# 論文 支持条件と版厚が異なる RC 版の静的押抜きせん断性状

三上 浩<sup>\*1</sup>·岸 徳光<sup>\*2</sup>·栗橋 祐介<sup>\*3</sup>

要旨:本研究では,RC 製落石覆工頂版の耐衝撃設計法の確立を目的として,局所荷重が静的に作用した場合のRC版の押抜きせん断性状を支持条件および版厚を変化させた全9体の試験体を用いて検討した。支持条件は四辺支持と二辺支持および一辺+二隅角点支持の3種類とした。また,版厚は下端鉄筋の芯かぶりを40mmとし,有効高さを3種類に変化させて設定した。実験の結果,1)RC版の破壊形式は支持条件や版厚にかかわらず押抜きせん断型である,2)版厚によらず支持条件が押抜きせん断耐力に及ぼす影響は小さい,3)吸収エネルギーは版厚にかかわらず四辺支持で最も小さい,ことなどが明らかになった。

キーワード: RC版,支持条件,版厚,押抜きせん断性状,耐力比

# 1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 版に局所荷重が静的および衝撃的 に作用した場合,押抜きせん断破壊が生じることは良く知 られている。道路を落石から防護する落石防護覆道頂版は 一般的に RC 製であり,現在,性能照査型耐衝撃設計法の 確立に向けた検討が各機関で実施されている。著者らも数 多くの衝撃実験を実施し,耐衝撃設計法の確立に向けた検 討<sup>1)~3)</sup>を行っているが,頂版を四辺単純支持版にモデル化 して検討するのが一般的である。

一方, 頂版は覆道の構造形式によっては壁や柱で支持され, 二辺単純支持や一辺単純支持+多点支持状態のものも多い。以上から,本文では RC 製頂版の耐衝撃設計法の確立を目的として,重要な基礎データである局所荷重が静的に作用した場合の RC 版の押抜きせん断性状を支持条件および版厚を変化させた全9体の試験体を用いて検討した。支持条件は四辺支持と二辺支持および一辺+二隅角点支持の3種類とした。また,版厚は下端鉄筋の芯かぶりを40 mmとし,有効高さを3種類に変化させて設定した。

### 2. 実験概要

表-1 に本実験に用いた RC 版の一覧を示す。試験体数は 支持条件 3 種類,版厚 3 種類の合計 9 体である。試験体名 の第一項目は支持条件 (S4:四辺支持,S2:二辺支持,S1: 一辺+二隅角点支持)を示し,第二項目は版厚を示してい る。なお,コンクリートの圧縮強度は 26.2 ~ 32.0 MPa,用 いた鉄筋は D13 または D16 (SD345) で降伏強度は各々 393 MPa および 389 MPa であった。

図-1 に試験体の形状寸法と配筋・支持状況および鉄筋に 貼り付けたひずみゲージの位置を示す。実験に用いた試験 体は寸法が 2,000 × 2,000 mm で版厚が 150, 180 および 210 mm の単鉄筋 RC 版である。鉄筋には版厚 150 mm で D13, それ以上の版厚では D16 を用い,版中央部より 150 mm 間 隔で格子状に配置した。なお,鉄筋は支持辺がある場合は 端部に配置した溝型鋼(H150,H180試験体)もしくは鋼板 (H210試験体)に溶接して定着を確保した。一方,支持辺が ない場合は直角フックによって定着した。鉄筋比はH180 試験体で1.1%であり,その他は0.9%である。

辺支持部の境界条件は、貫通ボルトとナットによって RC 版の浮き上がりを拘束し、回転を許容するピン支持として いる。二隅角点支持部は、辺支持部と同様に浮き上がりを 拘束する一方で全方向に回転可能な構造としている。各辺 および支持点の支持間隔はいずれも 1.75 m である。静荷重 の載荷位置は RC 版の中央とし、載荷版の直径は 90 mm で ある。

測定項目は載荷荷重と載荷点直下の変位および鉄筋のひ ずみ分布である。実験終了後には RC 版の裏面に発生した ひび割れをトレースしてひび割れ図を作成した。

# 3. 実験結果

# 3.1 荷重-変位関係

図-2に各支持条件における試験体の荷重-変位関係を

試験	支持条件	版厚	コンクリート				
体名		(mm)	強度 (MPa)				
S4-H150		150	27.3				
S4-H180	四辺支持	180	26.3				
S4-H210		210	28.9				
S2-H150		150	29.4				
S2-H180	二辺支持	180	26.2				
S2-H210		210	32.0				
S1-H150	一辺+ 二隅角点支持	150	30.0				
S1-H180		180	27.3				
S1-H210		210	28.1				

