道路橋RC床版の押抜きせん断耐荷力評価式に関する研究

Evaluation Formula on Punching Shear Load-Carrying Capacity of RC Slabs in Highway Bridges

阿部忠*,木田哲量**,徐 銘謙***,澤野利章****, Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Ming-Chien HSU and Toshiaki SWANO

*博(工),日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1) **工博,日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1) ***博(工),日本大学 大学生産工学部 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1) ****工博,日本大学助教授 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

Abstract : The present paper deals with the evaluation formula for the punching shear load-carrying capacity of RC slabs in the highway bridge by applying the ultimate limit state design method. The testing specimens of three types were prepared on the basis of the Specifications for Highway Bridges of Japan. The theoretical model and the load-carrying capacity equation for the punching shear have been determined due to the failure modes and the strains detected on the rebars ; so, the estimated values by the proposed equation considering the ultimate limit state design method agreed well to the experimental results. Thus, the design live load can be obtained by application of the material and member factors to the estimated punching shear load-carrying capacity.

Key words: RC Slab, Static Load, Punching Shear Failure Model, Punching Shear Load-Capacity キーワード: RC床版,静荷重,押抜きせん断破壊モデル,押抜きせん断耐荷力

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関わる性能を明確に示すこ とができる設計手法である.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),3)}.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³⁾.

道路橋 RC 床版は,大型自動車の輪荷重を直接支持 し,この場合の耐荷力性能は一般的に押抜きせん断耐 荷力として評価される場合が多い.RC 床版の押抜きせ ん断破壊への影響因子は,コンクリートの圧縮強度,有 効高,鉄筋比,載荷版の周長などが考えられる.これら の影響因子は押抜きせん断耐荷力式の提案者によって, その適用方法がそれぞれ異なっている.

そこで本研究では,道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐 荷力の主要影響因子であるコンクリートの圧縮強度,有 効高,鉄筋比が異なる3タイプの RC 床版供試体を用い て,静的押抜きせん断実験を行い,破壊状況から押抜き せん断破壊モデルを提案するとともに,荷重とひずみの 関係から終局限界状態における降伏強度付近,引張強度 付近および破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力式を提案 した.また,提案する押抜きせん断耐荷力式による理論 値と実験値との整合性,ならびに楊,浜田ら ⁴(以下, 文献4)とする)の RC 床版供試体の場合との整合性を検 証し,道路橋 RC 床版の耐荷力性能における押抜きせん 断耐荷力式の確立への一助とする.

2.供試体の使用材料・寸法および実験方法

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 20 mmの粗骨材を使用した.また,タイプ の鉄筋には SD295A の D10,タイプ には SD295A の D13 を使用し,タイプ には SD295A の D10 を使用した. タイプ の供試体名称を -S-1,2,タイプ を -S-1 と し,タイプ の名称を -S-1,2,3,4とした.本実験に 用いた材料の力学特性値を表 - 1に示す.供試体 につい て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.

	コンクリート	鉄 筋 (SD295A)				設計支閉 床間	床版回	有効高	mm 1m ² 当たりの鉄館		
供試体	圧 縮 強 度 N/mm ²	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	mm	mm	軸直角 方向	軸方向	引張 A _s (mm ²)	圧縮 A' _s (mm ²)
-S-1 -S-2	30.0 30.0	D10	365	510	200	1200.0	110.0	90.0	80.0	713.0	356.5
-S-1	27.0	D13	371	506	200	1200.0	110.0	90.0	80.0	995.0	497.5
-S-1 -S-2	32.0 32.0	D10	370	511	200	1200.0	130.0	105.0	95.0	713.0	356.5
-S-3 -S-4	35.0 35.0		368	516	200					713.0	356.5
20-A _s -1 20-A _s -2	24.9	D10	-	-	-	1300.0	130.0	100.0	90.0	427.8	427.8
20-1/2A _S -1 20-1/2A _S -1	34.7 32.5	D10	-	-	-	1300.0	130.0	100.0	90.0	427.8	213.9

表 - 1 材料特性値および供試体概要



図 - 1 供試体寸法および鉄筋配置

2.2 供試体寸法および鉄筋の配置

タイプ , の供試体寸法は,道路橋示方書・同解説 (以下,道示 とする)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500台未満,タイプ は 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 量を算出して配置し,供試体寸法および鉄筋配置を1/2 モデルとした.なお,タイプ は鉄筋比の影響も考慮す ることからタイプ の1.4 倍の鉄筋量とした.

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 - 1に示す.供試体の詳細は以下に示すとおりである.

