験装置は、管理供試体の角柱($100 \times 400\text{mm}$)を用い、その供試体を長さを $1/2$ に切断し、 $100 \times 200\text{mm}$ に加工して、せん断試験と圧縮試験を同一供試体で行うことができるので両者の関係が明確になるなどの大きな特長がある。

1) 供試体の作製

モードⅡ型一面せん断試験および圧縮試験用供試体のコンクリートには、普通ポルトランドセメントと最大寸法 20mm の粗骨材等を使用し、養生材齢は 28 日とした。とくに、高強度コンクリートには、シリカヒュームおよび高性能減水剤を使用した。なお、コンクリートの圧縮強度は、設計基準強度を $20\text{N/mm}^2 \sim 80\text{N/mm}^2$ までの 34

体用いた。

供試体寸法および形状は、通常のコンクリートの圧縮試験に用いる管理供試体($100 \times 400\text{mm}$)の角柱を用い、この角柱をコンクリートカッターで切断し、せん断試験と圧縮試験に用いる。供試体の形状および寸法を図-8に示す。

2) 試験方法

a ; 圧縮試験方法

圧縮試験は、図-8に示す供試体を用いて、コンクリートの圧縮荷重法 JIS A 1108 の規定に基づき、加圧速度を毎秒 0.6N/mm^2 で行った。

b ; モードⅡ型一面せん断試験方法

図-7に示した一面せん断試験装置に管理供試体を切断した一方を用いて行う。荷重の荷重方法は圧縮試験方法と同様である。

3) 新一面せん断試験法によるせん断強度

モードⅡ型新一面せん断試験装置によって得られるコンクリートせん断応力度をせん断強度 f_{cv0} と定義し、式(8)より算出する。

$$f_{cv0} = P/A_s \quad (8)$$

ここで、 f_{cv0} : コンクリートのせん断応力度、 P : 破壊荷重、 A_s : 一面せん断破壊面積

以上より、モードⅡ型一面せん断試験によるせん断強度と圧縮強度との関係を図-9に示す。なお、伊東、並木、松井⁹⁾らの実験値およびせん断強度式を併せて図-9に示した。

図-9より、本実験におけるせん断強度は、伊東、並木らの結果と比較すると、コンクリートが高強度になるにしたがって、差が生じている。しかし、松井らが行ったコンクリートの圧縮強度 $50\text{N/mm}^2 \sim 70\text{N/mm}^2$ までの範囲のせん断強度とは近似している。本実験におけるせん断強度は式(9)で与えられる。

