

道路橋RC床版の設計法および面外せん断耐荷力評価式に関する一考察

生産工 木田哲量 阿部 忠 澤野利章 水口和彦

1. はじめに

鋼道路橋 RC 床版の設計法は、これ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性能照査型設計法へと改訂されている^{1), 2)}。性能照査型設計法は、公共施設の品質の確保、技術基準類の国際化への対応、客観性の確保などに有効とされ、その設計手法の具体化が進められている³⁾。

そこで本研究では、鋼道路橋の RC 床版の性能照査型設計法を合理的にするために、①道示Ⅱの規定に基づく許容応力度設計法および伸縮継手の段差によって発生する動的影響を考慮した活荷重曲げモーメントによる設計法、② RC 部材の使用限界状態および終局限界状態設計法による RC 床版の曲げ耐力、③面外せん断力に対する押抜きせん断耐荷力を土木学会式、道示Ⅲ、筆者らの提案式を適用した設計法、について考察し、道路橋 RC 床版の耐荷力性能における設計法の確立への一助とする。

2. 動的影響を適用した単純版の曲げモーメント

道示Ⅱでは、衝撃係数を含めた活荷重曲げモーメント式が規定されている。本研究では、伸縮継ぎ手の段差によって発生する荷重変動の影響を考慮した動的影響係数 α_i を適用した活荷重曲げモーメント式とする。走行振動荷重による動的影響を示す動的影響係数⁴⁾を考慮した活荷重 $P_{(1+\alpha i)}$ は、式(1)として与えられる。

$$P_{(1+\alpha i)} = P(1+\alpha_i) \quad (1)$$

ただし、 $K_v \leq K_i$; $\alpha_i = i$

$$K_i < K_v; \alpha_i = 0.050K_v^{0.675}$$

$$K_i = -0.20L + 20.8$$

$$i = 20 / (50 + L)$$

ここに、 $P_{(1+\alpha i)}$: RC 床版の動的影響係数を含む設計荷重(kN)、 P : 設計活荷重(= 100kN)、 α_i : 動的影響係数、 K_v : 荷重変動率 (例えば、段差 2cm の場合 30 %、段差 3cm の場合 40 %)、 K_i : 基準荷重振幅、 L : 床版設計支間、 i : 道示Ⅰに規定する衝撃係数

したがって、道示Ⅱの規定する活荷重曲げモーメント式に動的影響係数 α_i および割増係数 K_α を適用した場合の曲げモーメント式は、主鉄筋方向が式(2.1)、配力筋方向は式(2.2)となる。

$$M_{L(1+i)K_\alpha} = (0.088L + 0.048)P_{L(1+\alpha i)} \cdot K_\alpha \quad (2.1)$$

$$M_{L(1+i)} = (0.075L + 0.024)P_{L(1+\alpha i)} \quad (2.2)$$

ここに、 L : 設計支間、 $P_{L(1+\alpha i)}$: 動的影響を含む設計荷重、 K_α : 割増係数

3. RC床版の設計条件

3.1 設計条件

床版の区分 ; 単純版

床版の支間 ; 2.0m (単純版)

計画交通量 ; 500 台未満/1 日 1 方向

荷 重 ; T 荷重 (= 100kN)

荷重変動率 ; $K_v = 20 \%, 30 \%, 40 \%$ (荷重振幅と伸縮継手の段差の関係は今後の課題とする)

コンクリート設計基準強度 ; $\sigma_{ck} = 30\text{N/mm}^2$

使用鉄筋 ; SD295A, D16 ($f_{yd} = f_{yd} = 295\text{N/mm}^2$, $f_y = f_y = 440\text{N/mm}^2$)¹⁾

3.2 道示Ⅱの規定による許容応力度設計法

(1) 道示Ⅱの規定に基づいた設計

RC 床版の死荷重曲げモーメント M_d は単純版として設計することから、式(3)として与える。

$$M_d = w_d L^2 / 8 \quad (3)$$

ここに、 w_d : 単位幅あたりの死荷重、 L : 設計支間
道示Ⅱは、許容応力度設計法であることからコンクリートの許容圧縮応力度 σ_{ca} は $\sigma_{ca} = \sigma_{ck} / 3$ とし、鉄筋の許容引張応力度 σ_{sa} は 140N/mm^2 である。なお σ_{ck}

