

硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成板の 高速載荷押し抜きせん断実験

HIGH SPEED LOADING PUNCHING SHEAR TEST OF
STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLAB FILLED WITH HARD ULETHANE

加瀬典文*, 太田貞次**, 香月智***, 石川信隆****

Norihumi KASE, Teiji OHTA, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA

* 防衛大学校 理工学研究科学生 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

** (株)宮地鐵工所 技術開発部 (〒103 東京都中央区日本橋小伝馬町15番地18号)

*** 工博 防衛大学校助教授 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

**** 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

This paper presents an experimental approach on the high speed loading punching shear resistance of steel-concrete composite slab filled with hard ulethane. Three type specimens of composite steel-concrete slab, i.e. standard steel-concrete composite, composite slab filled with hard ulethane, and composite slab filled with hard ulethane and partition steel plate are used to examine the effect on the impact load resistance. The static loading and high speed loading punching shear tests are carried out to examine the loading rate effect. Considerable effects of filled hard ulethane on the punching shear resistance can be found in both load carrring capacity and absorption energy.

Key Words: Compopsite slab, punching shear resistance, rigid ulethane,
loading rate effect

1. 緒 言

ロックシェッドの設計は、建設地ごとに落下の可能性のある落石の大きさおよび落下高を予測し、その推定荷重に対して十分な強度を有するように許容応力度設計が行われている¹⁾。近年、この荷重条件が厳しくなりつつあることや、道路幅員が増加し桁長さが増加したことなどによって、桁の所要断面が大きくなる傾向にある。従来、ロックシェッドの多くは、経済性の観点から鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートのものが多く建設されてきたが、所要断面が大きくなると、自重による荷重の影響が無視できなくなりつつある。すなわち、従来の鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリート構造が経済的かつ合理的であるとは言い難い状況になってきた。

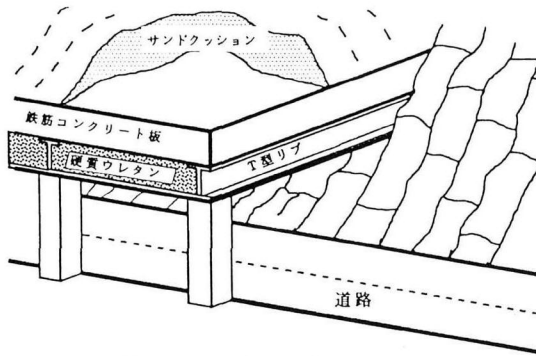
このような観点から、曲げ引張り側のコンクリートを充填せずに、軽量かつ高耐荷力化を図った鋼・コンクリート合成板構造の開発が検討されつつある²⁾。その際、鋼部分の防錆による維持コストの低減および現場打ちコンクリートの型枠代用などの管理施工上の利便性を考慮して、図-1に示すような鋼箱部分の空隙に硬質ウレタ

ンを充填した鋼・コンクリート合成構造の実用化が検討されている³⁾。

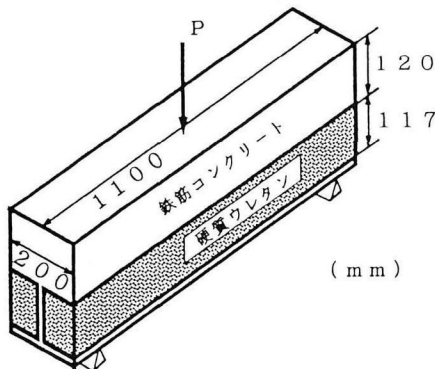
著者ら⁴⁾は、図-2に示すような硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリートの合成梁部材の高速載荷実験を行い、硬質ウレタンを充填することによる衝撃荷重に対する効果を確認した。その結果、鋼・コンクリート合成梁の引張側領域に硬質ウレタンを充填すると、最大荷重にはさほど相違がないが、その後の終局耐力が上昇し、衝撃吸収エネルギーが顕著に増加することを確認した。これは、現行の許容応力度設計法において、直接的に設計計算上の効果は得られないものの、予測外の極度に大きな落石荷重に対して予備的に保有される耐衝撃性能という観点で優れた性能を有するものと考えられる。

一方、既存の鉄筋コンクリート製ロックシェッドに対する落石実験において、写真-1に示すような鉄筋コンクリート板の押し抜きせん断破壊が生じることが報告されている⁵⁾。

そこで本研究は、先の合成梁部材の実験⁴⁾によって明らかになった曲げ変形に対する硬質ウレタンの充填効果を基礎として、硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリ



図－1 硬質ウレタンを充填した
鋼・コンクリート合成板ロックシェッド



図－2 硬質ウレタンを充填した
鋼・コンクリートの合成梁

ト合成板の高速載荷押し抜きせん断実験を行い、その破壊変形に対する硬質ウレタンの充填効果について実験的に考察したものである。

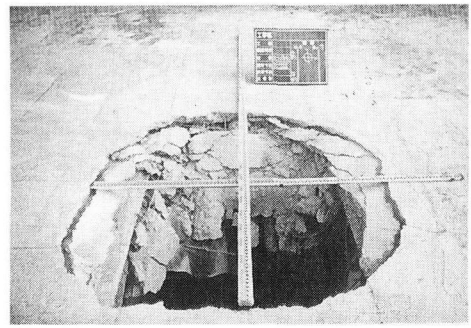
すなわち、図－3に示す鋼・コンクリート合成板供試体を用い、①載荷速度の影響、②ウレタン充填の効果および③仕切鋼板の効果などについて基礎的に考察したものである。

