

鋼・コンクリート合成サンドイッチ板の動的挙動と耐衝撃性能に関する一考察

AN EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC BEHAVIORS AND IMPACT RESISTANCE OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE PANELS UNDER IMPACT LOADINGS

小暮幹太*, 鶴居正行**, 大野友則***, 安藤智啓****, 山口 弘*****

Kanta KOGURE, Masayuki UI, Tomonori OHNO, Tomohiro ANDOU and Hiroshi YAMAGUCHI

* 工修 防衛大学校研究員 土木工学科 (〒239 横須賀市走水1-10-20)

** 工修 元防衛庁第4研究所 研究員 (〒229 相模原市淵野辺2-9-54)

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

**** 工修 防衛庁第4研究所 研究員 (〒229 相模原市淵野辺2-9-54)

***** 工博 防衛庁第4研究所 研究室長 (同上)

This paper gives experimental results of the dynamic behaviors and the impact resistance of composite panels in which core concrete is sandwiched by steel skin plates under impact loadings. In this study, different three types of loading tests were carried out to investigate the characteristics of composite panels. From the results of both static and high-speed loading tests (loading speed: 4m/s), static and dynamic behaviors were compared to find out the effects of the dimensions and the spacing of shear connector and the thickness of steel plate on the dynamic characteristics as the failure mode. To examine the impact resistance of composite panels subjected to impact loads, the drop weight impact loading tests were done. Then the most effective factor in configurations of composite panels to have influence on the impact resistance was found out.

Key Words : sandwich panel, impact loading test, impact resistance, shear connector

1. はじめに

近年, 土木・建築分野における各種構造物, 例えば原子力発電関連施設など重要構造物に対する衝撃安全性が求められるようになり, RC部材の衝撃挙動の解明と耐衝撃性の向上を目指した研究が行われている。

著者らは, 物体が高速で衝突する際にRC板に生じる表面破壊や裏面剥離などの局部損傷の防止効果を耐衝撃性の指標として, RC板の配筋方法や, 通常のRC板に鋼板を補強したいわゆるロビンソン型の合成板に対する検討を行ってきた。その結果, 細径の鉄筋をメッシュ状に密に配筋すること, およびRC板に鋼板を補強した合成板が局部損傷の抑制に極めて効果的であることを実験的に確認してきた^{1), 2)}。

一般に, 鋼とコンクリートから成る合成構造は, 通常の鉄筋コンクリート構造に比べると, 高強度, 高靱性の特性を有することがわかっており, 各種構造物への適用例が増加しつつある。とくに土木分野では, 道路橋の橋脚, 港湾構造物などにおいて大型の合成構造が見られるようになっている³⁾。また, 兵庫県南部地震以降, 既存構造物の耐震補強が全国的に緊急の課題となっており, 合成構造の耐震性についても関心が向けられている⁴⁾。

しかしながら, 合成構造の適用例が数多く報告されている一方で, 部材レベルでの力学的性状や挙動に関しては静的荷重の作用条件においても未だ十分に解明されていないのが現状である。著者らも既往の研究においては鋼・コンクリート合成板の動的な力学性状と衝突時の挙動との関連については未検討であった。また, 終局限界状態における鋼・コンクリート合成板の破壊性状, とくに押し抜きせん断強度を評価するためには, 実験データを蓄積することが必要であると指摘されている⁵⁾ものの, 実験装置の制約など種々の制約のため研究例は極めて少ない。

そこで本研究は, 主として, 鋼板を2枚使用したサンドイッチ構造 (以下, サンドイッチ板と呼ぶ) の鋼・コンクリート合成板を対象として, まず静的および動的力学特性を把握するための静的・急速の2種類の載荷実験と, 衝撃力を受ける鋼・コンクリート合成板の衝撃挙動と耐衝撃性を調べるための落下衝突実験を行った。鋼・コンクリート合成板の力学特性を支配すると考えられるパラメータとしては, 補強する鋼板の厚さや, コンクリートと鋼板のずれ止めに用いるシアコネクタの諸元・補強間隔等があり, 本実験では, これらのパラメータの中から耐衝撃性能を向上させるのに最も効果的な要因を特定することをねらいとしている。

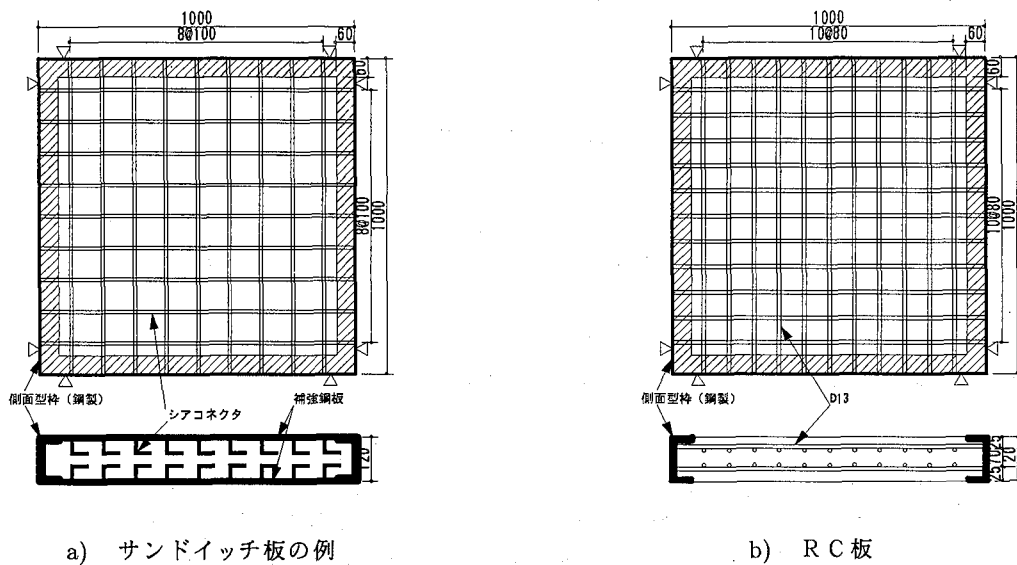


図-1 試験体の概要

単位 (mm)

表-2 主な材料特性

コンクリート圧縮強度		鉄筋 (規格 SD295A)			
540 kgf/cm ²		降伏点 3610 kgf/cm ²	引張強度 5042 kgf/cm ²	伸び 26 %	
鋼材	厚さ(mm)	1	2.1	3.0	4.5
	降伏点 (kgf/cm ²)	2333 (0.2%)	3727	3727	3640
	引張強度 (kgf/cm ²)	3569	4387	4420	4405
	伸び (%)	47.5	33.7	34.1	36.6

