

RC床版の押抜きせん断耐荷力に関する実験研究

日大生産工(院) 大塚裕太 日大生産工 阿部 忠 日大生産工 木田哲量
日大生産工(研) 徐 銘謙 日大生産工 澤野利章

1. はじめに

道路橋の設計技術基準である道路橋示方書・同解説(以下、道示とする)¹⁾は、性能規定型の基準を目指して改訂された。道路橋床版に期待される性能を規定する設計法は、使用状況を想定し、破壊に対する安全性における性能を明確に示すことで費用対効果を明確にできる設計手法である。一方、鋼橋床版に期待される性能を規定し、破壊に対する安全性を確保することを目的とした性能照査型設計法の構築が進められている²⁾。その基本性能としては、安全性、使用性、社会・環境適合性の3つの性能を定めている。そして、安全性を具体的に確保するための性能として、耐荷力性能、疲労耐久性、材料耐久性を位置づけ、性能照査を評価するための設計手法の具体化が進められている。

そこで本研究では、RC床版に静荷重および走行荷重が作用した場合の押抜きせん断耐荷力を理論的に評価するために、複鉄筋配置したRC床版供試体を用いて静荷重実験および走行荷重実験を行った。実験より、押抜きせん断耐荷力および引張鉄筋の荷重とひずみの関係から破壊時および弾性域における押抜きせん断耐荷力を明確にし、土木学会式³⁾による押抜きせん断耐荷力式との整合性を検証し、道路橋RC床版の安全性を評価するための耐荷力式の確立の一助とする。

2. 供試体の使用材料および寸法

2.1 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の粗骨材を使用し、鉄筋にはSD295AのD10を用いた。本実験に用いた材

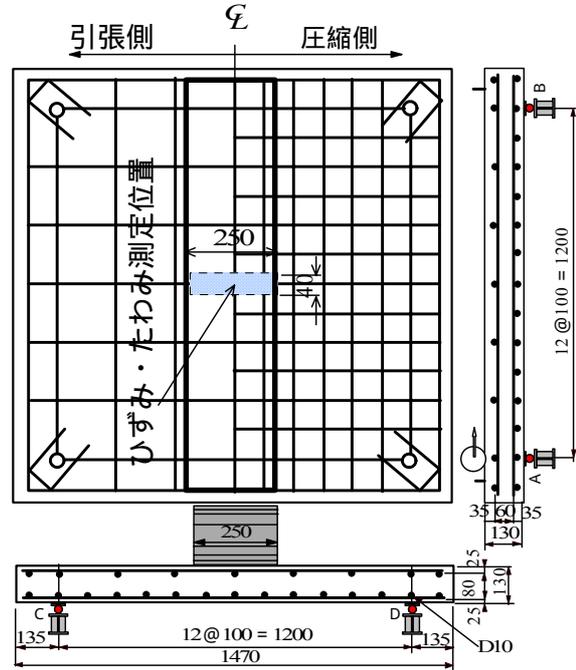


図-1 供試体寸法および鉄筋配置

料の力学特性値を表-1に示す。供試体は製作日が異なることからグループ分けして表-1に示した。

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体寸法は、道示の規定に基づいて、大型自動車の1日1方向の計画交通量が2000台以上を想定して床版厚さを決定した。また、鉄筋の配置は床版支間に対する設計曲げモーメントから鉄筋量を算出し、道示に基づいて配置し、供試体寸法および鉄筋配置を1/2とした。RC床版供試体は4辺単純支持とする正方形板とし、その供試体概要を表-1に示し、寸法および鉄筋の配置を図

表-1 材料特性および床版概要

供試体	コンクリート 圧縮強度 N/mm ²	鉄筋 (SD295A)			設計支間 mm	床版厚 mm	有効高 mm		1m ² 当たりの鉄筋量	
		使用鉄筋	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²			ヤング係数 kN/mm ²	軸直角方向	軸方向	引張 A _s (mm ²)
120-S-1,2	32.0	D10	370	511	1200.0	130.0	105.0	95.0	713.0	356.5
120-S-3,4	35.0		368	516						
120-R-1,2	32.0		370	511					200	
120-R-3,4	35.0		368	516					200	

Experimental Study on
Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs
by Yuta OTSUKA ,
Tadashi ABE , Tetsukazu KIDA , Ming-chien.Hsu and Toshiaki SAWANO

- 1 に示す。供試体の詳細は以下に示すとおりである。

供試体は全長を 147cm, 支間 120cm, 床版厚さを 13cm の等方性版とし, 鉄筋は複鉄筋配置とした。鉄筋には D10 を用い, 引張側の主鉄筋および配力筋を 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 を配置した。

