

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2007～2009
課題番号：19360203
研究課題名（和文）：耐久性に優れた次世代高性能ハイブリッド構造材の開発とその合理的設計法の構築
研究課題名（英文）Development of high efficient hybrid structure members of the next generation in durability and construction of reasonable design method
研究代表者
日野 伸一（SHINICHI HINO）
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：00136532

研究成果の概要（和文）：従来の主要建設材料である鋼材およびコンクリート材料を用いた構造材の品質改善や複合化を推進するとともに、21 世紀の構造材料として期待される繊維強化プラスチック（FRP）などの新素材の積極的な活用を図り、耐久性に優れ、ライフサイクルコスト評価で経済性にも富んだ高性能構造材の開発とその合理的な設計・施工法を構築した。

研究成果の概要（英文）：In this research, it used for an aggressive target of the new material such as fiber reinforced polymer expected as structural materials of the 21st century. Efficient excelling in durability, abundant the economy by the life cycle cost (LCC), structure materials was developed. Moreover, the reasonable design and construction method were constructed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2009 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：新素材，複合構造

1. 研究開始当初の背景

現在、世界中の先進諸国が直面する共通的課題として、20 世紀中盤以降、大量に建設された各種の社会基盤構造物が老朽化し性能の陳腐化が急速的に進み、補修補強のみならず、解体・再構築の必要性が日増しに切迫していることが指摘されている。また、今後新設される構造物の建設にあたって、長寿命化を見据えたライフサイクルコスト(LCC)評価に基づく工費縮減が必要不可欠との認識が社会的にも浸透しつつある。

以上のような観点から、本研究では、従来の主要建設材料である鋼材およびコンクリート材料を用いた構造材の品質改善や複合化を推進するとともに、21 世紀の構造材料として期待される繊維強化プラスチック（FRP）などの新素材の積極的な活用を図り、耐久性に優れ、ライフサイクルコスト評価で経済性にも富んだ高性能構造材の開発とその合理的な設計・施工法の構築を目的とした研究を実施するものである。具体的には、近年、航空・宇宙、船舶・自動車、各種レジャ

一用品などへの活用が著しく、土木・建築構造材への適用にも着目され始めた炭素繊維(CFRP)、ガラス繊維(GFRP)、ビニロン繊維(VFRP)などの各種繊維プラスチック(FRP)と、従来構造材料である鋼材・コンクリート材との複合化による長期耐久性、軽量化、高強度、高靱性、経済性などに優れた高性能構造材の創生をめざす。

2. 研究の目的

具体的な研究目的としては、研究代表者らがこれまで科研費や民間企業との共同研究費などを活用して実施してきた複数の研究課題の成果に立脚して、それらを発展・体系化させる形で本研究を遂行する。具体的な研究項目としては、以下のとおりである。

- (1) ガラス繊維引抜き成形補強材(GFRP)の材料設計および曲げ・せん断破壊メカニズムと部材接合構造の究明
- (2) 独自のロボット製造技術を活用した端部アンカー付き連続炭素繊維補強材(CFRP)の開発とコンクリート補強材への適用技術の構築
- (3) 人工軽量骨材と鋼繊維およびビニロン短繊維(VFRP)の混入による超軽量コンクリート構造材の力学特性の究明とその設計法の確立
- (4) 上記の各種構造材のハイブリッド化、あるいは既存構造材(たとえば鋼構造)とのハイブリッド化の適用性検討と実験・解析シミュレーションによる構造設計法の究明

3. 研究の方法

- (1) GFRP 補強材の材料設計および曲げ・せん断破壊メカニズムと部材接合構造の究明

GFRP 補強材の力学特性は、繊維の配列方向とその量に依存した直交異方性を有しており、曲げ・せん断などの構造特性は繊維と接着剤の性能に依存する。また、構造物とへの適用に際しては、部材相互の接合構造およびその性能の究明が不可欠である。そこで、以下の項目について実施した。

- ① GFRP 引抜き成形材の材料強度を試設計し(日野)→ 試作(材料メーカーに依頼) → 各方向の材料強度試験による力学定数の把握(日野)
- ② GFRP はり部材の曲げ・せん断試験による構造特性と破壊メカニズムの究明(日野・貝沼)
- ③ はり部材による実験とその数値シミュレーションによる検討(日野・貝沼)