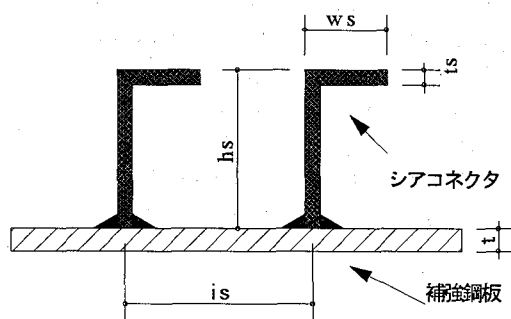


図-2 シアコネクタの概要

2. 載荷実験の概要

載荷実験では、試験体上に設置した載荷治具を介して試験体に載荷し、載荷時の力学特性（強度、変形性能など）を調べる。ここでは各パラメータおよび載荷速度が鋼・コンクリート合成板の力学特性に及ぼす影響を調べる。

2.1 試験体の概要

図-1に試験体の概要を示す。試験体のコンクリート部分の厚さは、すべて同じ12cmとし、図-2に示すような逆L型のシアコネクタを用いて板の両面で鋼板をコンクリートと合成させるタイプ（8種類）と、シアコネクタの代わりにエポキシ接着剤でコンクリートに貼り付けるタイプ（1種類）を製作した。サンドイッチ板試験体を製作するにあたっては、シアコネクタを鋼板に溶接し、これを型枠として内部にコンクリートを充填した。またサンドイッチ板の耐力や変形性能などと比較するために、厚さ12cmの通常の複鉄筋コンクリート板（以下、RC板と呼ぶ）、載荷裏面のみにエポキシ接着剤で鋼板を補強した合成板（以下、オープンサンドイッ

チ板と呼ぶ）、および鋼板をエポキシ接着剤でRC板の裏面のみに補強した合成板（以下、オープンRC板と呼ぶ）をそれぞれ1種類ずつ製作した。本実験での試験体数は、静的載荷用12体、急速載荷用12体および、後で述べる衝突実験用12体の合計36体である。試験体の寸法・諸元を表-1に、主な材料特性を表-2に示す。試験体の設計条件は、RC板の鉄筋比を基準としている。すなわち、合成板の設計には、鋼材比（ここで言う鋼材比とは、便宜的に、鋼・コンクリート合成板に用いる鋼板とシアコネクタの体積が、試験体の単位体積あたりに占める割合として定めたものである）がRC板の鉄筋比と等しい鋼板厚が1mmのサンドイッチ板3種類（番号1～3）と、鋼板厚さを変えることで鋼材比を約2，3，4倍にそれぞれ増加させた試験体3種類（番号4～6）を製作している。これに、鋼材比がRC板の2倍でシアコネクタ間隔を変えたサンドイッチ板2種類（番号7，8）とエポキシ接着剤による補強効果を検討するための試験体3種類（番号9，10，12）を加えた合計12種類の試験体である。

2.2 実験装置と実験の種類

静的および急速載荷実験における試験体の設置状況を、写真-1に示す。試験体は、天端幅8cm、一辺の長さが110cmの正方形の固定用治具の上に4辺単純支持（純スパン84cm）で設置している。なお、載荷時に試験体の周辺が浮き上がるのを防止するために、各辺4本のボル

表-1 試験体の寸法・諸元・載荷条件 (※印：鉄筋比)

番号	呼び名	鋼板厚 上/下(mm)	シアコネクタの形状および間隔(mm)				鋼材比 (%)	載荷条件		
			hs	ws	ts	is		静的	急速	衝撃
1	SAND-1	1.0/1.0	40	0	1.2	100	1.5	○	○	○
2	SAND-2	1.0/1.0	30	9.5	1.2	100	1.5	○	○	○
3	SAND-3	1.0/1.0	20	20	1.2	100	1.5	○	○	○
4	SAND-4	2.3/2.3	25	26	1.6	100	3.0	○	○	○
5	SAND-5	3.2/3.2	25	25	3.2	100	4.7	○	○	○
6	SAND-6	4.5/4.5	25	25	3.2	100	5.8	○	○	○
7	SAND-7	2.3/2.3	27	28	1.2	75	3.0	○	○	○
8	SAND-8	2.3/2.3	30	35	1.6	125	3.0	○	○	○
9	SAND-9	2.3/2.3	—	—	—	—	1.8	○	○	○
10	OPEN-10	0/2.3	—	—	—	—	1.9	○	○	○
11	RC-11	0/0	—	—	—	—	※1.5	○	○	○
12	ORC-12	0/1.0	—	—	—	—	2.2	○	○	○

表-3 検討項目

検討項目	内容	対象試験体
①シアコネクタの形状	鋼材比を一定としてシアコネクタの形状（高さ、幅）を変える	SAND-1, 2, 3
②鋼板厚	シアコネクタ形状を一定として、補強鋼板厚を変える	SAND-4, 5, 6 および SAND-3
③シアコネクタの間隔	鋼材比および鋼板厚を一定としてシアコネクタ間隔を変える	SAND-7, 8, 4
④鋼板の補強位置	エポキシ接着剤を用いて鋼板を補強（接着）させる位置を変える	SAND-9 OPEN-10
⑤鋼板補強	通常のRC板にエポキシ接着剤を用いて鋼板を補強する	RC-11 ORC-12

トで押さえている。実験に用いた装置は、最大100tonfの載荷容量を有し、油圧弁を制御することで静的から5m/sまでの急速載荷が可能であり、最大変位45cmまで試験体を載荷できる。載荷にあたっては、載荷体（鋼製円柱棒：150cm,φ10cm,材質:SCM435）を試験体に接触させた状態から開始するので、急速載荷においても衝撃応力は発生せず、材料強度や部材の終局限界性能に及ばず速度効果を調べることができる。本実験では、載荷速度を静的と急速（載荷速度4m/s）の2種類とし、静的および動的な力学特性（破壊性状、耐荷力およびエネルギー吸収容量）について調べた。計測は載荷時に得られる荷重と変位および鋼板のひずみ分布について行った。なお、載荷変位はコンクリート部分の厚さと同じ12cmに設定したが、載荷装置の特性から設定した最大変位量付近では載荷速度が多少減速（急速載荷時）するため、考察は載荷変位10cmまでのデータで行うことにする。主な検討項目を表-3に示す。

2.3 載荷実験の結果および考察

(1) RC板とサンドイッチ板の力学特性の違い

図-3に載荷実験（静的・急速）で得られた各試験体の最大耐力と、最大耐力時および載荷変位100mmまでに試験体が吸収したエネルギー量（荷重～変位曲線で囲まれる面積）を示す。載荷後のRC板の状態を調べる