3. 実験方法

3.1 走行振動試験装置の概要

本実験に用いた走行振動疲労試験装置は, 鋼製の反力フレーム(400kN)のほりに, 鋼製の車輪(幅 25cm, 直径 45cm)と油圧式の振動疲労試験機(300kN)を固定し, 供試体を設置した台車をモーターとクランクアームにより水平方向へ往復運動させて荷重の走行状態を実現するものである。走行振動試験装置を図 - 2 に示す。

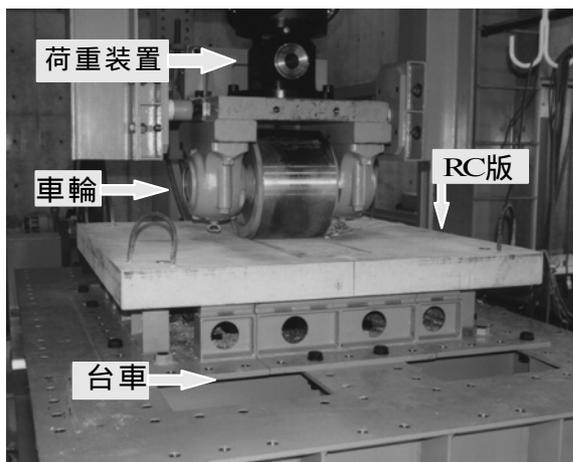


図 - 2 実験装置 (走行振動試験装置)

3.2 静荷重実験(S : Static load)

RC 床版の押抜きせん断実験は, 走行振動試験装置の輪荷重 (接地面 250×40mm) を床版の支間中央に載荷する静荷重載荷である。静荷重載荷における荷重の大きさは引張主鉄筋が降伏するまでは 10kN ずつ増加させ, その後は供試体が破壊するまで 5.0kN ずつ増加させた。

3.3 走行荷重実験(R : Running load)

走行荷重実験は, 静荷重耐力に比して, 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載荷である⁴⁾。まず, RC 床版の支間中央に車輪を停止させ, 荷重載荷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 1 往

表 - 2 実験耐力および破壊モード

供試体 (使用鉄筋)	実験最大耐力 (kN)	平均耐力 (kN)	破壊モード
120-S-1(D10)	221.3	223.4	押し抜きせん断破壊
120-S-2(D10)	225.4		押し抜きせん断破壊
120-S-3(D10)	235.2	237.7	押し抜きせん断破壊
120-S-4(D10)	240.2		押し抜きせん断破壊
120-R-1(D10)	170.0	170.2	押し抜きせん断破壊
120-R-2(D10)	170.4		押し抜きせん断破壊
120-R-3(D10)	172.5	172.0	押し抜きせん断破壊
120-R-4(D10)	171.5		押し抜きせん断破壊

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。走行範囲を図 - 1 に示した。

4. 実験結果

4.1 実験押抜きせん断耐力

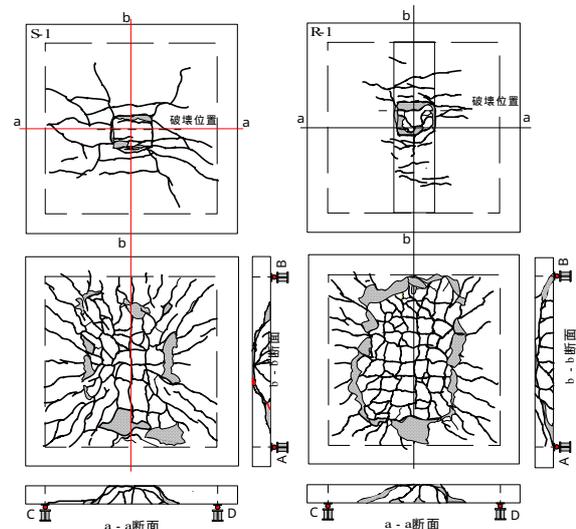
本実験における RC 床版の最大耐力を表 - 2 に示す。

静荷重実験における供試体 S-1, 2 の場合の平均耐力は 223.4kN, 走行荷重実験における供試体 R-1, 2 の平均耐力が 170.2kN となり, その実験耐力比(R/S)は 0.76 であり, 走行荷重が作用することで 24%耐力が低下した。また, 供試体 S-2, 3 の場合の平均耐力は 237.7kN, 走行荷重実験における供試体 R-3, 4 の平均耐力が 172.0kN となり, その実験耐力比(R/S)は 0.72 であり, 走行荷重が作用することで 28%耐力が低下した。