- ④ GFRP 部材の破壊シミュレーション(園田)
 - ⑤ GFRP 部材相互および鋼またはコンクリート部材との接合構造の究明(日野・貝沼)
- (2) ロボット製造技術を活用した端部アンカー付きCFRP補強材の開発と適用技術の構築

有効長 3.0m の端部アンカー付き CFRP 連続補強材の試作が可能になり、それを用いて製造された補強材の基本力学性能を試験する必要がある。既に、引張特性など素材の性能は解明済みのため、コンクリート補強材への適用を念頭に置いた以下の項目について検討した。

- ① スパン 3.0m の PC はりを対象とした有効導入プレストレスと曲げ性能の究明(山口)
 - ② 端部 U 型アンカーの定着性能と接合構造の検討(日野・貝沼・山口) 端部 U 型アンカーは、プレストレス導入時の緊張冶具の代用、および CFRP 補強材相互の接合に対して有用になることが期待される。簡便でかつ効果的な定着構造、接合構造を実験的に究明した(山口)。また、最適ボルト接着併用接合法について究明した(貝沼)。
 - ③ GFRP 接合部の使用状態および終局時の応力解析(園田)
- (3) 短繊維補強による超軽量コンクリート構造材の力学特性の究明
- 使用する短繊維としては、鋼繊維、ビニロン繊維の 2 種であり、コンクリートの練り混ぜの施工性より、最大混入率 1.2% を上限となることは既に明らかにされている。本研究では、せん断スパン比、骨材の種類などを変化させて、できるだけ多くのデータを集積した(日野・合田)。得られたデータを統計的処理することにより、既往の耐力評価式をアレンジした設計評価式を提案した。
- (4) ハイブリッド構造の材料・構造の確立および設計・施工法の検討
- ① GFRP 部材接合部の屋外暴露試験による経時劣化の検討(担当: 貝沼)
 - ② GFRP 部材接合部の疲労試験による耐久性の検討(担当: 日野・貝沼)
 - ③ U 型アンカー構造材の合理的接合構造とその設計強度の究明(担当: 山口・園田・日野)
 - ④ 上記補強材を用いた PC 部材の設計検討(担当: 山口・日野)
 - ⑤ FRP 短繊維補強超軽量コンクリ

- ートの材料構成則の究明と FEM 非線形解析 (担当: 園田・日野)
- ⑥ FRP 短繊維補強超軽量コンクリート部材の設計耐力式の確立 (担当: 日野・合田)
 - ⑦ ハイブリッド構造の適用対象を想定した試設計とその検討課題の抽出。(担当: 日野・貝沼・山口)
 - ⑧ 試設計した対象構造の模型試験体を用いた載荷実験と数値シミュレーションによる適用性の検討, 合理的設計手法の確立。(担当: 日野・園田・貝沼・山口)

4. 研究成果

紙面の都合上, 本報告書では「GFRP 補強材の材料設計および曲げ・せん断破壊メカニズムと部材接合構造の究明」に関する研究成果の概要を示す. その他の研究成果の詳細は, 5. 主な発表論文等を参照されたい.

(1) GFRP 部材接合部の静的強度特性

① 試験概要

図-1 に供試体概略図, 表-1 に材料特性値を示す. GFRP 板の表面処理は未処理およびブラスト処理の 2 種類であり, その影響についても検討した. Ad タイプは 2 液混合常温硬化型エポキシ樹脂接着剤のみで GFRP 板と添接鋼板を接着接合し, Bo タイプは高力ボルトのみで摩擦接合し, 設計ボルト軸力 55.8kN を導入した. Co タイプは樹脂接着剤と高力ボルトの併用接合とした. Bo' タイプは GFRP 板同士を高力ボルトのみで摩擦接合した. 供試体は室温 20°C, 湿度 60% の条件で 1 週間養生した. 試験は GFRP 板のつかみ部を試験機のチャックで挟み, 漸増引張試験を行い, 荷重と GFRP 板間の相対変位を計測した.

② 結果および考察

図-2 に試験結果を示す. Ad タイプはブラスト処理を行うことにより最大荷重が 3 倍になった. Bo, Co タイプはブラスト処理の有無によるすべり荷重の変化は見られず, 120~130kN 程度であった. Bo' タイプはブラスト処理によりすべり荷重が 1.8 倍

になり, ブラスト処理による接合強度の向上が見られた. また, Bo, Co, Bo' タイプの最大荷重に関しては GFRP の材料強度の誤差程度しかなかった.