表-1 実験ケース一覧

\*1 三井住友建設(株) 技術研究開発本部 技術開発センター 主席研究員 博(工) (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 教授 工博 (正会員)

\*3 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博(工) (正会員)







図-2 荷重-変位関係(支持条件比較)

版厚ごとに示した。図より,支持条件や版厚にかかわらず, いずれの試験体も最大荷重到達後,荷重が一気に低下して 破壊していることから,押抜きせん断破壊に至ったことが 伺われる。また,支持条件にかかわらず,最大荷重は版厚 が厚いほど大きくなり,最大荷重時変位は版厚が薄いほど 大きくなることがわかる。なお,ひび割れ発生による剛性 勾配の低下は支持条件にかかわらず版厚が薄いほど顕著で ある。

図-3 に各版厚における試験体の荷重-変位関係を支持 条件ごとに示した。図から,版厚にかかわらず最大荷重は S1 試験体で多少小さいものの大略同程度であることがわか る。一方,最大荷重時変位は版厚にかかわらず S1 試験体で 最も大きく、次いでS2,S4 試験体であり、四辺支持版が最 も最大荷重時変位が小さい。また、ひび割れ発生後におけ る剛性勾配は、版厚にかかわらずS1 試験体で最も小さく、 次いでS2,S4 試験体であるが、いずれの支持条件でも剛 性勾配は版厚が増加するほど増大する傾向にある。

# 3.2 最大荷重および最大荷重時変位

図-4 に各試験体の最大荷重を支持条件ごとに整理して 示す。図より、版厚によらず最大荷重は四辺支持の場合に 最も大きく、次いで二辺支持、一辺+二隅角点支持の順に なっていることがわかる。ただし、支持条件による差異は 顕著ではない。また、版厚が大きいほど最大荷重が大きく なる傾向にある。特に、版厚 150 mm の最大荷重は版厚 180、



図-6 各試験体の吸収エネルギー

210 mm の場合を 100~150 kN 程度下回っている。

図-5に各試験体の最大荷重時変位を支持条件ごとに整 理して示す。図より,最大荷重時変位は版厚によらず四辺 支持の場合が最も小さく,次いで二辺支持,一辺+二隅角 点支持の順になっていることがわかる。また、版厚が小さ いほど最大荷重時変位が大きくなる傾向にある。特に、版 厚150 mmの最大荷重時変位は、版厚180,210 mmの場合を

より,最大荷重に及ぼす支持条件の影響は比較的小さく, 最大荷重時変位に及ぼす支持条件の影響は比較的大きいこ とが明らかになった。また、支持条件にかかわらず 版厚 210,180 mmの試験体間の最大荷重および最大荷重時変位 の差異は、版厚 180, 150 mm の試験体間の差異よりも小さ く、特に版厚150mmの場合は最大荷重が小さくかつ最大

# 3.3 吸収エネルギー

図-6 に荷重-変位関係を積分して求めた吸収エネルギー を支持条件と版厚の影響に着目して整理した。図より、同 じ支持条件では版厚が厚いほど吸収エネルギーが大きくな る傾向にあるものの, S2 試験体では版厚の影響が顕著で はないことがわかる。また、版厚にかかわらず吸収エネル ギーは S4 試験体で最も小さく, S1 試験体は版厚によって 吸収エネルギー量が大きく変動していることがわかる。す なわち, S1-H210 試験体は S2-H210 試験体よりも吸収エネ ルギーが 1.5 倍以上大きい一方で, S1-H180 および -H150 試





験体の吸収エネルギーは S2 試験体のそれらと大略同程度 である。

このように,支持条件や版厚は RC 版の吸収エネルギー に影響を及ぼすものの,いずれの版厚でも S4 試験体の吸 収エネルギーが最も小さい。これは,四辺支持のために曲 げによる変形量が小さいためと考えられる。また,S1 試験 体の吸収エネルギーが版厚の厚い場合に大きいのは,曲げ 剛性の増大によって最大荷重および最大荷重時変位が大き く増加したためと考えられる。なお,S2 試験体の吸収エ ネルギーが S1 試験体と異なり版厚によらずほぼ同程度で

	版厚 210 mm		版厚 180 mm			版厚 150 mm			
試験体名	実測値	計算值	耐力比	実測値	計算值	耐力比	実測値	計算值	耐力比
	(kN)	(kN)	(実測/計算)	(kN)	(kN)	(実測/計算)	(kN)	(kN)	(実測/計算)
S4	359.9	368.3	0.98	296.3	266.4	1.11	195.2	167.2	1.17
S2	340.6	387.7	0.88	292.2	265.9	1.10	186.0	173.5	1.07
S1	331.1	363.1	0.91	278.8	271.4	1.03	177.3	175.3	1.01

