

論文・報告

ヘリコプタ渡海工法開発実験報告

Report on Experimental Development of Traversing
a Pilot-Rope over a Strait by Helicopter

横山 仁規* 田口 吉彦**
Masanori YOKOYAMA Yoshihiko TAGUCHI

All the methods which have been traditionally adopted for stretching a pilot rope, rely largely on the use of a barge. Operations of the barge are likely to be greatly affected by the actual sociological conditions such as the magnitude of tidal current velocity and the traffic volume of ships on the sea. It has been a long time since the idea for using a helicopter in erection was started. And therefore a comparison between a typical type of barge conditions of the sea and helicopter erection method was done. An experiment on some items to be considered also carried out, so as to put the later method into practical use. The results show that the helicopter method is very beneficial in erecting long suspension bridge like Akashi Kaikyo Bridge where work using a helicopter can be done safely and the problems of construction management can be successfully solved. It is confirmed by this comparison that by using helicopter stretching is simpler and can be carried out in shorter period than expected.

Keywords : helicopter, Pilot-Rope, strait

1. まえがき

渡海とは、長大吊橋の建設において、主ケーブル工事の第一段階として主塔間あるいは主塔と橋台間に最初のロープを張り渡す作業である。その後、このロープ（パイロットロープ）を先導として各種の架設装置を用い、キャットウォーク（ケーブル架設用空中吊足場）設備などを設置し、主ケーブルを完成するのがケーブル工事である。

今までのパイロットロープ渡海工法は、各々の吊橋で現地の施工条件に合わせて段階的に発展し、中央スパン1 000 m規模の工事に対して、下記の工法が実施されている。

① 浮子（フロート）工法 ……若戸大橋・関門橋
平戸・因島大橋

② 曜船フリーハング工法 ……大鳴門橋

③ FC船フリーハング工法 ……瀬戸大橋

実績のある上記工法ではあるが、社会環境、特に航行船舶への航路閉鎖・規制などが問題とされており、従来より、ヘリコプタ渡海工法が、海面を使用しない工法として注目されていた。この工法は、送電線架空工事において多くの実績を有し、海峡部でも1 000 mスパン規模の施工例があり、渡海工法として若戸大橋の頃より、その利

点が理解されていた工法である。しかしながら、橋梁分野での実績がないことや、飛行作業の安全性が危惧され、具体的な研究もされないまま現在に至っているのが現状である。

今日の周辺技術の進歩により、大型ヘリコプタの出現や架線装置の開発、さらに軽量で高強度の新素材ロープの入手が可能となった現実を踏まえ、超長大橋に向けて同工法を開発する機会が到来したと考えられる。

特に、現在建設中の明石海峡大橋は、中央スパン1 990 mで、1日あたり1 400隻以上の航行船舶がある重要な国際航路に架かる超長大吊橋である（図-1参照）。したがって、航路規制を最小限に留め海象（潮流速）に影響されない渡海工法が強く望まれる。本文では、明石海峡大橋を対象とした実橋の渡海工法として、ヘリコプタ渡海工法を確立するために行った実験結果について報告する。