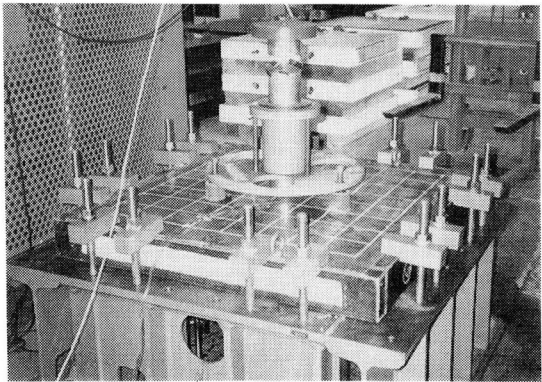
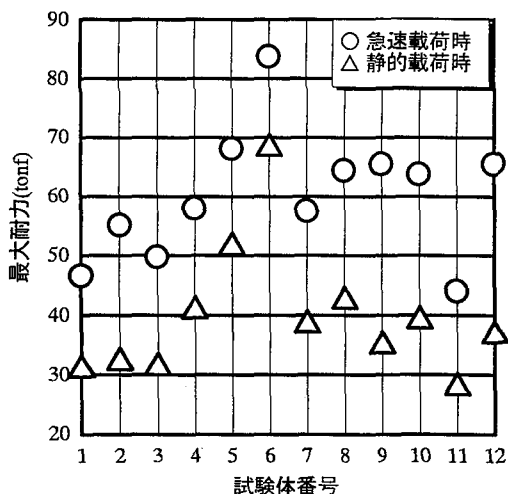


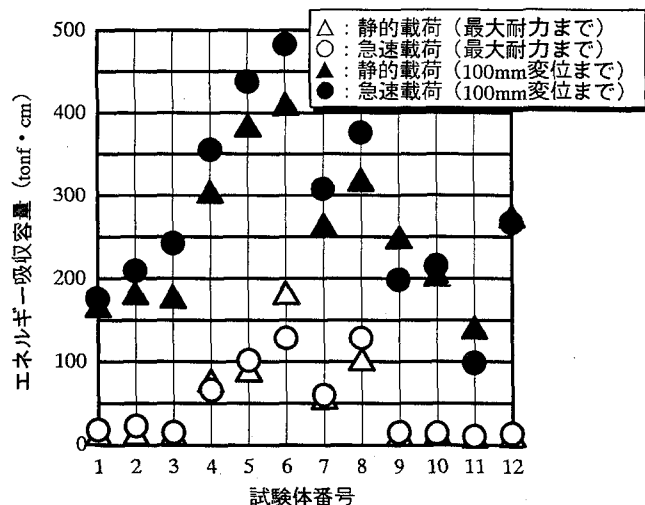
写真-1 載荷実験の状況

と、曲げ破壊による降伏線はほとんど認められず、本実験の載荷条件における破壊のモードは押し抜きせん断破壊であった。

ここではまずRC板とサンドイッチ板の静的および動的挙動を比較するために、RC板の鉄筋比とサンドイッチ板は鋼材の体積比がほぼ等しく1.5%になるように設計したRC-11およびSAND-3の静的および急速載荷に対する実験結果を図-4に示す。図のa), b)より、RC板は静的および急速載荷のいずれの場合も、最大耐力に達した後、載荷部分のコンクリートの圧壊によって耐力が急激に低下する。その後静的載荷時では、下端筋が引張力を負担することによって下端筋が破断あるいは抜け落ちるまで耐力がやや上昇する。その後耐力が再び減少を開始する時点に対応する変位を終局変位（図中■印）と定義すると、静的終局変位量は約50mmである。急速載荷に対しては、変形が局部的になることで、静的載荷の場合より下端筋の破断が早い変位段階で生じる。このため、静的載荷時より材料のひずみ速度効果などにより載荷直後の耐力は上昇するが、終局変位量は約35mmとなる。また、いずれの載荷の場合も圧壊後に載荷点を中心として円錐状にコンクリート



a) 試験体の最大耐力



b) 荷重時のエネルギー吸収容量

図-3 荷重実験の結果

が欠落する。

これに対してサンドイッチ板の耐力はRC板よりも静的荷重、急速荷重のいずれも12%ほど上昇している。最大耐力後、荷重部分の鋼板は荷重体の縁の部分で破断し、コアのコンクリートの圧壊によって低下するが、裏面の鋼板によってコアのコンクリートは剥落することなく拘束状態を保つため耐力が保持される。変形にともなって累積される部材のエネルギー吸収量は静的荷重時においてはRC板とサンドイッチ板に顕著な違いは認められないが、急速荷重時ではRC板のエネルギー吸収が変位50mm前後でほぼ頭打ちになるのに対して、サンドイッチ板は荷重変位100mmにおいても裏面鋼板の破断が生じないため耐力を保持した状態で変形がすすむ。その結果RC板よりもエネルギー吸収量が著しく増加する。以下に、本研究で扱ったパラメータ毎に鋼・コンクリート合成板の強度と変形性能について検討する。

(2) シアコネクタの高さと幅の影響

ここで検討するシアコネクタの概要を、図-5に示す。シアコネクタはいずれも厚さが同じ(1.2mm)で、鋼材比がほぼ等しくなるように高さや頂部幅を変えた3種類の形鋼で、SAND-1、SAND-2およびSAND-3にそれぞれのシアコネクタを用いて鋼板を合成している。なお、外殻の補強鋼板の厚さはいずれも1.0mmとしている。

図-3より、静的荷重時の力学特性(耐力力、エネルギー吸収容量)には顕著な差はほとんどないが、急速荷重時では、エネルギー吸収容量は、シアコネクタの頂部に付けたフックの幅を長く(SAND-1→SAND-2→SAND-3)することで増加することが認められる。これは、図-6において、最大耐力以降変位量が60mmより大きくなると変形性能が試験体によって異なるため、頂部幅のないSAND-1は急激に耐力が低下し、変位80mm以降は耐力がほとんどなくなっている。荷重後の状態を比較すると、SAND-1では裏面鋼板の変形が局所的で亀裂が荷重点周辺に生じるのに対し、頂部幅の大きい