表-2 各試験体の押抜きせん断耐力

表-3 各試験体のコンクリート強度補正後の押抜きせん断耐力

	版厚 210 mm		版厚 180 mm			版厚 150 mm			
試験体名	補正値	計算值	耐力比	補正值	計算值	耐力比	補正値	計算值	耐力比
	(kN)	(kN)	(補正値/計算)	(kN)	(kN)	(補正値/計算)	(kN)	(kN)	(補正値/計算)
S4	356.8	365.0	0.98	307.8	276.8	1.11	199.1	170.5	1.17
S2	320.8		0.88	304.4		1.10	182.8		1.07
S1	332.9		0.91	284.5		1.03	170.5		1.01

あるのは,耐荷性状が版の曲げ剛性によらず変化しないこ とを示している。すなわち,二辺支持の場合は,境界条件 の方が版の曲げ剛性よりもひび割れ性状を含む耐荷性状に 及ぼす影響が顕著であるものと考えられる。

#### 3.4 鉄筋のひずみ分布性状

図-7に各試験体の最大荷重時における鉄筋各点のひず み分布を示す。(a) 図は N-S 方向分布,(b) 図は W-E 方向分 布を示している。なお,鉄筋のひずみは 図-1 に示すよう に N-S 方向に配置された鉄筋の軸方向ひずみである。(a) 図 より,S4 試験体を除く試験体では版厚の薄い H150 試験体 の載荷点近傍にひずみが集中し,一部の鉄筋ひずみが降伏 ひずみ(1,945 µ もしくは 1,965 µ)を大きく超過しているこ とがわかる。一方,版厚の厚い H210 試験体では支持条件 にかかわらず同様なひずみ分布性状を示し,いずれの試験 体の終局時でも降伏ひずみには至っていないことがわかる。

(b) 図から, H150 試験体を除いて W-E 方向における載荷 点直下周辺へのひずみの集中は顕著でないことがわかる。 ただし, H150 試験体のひずみは N-S 方向と同様に S4 試験 体に比べて S1, S2 試験体で大きく,一部で降伏ひずみを 大きく超えている。W-E 方向のひずみは全般的に S4 試験 体で小さく,いずれの版厚でも最大ひずみは降伏ひずみ程 度である。一方,S2 および S1 試験体では,版厚が厚い試 験体でも一部で鉄筋ひずみが降伏ひずみを大きく超えてい る。これは,S2 および S1 試験体は W-E 方向に支持されて いないため,より強く N-S 方向で荷重に抵抗することを示 すものと考えられる。

# 3.5 ひび割れ性状

図-8に実験終了後における RC 版裏面のひび割れ性状を 示す。図より、支持条件や版厚にかかわらず不完全な場合 もあるが円形状のひび割れが発生していることから、全て の試験体は押抜きせん断破壊したことが伺われる。S4 試験 体のひび割れは、対角線状と円形状が中心であるが、版厚 が薄くなると対角線状のひび割れが少なくなる傾向にある。 S2 試験体には水平ひび割れと対角線状のひび割れおよび円 形状のひび割れが発生し、版厚が最も薄い H150 試験体で は対角線状と円形状のひび割れが明瞭に形成されている。

S1 試験体には,いずれの版厚でも2方向の水平ひび割れ と支持辺近傍の対角線状のひび割れおよび円形状のひび割 れが発生している。また,版厚の厚いH210 試験体では,他 の版厚に比べて円形状ひび割れが明瞭に形成されている。 ただし,円形状ひび割れ以外のひび割れには,版厚による 差異は顕著ではない。すなわち,S1 試験体の押抜きせん 断破壊は他の支持条件と異なり,試験体の版厚が厚い場合 に明瞭に出現すると考えられる。これは,曲げ変形が卓越 しやすい支持条件であるものの,版厚が厚いことで曲げ剛 性が大きくなり押抜きせん断破壊に至ったためと推察され る。そのため,前述したようにS1-H210 試験体の吸収エネ ルギーが大きくなったものと考えられる。

#### 3.6 押抜きせん断耐力

**表**-2 に実測および計算押抜きせん断耐力の一覧を示す。 表中には実測値を計算値で除した耐力比も示した。表中の 計算押抜きせん断耐力は土木学会コンクリート標準示方書 (設計編)<sup>4)</sup>に準拠して算出したもので,版厚には依存するも のの支持条件には影響されない計算値である。以下に計算 式を示す。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f_{pcd} \cdot u_p \cdot d/\gamma_b \tag{1}$$

$$f_{pcd} = 0.20 \sqrt{f'_{cd}} , \quad \beta_d = \sqrt[4]{1/d}$$
  
$$\beta_p = \sqrt[3]{100p}, \quad \beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$