タイプ の供試体は全長を 147cm,支間 120cm の等方 性版とし,鉄筋は複鉄筋配置とした.引張側の主鉄筋は D10を10cm間隔で配置し,配力筋は12cm間隔で配置し た.有効高さをそれぞれ9cm,8cmとし,圧縮側には引 張鉄筋量の1/2を配置した. タイプ の供試体の寸法はタイプ と同様であるが, 鉄筋に D13 を用い,配置はタイプ と同様とした.

タイプ の供試体は,全長および支間がタイプ , と同様の 120cm とし,床版厚さを 13cm とした.鉄筋は D10 を複鉄筋配置とし,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 を配置する. 2.3 文献4)に示す供試体

本研究は押抜きせん断破壊モデルおよび耐荷力式の妥 当性を評価するために,文献4)に示す RC 床版の押抜き せん断実験に用いた供試体を本研究で提案する理論式に 適用する.

文献4)に示す供試体の材料は,本供試体に用いた材料 と同等で,コンクリートには普通ポルトランドセメント と最大粗骨材寸法20mmを用いている.鉄筋はSD295A, D10を用いている.供試体寸法は,全長を150cm,支間 130cmの等方性版とし,鉄筋は複鉄筋配置である.引張 側の軸直角方向および軸方向ともに 15cm 間隔で配置し, 有効高さをそれぞれ 10cm,9cm としている.供試体の名 称は骨材寸法を基準に,引張鉄筋と圧縮鉄筋を1:1 に配 置した供試体を 20-As-1,2 とし,引張鉄筋と圧縮鉄筋を1 :0.5 として配置した供試体を 20-1/2As-1,2 としている. また,供試体は4辺単純支持としている.供試体の材料 特性値および供試体概要を表-1に併記した.なお,鉄筋 の材料特性値は不明である.

2.4 RC床版の押抜きせん断実験

RC 床版の押抜きせん断実験は,図-1に示すように, 接地面 250×40mm の輪荷重を床版の支間中央に載荷し て,静荷重実験を行う.静荷重実験における荷重の大き さは 5.0kN ずつ増加する段階荷重とした.なお,文献4) に示す供試体は床版中央に 100×100mm の載荷板を設置 し,荷重は 5.0kN づつ増加する静荷重実験である.

3.実験結果

3.1 実験押抜きせん断耐荷力

本実験における RC 床版の実験耐荷力を表 - 2に示す. 静荷重実験における最大耐荷力の平均値は,タイプの場合 174.3kN,タイプの場合は 196.0kN である.タイプの鉄筋量をタイプの1.4 倍配置したことから耐荷力が1.15 倍となった.また,タイプの供試体 -S-1,2 の場合は 223.4kN,供試体 -S-3,4 の場合は 237.7kN である.この最大耐荷力は破壊荷重付近の押抜きせん耐荷力である.なお,タイプ における最大耐荷力の差はコンクリートの圧縮強度の差によるものである.

次に, 文献 4)における最大耐荷力の平均は,供試体 20-Asは171.5kN であり, 20-1/2Asが165.6kN である.こ れによると,コンクリートの圧縮強度が高い供試体 20-1/2Asに比して鉄筋配置を圧縮側と引張側を1:1 で配 置した供試体 20-Asの耐荷力が上回っている.

3.2 破壊状況

本実験の破壊時における底面のひび割れ状況の一例を 図 - 2に示す.また,タイプの床版中央部における軸直

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
-S-1(D10)	165.3	167.8	押し抜きせん断破壊
-S-2(D10)	170.2	107.8	押し抜きせん断破壊
-S-1(D13)	196.3	196.0	押し抜きせん断破壊
-S-1(D10)	225.4	223 /	押し抜きせん断破壊
-S-2(D10)	221.3	223.4	押し抜きせん断破壊
-S-3(D10)	235.2	237.7	押し抜きせん断破壊
-S-4(D10)	240.2	237.7	押し抜きせん断破壊
20-A _s -1(D10)	171.5	171.5	押し抜きせん断破壊
20-A _s -2(D10)	1/1.5	1/1.5	押し抜きせん断破壊
20-1/2A _S -1(D10)	165.6	165.6	押し抜きせん断破壊
20-1/2As-2(D10)	105.0	105.0	押し抜きせん断破壊

角方向の切断面(a-a断面)の破壊状況を写真 - 1に示す.