2. 実験概要と使用機材

ヘリコプタ渡海工法の実用化を検討するために、使用機材の性能を調べる基礎実験、実工事を再現した小規模模擬実験と、段階的に実験を行った。

基礎実験では、本工法の基本的技術要素としてヘリコプタ本体・架線装置・ロープ材料などの諸性能の定量的確認を行った。その成果を基に、実橋を模擬した作業状

*川田建設㈱工事本部技術部技術一課課長 **川田建設㈱工事本部技術部技術一課

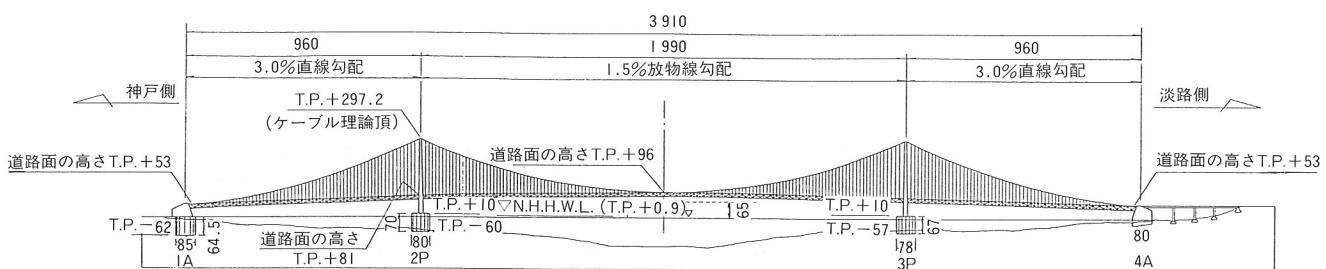


図-1 明石海峡大橋

況下で総合的な検証として小規模模擬実験を行った。両実験の主要実験項目を表-1に示す。

表-1 主要実験項目

	実験項目	計測内容	実験場所・日程
基礎実験	①延線機とロープの機能実験	・長尺ロープの繰り出し安定性 ・リール巻付張力 ・延線機の張力制御機能	芦ノ湖
	②ヘリコプタの限界索引力測定	・索引能力と操縦安定性 および 限界索引角度の計測	遊覧ヘリポート (東邦航空管理)
	③ヘリコプタの騒音・風速測定	・ロータ回転による負荷状態と飛行形態別の騒音と風速	平成2年11月12日 ～22日
小規模模擬実験	・模擬延線 一連の延線(渡海) 作業の中で右記の点を確認・検証	①ヘリコプタとロープの挙動 ②始点・終点でのロープ固縛処理法 ③タイムスタディ ④全体システム	神戸市 六甲アイランド沖 第七防波堤 平成3年3月3日 ～9日

以下に、本実験で使用したロープ材料の仕様やヘリコプタの性能、および延線機(架線装置)の機能などについて示す。

① ロープ

本工法では、ワイヤロープに代わる軽量で高強度なロープとして、以下のロープの使用を検討した。

芯：ポリアミド系繊維(商品名：ケブラー)
外被：ポリエスチル繊維+ウレタン樹脂被覆
引張強度： $\phi 16\text{ mm}$ —— 9,500 kgf
 $\phi 10\text{ mm}$ —— 4,200 kgf

自重： $\phi 16\text{ mm}$ —— 214 g/m

$\phi 10\text{ mm}$ —— 91.7 g/m

参考までに、ワイヤロープ($\phi 10\text{ mm}$)の場合は、
引張強度：5,020 kgf、自重：332 g/mである。

② ヘリコプタ(写真-1参照)

名称：スーパーピューマ(AS332L)

自重：約5,000 kg

全長：約15 m

機外吊下能力：4,500 kg(最大)



写真-1 ヘリコプタ

③ 延線機(写真-2参照)

自重：850 kg

最大巻込長：5,000 m ($\phi 16\text{ mm}$ ロープ)

制動能力：～1,000 kgf (40 km/h時)

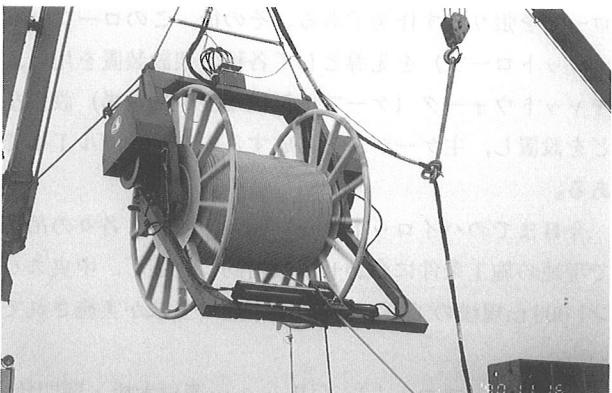


写真-2 延線機

3. 基礎実験

(1) 延線機の構造機能実験

ヘリコプタ渡海工法においては、張り渡されるロープが海面に接することなく、所定の航路限界を保持し安定して延線機から繰り出される必要がある。

そこで、張力制御機能を有する新しい延線機を使用し実橋で想定されるロープ速度と管理張力に対して、図-2に示す設備で検証を行った。

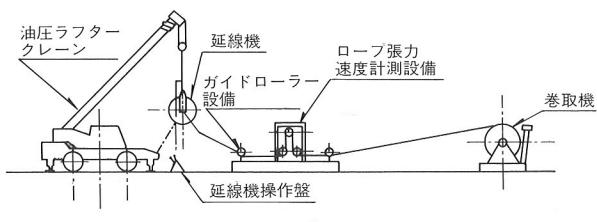


図-2 設備配置図

a) 実験方法

供試体リールには、纖維ロープ ($\phi 16\text{ mm} \times 3000\text{ m}$) を整列巻付けに加えて巻付け張力を管理して巻付け、延線機にセットした。対置した巻取機で、表-2に示す組合せで展開試験を行った。

表-2 組合せケース

	巻付け張力(kgf)	繰り出し速度(m/min)
Case-1	50	150
Case-2	50	300
Case-3	200	150
Case-4	200	300