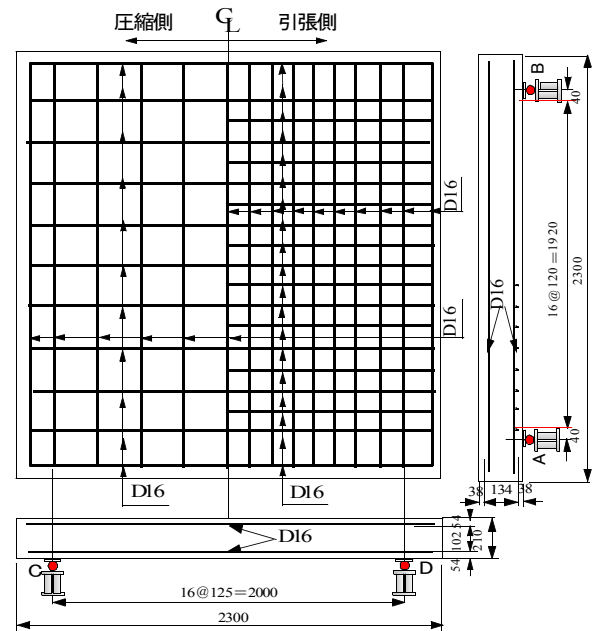


図-1 RC床版寸法および鉄筋間隔 (道示Ⅱ)

Estimate Equations of Transverse Shear Load-Carrying capacity
and Design Method of RC Slab of Highway Bridge

by

Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE, Toshiaki SAWANO and Kazuhiko MINAKUCHI

表－1 道示Ⅱ，および動的影響係数 K_v を考慮したRC床版の設計値

		条件		曲げモーメント(kN・m/m)				鉄筋量(mm ²)		鉄筋応力度≦許容応力度	
		支間	床版厚	主鉄筋		配力筋		主鉄筋	配力筋	主鉄筋	配力筋
		L(cm)	t(cm)	M ₀	Σ M	M _{L(1+μ)}	M _{L(1+μ)}	A _s	A _s '	σ _s	σ _s
動的影響係数を適用	道示Ⅱ	200	21	3.495	31.000	34.495	24.000	1655	1588	140N/mm ² ≦140N/mm ²	115N/mm ² ≦140N/mm ²
	$K_v=20\%$ 未満	200	21	3.495	31.015	34.510	24.092	1655	1588	140N/mm ² ≦140N/mm ²	115N/mm ² ≦140N/mm ²
	$K_v=20\%\sim 30\%$ 未満	200	21	3.495	33.533	37.028	26.048	1805	1588	138N/mm ² ≦140N/mm ²	124N/mm ² ≦140N/mm ²
	$K_v=30\%\sim 40\%$ 未満	200	21	3.495	36.042	39.537	27.997	1986	1588	135N/mm ² ≦140N/mm ²	133N/mm ² ≦140N/mm ²

表－2 使用限界状態および終局限界状態における曲げ耐力

		条件		コンクリート 圧縮強度 N/mm ²	曲げモーメント (kN・m/m) Σ M	鉄筋量(mm ²)		使用限界状態 (kN・m/m)		終局限界状態 (kN・m/m)	
		支間	床版厚			引張筋	圧縮筋	M _{uj}	M _{uj} /Σ M	M _{uj}	M _{uj} /Σ M
		L(cm)	t(cm)			A _s	A _s '				
動的影響係数を適用	道示Ⅱ	200	21	30	34.495	1655	828	35.60	1.03	54.86	1.59
	$K_v=20\%$ 未満	200	21		34.510	1655	828	35.60	1.03	54.86	1.59
	$K_v=20\%\sim 30\%$ 未満	200	21		37.028	1805	903	38.66	1.04	59.71	1.61
	$K_v=30\%\sim 40\%$ 未満	200	21		39.537	1986	993	42.32	1.07	65.55	1.66

はコンクリートの設計基準強度である。道示Ⅱに基づいて設計した RC 床版の設計値を表－1に示す。また、道示Ⅱの規定に基づいて設計した RC 床版の寸法および鉄筋配置を図－1に示す。

RC 床版の最小厚さは、1 日 1 方向当たり 500 台未満の場合の 21cm である。主鉄筋は D16 (SD295A) を 12cm 間隔、配力筋は D16 を 12.5cm 間隔とした。