2. 実験の概要

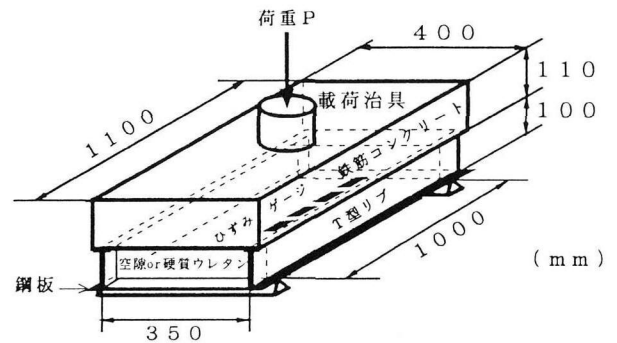
2.1 試験体

試験体は、図－3に示すように底部鋼板とこれを補鋼する2本のTリブからなる鋼製型枠と、Tリブの上フランジに溶着したスタッドを介して鋼製型枠に合成されたコンクリート版とで構成される鋼・コンクリート合成版である。Tリブの間隔は、押し抜きせん断破壊面が上フランジにかからないよう配慮し350mmとした。また、コンクリート版の下側、鋼製型枠の内側の部分に硬質ウレタンを充填したものと、そのまま空洞にしたものの2種類を作製した。表－1にコンクリートの示方配合を、表－2に硬質ウレタンおよび実験時のコンクリートの材料特性値を示す。また、コンクリート版の配筋状況ならびにスタッド配置状況をそれぞれ図－4、5に示す。

表－2に示されるように、硬質ウレタンの圧縮強度ならびにヤング係数は鋼やコンクリートと比較すると非常



写真－1 落石実験による鉄筋コンクリート板
押し抜きせん断破壊状況



図－3 試験体

に小さなものである。そのため、実験ではコンクリートとウレタンの間に仕切鋼板 ($t=2.3\text{mm}$) を置いた試験体を新たに追加して、図－6に示すような (A) 硬質ウレタンを充填し仕切鋼板を置いたタイプA、(B) 硬質ウレタンを充填したタイプB、(C) 硬質ウレタン部分を中空としたタイプCの3種類の試験体を作製した。仕切鋼板は、硬質ウレタンに作用する荷重を広範囲に分布させ硬質ウレタンの抵抗面積を増大させることを目的とするものであり、鋼製型枠とは独立して配置した。

2.2 実験の種類

実験は、図－3に示すように試験体中央に直径10cmの円形の鋼製載荷治具を用いて静的載荷および高速載荷し、載荷面が押し抜きせん断破壊するまでの荷重～変位関係および鋼板のひずみについて計測した。静的実験は、通常のアムスラー試験装置を用い、また高速実験は、図－8に示す高速変形負荷装置を用いて行った。この高速変形負荷装置は、試験の開始から終了までの間、載荷速度は反力の変化にかかわらず設定速度に保持される。本研究では、静的載荷実験と比較して載荷速度の影響が最も顕著に現れる本試験装置の最高速度の400cm/sの載荷速度で実験を行った。よって、実験は表－4に示す6ケースについて行った。

表-1 コンクリート示方配合

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材比 S/a (%)	単位量(kgf/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
2.0	12	4.5	53.5	41.5	163	305	743	1095	1.22

表-2 鋼材とコンクリートの材料特性値

名 称	材 料 特 性
底面鋼板・Tリブ	SS400材 (t=6mm) : $\sigma_y=3200\text{kgf/cm}^2$
鉄 筋	SD295材 (D10) : $\sigma_y=3950\text{kgf/cm}^2$
コンクリート	早強ポルトランドセメントコンクリート 圧縮強度=358kgf/cm ² ヤング率=3.20×10 ⁵ kgf/cm ²
鋼とコンクリートのヤング率比	N=7

表-3 硬質ウレタン特性値 (比重 0.03)

項 目	測 定 方 向	
	層 方 向	層直角方向
圧縮強度 (kgf/cm ²)	2.2	1.0
引張強度 (kgf/cm ²)	3.2	2.0
せん断強度 (kgf/cm ²)	1.5	1.4
初期ヤング率(kgf/cm ²)	56.0	26.0
吸水率 (%)	1.8	

3. 実験結果と考察

3.1 静的実験の結果と考察

(1) 荷重～変位関係

図-9に、静的実験によって得られた荷重～変位関係を示す。ここで変位とは、図-3で示す載荷治具の変位である。図より、すべての試験体とも、弾性→最大荷重→軟化領域→終局耐力(荷重が一定)の3段階からなる弾塑性挙動を示している。弾性領域での剛性は、すべての試験体とも非常に大きく、硬質ウレタン充填や仕切鋼板による差異は見られない。参考のため、図中に梁として求めた弾性の荷重～変位関係を示しているが、これと実験の弾性領域がほぼ一致することがわかる。弾性領域の終了時に生じる最大荷重は、中空のタイプCが約22tonfであるのに対して、硬質ウレタンを充填したタイプBは約26tonf、および硬質ウレタン+仕切鋼板のタイプAは約24tonfになっており、硬質ウレタンの充填による最大荷重の増加は顕著であるが、仕切鋼板によってさらに最大荷重が増加することはない。最大荷重の得られる変位量は、いずれのタイプとも1～2mmでほぼ等しく、その後の軟化領域の勾配は3つの試験体に大きな差異はない。しかし、硬質ウレタンを充填したタイプBおよび硬質ウレタン充填+仕切鋼板のタイプAは、変位10mmで軟化領域から終局耐力に移行するのに対し、中空のタイプCは、変位15mmまで軟化領域が続いている。このため、中空のタイプCの終局耐力は他のタイプに比べて特に小さくなり、各タイプの終局耐力は、タイプAが約14tonf、タイプBが約11tonf、タイプCが約8tonfとなっている。よって、終局耐力の最大荷重に対する比率は中空のタイプCが37%であるのに対し、硬質ウレタン充填のタイプBが

