

論文 超軽量コンクリートを用いた鋼・コンクリート合成部材の力学特性

左東 有次^{*1}・日野 伸一^{*2}・太田 俊昭^{*3}・田村 一美^{*4}

要旨: ハイブリッド浮き桟橋などの面材に用いる鋼・コンクリート合成部材の軽量化を目的とした超軽量コンクリートと鋼板の合成構造に関する研究は、これまでわずかであり、超軽量コンクリートを合成構造に適用するには、その力学特性を把握する必要がある。そこで、本研究では、超軽量コンクリートを用いた頭付スタッドの押し抜き試験や合成はりの静的曲げ試験を行い、ずれ止め特性や合成はりの力学特性などについて実験的に検証した。また、ずれ止めのせん断耐力やはり部材の曲げ耐力の評価に対する既往の設計式の適用性についても検討した。

キーワード: 鋼・コンクリート合成部材, 超軽量コンクリート, スタッド, せん断耐力

1. はじめに

現在、鋼・コンクリート合成構造が、ハイブリッド浮き桟橋などの港湾構造物を中心に多く構築されている。これらの構造物は、水密性が高く、靱性や耐久性に優れているため、浮き桟橋などの港湾構造物には適している。しかしながら、鋼構造物に比べて重量が重く、架設や係留設備が大掛かりで不経済と成るため、ハイブリッド浮き桟橋の軽量化は、構造的、経済的にも有効である。一方、近年開発された人工軽量骨材を用いた超軽量コンクリート¹⁾は、圧縮強度が高く、耐久性にも優れているため、構造用としてもその適用が有用視されている。

そこで、本研究では、浮き桟橋等の鋼・コンクリート合成構造に対する超軽量コンクリートの適用を目的として、その合成構造の基礎的な力学特性を押し抜き試験や合成はりの静的載荷試験で検証し、ずれ止めのせん断耐力やはり部材の曲げ耐力の評価に対する既往の設計式の適用性について考察した。

2. 超軽量コンクリート

2.1 使用材料と配合

本研究では、細骨材、粗骨材ともに人工軽量骨材を用いた超軽量コンクリート（以下 UL と略す）、粗骨材のみに人工軽量骨材を用いた軽量コンクリート（以下 L と略す）及び普通コンクリート（以下 N と略す）の3種類を使用した。コンクリートの使用材料を表-1に示す。本実験に使用した人工軽量骨材は、従来の人工軽量骨材に比べ、吸水率が低く、強度や耐久性にも優れている。

実験に使用した3種類のコンクリートの配合を表-2に示す。それぞれのコンクリートは単位水量、目標スランプ、目標圧縮強度を同一とした。スランプは側壁へのコンクリート打設を考慮して18cmとした。コンクリートの単位重

表-1 コンクリートの使用材料

種類	名称	記号	絶乾比重	24時間吸水率(%)	最大骨材径(mm)
セメント	高炉セメントB種	C	3.04	—	—
細骨材	超軽量細骨材	S1	0.98	5.4	5
	硬質パセライト	S2	1.26	5.8	1.2
	石灰質砕砂	S3	2.59	1.44	5
粗骨材	超軽量粗骨材	G1	0.87	2.00	15
	石灰岩碎石	G2	2.70	0.85	20

*1 九州大学大学院助手 工学研究科 都市環境システム工学専攻 (正会員)
 *2 九州大学大学院助教授 工学研究科 都市環境システム工学専攻 工博 (正会員)
 *3 九州大学大学院教授 工学研究科 都市環境システム工学専攻 工博 (正会員)
 *4 三菱重工業株式会社 技術本部 広島研究所 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合表

配合 NO.	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位重量 (kg/m ³)									単位容積 質量(kg/m ³)
				W	C	S1	S2	S3	G1	G2	SP	AE	
UL	32.6	50.0	5.0	155	475	230	127	—	284	—	2.85	3.80	1272
L	39.0	46.0	5.0	155	397	—	—	804	319	—	1.59	4.76	1675
N	55.0	52.0	4.5	155	282	—	—	967	—	927	1.13	1.69	2331