図-9 各試験体の押抜きせん断耐力比

ここで、 $f'_{cd}$ :コンクリートの圧縮強度、u:載荷面の周長、 $u_p$ :照査断面の周長、d:有効高さ、p (= $A_s/(b \cdot d)$ ):鉄筋比、 $A_s$ :鉄筋の断面積、 $\gamma_b$ :部材係数である。なお、部材係数  $\gamma_b$ 、材料係数  $\gamma_m$  はともに 1.0 とし、材料試験結果を用いて 算定した。

一方, **表**-3 に実測押抜きせん断耐力を各試験体の平均 コンクリート強度 (28.4 MPa) で補正した場合の一覧を示 す。これは,実験でのコンクリート強度が 26.2 ~ 32.0 MPa までばらつく一方で, RC版の押抜きせん断耐力に及ぼす コンクリート強度の影響が比較的顕著であることから,こ の影響度合いを検討するためである。補正値は,実測押抜 きせん断耐力がコンクリート強度の 1/2 乗に比例するもの とし,実測押抜きせん断耐力に (28.4/f<sub>c</sub>)<sup>1/2</sup> を乗じて算出し た。ここで, f<sub>c</sub> は各試験体のコンクリート強度である。な お,**表**-3 に示す計算押抜きせん断耐力はコンクリート強 度を上記の平均値 (28.4 MPa) として算出している。

**表**-2および **表**-3より, コンクリート強度補正により 各試験体の実測および計算押抜きせん断耐力が変わるもの の耐力比は同様であることがわかる。すなわち,本研究に おける耐力比はコンクリート強度の違いに影響されない物 理量であると考えられる。

図-9には、各試験体の耐力比を支持条件ごとに整理した。図より、実測耐力を計算耐力で除した耐力比は H210 試験体では支持条件にかかわらず 1.0 を下回り、特に二辺 支持および一辺+二隅角点支持では計算耐力が実測耐力を 過大に評価する傾向が認められる。それよりも薄い版厚で は、支持条件にかかわらず 1.0 を上回っており、計算耐力 は実測耐力を安全側に評価していることがわかる。なお、 耐力比は全般的に S1 試験体で小さくなる傾向にある。

# 4. **まとめ**

落石覆道頂版部の性能照査型耐衝撃設計法を確立するこ とを目的として,基礎的かつ重要な局所荷重が静的に作用 した場合の押抜きせん断性状を実験的に検討した。検討は 実際の構造形式に併せた支持条件として四辺支持,二辺支 持および一辺+二隅角点支持に着目し,併せて版厚の影響 を検討した。実験に用いた載荷版の直径は90 mm である。 本検討の範囲内で明らかになった事項を要約すると以下の 通りである。

- 1) RC版の破壊形式は支持条件や版厚にかかわらず押抜 きせん断型である。
- 2) 最大荷重は支持条件にかかわらず版厚が厚いほど大きい。また、最大荷重はS1 試験体で多少小さいものの大略同程度であり、支持条件が押抜きせん断耐力に及ぼす影響は顕著でない。
- 3) 最大荷重時変位に及ぼす影響は支持条件よりも版厚の 方が顕著であるが,吸収エネルギーは版厚にかかわら ず S4 試験体で最も小さい。
- 4) S4 試験体の鉄筋ひずみは版厚にかかわらず最大でも降 伏ひずみ程度である。一方,S1 および S2 試験体では 版厚が厚くても載荷点直下近傍の鉄筋が一部で完全に 降伏している。
- 5) 実測耐力を計算耐力で除した耐力比は版厚の厚い試験 体で1.0を下回り, S1 試験体の耐力比は全般的に他の 試験体よりも小さい。

# 参考文献

- 岸 徳光,三上 浩,栗橋祐介:矩形 RC 版の衝撃耐荷挙 動に及ぼす重錘直径の影響,構造工学論文集, Vol.54A, pp.1034-1043, 2008.3
- 2)岸 徳光,三上 浩,栗橋祐介:低速度衝撃を受ける 四辺単純支持 RC 版の耐衝撃設計法に関する一提案, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1327-1336, 2009.3
- 3) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介:支持条件の異なる RC 版の静的および重錘荷重載荷実験,構造工学論文集, Vol.56A, pp.1160-1168, 2010.3
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書 [設計編],2007 年 制定