(2) 動的影響係数を考慮した荷重による設計法

伸縮継手の段差を考慮した場合、すなわち床版の動的影響係数 K_v を含む設計荷重を適用した主鉄筋方向の単位幅あたりの活荷重曲げモーメントは式(2.1)、配力筋方向を式(2.2)より算出する。この場合の荷重変動率 K_v は、20 %，30 %，40 %とする。

この、動的影響係数を考慮した場合の RC 床版の設計値を表－1に併記した。動的影響係数 $K_v = 20\%$ の場合は道示Ⅱの結果と同様である。 $K_v = 30\%$ の主鉄筋の間隔は 11cm，40 %の場合は 10cm 間隔となった。

3.3 使用限界および終局限界状態設計法の適用⁵⁾

RC 構造物の設計法は限界状態設計法へと移行されている。そこで、RC 床版の使用限界状態および終局限界状態における曲げ耐力についても検討する必要がある。したがって、道示Ⅱおよび動的影響係数を適用した場合の曲げモーメントより算出した鉄筋量および配置をもとに幅 1m 当たりの複鉄筋長方形断面として設計活荷重曲げモーメントと使用限界および終局限界における曲げ耐力を比較する。

(1) 使用限界状態の設計曲げ耐力⁷⁾

1) 中立軸の位置：x

使用限界状態における中立軸の位置は式(4)として与えられている。

$$x = -n(A_s + A'_s)/b + \sqrt{\{n(A_s + A'_s)/b\}^2 + 2n/b(dA_s + d'A'_s)} \quad (4)$$

ここで、x：中立軸の位置， A_s ， A'_s ：引張および圧縮鉄筋量，b：部材幅(100cm)，n：鉄筋とコンクリートのヤング係数比(=7.1)，d：有効高さ， d' ：圧縮鉄筋のかぶり

2) 使用限界状態における抵抗曲げモーメント： M_R

使用限界状態におけるコンクリートの抵抗曲げモーメント M_{rc} と鉄筋の抵抗曲げモーメント M_{rs} は、それぞれ式(5)，(6)として与えられている。使用限界状態における抵抗曲げモーメント M_R は、コンクリートの抵抗曲げモーメント M_{rc} と鉄筋の抵抗曲げモーメント M_{rs} を比較して小さい方とする。

$$M_{rc} = \sigma_{ca} \{bx/2(d - x/3) + nA'_s \{(x - d')/x\}(d - d')\} \quad (5)$$

$$M_{rs} = \sigma_{sa} [bx^2(d - x/3) + 2nA'_s (x - d')(d - d')/\{2n(d - x)\}] \quad (6)$$

ここで、x：中立軸の位置，b：部材幅(100cm)，n：鉄筋とコンクリートのヤング係数比(= $E_c/E_s = 7.1$)， A_s ， A'_s ：引張および圧縮鉄筋量， σ_{ca} ：コンクリートの圧縮許容応力度(= $\sigma_{ck}/3$)， σ_{sa} ：鉄筋の許容応力度(= 140N/mm²)

この RC 床版の場合は、鉄筋の抵抗曲げモーメントが小さいことから M_{rs} を抵抗曲げモーメント M_R とし、表－2に示す。表－2より、使用限界状態設計法における曲げ耐力は理論曲げ耐力に比して、道示Ⅱおよび動的影響 $K_v = 20\%$ は使用限界状態が 1.03 倍となり、 $K_v = 30\%$ ，40 %の場合は、それぞれ 1.04，107 倍となり安全側となった。

(2) 終局限界状態の設計曲げ耐力

1) 等価応力ブロックの大きさ：a

等価応力ブロックの大きさは、圧縮鉄筋が降伏した場合と降伏しない場合について算出されるが、RC 床版の場合は破壊時においても圧縮鉄筋は降伏することはない。この場合にも圧縮鉄筋が降伏しない場合の等価応力ブロックを算出する。よって、圧縮鉄筋が降伏しない場合の等価応力ブロック a は、式(7)として与えられている。

$$a/d = m/2[p - p'(\epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_{yd}) + \sqrt{\{p - p'(\epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_{yd})\}^2 + p' \cdot 4\beta/m \cdot d'/d \cdot \epsilon'_{cu} \cdot E'_s/f_{yd}}] \quad (7)$$