繰り出し中は、延線機ブレーキ設定を繰り出し長500mごとに、100kgf単位で5段階設定した。また、ロープ速度や張力は、巻取機と延線機の間に計測装置を組み込んで連続測定した(図-3参照)。

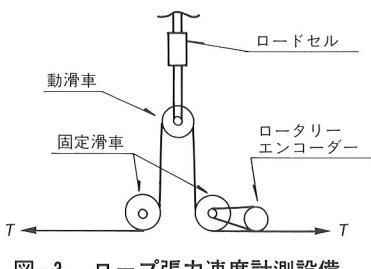


図-3 ロープ張力速度計測設備

b) 計測結果と考察

① 長尺ロープの繰り出し安定性

各々の組合せケースにおいて、延線機およびロープ繰り出し性状は良好であり、実橋で予想される延線速度150~300m/minの範囲内であれば問題のないことが確かめられた。また、供試体ロープについても、実験全般を通して損傷がなく、渡海用パイロットロープとして使用可能であると判断された。

② 延線機の張力制御機能

連続展開中のロープ張力と延線機の張力制御ブレーキの油圧値をグラフにすると、図-4のとおりであった。多少のバラツキは認められるが、ほぼ直線に近似しており、油圧値が延線中の管理目安として充

分機能するものであると考えられた。

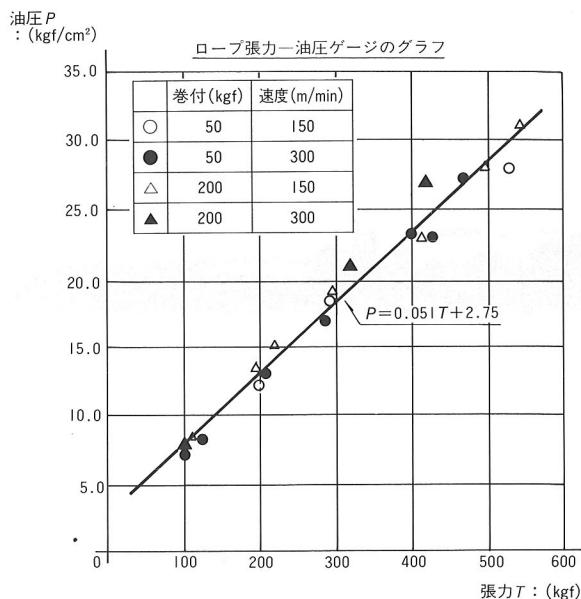


図-4 張力と油圧値の関係

(2) ヘリコプタの限界索引力の測定

a) 実験方法

本工法の主体となるヘリコプタの索引力(ロープを斜方向に引く力)は、これまでの実績の中で定量的に把握されていなかった項目である。ここでは、ヘリコプタの機外に延線機を吊り下げ、巻込まれているロープに張力を導入して索引力とその限界角を計測した。

設定張力は、300, 700, 1 000 kgfとし、角度はローラー出口の角度計により測定した。図-5にその要領を、写真-3にその状況を示す。

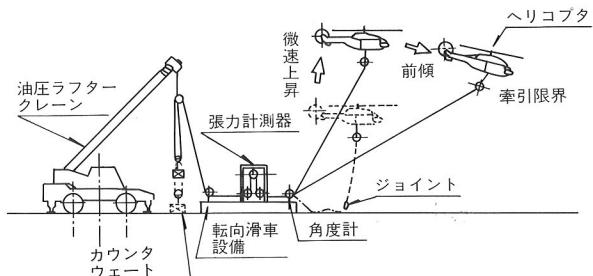


図-5 索引実験要領

b) 計測結果と考察

設定したロープ張力に対して、ヘリコプタの限界索引角は図-6に示すとおりであった。図中の索引能力線は、実験時のヘリコプタにかかる積載物重量・外気温・飛行高度を考慮した理論値である。