タイプ の供試体 -S-1 の破壊状況は, 車輪の接地面 (25cm×4cm)から床版底面方向に 45 度の拡がりで分布 し,底面コンクリートははく離破壊し,これはダウエル 効果によるものである.次に,タイプ の供試体 -S-1 の鉄筋には D13 を使用したが,破壊状況は D10 を使用し た場合とほぼ同様の破壊状況である.タイプ の場合も タイプ , と同様に引張鉄筋のかぶりコンクリートが はく離破壊している.断面の破壊状況をタイプ におけ る軸直角方向の切断面 a-a (写真 - 1)より,輪荷重の接 地面から床版底面方向に45度の傾斜でせん断破壊してい ることが分かる.また,軸直角方向に配置した引張鉄筋 のかぶりコンクリートははく離破壊している.これは, ダウエル効果によるものである.したがって,本供試体 の押抜きせん断破壊モデルは図 - 2に示した底面の破壊状 況と写真 - 1に示した切断面の破壊状況が,松井ら 5,0が 提案する押抜きせん断破壊モデルと同様であることから, 載荷板から 45 度で分布するものとし,引張鉄筋のかぶり 内はダウエル効果を考慮して, 押抜きせん断破壊モデル を仮定する.

3.3 荷重とひずみの関係

本実験における供試体中央に配置したの主鉄筋の荷重



(1) タイプ



(2) タイプ 図 - 2 破壊状況の一例

Ⅲ-8-1



(3)タイプ





写真 - 1 軸直角方向の破壊断面の一例(タイプ)

とひずみの関係をタイプ , の場合は図 - 3(1),タイ プ は図 - 3(2)に示す.なお,本実験における引張鉄筋 の降伏ひずみは表 - 1 に示した材料特性値より,タイプ が 1825×10⁶,タイプ が 1855×10⁶ である.また,タ イプ -S-1,2 が 1850×10⁶, -S-3,4 が 1840×10⁶ であ る.この降伏ひずみと荷重の関係から降伏荷重付近の押 抜きせん断破壊モデルと耐荷力式を提案する.次に,引 張強度に達したひずみはタイプ が 2550×10⁶, -S-3 が 2530×10°である.タイプ -S-1,2が2555×10°, -S-3,4 が2580×10°である.このひずみ値と荷重の関係から引張 強度付近の押抜きせん断耐荷力を算定する.ここで,降 伏ひずみおよび引張強度のひずみ値を図-3に示す. (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-3,1) より,タイプ は荷重 110kN 付近で降伏し,荷重 130kN 付近で引張強度に達している.その後の荷重増加におい ても線形的に増加し,荷重 150kN 付近からひずみは急激 に増加している.また,タイプ の場合はタイプ に対 して 1.4 倍の鉄筋量を配置したことから降伏荷重は 170kN であり,破壊荷重付近まで線形的に増加している. 次に,タイプ の場合はタイプ に比して鉄筋量も多く 配置したことから引張強度付近まで線形的に増加する が,引張強度に達した付近の荷重からひずみの増加が著 しくなった.

(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 - 3 2)より, タイプ , ともに引張強度付近まではほぼ線形的に増



加するものの,その後の荷重増加においてはひずみの増 加が著しい.タイプの場合に対して引張強度付近まで は線形的に増加し,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.

(3)主鉄筋と配力筋の平均ひずみ

理論耐力荷式を解析するためには,引張側の主鉄筋お よび配力筋のひずみをもとに理論押抜きせん断耐荷力を 解析する必要がある.しかし,解析が煩雑になることか ら主鉄筋と配力筋のひずみの平均値を基に,引張鉄筋が 降伏する荷重付近と引張鉄筋のひずみ引張強度に達した 付近および破壊荷重付近の理論押抜きせん断耐荷力式を 提案し,実験耐荷力との整合性を評価することとする. よって,主鉄筋と配力筋のひずみの平均値を図-3,3)に 示す.図-3,3)より,降伏荷重の最大値は,供試体 -S-1,2 で 115kN であり,供試体 -S-1 で 125kN である.また, 引張強度付近の最大荷重値は供試体 -S-1,2で135kN, 供試体 -S-1 で 160kN である . タイプ における供試体 -S-1,2で,それぞれ150kN,145kNであり, -S-3,4 は 155kN, 155kN である.また, 引張強度付近の最大荷 重値は供試体 -S-1,2 で,ともに 175kN であり,供試 体 -S-3,4 ではそれぞれ180kN,185kN である.これら の平均ひずみ値と各荷重との関係を用いて実験値と理論 値の整合性を検討する.