混和剤：高性能AE減水剤(SP)：ポリカルボン酸系，AE助剤(AE)：ロジン系

量はそれぞれ，N：2.33，L：1.63，UL：1.27
でULはNより45%軽量となっている。

2.2 試験結果

各種コンクリートの強度試験結果を表-3
に示す。せん断試験は JSCE-G 553-1983「鋼
繊維補強コンクリートのせん断強度試験方
法」に準じて実施し，その他は JIS に準じて
行った。UL は，従来の軽量コンクリートと
同様に圧縮強度に比べて引張強度やヤング係
数が N に比べて低い。また，圧縮強度試験で
は，UL，Lは脆性的な破壊をした。

3. 押し抜き試験

3.1 供試体および試験方法

供試体の一般図を図-1に示す。供試体は，
日本鋼構造協会の「頭付スタッドの押し抜き
試験方法(案)」²⁾に準じて作製した。供試体の
種類を表-4に示す。供試体は，UL，L，Nの
3種類のコンクリートで製作し，それぞれのタ
イプについてスタッド径を19mm，22mmに
変化させた。また，ULとLは図-2のように側
壁を対象とした打設方向Aタイプと床版に対
象としたBタイプを製作した。供試体数は，UL，
Lが各3体，Nが各2体の計22体である。

押し抜き試験は100tfの構造物万能試験機を
を用いて行った。鋼板とコンクリートの相対ず
れは，図-1のようにスタッド取り付け位置の
4箇所測定した。荷重方法は，各ケースとも
最初の一体を漸増繰り返し荷重法で行い，残り
の供試体は単調増加荷重法で行った。漸増繰
返し荷重では，4箇所の残留変位が全て
0.075mmを超過するまで，最大荷重を20kN
ずつ増加させながら，荷重・除荷を繰り返す。

表-3 コンクリートの強度試験結果(材令28日)(Mpa)

ケース	圧縮強度	引張強度	曲げ引張 強度	せん断 強度	ヤング係数 ($\times 10^4$)
UL	40.0	2.84 (1/14)	6.08 (1/7)	5.39 (1/7)	1.37
L	31.2	2.75 (1/11)	6.77 (1/5)	6.08 (1/5)	2.14
N	34.5	3.24 (1/11)	6.08 (1/6)	5.98 (1/6)	3.16

注) 括弧内は，圧縮強度に対する比率を示す。

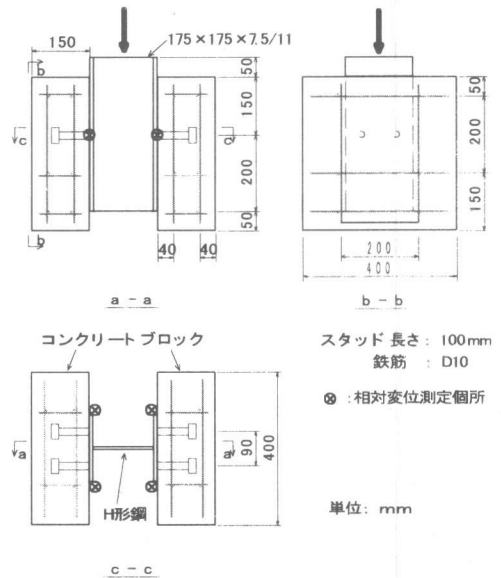


図-1 押し抜き試験供試体一般図

表-4 供試体の種類

ケース名	コンクリートの種類	スタッド径 (mm)	コンクリートの 打設方向
UL-19A	超軽量コンクリート (UL)	19	A
UL-19B			B
UL-22A			A
L-19A	軽量コンクリート (L)	19	A
L-19B			B
L-22A			A
N-19A	普通コンクリート (N)	19	A
N-22A			A