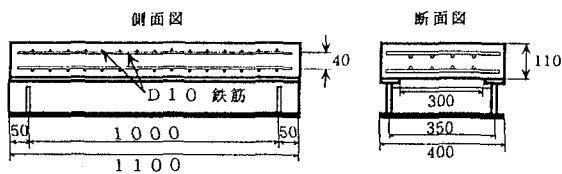


図-4 鉄筋コンクリート配筋図

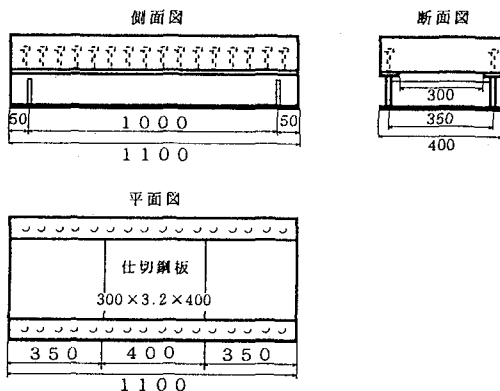


図-5 鋼・コンクリート合成ジベル配置図

41%, 硬質ウレタン充填+仕切鋼板のタイプAは59%となる。一方、終局耐力におけるAとBの比率は約29%で、これは仕切鋼板の影響であり、また終局耐力におけるBとCの比率は約37%で、これは硬質ウレタン充填の効果と考えられる。

よって、静的押し抜きせん断実験において、硬質ウレタン充填効果および仕切鋼板の効果が明瞭に現れることがわかる。

(2) 鋼板ひずみ

実験では、図-3に示したように底面鋼板にひずみゲージを貼付し測定した。このひずみゲージは、図-10に示すように載荷点直下の中央点から10cm間隔で貼付したものであるが、このひずみを生じさせる機構は大きく2つ考えられる。その一つは、曲げモーメントによって梁に生じる曲げ変形に連動して生じるものであり、二つめは充填された硬質ウレタンの分布圧力によって生ずるものである。図-11に載荷点直下(図-10のs-1ひずみゲージ)における鋼板ひずみ～載荷点変位関係を示す。この図の曲線が図-9で示した荷重～変位関係と非常によく似ていることから、鋼板のひずみが板全体の変位に強い相関を有するメカニズムを持つことがわかる。まず、最初の線形的にひずみが上昇する領域では、タイプA、B、Cいずれの試験体も同じ勾配であることから、図-9で述べたように弾性領域では硬質ウレタンによる分布圧力

表-4 実験ケース

タイプ	試験体断面構造	静的載荷	高速載荷
A	コンクリート 仕切鋼板 ウレタン	St-A	Hs-A
B	コンクリート ウレタン	St-B	Hs-B
C	コンクリート	St-C	Hs-C

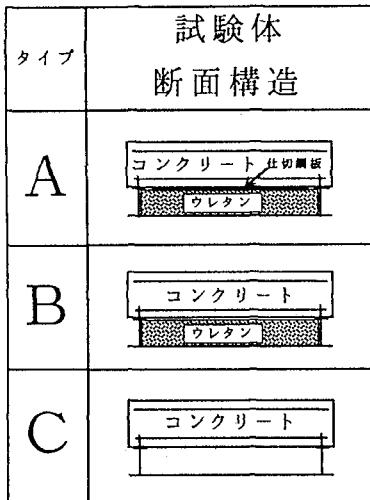


図-6 試験体タイプ

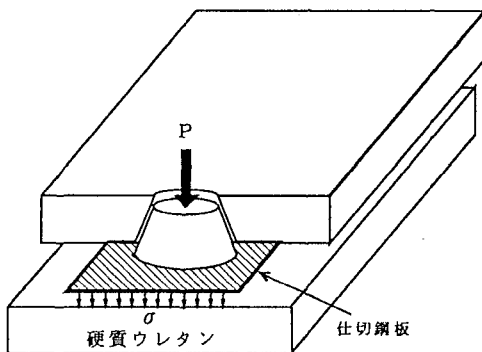


図-7 仕切鋼板の効果

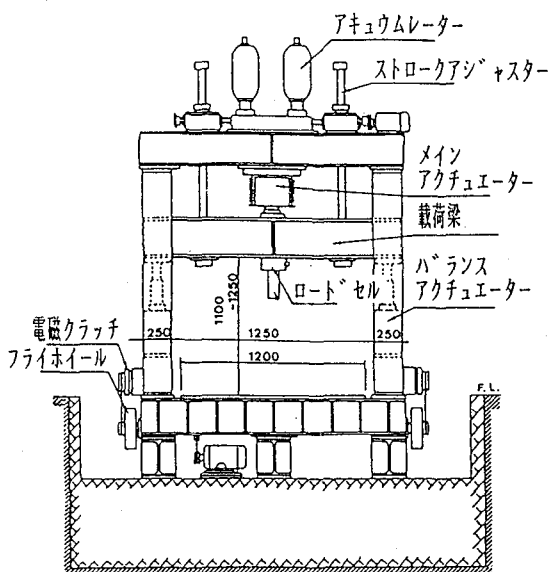


図-8 高速変形負荷装置

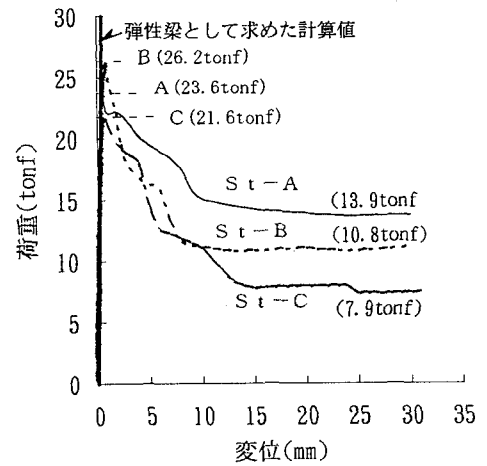


図-9 荷重～変位関係（静的載荷）

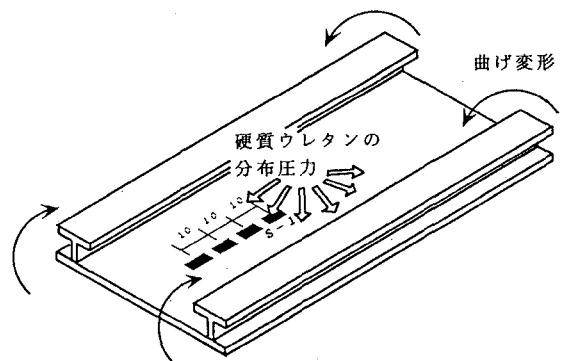


図-10 底面鋼板のひずみ

は、ほとんど生じていないことがわかる。しかし、最大荷重変位1～2mmを越えた後の鋼板ひずみ挙動には、硬質ウレタン充填および仕切鋼板の影響が明瞭に現れている。すなわち、中空のタイプCは、最大ひずみ450 μ に対して、変位15mmで250 μ と約55%もひずみが低下するのに対し、硬質ウレタンを充填したタイプBの場合には70%、硬質ウレタン+仕切鋼板のタイプAでは約90%と鋼板ひずみの低下が抑制されており、最大荷重以降は硬質ウレタンに変形が生じることによって鋼板に圧力を伝達するメカニズムが明瞭に現れていることがわかる。