実橋での最終索引角度は25°付近となるが、実験値より張力700 kgf(理論値: 740 kgf)、角度にして24.5°まで安定した作業が可能と判定できる。

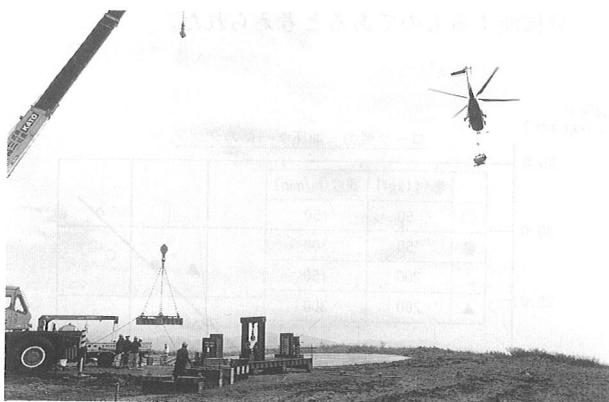


写真-3 索引力測定全景

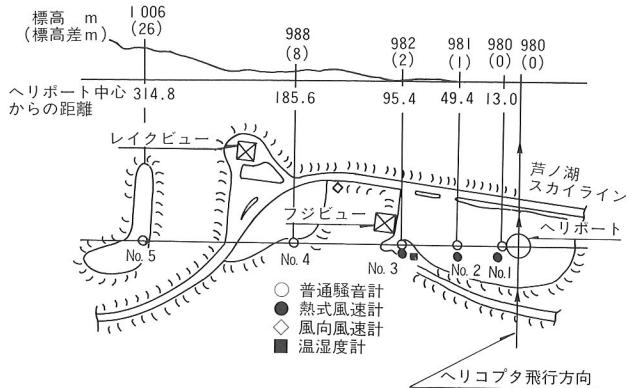


図-7 計測機器の配置

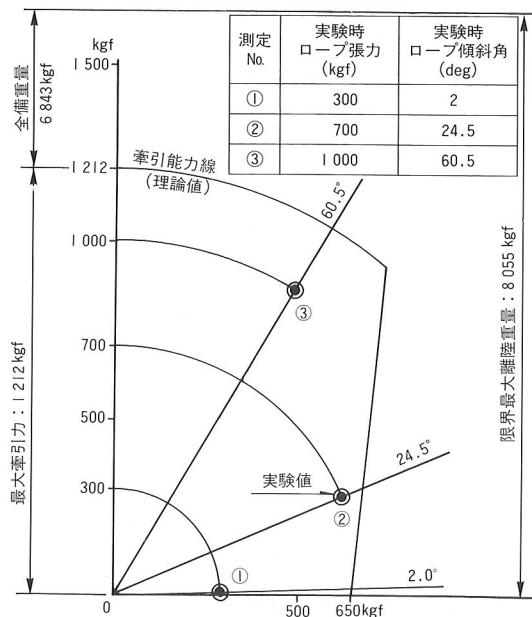


図-6 測定結果

実験中のヘリコプタ飛行姿勢に関しては、ホバリング（空中停止）状態でもほとんど動搖がなく、カウンタウェートの浮上や着地も全てヘリコプタ側で対応でき非常に安定していた。また、索引限界状態からの機体の立て直しもスムーズであり、ヘリコプタの操縦安定性は高く評価できた。

(3) ヘリコプタの騒音・風速の測定

ヘリコプタ作業の場合、そのロータ回転により発生する騒音と風圧（風速）の程度が、第三者（社会）への騒音問題や作業者の安全作業上の問題となる。

図-7に示す計測配置のもとに、ヘリコプタの飛行形態と負荷量の組合せにおいて騒音および風速を測定した。

測定結果はおおむね次のとおりであった。

① 負荷の有無による騒音の差異はなかった。

② 騒音レベルの最大値（No. 1 地点）

離陸時：114 dB

ホバリング時：131 dB（高度20 m）

③ 風速の最大値（No. 1 地点）：20.8 m/s

騒音については、ほぼ予想どおりの結果であったが、実橋では最も民家に近い1Aアンカーレッジで300 mの距離があり、この場合の距離減衰騒音値は80 dBと予想される。この値は建設機械のような連続騒音値としては大きいが、ヘリコプタのように短日で一時的な値である場合は充分に理解の得られるものと判断する。

風速については、自然風としての作業限界値（10~15 m/s）は超えているが、これも一時的な風であること、山間部での物資輸送・建設工事では日常的にヘリコプタ直下での作業が実施されていること、さらに今回の実験においても負荷カウンタの取付けをヘリコプタ直下7~8 mで実施したことを考慮すれば、渡海作業も対処可能と判断する。ただし、第2段階の小規模実験を実施するにあたっては、ヘリコプタの風圧を直接受ける指示員や作業員に事前の体感をさせて、その心構えをさせておく必要がある。

4. 小規模模擬実験

(1) 実験概要と実施要領

基礎実験で得られたデータを基に、ヘリコプタ、延線機、ケブラー繩等渡海用設備全体の組合せによる模擬延線実験を計画し実施した。実工事を忠実に再現した一連の渡海作業の中で、各所の作業手順や設備・装置の適合性を確認するとともに、作業管理や通信連絡体制等についても一案を試行し、実工事での対応課題を抽出・把握することを目的としたものである。