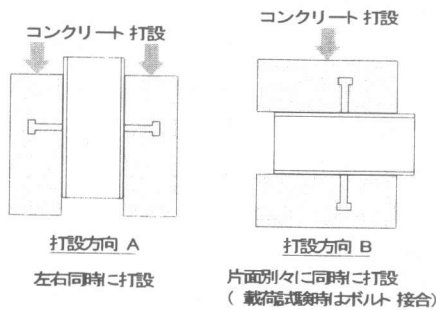


図-2 供試体のコンクリート打設方向

それ以降、相対変位が 4mm まで変位が 0.5mm 増加する毎に载荷・除荷を繰り返し、4mm 以降、破壊まで単調载荷した。

3.2 実験結果および考察

(1) スタッドのせん断耐力

スタッドのせん断耐力に関する設計値は、既往の道路橋示方書・同解説（以下、道路橋示方書と略す）³⁾、鋼構造物設計指針 PART B（以下、鋼構造物指針と略す）⁴⁾ に準じて下式にて算出した。

①スタッドの許容せん断力（道路橋示方書）

$$Q_a = 5.5dh\sqrt{\sigma_{ck}} \text{ (kgf/本)} \quad (h/d \leq 5.5) \quad (1)$$

$$Q_a = 30d^2\sqrt{\sigma_{ck}} \text{ (kgf/本)} \quad (h/d > 5.5) \quad (2)$$

②スタッドの最大せん断耐力（鋼構造物指針）

$$Q_{max} = 24dh\sqrt{\sigma_{ck}} \text{ (kgf/本)} \quad (h/d \leq 5.5) \quad (3)$$

$$Q_{max} = 130d^2\sqrt{\sigma_{ck}} \text{ (kgf/本)} \quad (h/d > 5.5) \quad (4)$$

ここに、 d : スタッドの直径(cm)

h : スタッドの高さ(cm)

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度(kgf/cm²)

本実験では、 $h/d = 4.55 \sim 5.26$ より(1), (3)式にて設計値を算出した。押し抜き試験時のコンクリートの圧縮強度より算出したスタッドのせん断耐力の設計値を表-5に示す。

(2) コンクリートの種類による影響

図-3にスタッド径 22mm、打設方向 A の作用せん断力-相対変位履歴曲線の包絡線をコンクリートの種類毎に示す。作用せん断力が約 80kN 以下の場合には、作用せん断力に対する

表-5 押し抜きせん断耐力の設計値

ケース名	圧縮強度 (MPa)	許容せん断力 Q_a (kN/本)	最大せん断耐力 Q_{max} (kN/本)
UL-19A	31.1	18.2	79.6
UL-19B	27.7	17.2	75.2
UL-22A	31.0	21.1	92.1
L-19A	34.5	19.2	83.9
L-19B	38.0	20.2	88.0
L-22A	42.3	24.6	107.5
N-19A	30.4	18.0	78.7
N-22A	30.6	21.0	91.5

注) 圧縮強度は押し抜き試験時の測定値

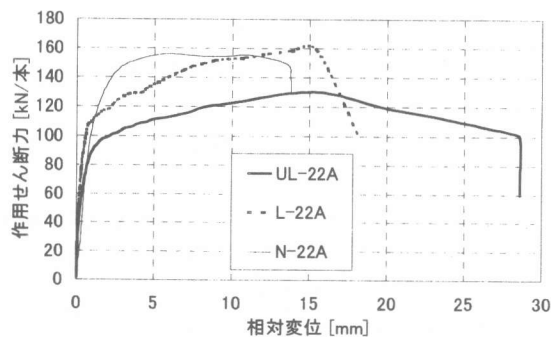


図-3 作用せん断力と相対変位の履歴曲線 (スタッド径 22mm)

相対変位の差は顕著に認められないが、それ以上の作用せん断力では、UL, L, N の順に相対変位の伸びが大きくなった。これは、コンクリートのヤング係数や引張強度が N より、UL や L が低いためと考えられる。また、破壊までの相対変位は UL が最も大きく、靱性に優れた挙動を示した。