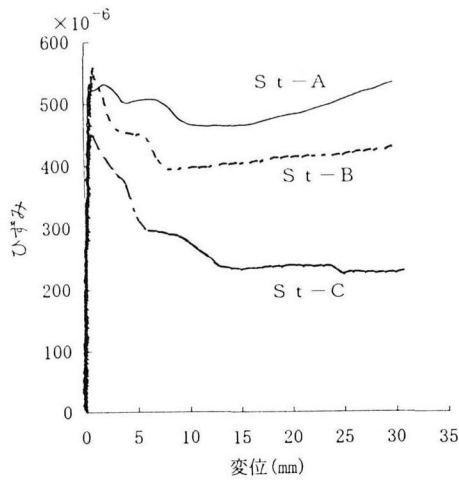


図-1 1 鋼板ひずみ～変位関係（静的載荷）

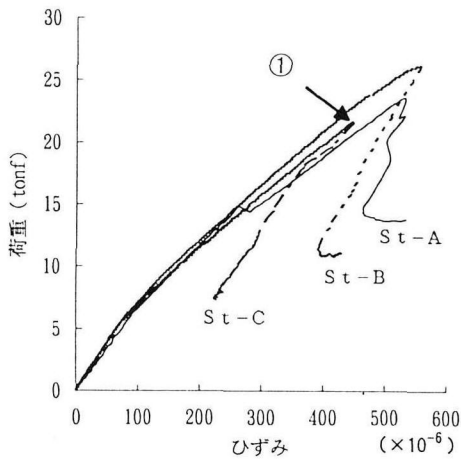


図-1 2 荷重～鋼板ひずみ関係（静的載荷）

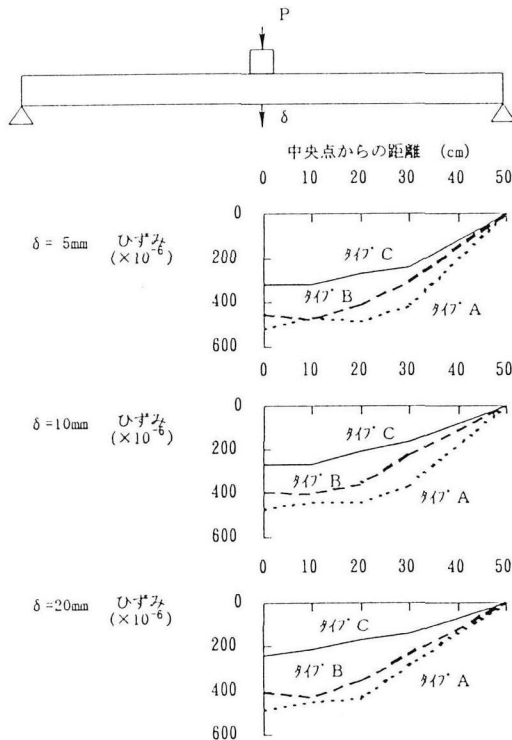


図-1 3 鋼板のひずみ分布（静的載荷）

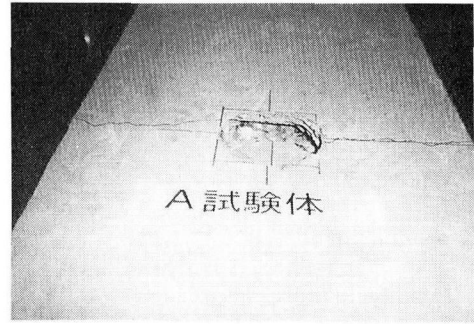


写真-2 静的載荷 押し抜きせん断破壊状況

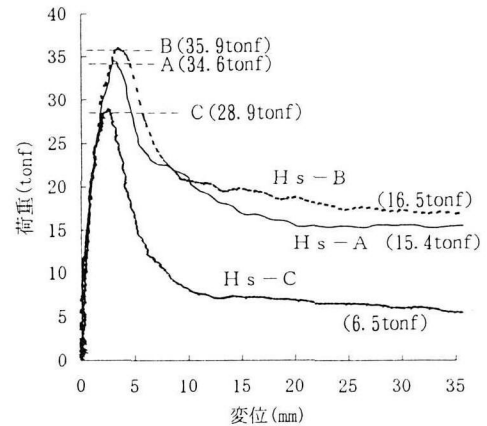


図-1 4 荷重～変位関係（高速載荷）

図-12には荷重～鋼板ひずみ関係を示す。これより硬質ウレタンを充填しないタイプCと、硬質ウレタンを充填したタイプA、Bの荷重～鋼板ひずみ勾配は、図中の①点までは変わらないことから、板全体の弾性挙動時には、さほどウレタンの充填効果は大きくないことがわかる。ウレタン充填効果はむしろ①以降さらにタイプA、Bのひずみが増加することに見受けられ、これは図-11に示したウレタン充填効果が終局耐力に寄与するメカニズムを示すものである。

図-13には、変位 $\delta = 5\text{mm}$ 、 10mm 、 20mm における鋼板ひずみの分布図を示す。これより、変形が増加するに伴いタイプCとタイプA、Bとの差が顕著となることがわかる。また硬質ウレタンによる分布圧力の影響が、載荷点直下のみならず広い範囲の鋼板ひずみに現われていることがわかる。さらに仕切鋼板の効果もタイプAとBの差から若干現れていることが認められる。