模擬主塔には、フローティングクレーン船（FC）2隻を使用し、FCシアース上（海面上60 m）に塔頂足場を模擬した作業ステージを設置した。延線実験のスパンは、500, 700, 1 000 mの3段階を設定し、順次1回ずつパイロットロープ（ $\phi 10$ mmケブラー繩）の延線を実施した。図-8に延線要領、写真-4にFCの配置、写真-5, 6にそれぞれ始点側・終点側の作業ステージを示す。

延線実験は、延線開始の前段階から実工事を想定した手順を踏んで実施された。以下にその準備段階の作業手

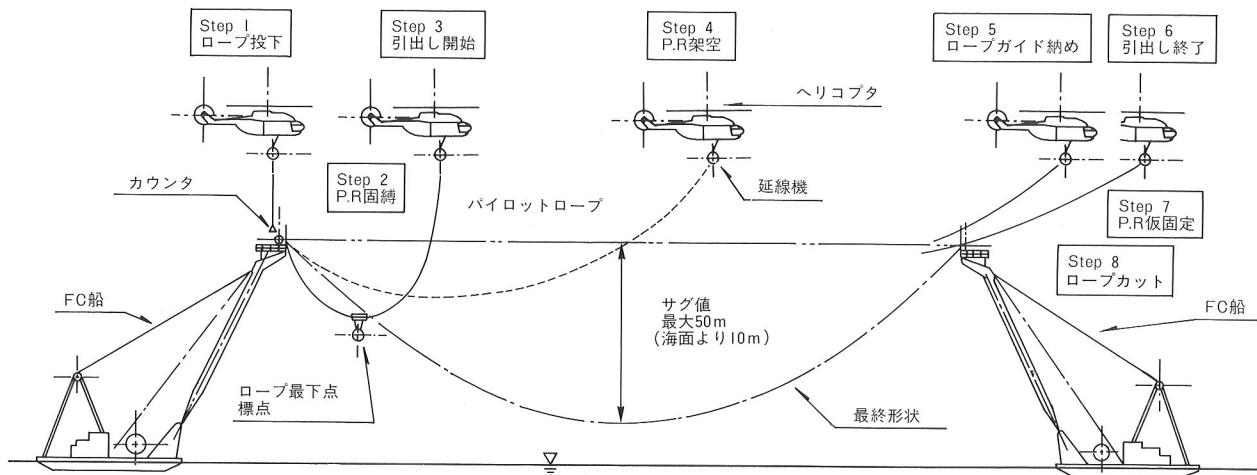


図-8 延線要領図

順を列挙する。

- ① 仮設ヘリポートにおいて、機体および延線機の作動チェックを行う。
- ② 延線機をセットした状態で延線ラインの上空を試験飛行し、ステージ上の安全と飛行ラインの風の影響をチェックする。
- ③ パイロットが実施可能と判断すれば、始点側上空に戻ってホバリングし、以降は図-8の手順で実施する。

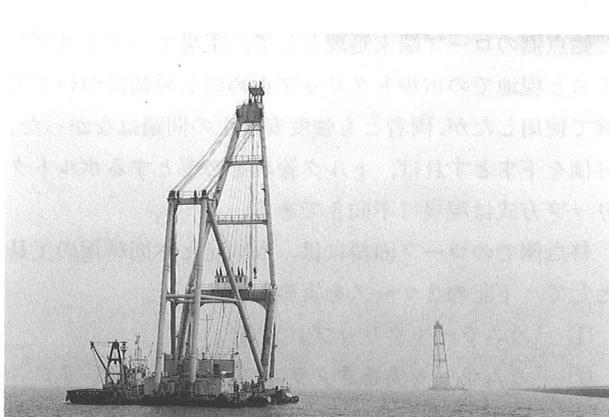


写真-4 FCの配置



写真-5 始点側作業ステージ

(2) 計測項目と方法

スパンの異なる3回の実験に対して、作業管理にかかる項目を各々計測した。実験における計測項目と方法を表-3に示す。

表-3 計測項目と方法

計測項目	方 法	計測機器
ロープ張力	・始点側作業ステージ上のロープアンカー部とパイロットロープ接続部の間にロードセルを介在	張力計
ヘリコプタ航跡	・陸上部よりトランシットを用いて30秒ごとに視準し、交角法により平面位置・高度を求めた	トランシット(3台)
ロープ最下点(ターゲット)	・始点側でロープに吊り下げた標点(ターゲット)をトランシットで視準した	トランシット(2台)
作業場の風速	・両作業ステージ上に風速計を設置し実験中連続計測し、特にヘリコプタ直下での影響を見た	熱式風速計
タイムスタディ	・作業ステップごとのラップタイムを計測	ストップウォッチ