静荷重実験の破壊モードは, 押し抜きせん断破壊となり, 走行荷重実験の場合ははり状化後に押し抜きせん断破壊となった。

4.2 破壊状況

本実験における破壊状況の一例を図 - 3 に示す。



(1) 静荷重実験 (2) 走行荷重実験

図 - 3 ひび割れ状況

静荷重の場合は、降伏線方向にひび割れが発生している。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。次に、軸直角方向断面(a-a)および軸方向断面(b-b)の破壊状況は、45°~60°のせん断破壊面を形成し、破壊モードは押し抜きせん断破壊となった。供試体は複鉄筋配置としたことから、圧縮鉄筋で荷重を分散し、引張側の鉄筋のダウエル効果が発揮されている。

走行荷重の場合の床版上面のひび割れは、スラブ中央の荷重載荷位置付近から軸直角方向に10cm~13cm 間隔で発生している。また、床版下面のひび割れは、軸直角方向に10cm 間隔で発生している。さらに、軸方向にも10cm~12cm 間隔でひび割れが発生し、格子状を形成している。このひび割れ間隔は、軸直角方向および軸方向に配置した鉄筋間隔とほぼ同じ寸法である。

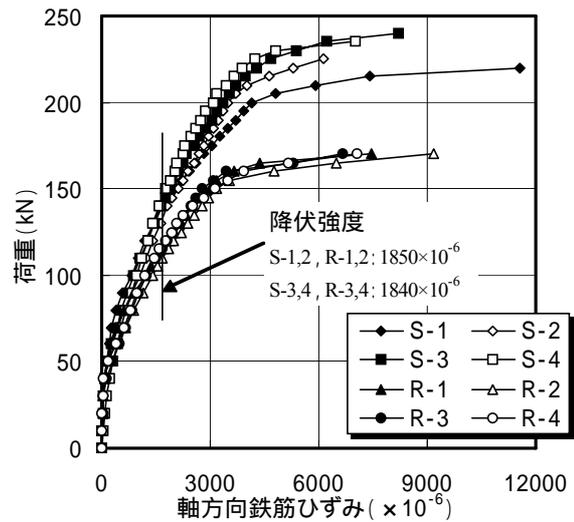
軸直角方向断面(a-a)は静荷重と同様に、車輪直下からアーチ作用により約30~50°の角度を持つせん断破壊形状を示し、ダウエル効果によるはく離も生じている。また、軸方向断面(b-b)は、はり状化していることが確認できる。したがって、走行荷重の場合も最終的には、押し抜きせん断破壊となった。

4.3 荷重とひずみの関係

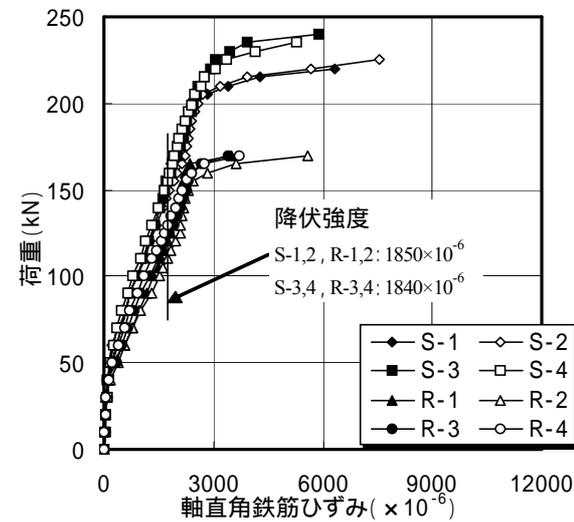
本実験における床版中央の主鉄筋の荷重とひずみの関係を図-4に示す。なお、本実験における主鉄筋および配力筋の降伏ひずみ、引張強度に対するひずみを表-1に示した材料特性値より算出し、図-4に併記した。

(1)主鉄筋のひずみ

軸直角方向に配置した主鉄筋の引張ひずみは図-4、(1)より、静荷重実験における引張主鉄筋の降伏荷重は150kN付近であり、その後の荷重増加においても線形的に増加し、荷重200kN付近からひずみの増加が著しい。また、走行荷重の場合は115kN付近で降伏し、荷重155kN付近からひず



(1) 主鉄筋



(2) 配力筋

図-4 荷重とひずみの関係

みの増加が著しい。

(2)配力筋のひずみ

軸方向に配置した配力筋の引張ひずみは図-4、(2)より、静荷重実験の場合も荷重150kN付近で降伏し、荷重200kN付近からひずみの増加が著しい。走行荷重の場合も主鉄筋と同様に115kNで降伏し

表-3 実験耐荷力および理論耐荷力

供試体 (鉄筋)	コンクリート		鉄筋		破壊荷重付近の理論耐力			終局限界状態の理論耐力			
	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	実験最大耐力 (kN)	理論耐力 (kN)	耐力比	降伏荷重 (kN)	ひずみ (×10 ⁻⁶)	理論耐力 (kN)	耐力比	
-S-1(D10)	32.0	370	511	221.3	191.1	1.15	150	1812	145.4	1.03	
-S-2(D10)				225.4							1.18
-S-3(D10)	35.0	368	516	235.2	199.8	1.17	155	1835	152.3	1.02	
-S-4(D10)				240.2							1.20
-R-1(D10)	32.0	370	511	170.0	191.1	0.89	115	1845	145.4	0.79	
-R-2(D10)				170.4							0.89
-R-3(D10)	35.0	368	516	172.5	199.8	0.86	115	1796	152.3	0.76	
-R-4(D10)				171.5							0.86