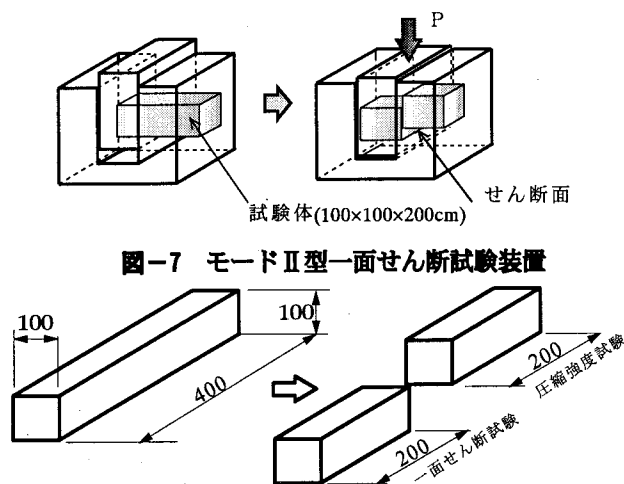


図-7 モードⅡ型一面せん断試験装置

図-8 せん断強度試験および圧縮強度試験供試体の寸法

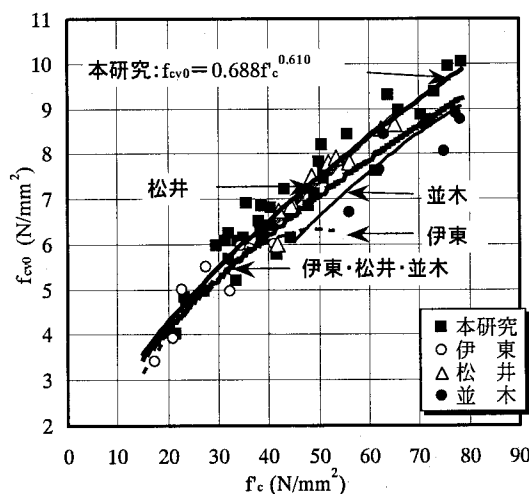


図-9 コンクリートのせん断強度と圧縮強度

$$f_{cv0} = 0.688f_c^{0.610} \quad (f_c \leq 80\text{N/mm}^2) \quad (9)$$

よって、松井式における押し抜きせん断耐力式に適用するコンクリートのせん断強度は式(9)を適用する。

6.2 コンクリートの引張強度

コンクリートの引張強度は、圧縮強度にほぼ比例していることから、その強度に対する推定式が必要となる。松井らはダウエル効果を示すコンクリートの引張強度には岡村式(1.b)を適用しており、圧縮強度 80N/mm^2 までは線形的であることから、ここでも岡村式を適用する。

6.3 押し抜きせん断耐力修正理論式

(1) 押し抜きせん断破壊モデル

1) 静荷重実験

松井式(1)は、コンクリートのはく離破壊が広範囲にわたるために下側の引張鉄筋のダウエル効果の影響を考慮している。しかし、現象的には供試体 100×10 タイプでは、圧縮鉄筋を配置していないことから、輪荷重により押し抜かれた場合は、全面に押し抜かれることは無く、片側が押し抜かれた後に、残りの半分が押し抜かれている。したがって、臨界面全てにダウエル効果は期待できないものと考えられることから、松井式における軸方向のダウエル効果 $(2(a+2d_m)C_d)$ を片側 $((a+2d_m)C_d)$ とすることを提案する。よって、提案力学モデルを図-10(1)に示す。なお、中山、桧貝¹²⁾らは、貫通ひび割れを有する鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐力式を、軸直角方向のダウエル効果を $1/2$ とした修正式を提案している。

次に、供試体 120×13 タイプは、松井式(1)と比較すると、実験値はやや下まわるもののほぼ近似したために、押し抜きせん断力学モデルは松井らが提案している力学モデルを適用する(図-10(2))。なお、コンクリートのせん断強度は本実験式(9)を適用する。

2) 走行荷重が作用する押し抜きせん断破壊モデル

松井式における走行荷重が作用した場合、すなわち RC 床版がはり状化後の押し抜きせん断力学モデルは、貫通ひび割れとなるはり状化に関する実験研究から 40cm 程度³⁾と報告している。しかし、輪荷重の軸方向の分布幅

($50\text{cm} \times 20\text{cm}$)を考慮するならば、配力筋方向の辺長 X_d も考慮する必要がある。したがって、走行荷重を受ける RC 床版の押し抜きせん断モデルを図-11のように提案する。

本実験より得られた、図-10の押し抜きせん断モデルをもとに、単鉄筋配置および複鉄筋配置による押し抜きせん断耐力を提案する。

(1) 静荷重による押し抜きせん断耐力

1) 単鉄筋配置

$$V_{cp} = f_{cv0} \{2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m\} + f_i \{2(4C_d + 2d_a + b)C_m + (a+2d_m)C_d\} \quad (10)$$

$$f_{cv0} = 0.688f_c^{0.610} \leq 80\text{N/mm}^2 \quad (\text{提案})$$

$$f_i = 0.269f_c^{2/3} \leq 80\text{N/mm}^2$$

2) 複鉄筋配置

$$V_{cp} = f_{cv0} \{2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m\} + f_i \{2(4C_d + 2d_a + b)C_m + 2(a+2d_m)C_d\} \quad (11)$$