本工法に用いる諸設備の基本的性能はすでに基礎実験で明確にされているため、小規模実験では実工事でも計測されるべき作業管理上の計測に重点を置いた。すなわ



写真-6 終点側作業ステージ

ち、国際航路上にロープを空中架設する工法として、航路限界高さを保持するためにどの程度のサグコントロールができるのか、またそうしながらどれくらいの時間で実施できるのかということが当実験最大の関心事であった。

(3) 計測結果と考察

a) ヘリコプタの飛行軌跡

ヘリコプタの高度と平面軌道に関する計測結果を表-4に示す。

表-4 ヘリコプタの軌道

条件	高度軌道		平面軌道	
	最低・最高	変動幅	平均偏心量	最大変動幅
500 m時	最高: 71 m 最低: 65 m	6 m	北側 2 m	2 m
700 m時	最高: 80 m 最低: 67 m	13 m	北側 9 m	15 m
1 000 m時	最高: 99 m 最低: 75 m	24 m	南側 8 m	9 m

表-4の結果に、実際に目視した状況を加味すると以下のことがいえる。

- ① 高度の変動幅は最大24 mであるが、これは瞬時に生じた変動ではなく、スパン1 000 mの延線の中で漸次変化したものであって肉眼では感知できない程度のものである。また、高度の変化がロープのサグに影響を与えた形跡もなく安定した水平飛行ができたといえる。
- ② 平面軌道に関しては、パイロットの目標物として延線ライン前方のFCを頼るのみであったが、大きなブレも見られず、ほとんど直線的であった。

以上のことから、サグ-張力を管理しながら目標物の少ない海上で延線を実施する場合においても、ヘリコプタの操縦安定性は充分確保できるといえる。ただし、これはパイロットや延線操作員の技量にもよることを付け加えておく。

b) ロープの挙動（形状と張力の変動）

ロープの張力とサグに関し、延線中の最大値と延線完了後の最終値を表-5に示す。

表-5 張力とサグの計測結果

実験条件	張 力		サ グ		備 考
	最大値	最終値	最大値	最終値	
500 m	504 kgf —	160 kgf (132 kgf)	—	22.2 m	・張力はロードセル読み値 (延線中) ・張力の()は推定値 ・サグは始点、 ターゲット、 ヘリコプタよりの推定値
700 m	132 kgf (116 kgf)	136 kgf (131 kgf)	46.2 m	44.9 m	
1 000 m	464 kgf (447 kgf)	464 kgf (442 kgf)	49.2 m	26.3 m	

ここで、張力については、700 m時には緩めに、また1 000 m時には引張り気味の張力で延線を実施した。表-5におけるサグ量は、この結果を反映しているものである。したがって、基礎実験で確かめられた索引能力の範囲内で、張力およびサグをコントロールできることが、模擬実験で確かめることができたといえる。

c) 作業足場（始点・終点ステージ上）の風速

基礎実験では地上におけるヘリコプタによる風速を測定したが、本実験では実工事とほぼ同じ作業環境にある始点・終点の各ステージ上でそれを計測した。結果を表-6に示す。

表-6 ステージ上の風速

	最大風速	作業足場上へリ位置	最大風圧
始点側	23.1 m/s	約20 m	66.8 kgf/m ²
終点側	21.3 m/s	約15 m	56.7 kgf/m ²

数値としては基礎実験と同様に20 m/s強の風速が観測されている。しかしながら、事前体感を実施したことや防風メガネ・安全帯の着用および作業工具等の万全な準備により、ステージ上の作業は滞りなく進められた。これで、「ヘリコプタの下は強風で作業困難」とされてきた過去の定性的懸念は完全に払拭された。

d) 始点・終点のロープの固縛処理

始点側のロープ端末処理として、工場でのアイスプラスと現地でのボルトクリップ止めの2種類について実験で使用したが、両者とも強度安全上の問題はなかった。評価を下すとすれば、トルク管理を必要とするボルトクリップ方式は現場に不向きである。