(3) 押し抜きせん断破壊モード

写真-2に、実験終了後の押し抜きせん断破壊の状況を示す。押し抜きせん断破壊が載荷治具の直径 10cm の円形に沿って明瞭に形成されている。また破壊面には鉄筋が曲げられた状態で、切断することなく残っている。なお、この時のせん断面の角度は約 $60^\circ \sim 70^\circ$ であった。

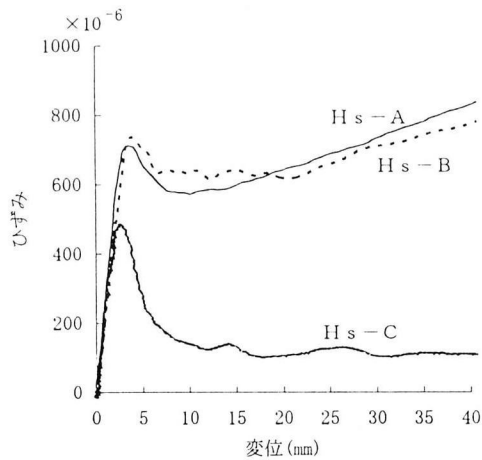


図-15 鋼板ひずみ～変位関係（高速載荷）

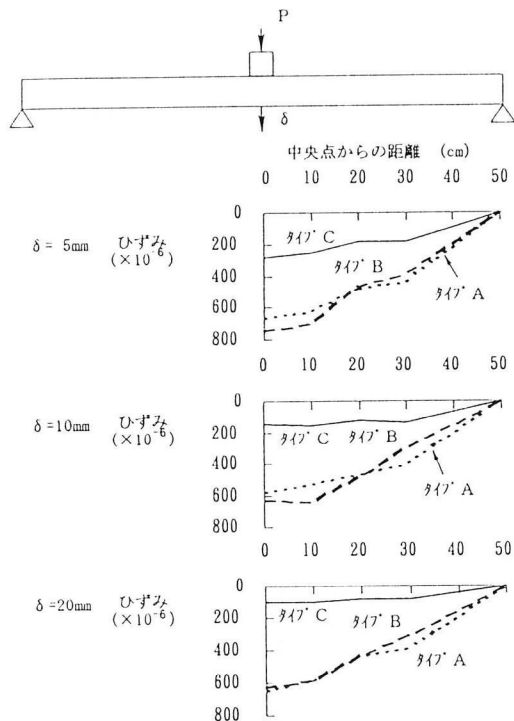


図-16 鋼板のひずみ分布（高速載荷）

3.2 高速載荷実験の結果と考察

(1) 荷重～変位関係

図-14に高速載荷実験によって得られた荷重～変位関係を示す。これより、高速変形下の押し抜きせん断破壊の荷重～変位関係は、静的実験とほぼ同じ弾塑性性状を示すことがわかる。すなわち、最大荷重は、中空のタイプCが約29tonfであるのに対し、硬質ウレタン充填のタイプBが約36tonf、硬質ウレタン充填+仕切鋼板のタイプAは約35tonfとなり、硬質ウレタンの充填効果が静的の場合以上に明瞭に現れているが、仕切鋼板の影響は明確には現れない。一方、最大荷重を生じる変位量は、3～4mmと静的の場合よりも少し大きくなるが、荷重20tonfまでの弾性剛性は静的実験結果とほぼ等しく、20tonf以降の、静的の場合よりも最大荷重が増加した部分の弾

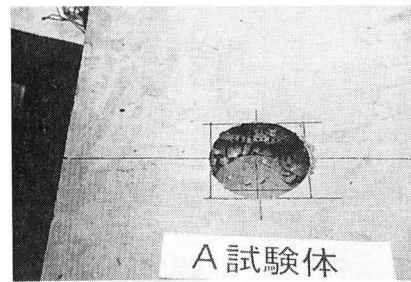


写真-3 高速載荷 押し抜きせん断破壊状況

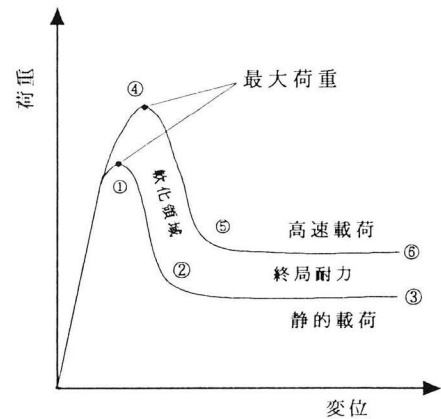


図-17 押し抜きせん断実験の荷重～変位関係模式図

性剛性が少し小さくなるためである。終局耐力については、タイプCが約6.5tonfに対してタイプBは約17tonfと約2倍以上となっており、硬質ウレタンの充填効果が顕著に現れている。しかし、タイプAは約15tonfと逆に下がり仕切鋼板の効果は現れていない。

(2) 鋼板ひずみ

図-15に、高速載荷における底面鋼板のひずみ～変位関係を示す。鋼板ひずみから測定される硬質ウレタンの充填効果は、高速載荷の方が静的実験よりも顕著に現れている。すなわち、中空のタイプCは最大荷重時の変位3mm付近で、最大ひずみ500 μ 付近から急激にひずみが低下し、変位10mm以降では約150 μ となるが、硬質ウレタンを充填したタイプBは最大ひずみ700 μ 付近から一端600 μ に低下するが、その後増加傾向を示している。なお、図-14の荷重～変位関係で確認されたことと同様に、仕切鋼板を付加したタイプAとタイプBの違いはあまり見受けられず、仕切鋼板の効果はあまり大きくない。図-16には、変位 $\delta = 5\text{mm}$ 、10mm、20mmにおけるひずみ分布を示すが、硬質ウレタンを充填したことによって、いずれの変位量においても広範囲に大きな鋼板ひずみが生じており、その影響は静的より顕著である。図-16からもタイプAとBとの差つまり仕切鋼板の効果が現れていないことがよくわかる。