ただし、

$$m = f_{yd}/0.85f_{cd}, \quad p = A_s/bd, \quad p' = A'_s/bd$$

ここで、d：有効高， f_{cd} ：コンクリートの設計圧縮強度(= σ_{ck}/γ_c ，(N/mm²))， E_s ， E'_s ：引張鉄筋のヤ

ング係数, E_s : 圧縮鉄筋のヤング係数, ϵ'_{cu} : 終局ひずみ ($= 0.0035$), γ_c : コンクリートの部材係数 ($= 1.3$)

2) 終局状態における設計曲げ耐力: M_{ud}

複鉄筋長方形断面の強度は引張鉄筋量 A_{sl} を持つ単鉄筋長方形断面の強度と, $A'_s \cdot f_{yd} \cdot (d - d') = A_{s2} \cdot f_{yd} \cdot (d - d')$ の偶力による強度との和と近似する. よって, 設計曲げ耐力は式(8)として与えられる.

$$M_{ud} = \{(A_s \cdot f_{yd} - A'_s \cdot f_{yd})(d - a/2) + A'_s \cdot f_{yd}(d - d')\} / \gamma_b \quad (8)$$

ここで, f_{yd} , f_{yd} : 鉄筋の降伏強度 (N/mm^2), A_s , A'_s : 鉄筋量, d : 有効高さ, d' : 圧縮縁から圧縮鉄筋の図心までの距離, b : 部材幅 (100cm), γ_s : 鋼材の材料係数 ($= 1.0$), γ_b : 部材係数 ($= 1.3$)

終局状態設計法における曲げ耐力は理論活荷重曲げモーメントに対して道示Ⅱおよび的影響 $K_v = 20\%$ が 1.59 倍, $K_v = 30\%$, 40% の場合は, それぞれ 1.61, 1.66 倍となり, かなり安全側となった.

3.4 押抜きせん断耐力^{1), 5), 6)}

面外せん断力に対する照査は, 押抜きせん断耐力をもって評価する. 押抜きせん断耐力の評価は, 土木学会式, 道示Ⅲ, 筆者らが提案する押抜きせん断耐力式より算出する.

(1) 土木学会式による押抜きせん断耐力⁵⁾

コンクリート標準示方書による RC 床版の押抜きせん断耐力は式(9), (10)として与えられている.

$$V_{pu} = V_{us} \quad (9)$$

$$V_{us} = \beta_d \cdot \beta_r \cdot \beta_p \cdot f_{pc} \cdot u_p \cdot d / \gamma_b \quad (10)$$

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

これによって, 算出したせん断耐力を表-3に示す. RC 床版の支間全体の鉄筋量を考慮すると, 押抜きせん断耐力は設計荷重の約 5 倍となり, 面外せん断力の照査は必要がないと考えられる. そこで, 有効幅を主鉄筋方向および配力筋方向それぞれ 1m あたりとして算出した. 設計荷重 $P_{L(1+ul)} \cdot K_a$ と土木学会式による押抜きせん断耐力 V_{pu} を比較すると, 道示Ⅱ規定に動的影響を考慮した $K_v = 20\%$ が 3.92 倍, $K_v = 30\%$, 40% の場合は, それぞれ 3.82 倍, 3.78 倍となり, 安全側となった.

(2) 道示Ⅲ¹⁾

道示Ⅲでは, 活荷重に対する床版の押抜きせん断耐力の照査が規定されている. そこで, 道示Ⅲに規定する押抜きせん断耐力を用いた, 押抜きせん

断耐力 P_u は式(11)として与えられる.

$$P_u = \tau_{cp} \cdot d_p \cdot d \quad (11)$$

ここで, P_u : 押抜きせん断耐力, τ_{cp} : 押抜きせん断許容応力度 ($= 1.0N/mm^2$), d_p : 断面の分布形状を部材の有効高の $1/2$ の距離だけ離れた面へ 45° の角度で投影した形状の外周の長さ (mm)

これらから算出した道示Ⅲに規定する押抜きせん断耐力を表-3に併記した. その結果, 道示Ⅲによる押抜きせん断耐力 P_u と土木学会式による押抜きせん断耐力 V_{pu} を比較すると道示Ⅱ規定に動的影響を考慮した $K_v = 20\%$ が 2.27 倍, $K_v = 30\%$, 40% の場合は, それぞれ 2.10, 1.95 倍となり, 土木学会式と大幅な差が生じた.