(2) GFRP・鋼接合部の経時変化特性

① 試験概要

本試験の供試体は図-1 の Bo タイプを用いた. 供試体を 1 週間および 1 ヶ月, 6 ヶ月, 1 年経過とし, 経過時間が及ぼす影響について検討した. 同時にボルト軸力も計測し, 軸力残存率の影響も検討した.

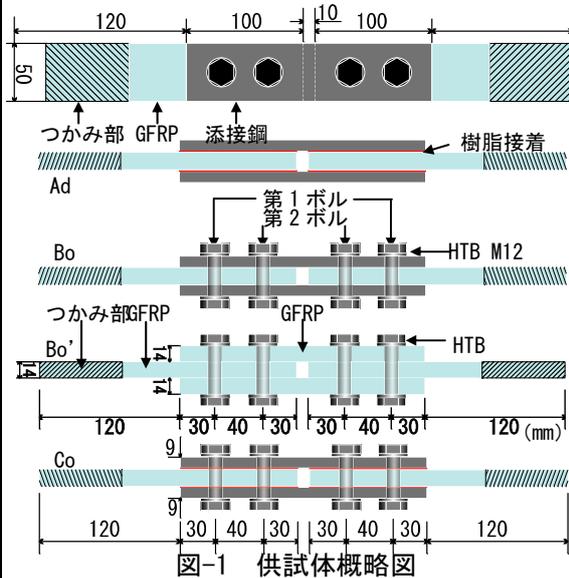


表-1 材料特性値

		GFRP			添接鋼板
		引抜き方向	引抜き直角方向	45° 方向	
弾性率 (GPa)	引張	24.0	11.0	4.00	210
	圧縮	30.0	20.0	-	
	せん断	4.60			
強度 (MPa)	引張	250	90.0	45.0	400
	圧縮	430	95.0	-	
	せん断	22.5			
ポアソン比		0.28	0.14	0.14	0.30

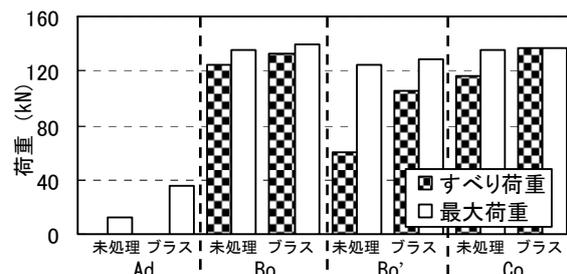


図-2 試験結果

② 試験結果および考察

(a) 軸力残存率－経過時間関係

図-3 に軸力残存率－経過時間関係を示す。本研究の範囲内では軸力導入から1年経過時点まで未処理、ブラスト処理ともに軸力残存率が80%程度になった。また、軸力残存率の標準偏差は、1年経過時点未処理は2.50、ブラスト処理は0.50程度とブラスト処理のほうがバラツキが小さい。本研究は1年程度の計測しか行っておらず、将来的な軸力残存率の予測を行うため今後も引き続き軸力残存率の計測を実施する。

(b) すべり荷重・最大荷重

図-4 に1週間、1ヶ月、6ヶ月および1年経過時点それぞれのすべり荷重・最大荷重を示す。すべり荷重は1年経過時点では未処理、ブラスト処理それぞれ116kN、120kNと1週間経過時点と比較して殆ど減少していない。これより、1週