表-6に各ケースの実験値を平均した押し抜き試験結果を示す。表中の限界強度は、漸増繰り返し载荷において、残留変位が 0.075mm 生じたときのスタッド 1 本当りの作用せん断力である。ずれ定数は、文献²⁾に準じて、最大せん断耐力の 1/3 荷重点の初期割線剛性であり、降伏せん断耐力は、このずれ定数の 0.2mm オフセット値である。

表より N の限界強度やずれ定数は UL, L に比べて小さいことがわかる。これは、N の水セ

メント比が55%とULやLよりも大きいため、スタッド支圧面にブリージングが発生し、載荷初期に残留変位が生じたものと推察される。

図-4に最大せん断耐力の実験値と設計値の比をコンクリートの種類別に示す。図より、スタッド径19mm, 22mmのいずれとも、設計値に対する実験値の比率は、UL, L, Nの順に増加している。これは、圧縮強度に比べて引張強度やヤング係数がNより小さなUL, Lでは、コンクリート部の圧壊やスタッドの変形が発生しやすいためと考えられる。しかしながら、ULの実測値も設計値を上回っており、また、表-6に示すように、ULの最大せん断耐力は許容せん断耐力に対して5倍以上である。したがって、ULも鋼・コンクリート合成構造のコンクリー

トとして有用であると考えられる。

(3) コンクリートの打設方向による影響

図-5に最大せん断耐力の実験値と設計値の比をコンクリートの打設方向別に示す。ULの方がLより、打設方向BとAの差が大きくなっている。これは、LよりULの方が水セメント比が小さいことを考えると、ブリージングの影響ではなく、軽量骨材がベスト分より軽いため浮き上がり、支圧面となるスタッド下面に軽量骨材が集中したのではないかと推察される。そのため、超軽量コンクリートでも、側壁などで打設方向Aにコンクリートを打設する場合には、スタッドのせん断耐力の評価に対する注意が必要である。

表-6 供試体の押し抜き試験結果

ケース名	限界強度 Q _c (kN/本)	降伏せん断耐力 Q _y (kN/本)	最大せん断耐力 Q _{max} (kN/本)	ずれ定数Kst (kN/mm・本)	破壊形式
UL-19A	34.9	52.7	99.9(5.5)	220	コンクリート
UL-19B	65.0	96.7	136.4(7.9)	402	コンクリート
UL-22A	44.8	68.9	126.4(6.0)	372	コンクリート
L-19A	38.9	71.9	126.1(6.6)	301	スタッド*
L-19B	63.7	81.7	144.6(7.2)	333	スタッド*
L-22A	39.2	100.3	160.7(6.5)	316	スタッド*
N-19A	15.2	69.6	133.6(7.4)	127	スタッド*, コンクリート
N-22A	20.3	102.1	157.6(7.5)	132	コンクリート