ている。その後の荷重増加では、著しくひずみが増加した。本供試体は主鉄筋のひずみの増加に比して、配力筋のひずみの増加が著しい結果となった。ここで、主鉄筋と配力筋のひずみの平均値による降伏荷重とひずみを表 - 3 に示す。

5 . RC 押抜きせん断耐荷力

RC 床版の静的耐荷力は、一般に押抜きせん断耐荷力として評価される場合が多い。RC 床版の押抜きせん断耐荷力は、多くの研究者により実験研究が行われ、破壊メカニズム、押抜きせん断耐荷力式が提案されてきた。本研究では RC 床版の押抜きせん断耐荷力式に土木学会式³⁾を適用して実験値との整合性を評価する。

5.1 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荷力は式(1)として与えられている。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_\gamma \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

ただし、

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad ; \quad p = A_s / bd$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p}$$

$$\beta_\gamma = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}}$$

$$u_p = u + 2\pi \cdot d/2$$

ここで、 β_d ：寸法効果の係数、 β_γ ：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_{pcd} ：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、 f'_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度(本研究における 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)

本実験における理論押し抜きせん断耐荷力式(式(1))の寸法効果の係数 β_d は 1.5 を超える場合は、 $\beta_p = 1.5$ とする。

本研究における破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力の算出にはコンクリートの材料係数 γ_c 、鋼材の材料係数 γ_s および部材係数 γ_b を、それぞれ 1.0 とする。また、設計押抜きせん断耐荷力の算出には、コンクリートには材料係数 γ_c を 1.3、鋼材の材料係数 γ_s を 1.0、部材係数 γ_b を 1.15 として算出した。土木学会式を適用した場合の押抜きせん断耐荷力を表 - 3 に併記した。

土木学会式を適用した静荷重実験における破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力は供試体 S-1,2 が 191.1kN、供試体 S-3,4 が 199.8kN であり、実験耐

荷力と比較すると、実験値が 1.15 倍～1.20 倍となり、安全側となった。また、安全率を適用して算出した設計押抜きせん断耐荷力は供試体 S-1,2 および供試体 S-3,4 で、それぞれ 145.4kN、152.3kN であり、表 - 3 に示した鉄筋の降伏荷重付近の押抜きせん断耐荷力となった。

次に、走行荷重実験における破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力と実験耐荷力との耐荷力比は、供試体 R-1,2、R-3,4 でそれぞれ 0.89, 0.86 となり、実験耐荷力が下回る結果となった。また、設計押抜きせん断耐荷力と鉄筋の降伏荷重付近の耐荷力との比は供試体 R-1,2、供試体 R-3,4 でそれぞれ 0.76、0.79 となり、実験値が大幅に下まわった。

以上より、土木学会式は静荷重実験における押抜きせん断耐荷力は安全側に設定されているが、走行荷重が作用した場合の押抜きせん断耐荷力は実験値が大幅に下回ることから、走行荷重による貫通ひび割れ、すなわちはり状の影響を考慮した載荷面の周長を考慮する必要がある。

6 . まとめ

RC 床版に対する静荷重による破壊モードは、輪荷重の載荷面から 45° の角度で拡がりを持つ押抜きせん断破壊となった。また、走行荷重の場合も同様に押抜きせん断破壊となった。静荷重実験における押抜きせん断耐荷力と走行荷重が作用した場合の押抜きせん断耐荷力を比較すると、走行荷重が作用することにより 24～28%耐荷力が低下した。

土木学会式による押抜きせん断耐荷力と実験耐荷力を比較すると、静荷重実験の場合材料係数および部材係数を 1.0 として算出した場合は近似した。また、材料係数を 1.3、部材係数を 1.15 を適用した設計押抜きせん断耐荷力も近似した。しかし、走行荷重が作用した場合の理論押抜きせん断耐荷力は実験値が理論値を大幅に下回る結果となった。

参考文献

- 1) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説
- 2) (社)土木学会性能照査設計分科会：道路橋床版の性能照査型設計、道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上、pp. 65-93, 2004.
- 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.
- 4) 阿部忠、木田哲量、高野真希子、澤野利章、加藤清志：静荷重・走行荷重を受ける RC 床版の押し抜きせん断耐力、構造工学論文集、Vol. 50A、pp. 919-926、2004.