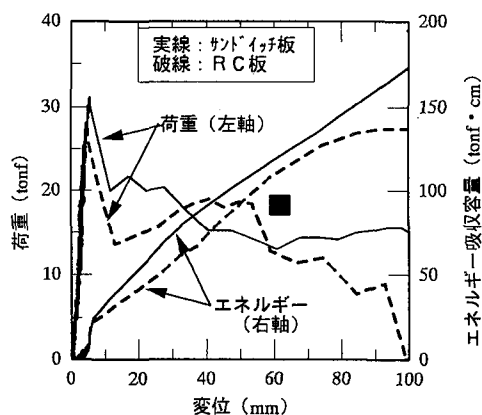
SAND-3では鋼板が支点到及び広い範囲で曲げ変形している。荷重によってコアのコンクリートは裏面鋼板に拘束された状態で破砕しながら下に押し下げられる。さらに荷重変位が大きくなるとコンクリートと裏面鋼板にはずれ変位が生じるが、シアコネクタが有効に働くことでコンクリートと鋼板の一体性が確保される。急速荷重時においては、シアコネクタ頂部に幅を設けることでこのような鋼板とコンクリートのずれ止め効果が発揮され、裏面鋼板の膜伸び変形がより広い範囲で生じ、サンドイッチ板の変形性能が向上したものと考えられる。

(3) 補強鋼板厚の影響

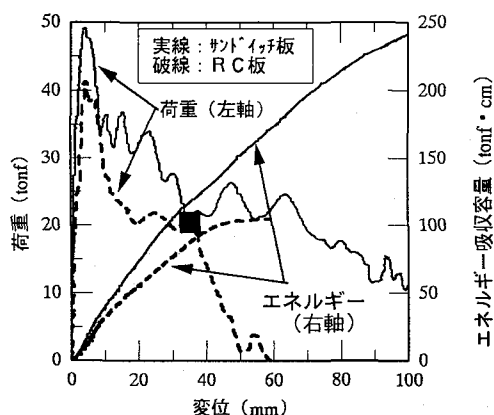
シアコネクタの形状は同一とし、鋼材比を主に外殻の補強鋼板の厚さを増加させることで設計した試験体から、補強鋼板厚の影響について調べる。用いた補強鋼板の厚さは、2.3mm(SAND-4)、3.2mm(SAND-5)および4.5mm(SAND-6)の3種類で、実験結果を図-7に示す。静的・急速のいずれの荷重時でも補強鋼板厚に比例して、最大耐力は増加する。また、鋼板厚1.0mm(SAND-3)と比較すると、補強鋼板厚を増すことで最大耐力が生じるまでにエネルギー吸収が期待できることがわかる。

Brandesら⁶⁾は、RC板の静的および急速荷重実験を行い、実験で得られる破壊のモードと荷重～変位関係を図-8のように分類している。図で、mode Iは弾性限界を越えた直後に小さなたわみ変形でコンクリートが押し抜ける押し抜きせん断破壊モード、mode IIは弾塑性曲げ変形が生じた後、曲げひびわれをともなった局部的せん断破壊が生じる曲げ押し抜きせん断破壊モード、mode IIIは降伏線に沿って塑性ヒンジによる終局的な回転能力に達するまで塑性曲げ変形をともなって全体的に曲げ破壊するモードをそれぞれ示している。

このような分類と対応させると、RC板や補強鋼板厚が薄いサンドイッチ板(SAND-3)ではmode Iの押し抜きせん断破壊であったが、ある程度厚い鋼板を用いれば



a) 静的載荷



b) 急速載荷

図-4 RC板とサンドイッチ板の力学特性の違い
(■印: RC板の終局変位)

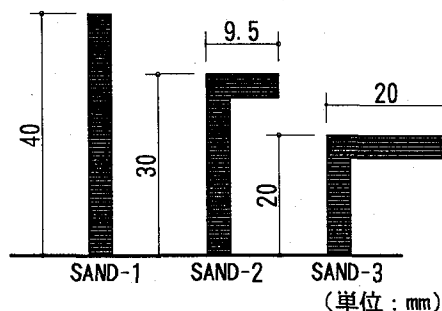


図-5 シアコネクタの形状の違い

mode Iからmode IIになり、さらに鋼板厚を厚くすることでサンドイッチ板の破壊モードがmode IIからmode IIIへ変わっていく。通常、このようなモードの違いは部材の曲げ耐力と押し抜きせん断耐力の大小関係で決まり、曲げ耐力が押し抜きせん断耐力より大きくなれば押し抜きせん断破壊し、その逆では曲げ破壊する。すなわち本実験の載荷条件において載荷面側の鋼板厚を厚くすることでサンドイッチ板の押し抜きせん断耐力が増大し、破壊のモードが十分な弾塑性曲げ変形をともなった押し抜きせん断型に移行したものと考えられる。

(4) シアコネクタ間隔の影響

補強鋼板の厚さが同一(2.3mm)でシアコネクタの配置間隔が100mm (SAND-4)、75mm (SAND-7) および125mm (SAND-8) の場合を比較すると、耐力力・エネルギー吸収容量ともに間隔が125mmのSAND-8の試験体がもっとも大きな値となった。図-9には比較のためにシアコネクタの代わりにエポキシ接着剤で鋼板を合成したSAND-9の実験結果もあわせて示している。最大耐力以降の変形性能にシアコネクタ間隔の影響による顕著な違いは認められないが、最大耐力が生じる変位量はSAND-8が最も大きく、シアコネクタの間隔が広くな

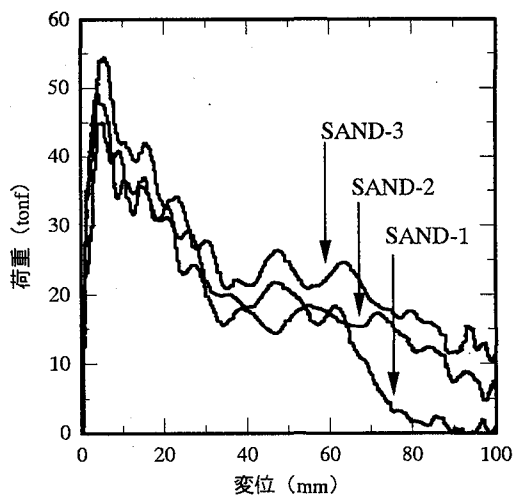
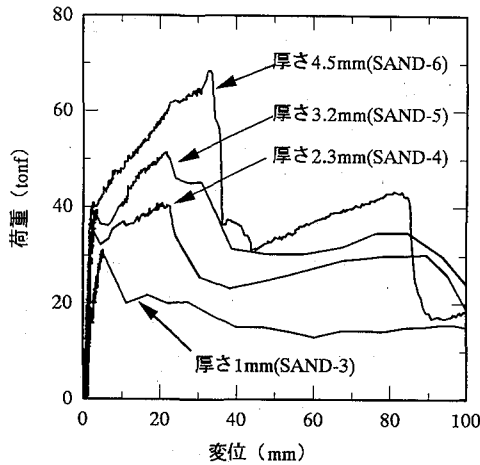