注) 括弧内は、許容せん断耐力に対する最大せん断耐力の比率を示す。

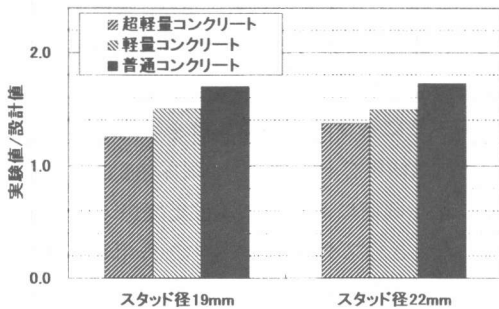


図-4 コンクリートの種類による最大せん断耐力の設計値と実測値の比較

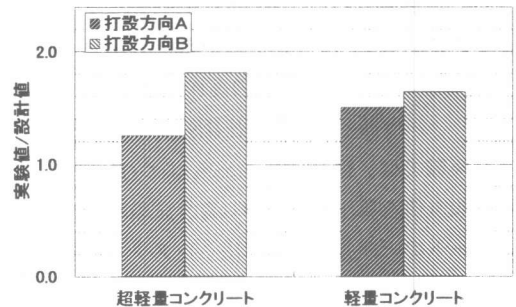


図-5 コンクリートの打設方向の違いによる最大せん断耐力の設計値と実測値の比較

4. 合成はりの静的載荷試験

4.1 供試体の種類および試験方法

供試体の構造図を図-6に、供試体の種類を表-7に示す。供試体は、6mm厚の鋼板とコンクリートをスタッドにて一体化させた20×25.6×180cmの合成はりである。スタッドはφ19mm、長さ200mm (h/d=10.5)の長尺スタッドを用い、ずれ止めと合わせてはりのせん断補強材としての機能を期待した。コンクリートはUL, L, Nの3種類を使用した。また、ULについては、スタッドの配置間隔を20cmと10cmの2種類の供試体を製作した。

はりの載荷は、図-6に示すように2点対称載荷としたが、UL-10Tのみは、中央1点載荷とした。試験は、まず設計荷重まで2回載荷と除荷を繰り返した後、破壊まで載荷を行った。各荷重ステップ毎に、鋼板、コンクリート及び鉄筋のひずみ、たわみ、鋼板とコンクリートのずれを測定し、ひび割れ状況を観察した。

表-7 はり供試体一覧

供試体名	コンクリートの種類	スタッド間隔 (mm)
UL-20T	超軽量コンクリート	200
UL-10T		100
L-20T	軽量コンクリート	200
N-20T	普通コンクリート	200

4.2 実験結果および考察

各供試体の載荷荷重と支間中央点のたわみの関係を、完全合成はりとして断面分割法により求めた解析値と合わせて図-7に示す。N-20T, L-20Tに比べてUL-20Tは変形が大きくなった。これは、ULのヤング係数がNやLよりも小さく、曲げ剛性も小さいためである。また、いずれの供試体とも実験値の方が解析値より曲げ剛性が小さくなったが、これは、供試体のスタッドが長尺でかつ引張側に配置されているため、接合面の合成度が小さくなったものと考えられる。

次に、表-8に供試体の終局耐力の実験値と計算値を示す。計算値はコンクリート標準示方書の曲げ耐力式とせん断耐力式に準じて算出し

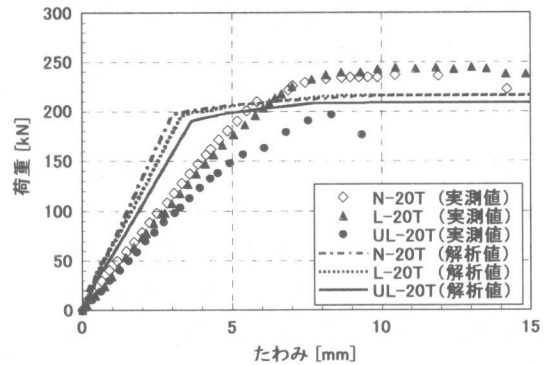


図-7 はりの荷重-たわみ曲線 (支間中央)

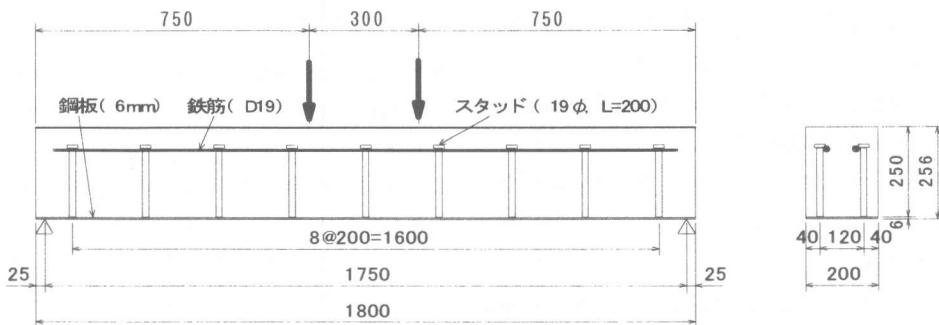


図-6 はり供試体の構造図 (UL-20T, L-20T, N-20T)