$$f_{cv0} = 0.688f_c^{0.610} \leq 80\text{N/mm}^2 \quad (\text{提案})$$

$$f_i = 0.269f_c^{2/3} \leq 80\text{N/mm}^2$$

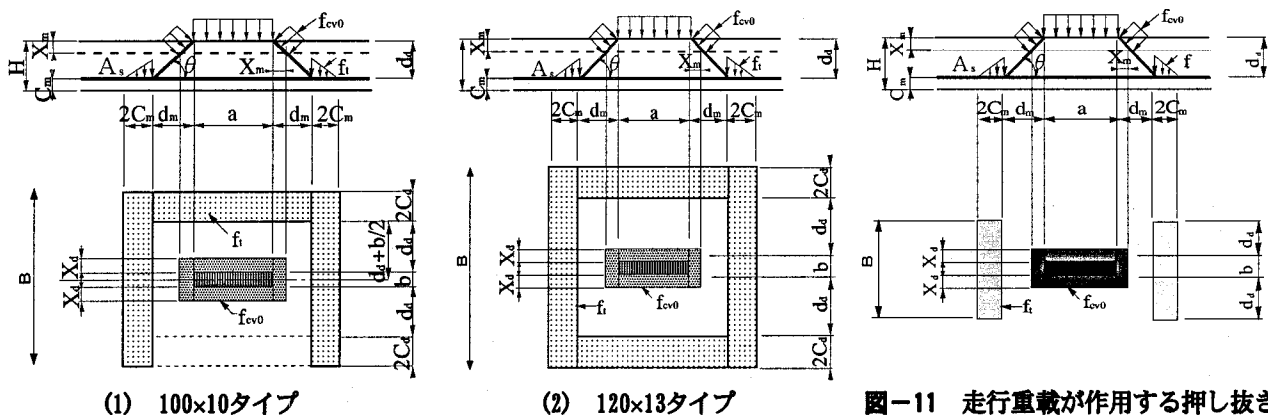
ここで、 V_{cp} : 押し抜きせん断耐力、 a , b : 載荷版の主鉄筋、配力筋方向の辺長、 X_m , X_d : 主鉄筋、配力鉄筋方向の中立軸の位置、 d_m , d_d : 引張主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ、 C_m , C_d : 引張主鉄筋、配力鉄筋のかぶり、 f_{cv0} : コンクリートのせん断強度 (N/mm^2)、 f_i : コンクリートの引張強度 (N/mm^2)

(2) はり状化後の押し抜きせん断耐力

はり状化後の押し抜きせん断耐力は図-11に示した力学モデルより、式(12)として与えられる。

$$V_{cp} = f_{cv0} \{2(a+2X_m)X_d + 2(b+2X_d)X_m\} + f_i \{2(2d_a + b)\} 2C_m \quad (12)$$

押し抜きせん断耐力修正理論式(10), (11), (12)より求めた結果を表-2に示す。



(1) 100×10タイプ

(2) 120×13タイプ

図-10 静荷重が作用する押し抜きせん断モデル

図-11 走行重載が作用する押し抜きせん断モデル

表-2 押し抜きせん断力修正理論耐力

供試体	実験耐力 (kN)	理論耐力	
		修正式	実験値 理論値
100×10-S-1	119.8	114.2	1.049
100×10-S-2	129.7		1.136
100×10-R-1	94.4		1.155
100×10-R-2	89.8	81.7	1.099
100×10-CR-1	108.5		1.329
100×10-CR-2	102.7		1.257
120×13-S-1	221.3	219.8	1.007
120×13-S-2	225.4		1.025
120×13-R-1	170.7		1.157
120×13-R-2	166.2	147.5	1.127
120×13-CR-1	184.3		1.249
120×13-CR-2	181.9		1.233

表-2より、本実験供試体の実験押し抜きせん断耐力と破壊状況による押し抜きせん断力学モデルおよび一面せん断強度式(9)を適用した場合の松井式修正理論式による理論値を考察する。まず、単鉄筋配置における静荷重の場合は、実験値に対して修正理論式(11)より算出すると供試体 100×10-S-1 で 1.049 倍、供試体 100×10-S-2 で 1.136 倍となり、松井式(1)に対して安全側となり、近似した結果が得られた。また、走行荷重の場合のはり状化後は、松井式(2)における軸直角方向のせん断強度を加えた提案式(12)より算出すると供試体 100×10-R-1, R-2 で、それぞれ 1.155 倍、1.099 倍となり実験値と理論値がより近似する結果となった。しかし、走行一定荷重の場合は差異が生じる結果となった。次に、複鉄筋配置の場合は、松井式(1)に本実験のせん断強度式(9)を適用した場合、すなわち式(11)より算出すると供試体 120×13-S-1 で 1.007 倍、供試体 120×13-S-2 で 1.025 倍となり、実験値と理論値がより近似した。また、走行荷重の場合も供試体 120×13-R-1, R-2 で、それぞれ 1.157 倍、1.127 倍と実験値と近似した。しかし、走行一定荷重の場合は、単鉄筋配置、すなわち供試体 100×10-CR と同様に安全側となった。