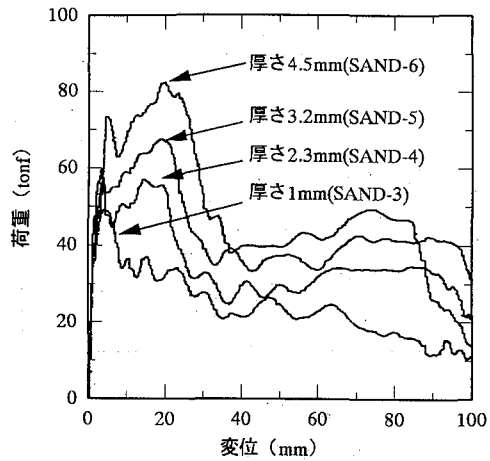
図-6 シアコネクタの形状の影響
(急速載荷時の荷重～変位関係)

ると曲げ押し抜きせん断型に移行していることがわかる。一般的に、シアコネクタはひびわれの発生を促進させるため、部材のひびわれ発生耐力が小さくなるといわれている⁷⁾。したがって、本実験の載荷条件では、載荷体直下のコンクリートに生じるひびわれ発生耐力に圧縮側補強鋼板のシアコネクタ間隔が影響し、ひびわれの分散性状の違いなどによって最大耐力に至るまでの変形性能に違いが生じたものと考えられる。

通常、シアコネクタの間隔については、圧縮側についてとくに検討されることはない。また、配置すべきシアコネクタの数は、単にシアコネクタに作用するせん断力を、個々のシアコネクタのせん断伝達耐力で除することで求め、配置間隔については定められていない⁷⁾。SHIMAら⁸⁾の一面せん断実験によれば、シアコネクタの間隔によってシアコネクタの耐力力性能が異なることが指摘されており、今後はシアコネクタの間隔が部



a) 静的載荷



b) 急速載荷

図-7 補強鋼板厚の影響

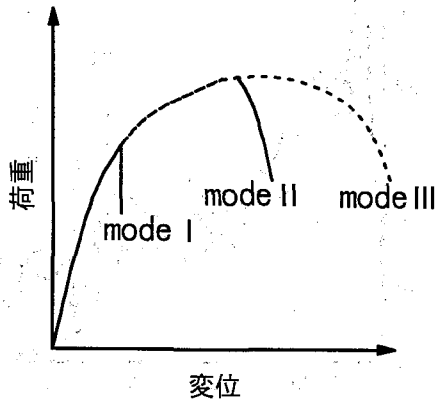


図-8 Brandesらによる破壊モードの分類⁶⁾

材の耐荷力性能に及ぼす影響について詳細な検討を行う必要がある。

一方、エポキシ接着剤を用いて鋼板とコンクリートを合成させたSAND-9では、シアコネクタを用いた場合と異なり、押し抜きせん断破壊型の挙動を示している。形鋼シアコネクタが用いられる理由として、外殻の鋼板自体の補剛効果があげられるが、エポキシ接着型では、シアコネクタを用いた場合より圧縮鋼板の剛性が低いため、少ない曲げ変形で載荷体の外縁の鋼板が破断しコンクリートの圧壊が生じるものと考えられる。また、急速載荷時の変形性能は、シアコネクタを用いたサンドイッチ板より低下する。この原因として、エポキシ接着剤によるコンクリートと鋼板のずれ止めや付着特性に及ぼす載荷速度の影響が考えられ、用いるエポキシの種類や合成方法についてもさらに検討が必要である。

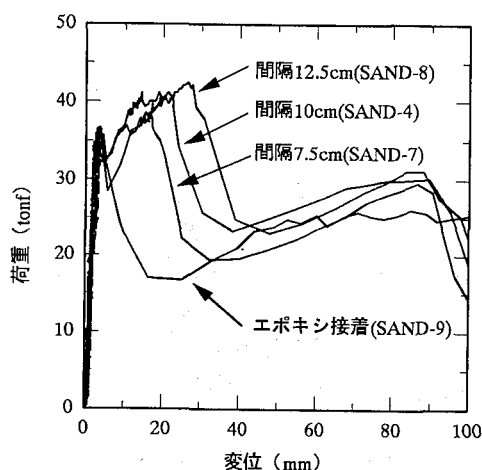
(5) 鋼板の補強位置およびRC板への鋼板補強の影響
著者ら⁹⁾は、厚さ0.8mm~1.6mmの薄い鋼板を衝突面、衝突裏面および両面にスタッドで合成した鋼・コン

クリート合成板の高速衝突実験(衝突速度170m/s)を行った。その結果、衝突面側の補強鋼板は表面破壊によるコンクリートの飛散を防止する効果は期待できるが、貫入や裏面剥離の抑制効果にほとんど影響しないことを確認した。ここでは著者らの既往の研究⁹⁾では未確認であったエポキシ接着剤で鋼板を両面補強したSAND-9、裏面補強のOPEN-10とRC板(RC-11)およびRC板の裏面のみにエポキシ接着剤で鋼板を補強したオープンRC板(ORC-12)について強度と変形性能を比較・検討する。

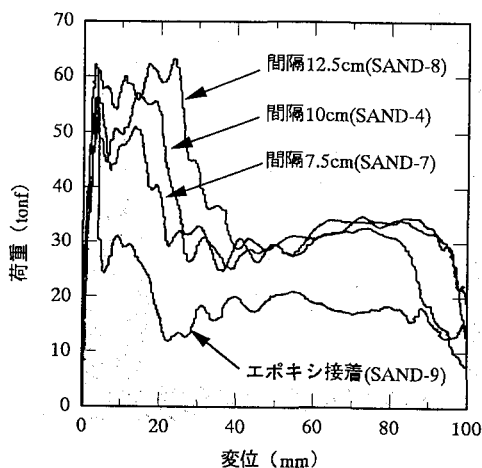
図-3(番号9および10)に示されるように、両面補強と裏面補強とで最大耐力およびエネルギー吸収容量に顕著な差は認められない。これは、先に述べたようにシアコネクタを用いないで鋼板を合成させた場合、鋼板自体の剛性が低いため、鋼板が載荷体によって少ない曲げ変形で押し抜かれてしまう。その結果耐力や破壊のモードにほとんど影響しないためである。

一方、サンドイッチ形式ではなく、RC板の裏面だけに鋼板を補強した場合は、図-10に示すように、裏面鋼板が引張鉄筋量を増加する効果となって部材の曲げ剛性が増加するため最大耐力が増大している。実験では、RC板に比べて静的載荷時で約30%急速載荷時で約50%耐力が上昇した。また、変形性能およびエネルギー吸収容量も圧壊後の裏面鋼板の影響で大幅に向上しており、わずか1mm程度の鋼板を補強するだけで力学特性が大幅に改善されることがわかる。急速載荷時の最大耐力を比較すると、オープンRC板(最大耐力65.5tonf)はサンドイッチ形式の試験体(番号1,2,3,4,7)より大きく、厚さ3.2mmの鋼板を補強したサンドイッチ板(最大耐力68.1tonf)に近い耐力を有しており、既存の部材に対する補強方法としては静的・急速の載荷に対してかなり有効であることが実験から確認できる。