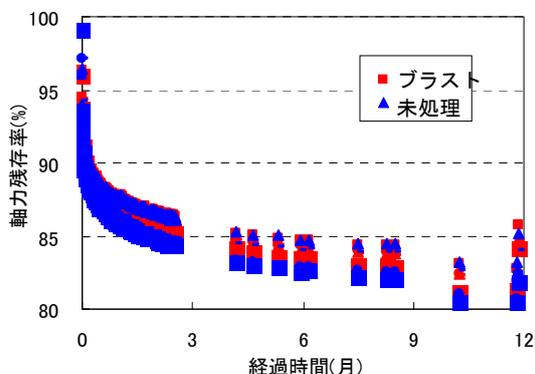


図-3 軸力残存率－経過時間関係

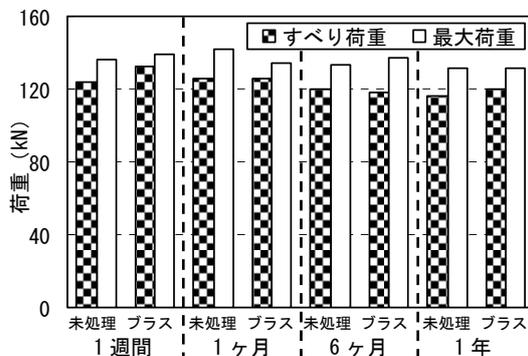


図-4 すべり荷重・最大荷重の比

間経過時点での未処理、ブラスト処理それぞれの軸力残存率は89.2%、88.6%、1年経過時点での未処理、ブラスト処理それぞれの軸力残存率は84.7%、83.1%であったものの、実用上十分なすべり係数を確保することができたと言える。また、最大荷重は経過時間に関係なくGFRPの材料強度による誤差程度しかなかった。

(3) 屋外暴露されたGFRP鋼接合部の耐久性

① 試験概要

供試体の暴露状況を図-5に、供試体概略図を図-6に示す。GFRP板の材料特性値を表-2に示す。接合面は、GFRP板はサンドペーパー(#60)で目荒らしし、添接鋼板はディスクグラインダーでのケレン加工のみとした。接合方法を試験パラメータとし、2.1と同様のパラメータで行った。供試体組立ての際に、Bo、Coタイプには設計ボルト軸力106kNを導入した。供試体作成後、防錆処理として塗装を施した。

② 結果および考察

図-7に試験結果を示す。暴露試験より、Adタイプは最大荷重が3年経過時点で0年経過時点の0.3倍になり、屋外暴露試験により接合強度の低減が確認された。一方、Bo、Coタイプはすべり荷重が3年経過時点で0年経過時点の1.3倍、0.9倍になり、Adタイプと比較して暴露および暴露期間が接合強度に及ぼす影響は小さいことがわかった。

(4) まとめ

- ① GFRP部材接合部引張試験において、接着接合についてはブラスト処理によって最大荷重が3倍になり、高力ボルト摩擦接合、併用接合はブラスト処理の有無によるすべり荷重の変化は見られなかった。GFRP・GFRP接合部(摩擦接合のみ)についてはブラスト処理によりすべり



図-5 供試体の暴露状況

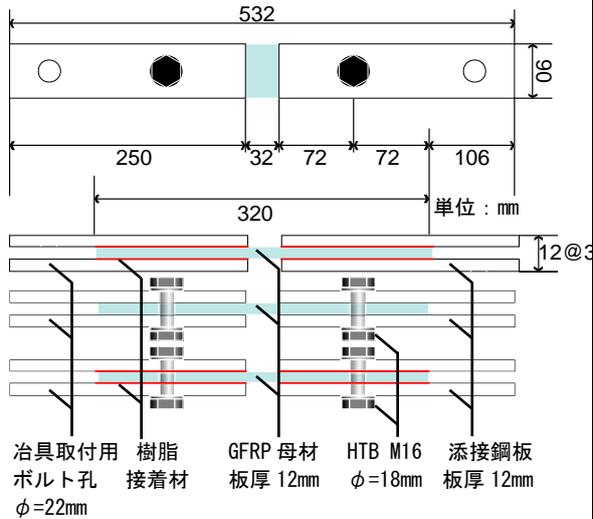


図-6 供試体概略図

表-2 材料特性値

GFRP板	引張強度	335
	引張弾性係数	23.5×10^3
	圧縮強度	283
	せん断強度	56.9

単位：N/mm²

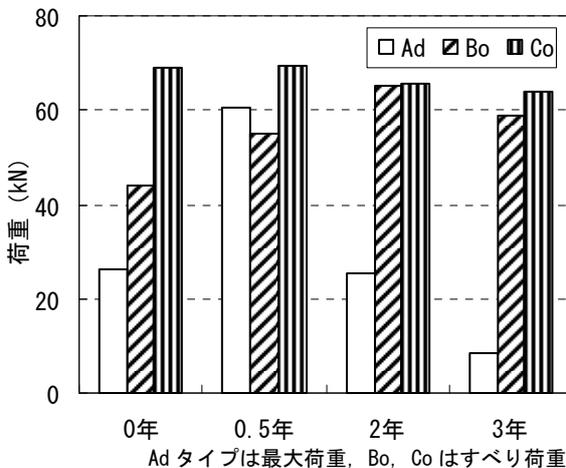


図-7 試験結果

荷重が 1.8 倍になり、ブラスト処理による接合強度の向上が見られた。また、GFRP・鋼接合部の摩擦接合と併用接合、GFRP・GFRP 接合部の摩擦接合の最大荷重は母材である GFRP の材料強度の誤差程度しかなかった。