終点側でのロープ固縛には、仮固定と本固縛用の工具として、下記の2ケースを実施した。

① 「カムラー+クリップ」方式

② 「カムラー+渦巻きクランプ」方式（写真-7）

仮固定に使用したカムラーは、ワンタッチ式でガムを押し開きロープを入れた後、カムレバーを引っ張ること

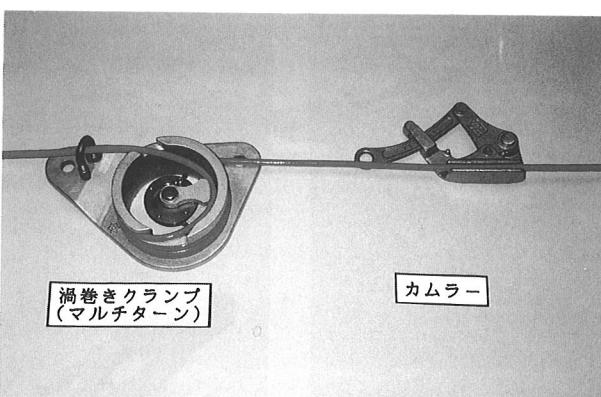


写真-7 マルチターンとカムラー

でスピーディな固縛作業ができた。

本固縛に用いたクリップ(Uボルト式)では、所定の強度を得るために締付ボルトのトルク管理が必要で作業が煩雑となり、取付時間も多くかかった。

一方、渦巻きクランプ(マルチターン)においては、渦巻状の溝にそってロープを巻付けるだけで、管理項目がなく、ロープ自体の損傷もなく、短時間で施工できた。

以上より、固縛パターンとしては、「カムラー+渦巻きクランプ」方式が最良と判断した。

e) タイムスタディ

延線開始から終了まで一連の作業時間を、作業ステップごとに計測した。各延線ケースのタイムスタディを整理すると表-7のようになった。

表-7 タイムスタディ

作業	500 m時	700 m時	1 000 m時
ロープ降下～延線開始	3'24"	6'10"	5'15"
ロープ延線時間 (平均飛行時間)	2'01" (248 m/min)	5'09" (140 m/min)	5'30" (182 m/min)
ヘリ到着～ロープ仮固定	3'22"	0'48"	4'30"
ロープ仮固定～切断	5'34"	2'16"	0'15"
ロープ降下～切断	14'21"	14'23"	15'30"
(クランプ種類)	カムラー+クリップ	カムラー+渦巻きクランプ	カムラー+渦巻きクランプ

ここで、各作業項目に対する所要時間の評価と明石海峡大橋を想定した実橋の工事を予想してみると、

① ロープ降下～延線開始

ヘリコプタのホバリングからロープ降下はスムーズであったが、測点となるターゲットの取付けに時間を要していた。実橋では、ホバリング位置が今回より高くなるが、ターゲットの取付性を改善すれば、7分程度で作業ができると思われる。

② ロープ延線(飛行速度)

500 m延線時は、初回ということもあり、操縦士の速度感覚が充分でなく予定より速度が速かった。700, 1 000 m時の中間的速度(170 m/min)で実施した方が、ロープ監視情報の伝達やサグの変動を小さくできる。実橋では2 000 mとして12分ほどであろうと推測される。

③ ヘリコプタ到達～ロープ切断

所要時間に対する作業要素は、ロープガイド納め作業より、ロープ固縛・切断作業が大きなポイントとなっている。実橋では、前述の「カムラー+渦巻きクランプ」方式により、5分程度で実施できるだろうと推測される。

以上より、実橋(2 000 mスパン)の予想作業時間は最大でも25分程度と考えられる。

f) 全体システムとしての確認

作業手順や設備・装置については実工事を忠実に再現した今回の実験において、それらの施工性や安全性に関する検証ができたほかに、本工法を実施する場合の作業管理方法や通信連絡体制等についても基本的な確認がなされ、ヘリコプタ渡海工法の技術的基本要素ばかりではなく全体的なシステムとしての確認もできた。

もちろん、個々の要素においては改善すべき課題のあることも明らかになったが、それらはどれも実橋工事での検討・計画の中で解決し得る課題としてとらえられる。

本工法を実行レベルで検証した小規模模擬実験が基本計画どおりに無事成功した意義は大きいものと考えられる。

5. まとめ

FCフリーハンギング工法に代表される従来の渡海工法に比べ、ヘリコプタ工法が実現されれば有利と見られていた事項をまとめると表-8のようになる。

表-8 ヘリコプタ工法の利点

利点項目	評価
・海上条件	・潮流速の影響を全く受けない。
・海面(航路)占有	・海面を全く使用しない。
・作業体制の規模	・複雑な作業がなく、作業ポイントが少なくてすむため小規模。
・海上警戒体制の規模	・海面を使用しないため、万一に備えての警戒は必要だが小規模。
・主要設備の規模	・ヘリコプタ1機で行える作業のため、船舶に比べて極めて小規模。
・工程	・作業の単純さや設備の小規模化が図れ、特に時間工程が短くなる。
・経済性	・上記の条件に加え、作業要員も少数となるためかなり経済的になる。