(3) 文献6)による押抜きせん断耐力

1) 静荷重の場合

ここでは, 主鉄筋が降伏する荷重付近の押抜きせん断耐力を検討する. そこで, コンクリートのせん断強度の影響とダウエル効果を考慮した押抜きせん断破壊モデルを図-2とする. また, 押抜きせん断耐力 V_{cp} は式(12)として与える. なお, 等価応力ブロック a は, 床版有効幅を 1m あたりとして主鉄筋方向 a_x および配力筋方向 a_y を式(7)より算出し, その平均値 a として式(12)に適用する.

$$V_{cp} = [f_{cv0} \{2(B+2a_x)a_x + 2(A \times a_x)\} + f_i \{2(4C_x + 2d_d + B)C_x + 2(A + 2d_d)C_x\}] / \gamma_b \quad (12)$$

$$f_{cv0} = 0.688 f_c^{0.610} \leq f_c = 80N/mm^2$$

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

ここで, A , B : 載荷板の主鉄筋, 配力筋方向の辺長 (mm), a_x : 主鉄筋 (a_x) と配力筋方向 (a_y) の等価応力ブロックの大きさの平均 ($= (a_x + a_y) / 2$), f_{cv0} : コンクリートのせん断強度 (N/mm^2)⁶⁾, f_i : コンクリート引張強度 (N/mm^2)⁸⁾, C_x : ダウエル効果の及ぼす影響範囲 ($= C'_d \times f_{yd} / f_y$) (mm), C'_d : 主鉄筋 (d'_x) と配力筋方向のかぶり (d'_y) の平均 ($= (d'_x + d'_y) / 2$) (mm), H : 床版厚さ (mm), f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

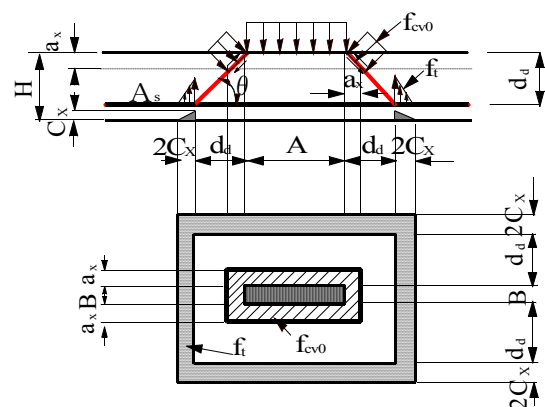


図-2 降伏荷重付近の押抜きせん断力学モデル (静荷重)

表-3 設計荷重 $P_{L(1+\alpha I)} \cdot K_\alpha$ と押抜きせん断耐力

		条件		設計荷重		鉄筋量(mm ²)		押抜きせん断耐力式(kN)		
		支間	床版厚	$P_{L(1+\alpha I) \cdot K \alpha}$	主鉄筋	配力筋	土木学会式	道示Ⅲ	静荷重	走行荷重
		L(cm)	t(cm)		kN	A_s (mm ²)				
道示Ⅱ		200	21	138.46	1588	1588	542.8	314.3	316.9	263.8
動的影響係数を適用	$K_v=20\%$ 未満	200	21	138.46	1588	1588	542.8		316.9	263.8
	$K_v=20\% \sim 30\%$ 未満	200	21	149.70	1805	1805	571.3		321.8	278.2
	$K_v=30\% \sim 40\%$ 未満	200	21	160.90	1986	1986	607.8		325.6	289.7

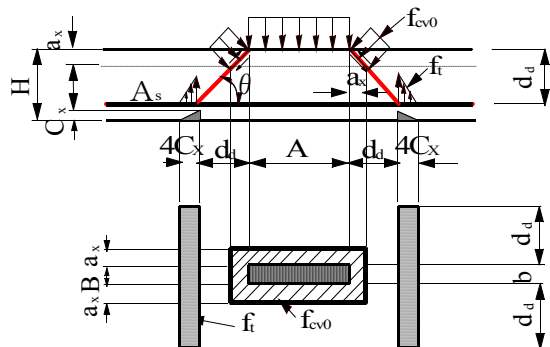


図-3 降伏荷重付近の押抜きせん断力学モデル(走行荷重)