5.理論押抜きせん断耐荷力

RC 床版の理論押抜きせん断耐荷力に関する研究は, 多くの研究者により実験研究が行われ,破壊メカニズム が解明され,押抜きせん断破壊モデルと耐荷力式が提案 されてきた.RC 床版の押抜きせん断破壊モデルおよび 耐力荷式としては松井式^{5,0},角田式⁷および土木学会式⁸⁾ が挙げられる.また,筆者らは道路橋 RC 床版を対象と して提案されている松井式に着目し,静的押抜きせん断 破壊モデルと耐荷力式の提案を行ってきた⁹.さらに,松 井式に適用されているコンクリートのせん断強度式につ いても提案し,実験値と理論値を近似させた^{9,10}.

本研究では,道路橋 RC 床版の耐荷力性能における理 論押抜きせん断耐荷力の評価式の確立を目的として,終 局限界状態を次の3段階で評価することとする.まず,

引張鉄筋のひずみの平均値が降伏強度に達した荷重, すなわち降伏強度付近の押抜きせん断耐荷力を評価する. 次に, 引張鉄筋のひずみが引張強度に達した荷重,す なわち引張強度付近,および 静荷重実験における最大 荷重,すなわち破壊荷重付近の最大押抜きせん断耐荷力 についてを評価する.破壊荷重付近の最大押抜きせん断 耐荷力は,疲労耐久性を評価するためにも評価する必要 がある.

5.1 降伏強度付近の押抜きせん断耐荷力式

降伏強度付近の押抜きせん断耐荷力の算出には,まず 静荷重実験における引張鉄筋の荷重とひずみの関係(図- 3)より,鉄筋が降伏する荷重付近の押抜きせん断破壊モ デルを,コンクリートのせん断強度の影響とダウエル効 果の影響を考慮して提案する.

(1) コンクリートのせん断強度の影響

松井らが提案する押抜きせん断破壊モデルは、コンク リートのせん断強度を受ける面を載荷版の主鉄筋方向, 配力筋方向の辺長から 45° で分布するものと仮定してい る.また,コンクリートのせん断強度 f.vo が影響を及ぼ す範囲を載荷版の位置から中立軸までとして算出してい る.本研究においても,写真-1に示すように 45°の傾 斜角で破壊しており,松井らが提案する押抜きせん断 破壊モデルと同様である.本論文は,終局限界状態に おける押抜きせん断耐荷力式の提案であることから, コンクリートのせん断強度 fcot が及ぼす範囲を主鉄筋 方向の等価応力ブロックと配力鉄筋方向の等価応力ブロ ックの大きさを求め,その平均値を適用する.なお,コ ンクリートのせん断強度 f_{c0}の算出には,筆者ら^{9,10}の提 案式(2.a)を適用する.また,本供試体に配置した圧縮 鉄筋は全て降伏していないことから,圧縮鉄筋が降伏し ていない場合の等価応力ブロックの大きさを算出する.

複鉄長方形断面の等価応力ブロックの大きさ(a)に関する一般式として式(1)が与えられている.

$$a/d = \frac{m/2[p-p'(\varepsilon'_{cu} \cdot E_s/f_{yd})]}{\{p-p'(\varepsilon'_{cu} \cdot E_s/f_{yd})^2\}+p' \cdot 4\beta/m \cdot d'/d \cdot \varepsilon'_{cu} \cdot E'_s /f_{yd}]}$$
(1)
tete U,

m = $f_{\mbox{\tiny yd}}/0.85 f_{\mbox{\tiny cd}}$, p = $A_{\mbox{\tiny s}}/b\,d$, p' = $A'_{\mbox{\tiny s}}/b\,d$

ここで, f_{et}: コンクリートの設計圧縮強度(=本研究 では実験耐荷力との整合性を評価することから,表-1 に示したコンクリートの圧縮強度 f_eを適用する (N/mm²)), f_{yd}: 引張鉄筋の降伏強度(N/mm²), f_{yd}: 圧縮 鉄筋の降伏強度(N/mm²), A_s: 引張側の鉄筋量(床版支 間あたり), A'_s: 圧縮側の鉄筋量(床版支間あたり), d: 有効高さ(= d₄), d': 圧縮縁から圧縮鉄筋の図心までの 距離, b: 部材幅(床版支間)

本研究では,等価応力ブロック大きさ a は,主鉄筋方向を ax,配力鉄筋方向を av として,その平均値を ax(=(ax + av)/2)として算定する.