また、鋼・コンクリート合成板の静的せん断耐力を評価するために、既往の押し抜きせん断耐力式¹⁰⁾を準用すると、図-11のように求められる。この際、押し抜き



a) 静的載荷



b) 急速載荷

図-9 シアコネクタの間隔の影響

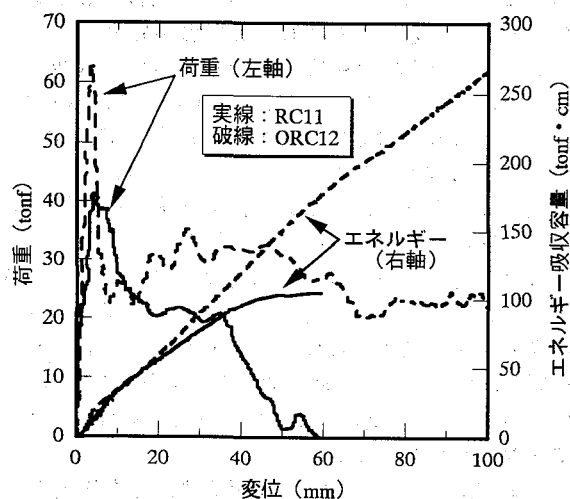


図-10 RC板への鋼板補強の効果
(急速載荷時)

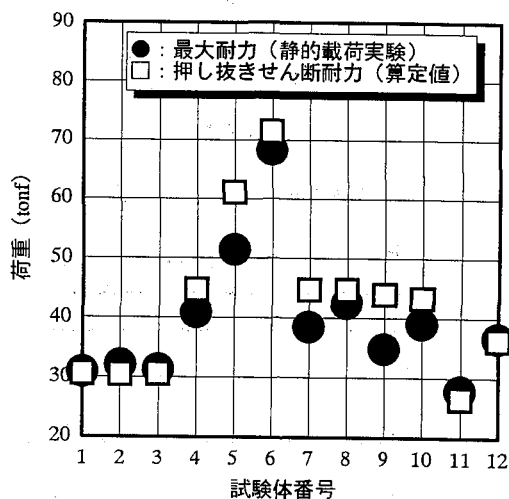


図-11 実験値と算定値
(静的載荷時)

せん断耐力に影響する試験体の有効高さは裏面鋼板から載荷面までの高さとし、鉄筋比は裏面の補強鋼板とシアコネクタをあわせた体積が鋼・コンクリート合成板全体の単位体積あたりに占める体積比(鋼材比)として計算し、式の適用範囲外の鋼材比についてもそのまま数値を代入している。図より、静的押し抜きせん断耐力を求める既往の算定値は概ね実験値と近い値を示している。載荷実験より、鋼・コンクリート合成板の最大耐力や変形性能は、シアコネクタの間隔の影響なども受けるので、今後これらの影響を考慮した算定式について検討する必要がある。

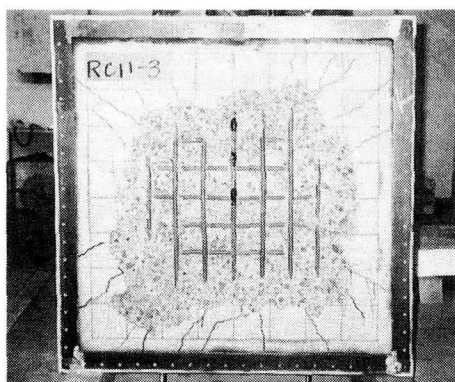
3. 衝突実験の概要

衝突実験に用いた試験体は、静的・急速載荷実験に用いたものと全く同一の12種類(12体)である。前章においては、各パラメータ(シアコネクタ形状・間隔、鋼板厚、補強位置)が部材の曲げやせん断変形などの

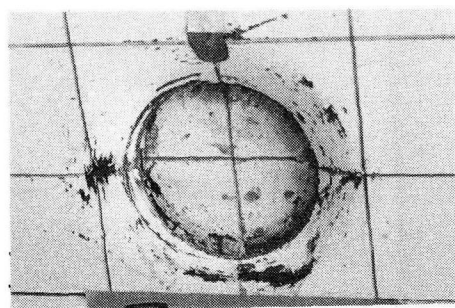
2次応答(これに対し1次応答は、衝突によって部材の局部に生じる表面破壊や貫入などの局部的損傷が生じる挙動を言う)に及ぼす影響について調べた。衝撃力を受ける部材の耐衝撃性は、1次応答による局部損傷の大きさと評価されることもあるので、物体の衝突という実現象に即した衝突荷重に対して検討するために衝突実験を行った。

3.1 実験装置および載荷条件

落錘式衝突実験は、ある重量の重錘をある高さから落下して試験体に衝突させる方式の実験である。本実験では、最大落下高さ18m、真空加速方式により重量30kgfの重錘を70m/sで衝突させる能力を有する真空加速式落下衝撃装置¹¹⁾を使用した。今回の実験では、1回の衝突によって板厚12cmのRC板の裏面コンクリートが剥離(裏面剥離)する程度の衝撃力を作用させるものとし、既往の研究結果¹⁾を参考として、重量103kgf、衝突



a) R C 板の裏面剥離



b) サンドイッチ板の貫入破壊

写真-2 衝突実験時の破壊状況の例

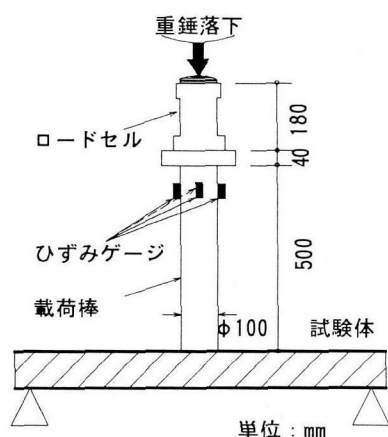


図-12 衝撃力の载荷と計測用治具の概要

速度 15m/s に設定した。試験体の設置および载荷治具は静的・急速载荷実験に用いたものと同一とし、図-12に示すように载荷棒の上部に新たにひずみゲージ式ロードセル（容量 250tonf ）を固定し、これを試験体中央に設置して上部から重錘を落下させ衝撃荷重を計測した。最大衝撃力は計測されたロードセルのデータに 1000Hz のローパスフィルターで処理して得られた波形から求めた^{12),13)}。なお、衝突によって载荷棒に生じる圧縮ひずみは最大 1000μ 程度であり、重錘の衝突時に降伏しないことを確認している。