静荷重の場合の主鉄筋が降伏する荷重付近の押抜きせん断耐力を式(12)より算出した結果を表-3に示す。その結果、設計活荷重 $P_{L(1+\alpha I)} \cdot K_\alpha$ と押抜きせん断耐力 V_{pu} (式(12))を比較すると道示Ⅱ規定に動的影響を考慮した $K_v = 20\%$ が2.29倍、 $K_v = 30\%$ 、 40% の場合は、それぞれ2.15、2.02倍となり、安全側となった。道示Ⅲによる押抜きせん断耐力と文献6)による押抜きせん断耐力は、ほぼ近似した結果が得られた。

2) 走行荷重の場合⁹⁾

走行荷重が作用する場合の弾性域の押抜きせん断耐力は、コンクリートのせん断強度の影響による押抜きせん断耐力式とダウエル効果の影響による押抜きせん断耐力式を合計することによって得られる。よって、降伏強度付近の押抜きせん断力学モデルを図-3に示し、押抜きせん断耐力式は、式(13)として与えられる。

$$V_{cp} = [f_{cv0} \{2(B+2a_x)a_x + 2(A \times a_x)\} + f_t \{4C_x(2d_d+B)\}] / \gamma_b \quad (13)$$

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

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

$$C_x = C'_d \cdot f_{yd} / f_y$$

走行荷重、すなわち輪荷重が走行することによって発生する貫通ひび割れを考慮したRC床版の引張主鉄筋が降伏する荷重付近の押抜きせん断耐力を式(13)より算出した結果を表-3に示す。この場合の設計活荷重と走行荷重によるひび割れ幅を考慮した押抜きせん断耐力 V_{pu} を比較すると、道示Ⅱ規定の動的影響を考慮した $K_v = 20\%$ が1.91倍、 $K_v = 30\%$ 、 40% の場合は、それぞれ1.86、1.80倍となった。静的押抜きせん断耐力と比較すると、走行荷重の場合

合が道示Ⅱ規定の動的影響を考慮した $K_v = 20\%$ 、 $K_v = 30\%$ で0.86倍、 $K_v = 40\%$ の場合で0.89倍となり、平均で約13%の低下がみられる。

4. まとめ

- ①道示Ⅱの規定による活荷重曲げモーメントと使用限界状態設計法による抵抗曲げモーメントを比較すると、道示Ⅱ規定に動的影響を考慮した $K_v = 20\%$ の場合は1.03倍、 $K_v = 30\%$ の場合は1.04倍、 $K_v = 40\%$ の場合は1.07倍となった。動的影響を示す段差量が大きくなる場合は、鉄筋量の割増しの他に、床版厚の検討も必要となる。また、終局状態における曲げ耐力の場合は使用鉄筋量 A_s が支配的となるので、鉄筋量を多くすることにより終局曲げ耐力も向上した。
- ②面外せん断力の照査については、押抜きせん断耐力に土木学会式、道示Ⅲ、文献6)に示す実験式を基に算出した。土木学会式は、床版支間と辺長を1:1とした場合は設計荷重の6~7倍の押抜きせん断耐力となる。そこで、鉄筋量を幅1m当たりとして算出したが、その場合も設計活荷重の3.8~3.9倍となる。また、道示Ⅲの場合は2.0~2.3倍、文献6)の場合は2.0~2.3倍となり、道示Ⅲと文献6)の押抜きせん断耐力は近似した結果が得られた。文献9)は走行荷重による貫通ひび割れ幅を考慮した押抜きせん断耐力であり、設計荷重に対しては1.80~1.91倍となった。

参考文献

- 1) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、2002。
- 2) 鋼・合成構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編、土木学会、2007。
- 3) (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、pp. 65-93 (2004)
- 4) 阿部忠、木田哲量、星埜正明、加藤清志、徐銘謙：走行振動荷重を受けるRCはり・床版の耐力および動的影響に関する実験研究、土木学会論文集、No. 808/I-74、pp. 33-45(2006)
- 5) 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)
- 6) 阿部忠、木田哲量、徐銘謙、澤野利章：道路橋RC床版の押抜きせん断耐力評価式に関する研究、構造工学論文集(日本学術会議・土木学会)、Vol. 53A、pp. 199-207(2007)
- 7) 加藤清志、河合紘茲、加藤直樹：鉄筋コンクリート工学、1999
- 8) 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。
- 9) 阿部忠、木田哲量、徐銘謙、澤野利章：限界状態設計法を適用した走行荷重が作用するRC床版の押抜きせん断耐力、第56回理論応用力学講演会 pp. 373-374