(2)ダウエル効果の影響

松井らが提案する押抜きせん断破壊モデルでは,ダウ エル効果が及ぼす影響範囲を引張主鉄筋のかぶりおよび 配力鉄筋のかぶりの2倍としている.これは,破壊荷重 時の場合であり,ここでは主鉄筋のかぶり d'x と配力鉄 筋のかぶり d'x を算出し,その平均値($C_a = (d'x + d'y)/2$) に引張鉄筋の降伏強度 f_{yd} と引張強度 f_y の比(f_{yd}/f_y)を係 数として乗じたものをダウエル効果の及ぼす影響範囲と する.したがって,ダウエル効果の及ぼす影響範囲は,Cx = $C_a \times f_{ya}/f_y$ とする.なお,引張強度 f_iの算出には岡村 式(2.b)¹¹⁾を適用する.



図 - 4 降伏強度付近の押抜きせん断破壊モデル

(3)降伏強度付近の押抜きせん断破壊モデル・耐荷力式 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-4とする.また,押 抜きせん断耐荷力 V₉は式(2)として与える.

$$V_{cp} = f_{cv0} \{ 2(B+2a_x)a_x+2(A\times a_x) \}$$

+f_t \{ 2(2C_x+2d_d+B)C_x+2(A+2d_d)C_x \} (2)
f_{cv0} = 0.688f_c^{0.610} f_c = 80N/mm^2 (2.a)

 $f_t = 0.269 f_c^{2/3}$ $f_c = 80 N/mm^2$ (2.b)

ここで,A,B:載荷版の主鉄筋,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_{ev0}:コン クリートのせん断強度(N/mm²)⁹⁾,f_i:コンクリート引張 強度 N/mm²j¹⁾ C_x :ダウエル効果の及ぼす影響範囲(= C₄ × f_{y4}/f_y), C₄:主鉄筋のかぶり(d'x)配力筋方向のかぶ り(d'y)の平均(=(d'x + d'y)/2),d₄:主鉄筋の有効高さ(d_x) と配力筋方向の有効高さ(d_y)の平均(=(H - C_x)), H :床版厚さ(mm),f_e:コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

式(2)より算出した降伏強度付近の押抜きせん断耐荷力 を表 - 3に示す.

5.2 引張強度付近の押抜きせん断耐荷力

引張強度付近の押抜きせん断耐荷力は,降伏強度付近 の場合と同様に,コンクリートのせん断強度の影響とダ ウエル効果の及ぼす影響範囲を考慮して提案する.

(1)コンクリートのせん断強度の影響

コンクリートのせん断強度 feet が及ぼす押抜きせん断 破壊モデルは,降伏強度付近の場合と同様に輪荷重の接 地面から 45°で等価応力ブロックの大きさの位置まで分 布するものと仮定する.よって,引張鉄筋のひずみの平 均値が引張強度に達した付近の等価応力ブロックの大きさ の算出には,鉄筋の引張強度 fyを適用し,式(3)より算出 する.



図 - 5 引張強度付近および破壊荷重付近の 押抜きせん断破壊モデル

 $\begin{array}{rl} a/d &=& m/2[p-p'(\epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y) \\ &+& \overline{\{p-p'(\epsilon'_{cu} \cdot E_s/f_y)^2\} + p' \cdot 4\beta/m \cdot d'/d \cdot \epsilon'_{cu} \cdot E'_s/f_y]} & (3) \\ & \hbar c \hbar c \cup , \\ &m &=& f_y/0.85 f_{cd} \ , \ p &=& A_s/b \, d \ , \ p' =& A'_s/b \, d \end{array}$

ここで, f_{et}: コンクリートの設計圧縮強度(=本研究 では実験耐荷力との整合性を評価することから,表-1 に示したコンクリートの圧縮強度 f_eを適用する (N/mm²)), f_y: 鉄筋の引張強度(N/mm²), b: 部材幅 (2)ダウエル効果の影響

ダウエル効果,すなわちコンクリートの引張強度による押抜きせん断耐荷力の分布面は,松井らが提案する押抜きせん断破壊モデルと同様に,引張主鉄筋のかぶりおよび配力鉄筋のかぶりの2倍とする.したがって,本提案による押抜きせん断破壊モデルは軸直角方向および軸方向の鉄筋かぶりCxの2倍(2Cx)とする.なお,ダウエル効果が及ぼす範囲は鉄筋の引張強度付近であることから係数として,降伏強度fydと引張強度fyの平均値を引張強度で除した値(fyd+fy)/2fyを適用する.