た。ただし、せん断耐力の算定ではスタッドをせん断補強鋼材として換算している。曲げ破壊した L-20T, N-20T とともに、実験値は曲げ耐力の計算値の約 1.2~1.3 倍である。それに対して、UL-20T は、曲げ耐力の計算値以下でせん断破壊した。これは、UL のコンクリートの引張強度が L や N より小さいためと、スタッドの配置間隔が 20cm と桁高の 1/2 以上の間隔があり、せん断補強筋として十分に機能しなかったためと考えられる。

図-8 に UL-10T の載荷荷重と支間中央のたわみの関係を示す。解析値は、スタッドをバネ要素とした 2 次元弾塑性解析結果である。スタッドの量を配置間隔 20cm から 10cm ピッチに増加した UL-10T は、載荷方法もせん断スパン比を大きくしたこともあり、曲げ破壊した。破壊荷重も、示方書による曲げ耐力の計算値の約 1.2 倍あり、N-20T, L-20T と同様に破壊時まで弾性合成はりとして靱性に富んだ挙動を示している。

以上より、超軽量コンクリートを用いた合成はりでも、適切にスタッドを配置すれば曲げ破壊時まで合成部材としての靱性に富んだ曲げ挙動を示すことが確認できた。また、その曲げ耐力は既往の曲げ耐力式でも評価できることが確認できた。

5. まとめ

超軽量コンクリートを用いた接合部のずれ止め押し抜き試験および合成はりの静的載荷試験の結果、以下のような結論を得た。

- ①超軽量コンクリートを用いた合成構造接合部のずれ止めせん断耐力は、普通コンクリートの場合より低下する。また、そのせん断耐力は、既往の設計式を用いても十分安全側に評価できる。
- ②ずれ止めとせん断補強筋を適切に配置すれば、超軽量コンクリートを用いた合成はり、曲げ部材として所要の耐力と剛性を保持することができる。また、長尺のスタッドを用いる

表-8 はりの終局耐力の計算値と実験値

供試体名	実験値	計算値		破壊形式
	最大荷重 P _{max} [kN]	曲げ耐力 P _m [kN]	せん断耐力 P _s [kN]	
UL-20T	197	208	431.3	せん断
UL-10T	205	170	572.0	曲げ
L-20T	254	207	429.8	曲げ
N-20T	265	200	455.1	曲げ

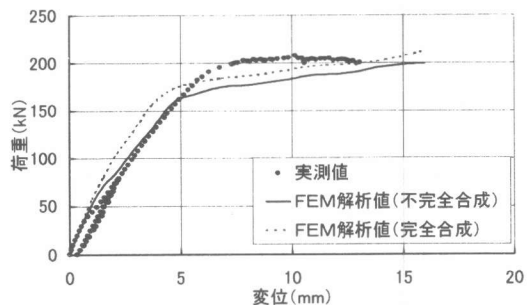


図-8 荷重-たわみ曲線(支間中央)
(UL-10T)

ことにより、はりのせん断補強筋としての機能も発揮することが可能である。

最後に、本研究を行うにあたり、多大な御協力を賜った三菱重工業(株) 広島製作所の木原一禎氏、九州大学工学研究科の新屋孝文氏、工学部の佐溝圭太郎氏には深く感謝致します。

【参考文献】

- 1) 太平洋セメント(株)清澄研究所：超軽量コンクリート、日本材料学会最新コンクリート技術講習会資料、1998.1
- 2) (社)日本鋼構造協会：頭付スタッドの押し抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状、JSCCテクニカルト、No. 35, 1996.11
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, pp.294-295, 1996.12
- 4) 土木学会：鋼構造設計指針PART B 合成構造, pp.52, 1997