3.2 実験結果および考察

試験体の実験後の破壊状況の例を、写真-2に示す。写真では、RC板の場合、裏面剥離が衝突点を中心として $\phi 60\text{cm}$ の範囲で生じている。鋼・コンクリート合成板では、コンクリート板の裏面に鋼板が取り付けがあるので、コンクリートの剥離を防止することができる。この場合は、シアコネクタおよびエポキシ接着剤による取り付けのどちらでも効果は同じである。サンドイッチ板の場合、衝突面側の鋼板が衝突部分で破断し貫入破壊が生じ、さらに裏面鋼板にはわずかに膨らみ変形

も認められた。しかし、写真に示すような破壊状況は1回の衝突ではほとんどの試験体で生じない。1回の衝突に対してRC板の場合は裏面に無数のひびわれが生じて裏面剥離限界と思われる損傷が発生した。一方、サンドイッチ板では衝突面鋼板が破断する限界程度の損傷であった。そこで、写真に示すように、鋼・コンクリート合成板に対しては試験体の载荷面側の鋼板が破断して貫入破壊が生じる、RC板には裏面剥離が生じる状態になるまで、繰り返し衝突実験を行った。なお、貫入量は衝突の都度ノギスで計測した。

図-13に、全ケースの最大衝撃力および繰り返し衝突によって载荷面に生じる貫入量を示す。試験体の衝突面に貫入が生じて、裏面鋼板の膨らみ変形は、補強鋼板厚が薄い (1mm) 試験体で最大 2cm 程度であり、鋼板の厚い (4.5mm) 試験体では膨らみ変形がほとんど確認できない程度であった。

まず、衝突によって発生する最大衝撃力を比較すると、第1撃の衝撃力は、鋼板厚が厚いほど（番号 $3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$ ）大きくなる傾向は認められるが、第2撃・第3撃時の衝撃力の大きさにはばらつきがある。衝突時の荷重の大小は、衝突点における材料の特性、衝突体の先端形状、被衝突体の剛性や重量などの影響を受けるので、実験で得られた荷重の大きさだけでは耐衝撃性能を評価することは困難である。一方、貫入量の大小を比較すると、载荷実験で曲げ押し抜きせん断型の破壊モードを示した試験体（番号 $4 \sim 8$ ）の貫入量が他の試験体に比べて小さくなっている。

三上・岸ら¹⁴⁾は、諸元の異なるRCはり部材に対する単一および繰り返し落下衝突実験を行い、耐衝撃性をエネルギー論的な考察から調べている。その結果、同一の衝突速度で比較した場合、吸収エネルギーが小さい試験体ほど健全であり、耐衝撃性に優れているとしている。これは、衝突時の全体のエネルギー収支を考えると、部材の弾塑性変形によって吸収されるエネルギーは、衝突する重錘の運動エネルギーのうち重錘のリバウンドや試験体の運動エネルギーのほか衝突によって発生する音や熱によって消費されるエネルギーを差し引いたものであり、このような衝突時のエネルギーの散逸の違い

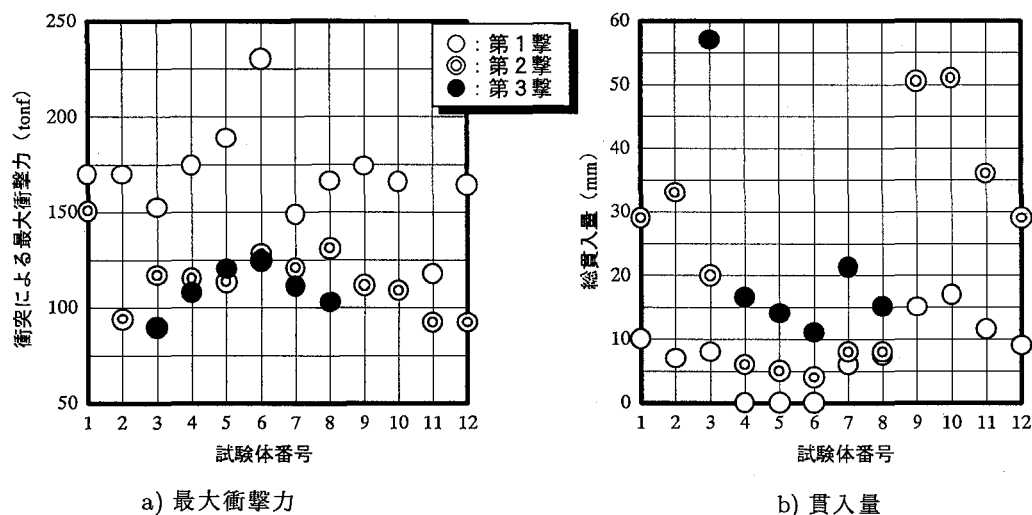


図-13 衝突回数による最大衝撃力と貫入量

を考慮した耐衝撃性のひとつの指標と考えられる。いま、衝突によって試験体に貫入破壊を生じさせるに要する載荷体の外部仕事、急速載荷実験における変形に要する内部仕事（荷重～変位曲線で囲まれる面積）と等値できると仮定する。実験結果において部材が損傷（貫入破壊）によって吸収したエネルギー量を求め、入力される重錘の運動エネルギー（ $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = 1182 \text{kgf} \cdot \text{cm}$ ）との比（吸収エネルギー率：%）で表せば、図-14のようになる。吸収エネルギー率の数値が大きいほどエネルギー吸収が大きく、ほとんど無い場合は0になる。例えば、番号4～6の試験体は第1撃の衝突に対して吸収エネルギーは0であり、エネルギーをほとんど吸収しない。これは、試験体の剛性が大きいため、衝突の重錘の運動エネルギーがリバウンドの運動エネルギーなどに費やされ、試験体に損傷が生じないと考えることができる。また、ほとんどの試験体は打撃回数とともに吸収エネルギー率が増加する。これは試験体の損傷が進行することを表しているが、吸収エネルギーの増加割合は試験体によって異なる。

著者らは、衝突後の試験体の残留エネルギー吸収容量を計測することで、見かけ上同じような損傷が生じていても、エネルギーの吸収のメカニズムが部材によって異なり損傷が抑制されることを実験的に確認した¹⁾。鋼・コンクリート合成板においてもこれと同じように、合成形式によっては貫入破壊のような見かけ上の損傷が進行しないでコンクリートのひずみエネルギーや鋼板のひずみエネルギーなどに費やされるなど、試験体の損傷に費やされるエネルギーの吸収のメカニズムが損傷の段階に応じて異なることが考えられ、これが貫入破壊から求められた吸収エネルギーの増加割合の違いに表れているものと思われる。