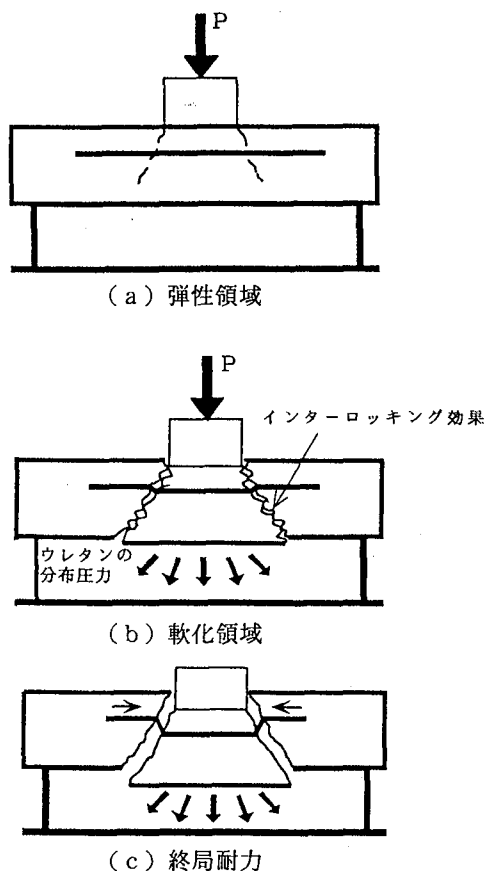


図-18 押し抜きせん断の破壊状況

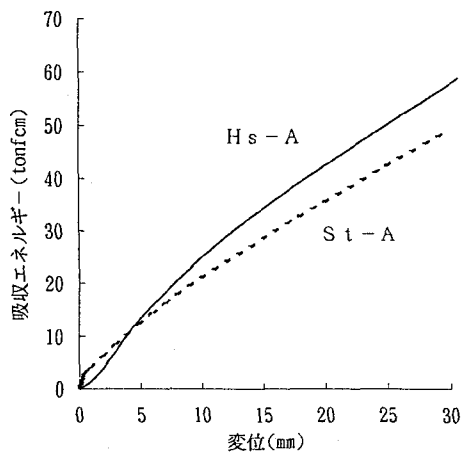
(3) 破壊状況

写真-3には試験終了後の破壊状況を示す。押し抜きせん断による破壊が明瞭に現れており、その破壊面の状況は、角度や面の滑らかさ等について静的の場合とほぼ同じものであった。

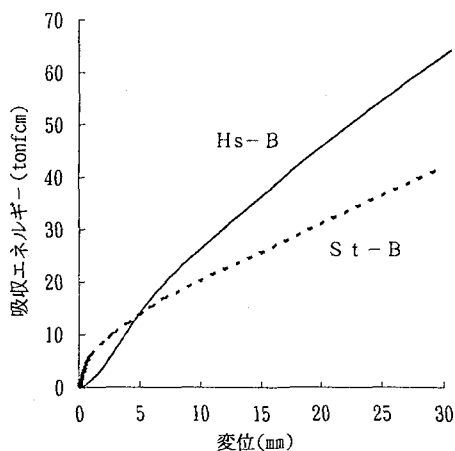
3.3 荷重～変位関係と破壊モードとの関係

図-17に実験で得られた荷重～変位関係を模式的に示す。また図-18には、実験の観察と前述の鋼板ひずみのデータから推察された押し抜きせん断破壊の過程を示す。すなわち、鋼・コンクリート合成板の押し抜きせん断破壊のメカニズムは、以下のとおりである。

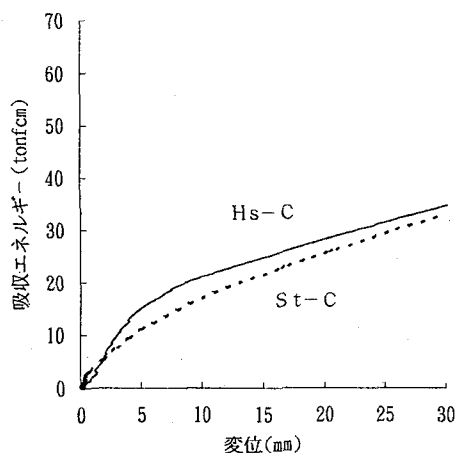
(a) 荷重開始直後の合成板は高い剛性を有するため、生ずる変位は極めて小さく、弾性的に急激に荷重が増加する。しかし、荷重の増大に伴って、コンクリート表面には荷重治具に沿った円形のひび割れが生じ、そのひび割れの接続による破壊面が図-18(a)に示すように徐々に形成される、この破壊面が最終的にコンクリートの裏面にまで達した時に押し抜きせん断破壊の弾性領域が終了し、これが静的実験における最大荷重を与えるものと思われる(図-17の点①)。一方、高速載荷実験の最大荷重が静的実験のものに比して大きくなる(図-17の点④)のは、この耐力増加部分の弾性剛性が静的のものよりやや小さいことから、単にコンクリート材料のひず



(a) タイプA



(b) タイプB



(c) タイプC

図-19 吸収エネルギー～変位関係

み速度効果による増加ではなく、ひび割れ面がコンクリートの裏面に達した後も、破壊面の凹凸によるインターロッキング効果による抵抗が時間遅れに残っているためと考えられる。

表-5 載荷速度の比較

(a) タイプA

区分 載荷速度	最大荷重 (tonf)	終局耐力 (tonf)	吸収エネルギー (tonfcm)
静的載荷 (0.1cm/s)	23.6 (100%)	13.9 (100%)	49.2 (100%)
高速載荷 (400cm/s)	34.6 (147%)	15.4 (111%)	58.3 (118%)