(3) 引張強度付近の押抜きせん断破壊モデル・耐荷力式 引張強度付近の押抜きせん断破壊モデルを図-5として 与える.また,押抜きせん断耐荷力 V_e,は式(4)として 与える.

$$V_{cp} = f_{cv0} \{ 2(B+2a_x)a_x+2(A \times a_x) \}$$

$$+f_{cv0} = 0.688f_{c}^{0.610} \quad f'_{c} = 80N/mm^2$$

$$f_{cv0} = 0.269f_{c}^{2/3} \quad f'_{c} = 80N/mm^2$$

ここで A B:載荷版の主鉄筋 配力筋方向の辺長(mm), Cx:ダウエル効果の及ぼす影響範囲(= Cd ×(fd + fg)/2fg), C'd:主鉄筋のかぶり(d'x)配力筋方向のかぶり(d'v)の平 均(= (d'x + d'y)/2), dd:主鉄筋の有効高さ(dx) と配力筋

	コンクリート	鉄	筋	降伏強度付近の理論耐荷力				引張強度付近の理論耐荷力				破壊荷重付近の理論耐荷力		
供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	降伏強 度 (N/mm ²)	引張強 度 (N/mm ²)	荷重 (kN)	ひずみ (×10 ⁻⁶)	理論耐 荷力 (kN)	耐荷力 比	荷重 (kN)	ひずみ (×10 ⁻⁶)	理論耐 荷力(kN)	耐荷力 比	実験最 大耐力 (kN)	理論耐 荷力(kN)	耐荷力比
-S-1	20.0	365*	510*	114.7	1825	111.6	1.03	136.9	2550	133.9	1.02	165.3	161.4	1.02
-S-2	50.0			115.3	1825		1.03	135.2	2550		1.01	170.2		1.05
-S-1	27.0	371	506	128.3	1855	125.4	1.02	161.0	2530	156.8	1.03	196.3	188.9	1.04
-S-1	32.0	370*	511*	150.3	1850	146.4	1.03	173.3	2555	173.0	1.00	225.4	208.8	1.08
-S-2	52.0			144.7	1850		0.99	174.5	2555		1.01	221.3		1.06
-S-3	25.0	368*	516*	150.5	1840	150.6	1.00	179.8	2580	179.4	1.00	235.2	212.1	1.11
-S-4	55.0			154.3	1840		1.02	186.8	2580		1.04	240.2		1.13
20-A _S -1 20-A _S -2	24.9	4.9 367 (*の平 3.7 均値)	367 512 *の平 (*の平 均値) 均値)	-	-	106.0	-	-	-	138.2	-	171.5	160.9	1.07
20-1/2Ac-1	33.7						-	-	-	152.0				0.93
20-1/2A _S -2					-	99.4					-	165.6	178.0	

表 - 3 実験耐荷力および理論耐荷力

方向の有効高さ(d_x)の平均(=(H - C_x)), f_e: コンク リートの圧縮強度(N/mm²)

式(4)より算出した引張強度付近の押抜きせん断耐荷力 を表 - 3に示す.

5.3 破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力

破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力は,引張強度付近の押抜きせん断破壊モデル,および押抜きせん断耐荷力 式とする.

(1) コンクリートのせん断強度の影響

破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力は式(4)を用いて算 出する.この場合の主鉄筋方向(a_x),配力筋方向(a_y)の 等価応力ブロックの大きさを算出する場合の有効幅 b は ひび割れの間隔を考慮して,ひび割れ幅を考慮した荷重 分布として,幅 b に引張鉄筋の降伏強度と引張強度の比 (f_{yd}/f_y)を係数として乗じた幅($b = 100 \times f_{yd}/f_y$)とし て等価応力ブロックの大きさを算出する.等価応力ブロ ックの大きさは,破壊荷重付近では圧縮鉄筋のひずみは 降伏強度に達していないことから式(3)を適用する.

(2)ダウエル効果の影響

破壊荷重付近におけるダウエル効果が及ぼす影響範囲は,松井らが提案する押抜きせん断破壊モデルと同様であることから,押抜きせん断破壊モデルは図-5に示すとおりとする.

(3)破壊荷重付近の押抜きせん断破壊モデル・耐荷力式 破壊荷重付近の押抜きせん断破壊モデルは,引張強度 付近の押抜きせん断破壊モデルと同様であることから, 押抜きせん断耐荷力は式(4)として与えられる.すなわち, 破壊荷重付近の最大押抜きせん断耐荷力に関する押抜き せん断破壊モデルは図-5とし,押抜きせん断耐荷力式に は,式(4)を適用する.

以上より,式(4)より算出した破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力を表-3に示す.

文献 4)に示す供試体の押抜きせん断耐荷力の算出にお いては,鉄筋の力学特性が不明のために,本供試体に配 置した SD295A,D10の平均値を用いて算出し,表-3に 併記した.