過去において、同工法が検討・採用の対象外とされた懸念項目に対して、今回の実験により確認されたことを整理すると表-9のようになる。

このように、基礎実験と小規模模擬実験を通して確認されたヘリコプタ渡海工法の定量的・定性的諸性能は、本工法採用にかかる障壁を全て取り除いたものと確信している。

本報告は、ヘリコプタ渡海工法開発のための実験報告であるが、ここで、実験に至るまでの経緯を紹介する。

平成元年度の業務として、明石海峡大橋を対象とした渡海工法の総括的検討の中で、ヘリコプタ工法が実用化

表-9 実験による確認事項

懸念項目	実験で確認されたこと
牽引力が小さい	スーパー・ピューマ(AS332L)は実橋での架設張力に対して、安全率3.0倍の索引能力(700 kgf, $\theta=25^\circ$)を有することが判明した。
気象(風)に弱い	実験時の実績で向い風9 m/sにて実施。これ以上の風速では、他工法の場合でも塔頂作業が危険。
実績がない	船舶工法でも強潮流下の2 000 mクラスは未知。実験スパンは明石海峡大橋の1/2であるが、張力的には実橋以上まで経験した。
盛替が多い	パイロットロープにφ10 mmケブラーロープを使用した場合、中間盛替ロープにワイヤロープを用いると5回、ケブラーロープを用いると2回でホーリングロープが完成できる。
風圧が強く作業困難	一時的に20 m/s程度の風速がある。しかし塔頂での作業は安全、確実に実施できた。
飛行の安全(安定)性が心配	強風、高張力、小スペース等厳しい条件での実験もあったが、いずれの場合もヘリコプタの操縦は安定していた。
騒音が大きい	音源値として130 dBが観測された。距離減衰(300 mで80 dB)を考えれば大きな問題ではない。
サグ管理が心配	制動管理型延線機を使用することにより、明石海峡大橋クラスの渡海では充分にサグをコントロールしながら実施できることがわかった。

検討に値する工法であることが確認され、さらに実験計画の概要が示された。これに基づく実験実施計画の立案にあたり、自然条件と環境条件の両方を満足する実験場所の調査を行った。場所は全国数十カ所の地形図から絞り、実際の現地調査を経て本文表-1の実験場所に決定された。また、長大吊橋のパイロットロープ渡海において最も重要なサグ管理に関する技術要素として、延線機の張力制御機能と即時位置計測システムに関する自社研究を行った。延線機については、送電工事における張力の数倍に及ぶ渡海張力に対して連続的な制動制御機能の対応状況を確認した(写真-8)。

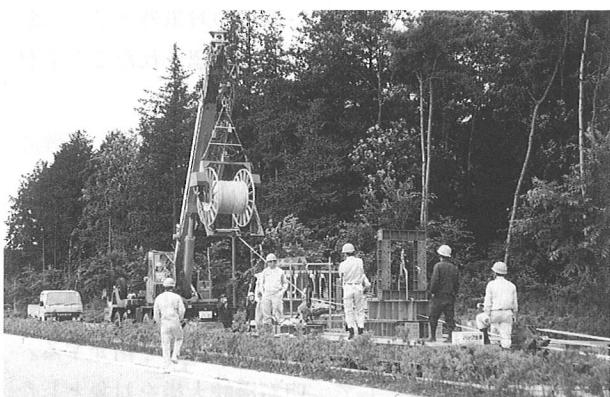


写真-8 延線機の制御機能確認試験

位置計測システムでは、電波・光波の両面から検討し、信頼性から光波計に着目した。数回の自動車追尾実験の中から最適機種を選定し、さらにヘリコプタ実機の追尾実験を行う中で、自動追尾型光波計が最適であることが判明した。当システムは、小規模模擬実験において試用し、実用に供し得るものであることが確認されたが、その詳細については別に報告の機会を得たい。

最後に、本実験の施主であり、検討業務のときより、多くのご指導をいただいた本州四国連絡橋公団・垂水工事事務所の皆様と、適切なご助言をいただいた株本州四国連絡橋エンジニアリング、さらには、実験に参画する機会を与えていただきました新日本製鐵(株)・(株)神戸製鋼所共同企業体関係者の皆様に心よりお礼を申し上げます。