- ② 経時変化試験において、1 年経過時点において軸力残存率は未処理、ブラスト処理ともに 80%に低減したが、実用上十分なすべり係数を確保することができた。
- ③ 暴露試験において、接着接合は最大荷重が 3 年経過時点で 0 年経過時点の 0.3 倍になったが、摩擦接合、併用接合はすべり荷重が 3 年経過時点で 0 年経過時点の 1.3 倍、0.9 倍になり、接着接合と比較し暴露や暴露期間が接合強度に及ぼす影響は小さいことがわかった。

(5) 今後の展望

土木構造材料への適応に向けて、GFRP・鋼接合部については疲労試験を実施し、動的荷重が作用した場合の疲労強度や耐荷挙動の検討把握を行う必要がある。また、耐久性という点で優れた土木構造部材の開発に向けて、GFRP 材と高耐久性部材との接合に着目し、接合強度や耐荷挙動、経時変化、耐久性に関しても検討把握を行う必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- ① 崔智宣, 山口浩平, 日野伸一, 園田崇智: 鋼繊維補強軽量 2 種コンクリート RC はりのせん断耐力評価に関する一考察, 査読有, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, 印刷中, 平成 22 年 7 月
- ② 鳥巢陽平, 山口浩平, 日野伸一, 今井富

士夫：CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力の評価，査読有，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，pp. 1645-1650，平成 21 年 7 月

- ③ 山口浩平，日野伸一，園田崇智，崔智宣：鋼繊維補強された軽量 2 種コンクリートの繊維混入率を考慮した強度評価式および RC 版の押抜きせん断耐力評価，査読有，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，pp. 1321-1326，平成 21 年 7 月
- ④ 山口浩平，日野伸一，郭勝華，崔智宣，園田崇智：鋼繊維補強された軽量 2 種コンクリートを用いた孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価，査読有，構造工学論文集，Vol. 55A，pp. 1114-1121，平成 21 年 4 月
- ⑤ 小林憲治，日野伸一，山口浩平，大本透：接着剤およびボルト接合を用いた GFRP・鋼接合部の強度特性に関する実験的研究，査読有，構造工学論文集，Vol. 55A，pp. 1140-1149，平成 21 年 4 月
- ⑥ 小林憲治，日野伸一，青野雄太，山口浩平，岡俊蔵，林耕四郎：GFRP 引抜き成形 I 形断面はりの材料力学特性および曲げせん断挙動に関する実験的研究，査読有，構造工学論文集，Vol. 54A，pp. 850-859，平成 20 年 4 月

〔学会発表〕（計 8 件）

- ① 鳥巢陽平，山口浩平，日野伸一：CFRP せん断補強筋を用いた RC はりのせん断耐力評価，第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文報告集，pp. 77-84，平成 21 年 7 月 23 日，東京都

② 小林憲治，山口浩平，大本透，日野伸一：GFRP 引抜き成形 I 形断面はり部材の耐荷挙動に関する解析的検討，第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム論文報告集，pp. 29-36，平成 21 年 7 月 23 日，東京都

③ 小林憲治，大本透，日野伸一，貝沼重信，山口浩平，青木卓也：接着剤およびボルト接合を用いた GFRP・鋼接合部の強度特性に関する実験的研究，第 63 回年次学術講演会講演論文集，pp. 131-132，平成 20 年 9 月 10-12 日，宮城県仙台市

④ 山口浩平，日野伸一，郭勝華，崔智宣，園田崇智：鋼繊維補強された軽量 2 種コンクリートを用いた孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価，第 63 回年次学術講演会講演論文集，pp. 115-116，平成 20 年 9 月 10-12 日，宮城県仙台市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日野伸一 (SHINICHI HINO)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：00136532

(2) 研究分担者

園田佳巨 (YOSHIMI SONODA)
九州大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：40304737

貝沼重信 (SHIGENOBU KAINUMA)
九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号：00262874

山口浩平 (KOHEI YAMAGUCHI)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：60336013

合田寛基 (HIROKI GODA)
九州工業大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：20346860