(b) タイプB

区分 載荷速度	最大荷重 (tonf)	終局耐力 (tonf)	吸収エネルギー (tonfcm)
静的載荷 (0.1cm/s)	26.2 (100%)	10.8 (100%)	42.0 (100%)
高速載荷 (400cm/s)	35.9 (137%)	16.5 (153%)	63.5 (152%)

(c) タイプC

区分 載荷速度	最大荷重 (tonf)	終局耐力 (tonf)	吸収エネルギー (tonfcm)
静的載荷 (0.1cm/s)	21.6 (100%)	7.9 (100%)	33.0 (100%)
高速載荷 (400cm/s)	28.9 (120%)	6.5 (82%)	34.6 (105%)

(b) その後、破壊面のインターロッキング効果は、変位の増大に伴って凹凸が少しずつ削られることにより減少するため、板の最大荷重は徐々に減少し軟化領域が形成される(図-18(b))。この変形状態になると、せん断破壊のコアが周りのコンクリート板とずれ変形を生じるため、その直下の硬質ウレタンを押さえつけるように働く。よって、硬質ウレタンは裏面鋼板の反力を得て圧縮応力を生じ、ウレタン充填効果が荷重および鋼板ひずみに明瞭に現れてくるものと思われる。

(c) さらに変形が進むと、押し抜きせん断の破壊面は完全に分離されインターロッキング効果はなくなり、せん断破壊のコアは鉄筋のみによって支えられている状態となり、鉄筋の抜け出しが始まる(図-18(c))。この状態(終局耐力)では、主として鉄筋の抜け出し耐力によって荷重の大きさが決定されるが、硬質ウレタンが充填されている場合には、ウレタンの反力と鉄筋の耐力によって荷重の大きさが決定される。図-17に示すように高速載荷時には硬質ウレタンの最大荷重がひずみ速度効果によって大きくなるため、終局耐力領域のウレタン充填効果が一層明確に現れるものと考えられる。

3.4 載荷速度の影響

図-19に静的載荷(S_t)および高速載荷(H_s)における吸収エネルギー～変位関係を示す。ここで吸収エネルギーとは、図-9で示す荷重～変位関係を変位に関して積分したものであり、その変位までの外力仕事である。硬質ウレタンを充填したタイプBや硬質ウレタン充

表-6 硬質ウレタン充填効果

(a) 静的載荷

区分 タイプ	最大荷重 (tonf)	終局耐力 (tonf)	吸収エネルギー (tonfcm)
タイプC	21.6 (100%)	7.9 (100%)	33.0 (100%)
タイプB	26.2 (121%)	10.8 (137%)	42.0 (127%)

(b) 高速載荷

区分 タイプ	最大荷重 (tonf)	終局耐力 (tonf)	吸収エネルギー (tonfcm)
タイプC	28.9 (100%)	6.5 (100%)	34.6 (100%)
タイプB	35.9 (124%)	16.5 (254%)	63.7 (184%)

表-7 仕切鋼板効果

(a) 静的載荷

区分 タイプ	最大荷重 (tonf)	終局耐力 (tonf)	吸収エネルギー (tonfcm)
タイプB	26.2 (100%)	10.8 (100%)	42.0 (100%)
タイプA	23.6 (90%)	13.9 (129%)	49.2 (117%)

(b) 高速載荷

区分 タイプ	最大荷重 (tonf)	終局耐力 (tonf)	吸収エネルギー (tonfcm)
タイプB	35.9 (100%)	16.5 (100%)	63.7 (100%)
タイプA	34.6 (96%)	15.4 (93%)	58.3 (92%)

填+仕切鋼板のタイプAでは、最大荷重を生じる変位3～4mm付近までは静的載荷の吸収エネルギーの方が高速載荷のものよりも、若干大きな吸収エネルギーとなるが、以後は変位の増加にともなって、高速載荷の吸収エネルギーが静的載荷の吸収エネルギーよりも大きくなる。中空のタイプCの場合にもおおむね同様な傾向が見られるが、静的載荷の吸収エネルギーと高速載荷の吸収エネルギーとはほぼ同じ大きさである。よって、タイプBのように硬質ウレタン充填による影響が吸収エネルギー～変位関係に対し高速載荷の方がより顕著に現れていることがわかる。表-5には、最大荷重、終局耐力および吸収エネルギー(変位30mm)に及ぼす載荷速度の影響を示す。最大載荷荷重はいずれの試験体においても、高速載荷の場合の方が、静的載荷の場合よりも約20～40%大きい。しかし、終局耐力では、タイプBが約50%の増加を示すのに対して、タイプAでは10%とあまり顕著な増加はなく、中空のタイプCでは-18%とむしろ減少している。吸収エネルギーでも、高速載荷による増加率は、タイプBが一番大きく、続いてタイプA、タイプCの順である。

表－8 最大荷重

項目	タイプ	タイプC	タイプB	タイプA
静的載荷	実測値 (tonf)	21.6 (119%)	26.2 (144%)	23.6 (130%)
	推定値 (tonf)	18.2 (100%)		
高速載荷	実測値 (tonf)	28.9 (138%)	35.9 (173%)	34.6 (166%)
	推定値 (tonf)	20.8 (100%)		

このことから、弾塑性域での吸収エネルギーによる安全性評価を考えると、衝突速度・破壊速度が大きいほど、硬質ウレタンを充填することの効果が顕著に現れることが認められる。

3.5 硬質ウレタンの充填効果

硬質ウレタンの充填効果をより明瞭に見るために、表－6に中空のタイプCと硬質ウレタン充填のタイプBを、最大荷重、終局耐力、吸収エネルギーについて比較して示す。これより、最大荷重、終局耐力、吸収エネルギーの全てが硬質ウレタンを充填したものの方が大きくなっており、硬質ウレタン充填効果が顕著であることがわかる。特に、高速載荷時の終局耐力および吸収エネルギーについては、硬質ウレタン充填の場合が中空の場合の約1.8倍も大きな値を示すことから、硬質ウレタン充の効果は、衝撃的な荷重を受ける場合により顕著に現れることが確認される。