6.理論耐荷力の結果

理論押抜きせん断耐荷力を終局限界状態における降伏 強度付近および引張強度付近,破壊荷重付近について, それぞれ算出した結果を表-3に示した.また,表-3に は図-3(3)に示した主鉄筋と配力筋の荷重と平均ひずみ 値を用いて,表-1に示した材料特性値から求めた降伏ひ ずみと引張強度ひずみに対する荷重を,補間法により算 出して表示した.この荷重を基に提案式の妥当性を評価 する.なお,材料特性値から求めた降伏ひずみ,引張強 度ひずみ値を表-3に併記した.

6.1 降伏強度付近の理論押抜きせん断耐荷力

降伏強度付近の押抜きせん断耐荷力は,図-4に示した 押抜きせん断破壊モデルを基に提案した押抜きせん断耐 荷力式(2)より算出した結果,供試体 -S-1,2が111.6kN であり,供試体 -S-1は125.4kN である.また,供試体

-S-1 2 の押抜きせん断耐荷力は 146.4kN,供試体 -S-3, 4 の場合は 150.6kN である.そこで,降伏強度付近の理 論押抜きせん断耐荷力と荷重と比較すると,タイプ,

, ともに耐荷力比が 0.99 ~ 1.03 となり, 近似した結 果が得られた.したがって,道路橋 RC 床版の押抜きせ ん断耐荷力の主要影響因子であるコンクリートの圧縮強 度,有効高,鉄筋比の異なる供試体においても理論耐荷 力式の妥当性が得られた.

6.2 引張強度付近の理論押抜きせん断耐荷力

(1) 引張強度付近の押抜きせん断耐荷力

引張強度付近の押抜きせん断耐荷力は,図-5に示した 押抜きせん断破壊モデルを基に提案した押抜きせん断耐 荷力式(4)より算出した結果,供試体 -S-1,2で133.9kN であり,供試体 -S-1で156.8kN である.また,供試体

-S-1,2の押抜きせん断耐荷力 173.0kN,供試体 S-3,4 の場合は 179.4kN である.よって,引張強度に達した付 近の荷重と理論値と比較すると,耐荷力比は 1.01 ~ 1.04 と なりタイプ,, ともに実験値と理論値が近似した. 6.3 破壊荷重付近の理論押抜きせん断耐荷力

破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力は,押抜きせん断 破壊モデル(図-5)による押抜きせん断耐荷力式(4)より 算出した結果,供試体 -S-1,2 場合は 161.4kN,供試体 -S-1 の場合は 188.9kN であり,ほぼ近似した結果が得 られた.また,供試体 -S-1,2 の押抜きせん断耐荷力は 208.8kN,供試体 -S-3,4 の場合は 212.1kN である.よ って,破壊荷重付近の理論耐荷力と実験耐荷力を比較す ると耐荷力比は 1.02 ~ 1.13 となり,ほぼ近似した結果が 得られた.

次に,文献4)に示す供試体の実験最大耐荷力と本提案 する押抜きせん断破壊モデルおよび押抜きせん断耐荷力 式(4)を用いて算出した結果,供試体 20-As は実験耐荷力 の 1.07 倍となり近似した.供試体 20-1/2As の場合は 0.93 倍となり,実験値が下回ったもののほぼ近似した結果が 得られた.なお,鉄筋量と引張鉄筋が圧縮鉄筋の比が1 :1とした供試体 20-As に比して,鉄筋量が引張鉄筋量 の 1/2 とした供試体 20-1/2As の理論耐荷力が上回ってい る.これは,コンクリートのせん断強度 feol に大きく影 響するコンクリートの圧縮強度の平均が,20-As が 24.9N/mm²,20-1/2As が 33.7N/mm² であり,コンクリー トの圧縮強度が高い供試体 20-1/2As が上回った.

7.設計押抜きせん断耐荷力

道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力への主要影響因 子であるコンクリートの圧縮強度,有効高,鉄筋比の異 なる RC 床版供試体の理論押抜きせん断力と実験耐荷力 とが近似したことから,提案する理論押抜きせん断耐荷 力式の妥当性が得られた.そこで,道路橋 RC 床版の性 能照査型設計法における耐荷力性能の評価法の1つである 設計押抜きせん断耐荷力の評価式には安全係数の適用が 必要となる.終局限界状態における安全係数の適用は, 本提案する押抜きせん断耐荷力式 V_{cp} にコンクリートの 材料係数 γ_c および鋼材の材料係数 γ_s を適用する.そして, 設計押抜きせん断耐荷力 V_{pet} には部材係数 γ_b を適用[®]し, 式(5)として与えられる.