吸収エネルギー率が小さい試験体は損傷が抑制され、吸収エネルギー率が大きい試験体ほど損傷が大きい。この大小関係から耐衝撃性を比較すると、シアコネクタの形状の比較（番号1,2,3）ではSAND-3（番号3）が

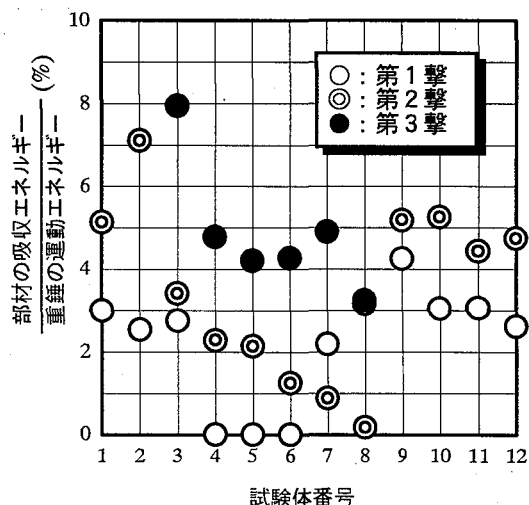


図-14 部材が貫入破壊によって吸収するエネルギー量の比較

最も耐衝撃性が高い。また、シアコネクタ間隔が広いSAND-8（番号8）は間隔の狭いSAND-4（番号4）およびSAND-7（番号7）に比べて第3撃時における吸収エネルギー率が小さく損傷が抑制されていることがわかる。

しかしながら、構造形式の異なるRC-11（番号11）、ORC12（番号12）の場合では、吸収エネルギー率の比較では鋼・コンクリート合成板と大きな違いはない。つまり、裏面剥離などの損傷が生じるため単に吸収エネルギー率の大小だけでは損傷の状態を判断することができないと言える。よってこのような場合には、応答時間内で変動する吸収メカニズムを詳細に検討するなど¹⁵⁾、別の指標を設けて評価する必要がある。

4. まとめ

本研究は、鋼・コンクリート合成サンドイッチ板の耐衝撃性能を、試験体の耐力と変形性能および載荷時の

速度の影響を調べる静的・急速の載荷実験と、実際の衝突荷重に対する試験体の挙動を調べる衝突実験の両面から実験的に検討したものである。本研究では、鋼・コンクリート合成板の衝撃時の力学性状に影響を及ぼすと考えられる部材諸元を調べる基礎的な段階としての位置づけから、限られた試験体数でなるべく多くのパラメータを網羅した。得られた結果を要約すると、

1) 静的および急速載荷実験の結果、補強する鋼板厚を厚くすることで鋼・コンクリート合成板の破壊モードが十分な弾塑性曲げ変形をともなった押し抜きせん断型に移行し、耐力や変形性能が著しく向上する。

2) 鋼板に溶接するシアコネクタ間隔の大小によってサンドイッチ板の最大耐力と最大耐力が生じる変位量に違いが生じる。本実験で調べた範囲では、鋼板厚および鋼材比が等しい試験体のシアコネクタ間隔を大きくすると荷重～変形関係が曲げ押し抜きせん断型に移行するとともに、最大耐力とその発生変位量が最も大きな値を示した。

3) 衝突荷重を受けると鋼・コンクリート合成板には貫入破壊が生じる。その時の貫入量や貫入に要する吸収エネルギー率の大小関係から鋼・コンクリート合成板の耐衝撃性を比較すれば、本実験の範囲では載荷実験の結果と同様に、鋼・コンクリート合成板の鋼板厚が厚いほど、あるいはシアコネクタ間隔が大きいほど衝突荷重に対する耐衝撃性が高い。

4) 鋼・コンクリート合成板と通常のRC板の耐衝撃性能を比較する場合は、衝突によってRC板には裏面剥離などの局部損傷が生じるため、部材の強度や吸収エネルギー率の大小だけでは評価できない。

鋼・コンクリート合成サンドイッチ板の力学性状についてはいまだ不明な点が多く、シアコネクタのずれ止め効果や耐力に影響する有効高さの捉え方など残されている問題が山積している。また、シアコネクタによる鋼板の補剛効果と耐衝撃性の違いは本研究からも確認されたが、耐衝撃性を効率的に向上させるための最適なシアコネクタ間隔やシアコネクタ形状については特定されるに至っていない。鋼・コンクリート合成板を耐衝撃部材として開発するために、今後は本研究の成果を踏まえ、パラメータを絞ったより詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 小暮 他：配筋状態の異なるRC板の衝撃挙動と耐衝撃性に関する実験的考察，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1315-1323，1996.3.

- 2) 小暮 他：鋼板で補強されたRC板の耐衝撃性と補強鋼板の等価コンクリート厚の推定，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1599-1608，1993.3.
- 3) 上田，塩屋：鋼コンクリート系サンドイッチ構造，コンクリート工学，Vol.30No.5，pp.5-20，1992.5.
- 4) 土木学会：第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，1995.11.
- 5) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン，平成元年3月
- 6) K.Brandes,E.Limberger,J.Herter：Experimental Verification of Punching Shear Failure of RC Slabs Subjected to Aircraft Impact Loads,Paper J5/6 SMiRT-8,Brussels,pp.197-201,Aug-1985.
- 7) 土木学会：鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針（案），平成4年7月.
- 8) CHUAH,SHIMA,etc.：LOAD-DISPLACEMENT RELATIONSHIP OF PLATE SHAPE SHEAR CONNECTOR IN STEEL-CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES,Proc.of JSCE,No.433 / V,pp.223-229,August 1991.
- 9) 小暮 他：鋼板の補強方法の相違によるRC板の耐衝撃性，第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.95-100，平成5年
- 10) 角田，井藤，藤田：鉄筋コンクリートスラブの押し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.105-115，1974.9.
- 11) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，pp.37-38，1994.1.
- 12) 酒巻 他：衝撃実験計測データのフィルター処理方法に関する考察，第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.151-155，1996.5.
- 13) 小暮 他：衝撃実験における種々の荷重計測方法に関する検討，第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.145-149，1996.5.
- 14) 三上，岸，松岡，田村：低速度衝撃を受けるRC梁の耐衝撃設計法の一提案，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1255-1260，1996.3.
- 15) 森川，河西 他：飛来物の高速衝突を受ける鋼製ライナー付鉄筋コンクリート板の耐衝撃性に関する実験と解析，建築学会構造系論文集，第477号，pp.107-114，1995.11.

(1996年9月6日受付)