7. まとめ

- ①単鉄筋配置における静荷重と走行荷重の場合の押し抜きせん断耐力比は 0.74 となり、走行荷重の場合が 26 % 耐力が低下した。また、複鉄筋配置の場合の床版の静荷重と走行荷重の場合の押し抜きせん断耐力比は 0.75 となり、走行荷重の場合が 25 % の耐力が低下した。
- ②破壊モードは供試体 100×10, 120×13 タイプともに静荷重の場合は押し抜きせん断破壊となるが、走行荷重、走行一定荷重および走行振動荷重の場合は、軸直角方向は押し抜きせん断破壊となるが、軸方向ははり状化するものの、押し抜きせん断破壊となった。
- ③新一面せん断試験による管理供試体(角柱)のコンクリート圧縮強度 $20\text{N/mm}^2 \sim 80\text{N/mm}^2$ の全領域におけるせん断応力度推定式を提案した。この推定式は、コンク

リートの圧縮強度が $40\text{N/mm}^2 \sim 50\text{N/mm}^2$ 付近の RC 床版および $50\text{N/mm}^2 \sim 80\text{N/mm}^2$ までの範囲における PC 床版にも適用することが可能である。

④静荷重および走行荷重が作用した場合の単・複鉄筋床版の押し抜きせん断力学モデルによる修正押し抜きせん断耐力式を提案した。また、本実験から得たコンクリートのせん断強度式を適用した結果、理論値と実験値の比は、静荷重が作用する 100×10 タイプで 1.09 倍、120×13 タイプは 1.02 倍、また走行荷重が作用する 100×10 タイプで 1.13 倍、120×13 タイプは 1.14 倍となり、両値が近似した結果となった。

参考文献

- 1)前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐力の評価式, 土木学会論文集, 第 348 号, V-1, pp.133-141, 1984, 8.
- 2)松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No. 2, pp. 677-632, 1987
- 3)土木学会: コンクリート標準示方書(構造性能照査編), 土木学会, 2002.3
- 4)伊東茂富: コンクリート工学, 森北出版, pp. 75, 1972.
- 5)並木 哲, 山本康弘, 戸際邦之, 黒羽健嗣: 高強度コンクリートの各種強度の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概要(近畿), pp. 737-738, 1989.
- 6)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.
- 7)阿部 忠, 木田哲量, 澤野利章, 星埜正明, 加藤清志: 走行荷重および変動荷重が作用する RC はりの耐力力と動的影響, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 313-320, 2001.
- 8)木田哲量, 阿部 忠, 澤野利章, 水口和彦, 加藤清志: 走行荷重載荷実験による RC 床版の耐力と鉄筋ひずみ度からの破壊メカニズム評価, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 211-216, 2003.6
- 9)東山浩士, 松井繁之, 水越睦視: PC 床版の押し抜きせん断耐力算定式に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp.1347-1354, 2001.
- 10)高野真希子, 木田哲量, 阿部忠, 加藤清志: コンクリートの圧縮応力場におけるせん断強度と一面せん断強度との多要因相関に関する研究, セメント・コンクリート論文集, pp. 232-237, 2001.
- 11)Makiko TAKANO, Tetsukazu KIDA, Kiyoshi KATO, Tadashi ABE and Naoki KATO: Formulation of Practical Shear Strength of Concrete and Its Application, Theoretical and Applied Mechanics Japan Vol. 51, pp. 63-68, 2002.
- 12)仲山元章, 桧貝勇, 中村光, 飯束義夫: 貫通ひびわれを有する鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol. 16, No. 2, 1994.

(2003年9月12日受付)