 $V_{pcd} = V_{cp} / \gamma_b$ (5)

ここで,

V_{ped}:設計押抜きせん断耐荷力(kN), V_{cp}: RC 床版押抜 きせん断耐荷力(kN), γ_b:部材係数

本供試体の設計押抜きせん断耐荷力式(5)における RC 床版押抜きせん断耐力 V_{cp} には,本来はコンクリートの 設計圧縮強度 f_{cd} を用いて材料係数を適用すべきである が,ここでは表 - 1に示したコンクリートの圧縮強度値 f_c をコンクリートの設計圧縮強度として材料係数 $\gamma_c = 1.3$ を適用する.また,鉄筋には SD295A を用いたことから 降伏強度 $f_{yd} = 259$ N/mm²,引張強度 $f_y = 440$ N/mm²とし¹⁾, それぞれに材料係数 $\gamma_s = 1.0$ を適用した.また,設計押 抜きせん断耐荷力 V_{ped} には,部材係数 $\gamma_b = 1.3$ を適用する.

降伏強度付近における設計押抜きせん断耐荷力を式(5)

より算出すると、タイプ の場合は 71.7kN、タイプ が 78.9kN、タイプ が 95.1kN となった.表-3に示した降 伏強度付近の押抜きせん断耐荷力と比較すると、約 64 % 程度の耐荷力となり、安全率は 36 %となった.本供試体 は、道路橋示方書の規定に基づいて設計し、その 1/2 モ デルとしたことから、設計活荷重(衝撃を含む)は 69.1kN (活荷重:100kN、衝撃荷重:38.2kN、1/2 モデルとした 場合:(100 + 38.2)/2 = 69.1kN)である.ここで、設計 活荷重と設計押抜きせん断耐荷力とを比較すると、タイ プ が 1.03 倍、タイプ は 1.15 倍上回った.また、タイ プ の場合は 1.38 倍となり、いずれの供試体も設計活荷 重が確保されている.

次に,破壊荷重付近の設計押抜きせん断耐荷力は,タ イプ が 110.8kN,タイプ が 125.1kN,タイプ が 146.0kN であり,材料係数,部材係数を適用した場合は 理論押抜きせん断耐荷力の約 68 %となり,安全率が 32 %である.よって,降伏強度付近および破壊荷重付近に おける押抜きせん断破壊モデルおよび押抜きせん断耐力 式に材料係数(?,,?,),部材係数(?,)を考慮することに よって設計押抜きせん断耐荷力を評価することができる.

8.まとめ

静荷重実験における RC 床版の押抜きせん断耐荷力を 降伏強度付近,引張強度付近および破壊荷重付近の場合 について解析した結果,次の成果が得られた.

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度の角度で拡がりを持つ押抜きせん断破 壊となった.また,引張鉄筋の底面コンクリートはダウ エル効果の影響により広範囲にわたり,はく離破壊して いる.

RC 床版の押抜きせん断耐荷力は,降伏強度付近の押 抜きせん断破壊モデルおよび押抜きせん断耐荷力式を用 いることによって実験値と理論値が近似し,妥当性がえ られた.

引張強度付近および破壊荷重付近の場合も,松井らが 提案する押抜きせん断破壊モデルおよび押抜きせん断耐 荷力式を修正して,押抜きせん断耐荷力式を提案した結 果,引張強度に達した付近と破壊荷重付近ともに実験値 と理論値は近似した.

道路橋RC床版の押抜きせん断耐荷力への主要影響因子 である,床版厚,鉄筋比,コンクリートの圧縮強度の異 なる3タイプの供試体,および文献4)に示す供試体につ いても解析した結果,実験耐荷力と提案した理論押抜き せん断耐荷力とが近似した結果が得られたことから,本 研究で提案する押抜きせん断破壊モデル,耐荷力式の妥 当性が得られた.

参考文献

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) 川畑篤敬,中村聖三,秋元礼子,太田孝二,ほか: 土木学会鋼・合成構造標準示方書設計編における 床版に関する条文の概要,第5回道路橋床版シンポ ジウム講演論文集, pp. 103-106, 2006.
- 4) 楊秋寧,浜田純夫,江上真介,毛明傑,山本尚文: 粗骨材寸法および圧縮側鉄筋量による RC 床版のせ ん断強度に関する影響,第5回道路橋床版シンポジ ウム講演論文集,pp.113-118,2006.
- 5)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,土木学会論文集,第348号, -1, pp.133-141,1984.
- 6)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 文報告集, Vol.9, No.2, pp. 627-632, 1987.

- 7)角田与史雄,伊藤昭夫,藤田嘉夫:鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集,第229号,pp.105-115,1974.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 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) 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. (2006年9月11日受付)