3.6 仕切鋼板の効果

仕切鋼板の効果を判定するために、表－7に硬質ウレタン充填のタイプBと硬質ウレタン充填＋仕切鋼板のタイプAの最大荷重、終局耐力および吸収エネルギーを比較して示す。まず、最大荷重をみると静的載荷および高速載荷のいずれの場合にも、仕切鋼板を有するタイプAの方が、仕切鋼板を入れないタイプBよりも小さくなっており、仕切鋼板の効果は見られない。また、終局耐力および吸収エネルギーでは、静的載荷時には、仕切鋼板を入れたタイプAの方が約20%大きな値を示すが、高速載荷では小さな値を示しており、高速の場合には仕切鋼板を入れる効果があるとは言いがたい。

4. せん断耐力式の検討

コンクリート標準示方書⁶⁾は、鉄筋コンクリート床板の押し抜きせん断耐力を次式によって推定するものとしている。

$$V_{pcc} = f_{pcc} \cdot u_p \cdot d / \gamma_p \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 V_{pcc} :押し抜きせん断耐力

$$f_{pcc} = 0.6 \cdot \beta_s \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot \sqrt{f'_c}$$

$$\beta_s = \sqrt[4]{100/d}, \beta_p = \sqrt[3]{100/p}$$

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

f'_c : コンクリートの静的圧縮強度(kgf/cm²)

u : 載荷面の周長(cm), u_p : 設計断面の周長で、載荷面から $d/2$ 離れた位置で算定, d : 有効高さ, p : 鉄筋比で二方向の鉄筋に対する平均値, γ_p : 安全係数で1.3が用いられるが、ここでは生の推定値を得るため1.0とした。

式(1)は、高速載荷による変形速度の効果は考慮されていない。実験結果の破壊面の観察によると、その形状は静的の場合も高速載荷の場合もほぼ同じであったことから、式(1)に用いられる変数の中で、コンクリートの圧縮強度が特に変形速度の効果を受けるものと考えられる。高橋ら⁷⁾は、コンクリート圧縮強度のひずみ速度効果を次式によって提案した。

$$f'_{cd} = \{1.49 + 0.27(\log \varepsilon_{xi}) + 0.035(\log \varepsilon_{xi})^2\} \times f_c \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 f'_{cd} : 動的圧縮強度、 ε_{xi} : コンクリートのひずみ速度。

よって、式(1)の静的圧縮強度に代えて、式(2)で与えられる動的な圧縮強度を用いることによって高速載荷におけるせん断耐力の推定式として修正することを試みた。なお、ひずみ速度は、最大荷重が生じた時間(10ms)までに、コンクリートの平均的破壊ひずみ 3000×10^{-6} に達する速度0.3 (1/s)を用いて算定した。

表－8に、推定値と実測の耐力を比較して示す。推定値は、静的実験の中空の場合で約19%の余裕をもった値を得ているが、高速載荷では、その余裕が約38%と若干大きな安全余裕となる。当然のことながら、式(1)にはウレタン充填効果は考慮されていないため、タイプAやBの場合には、実測値が推定値の静的で約30～40%程度、高速載荷で約60～70%大きなものとなっている。

5. 結 言

本研究の成果を要約すると、以下のようになる。

(1) 鋼・コンクリート合成板の押し抜きせん断破壊実験の結果得られた荷重～変位関係は、弾性領域、軟化領域、終局耐力領域の3つの領域からなる弾塑性性状を示した。

(2) 最大荷重は、概ね弾性挙動の終了する際に生じ、それ以降の軟化領域および終局耐力領域の荷重は、コンクリート破壊面のインターロッキング効果や、鉄筋の変形・抜け出しによる抵抗力によって決定されることが認められた。また、この領域で硬質ウレタンを充填した場合には、これに加えて硬質ウレタンの抵抗力も付加される。

(3) 硬質ウレタンを充填する効果は、最大荷重よりもそれ以降の終局耐力に顕著に現れる。この効果は、載荷速度が大きいとさらに顕著になる。

(4) 硬質ウレタンを充填した場合の終局耐力は、中空の場合に比して、静的載荷の場合で約37%、高速載荷の場合には約150%増加した。また硬質ウレタンを充填した場合の吸収エネルギーは、静的実験で約27%、高速載荷で約

84%増加した。

(5) 硬質ウレタンの充填に加えて仕切鋼板を配する効果は、静的載荷において若干見られるが、高速の場合にはあまり影響は見られなかった。

(6) 現行の押し抜きせん断耐力推定式に、コンクリート強度のひずみ速度効果を考慮した修正を試みた。その推定値は、実測値よりも静的で約20～40%、高速載荷で約40～70%小さくなり、安全側の値を得ることができた。特に、硬質ウレタンを充填したもので高速載荷の場合には、約2/3の値となるため、別途評価式を検討する必要がある。これについては今後研究する予定である。また、実設計に対しては、より詳細な実験や理論的な研究が必要である。

謝辞：本研究を行うに当たり、防衛大学校助手園田佳巨氏および当時学生の阪田洋氏のご援助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧, 1983年7月.
- 2) 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案)：土木学会 コンクリートライブラリー73, 1992.7.
- 3) 太田貞次, 山田信一, 具志保武, 宮坂睦夫：軽量充填材を使用した合成型枠橋の開発, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, I-246, pp. 522～523, 1990.9.
- 4) 山本恭嗣, 園田佳巨, 太田貞次, 石川信隆, 太田俊昭：硬質ウレタンを充填した鋼・コンクリート合成梁部材の静的および衝撃応答特性に関する実験的考察, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1645～1652, 1993年3月.
- 5) 松葉美晴・後藤吉晴・佐藤彰・音田奨・岡畑博子：実物大PC製シェッドの落石による破壊実験について, 第10回土木学会新潟会講演概要集, pp. 14～25, 1992年11月.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書(昭和61年制定)設計編
- 7) 高橋芳彦, 大野友則, 太田俊昭, 日野伸一：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼすひずみ速度効果, 構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 1567～1580, 1991年3月.

(1994年9月14日受付)