

# ジャイロモーメントを利用した吊荷制御装置の開発

井上文宏 渡辺幸次  
池田雄一 脇坂達也

## A Practical Development of Suspender Device Controlled by Gyroscopic Moment

Fumihiko Inoue Koji Watanabe  
Yuichi Ikeda Tatsuya Wakisaka

### Abstract

In construction work, while building components such as steel beams and concrete panels are being lifted and set in place, they are frequently rotated by wind pressure and by inertia accompanied by crane movement. A suspender device installed with a gyroscope has been developed to suppress these rotations. There are two distinctive features of utilizing gyroscopic moment. First, it is controlled actively so that the building components are turned in response to a control force, and then stopped in the desired setting position. Second, it is used passively to resist external disturbing forces. As the result of applying this device to construction site, these methods effectively cut down cycle times of lifting and setting building components in place and enable work to be carried out continuously. Furthermore, since the rotation of the components is regulated by remote wireless control, dangerous work is extremely reduced.

### 概要

建設工事における吊荷の揚重、取付け作業では、風の影響やクレーンの動きに伴う慣性力によって、吊荷が旋回することがしばしばあり、作業効率や安全性の面から改善すべき課題が残されている。そこで本研究開発では吊荷の正確な位置決めと姿勢保持を可能にする吊荷制御装置の開発を行い、実際の建設工事に適用した。本装置は内部にジャイロスコープが装備され、ここで発生するジャイロモーメントを利用して、吊荷の旋回制御を行う。高速で回転するフライホイールの軸を能動的に制御することで高精度の位置決めを可能にし、また受動的に制御することで風外乱に抵抗して吊荷の姿勢を一定方向に保持させる。本装置を実際の工事に適用した結果、従来の作業方法に比べ、吊荷作業に対する時間をかなり短縮でき、作業時間の均一化が実現された。また吊荷の旋回を無線遠隔制御できるため、作業員の危険作業が軽減され、安全性向上に大きく貢献した。

### 1. はじめに

建設工事におけるクレーンを用いた鉄骨梁や外壁PCa板などの揚重、取付け作業では、資材の旋回を極力抑制し、取込みやすい位置で資材を受取ることが、作業効率や作業員の安全性を向上させる面で望ましい。しかし、超高層ビルや湾岸等に面した建設現場、荷取スペースが狭く広範囲に資材を移動させる建設現場では、強い風やクレーンの動きに伴う慣性によって、資材の向きが頻繁に変化し、旋回し始めることも経験されている。特に、最近ではアルミカーテンウォールが多く使用され、荷の旋回に伴う接触、衝突は大きな損傷や災害を引き起こす原因となるため、取扱いにもより注意が必要である。そこで本研究では吊荷の正確な旋回位置決めと外力に対する姿勢保持を目的とし、自由空間でも高出力の旋回モーメントが得られるジャイロスコープの性質に着目し、これを応用した吊荷制御装置の開発を行った<sup>1)~3)</sup>。

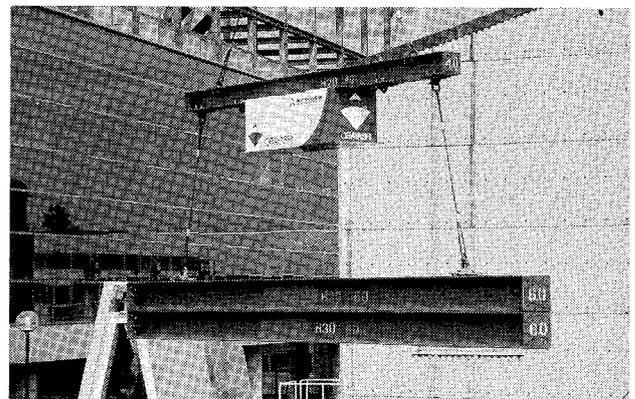


写真-1 ジャイロモーメントを利用した吊荷制御装置

本報では写真-1に示す開発装置の概要、ジャイロモーメントの発生原理と実験、解析結果、また実際の建築現場における性能、作業性評価について記述する。

## 2. 従来の装置と検討点

従来開発されている吊荷制御装置は、主として吊桁に取付けた軸流型ファンより噴出するジェットの風圧を利用して、旋回モーメントを得る方式である。その旋回制御はファンの回転数やバルブの開度を変え、流体の噴出流量や方向を変化させる機構であるが、その応答性は極めて緩慢であり、吊荷の極慣性モーメントによっても旋回速度が大きく変化するため、吊荷の位置決め作業を行うにはかなり難しい。さらに、これらの制御には大流量の流体が必要になるため、駆動装置（ファン、電源、制御装置）を含めた装置本体はかなり大型、大重量となり、電源に発電機を装備した場合には、高騒音が発生し、作業員や周囲環境に対する配慮が必要となる。したがって、今後の吊荷制御装置の開発には、次に示すような改良が必要である。

- ① 旋回および静止制御の応答性が早い。
- ② 位置決め精度が高い。
- ③ 外力に対する静止保持力が大きい。
- ④ 小型、軽量、省エネルギー、低騒音である。

## 3. 吊荷制御装置の概要

### 3.1 ジャイロスコープの原理と挙動

本装置では図-1に示すように、X軸回りに高速で回転するフライホイールを、ジンバルを介してY軸回りに回転させ、Z軸回りに発生するモーメントを利用する。フライホイールの極慣性モーメントおよび角速度を $I_x, \omega$ 、Y軸回りの角速度を $\dot{\theta}$ とすると、Z軸回りに発生するジャイロモーメント $M_z$ は、式(1)で示される。

$$M_z = I_x \dot{\theta} \omega \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、吊荷を含むジャイロスコープ各軸回りにおけるオイラーの運動方程式は式(2)~(4)で示される。

$$I_x \ddot{\omega} - I_y \dot{\theta} \dot{\phi} \cos \theta = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$I_y \ddot{\theta} + I_x \dot{\omega} \dot{\phi} \cos \theta = M_y + C_1 \dot{\theta} + K_1 \theta \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$I_z \ddot{\phi} + I_y C_2 \dot{\phi} - I_x \dot{\omega} \dot{\theta} \cos \theta = M_z + K_2 \phi \quad \dots\dots\dots(4)$$

$I$ は各軸回りの極慣性モーメント、 $C$ は角速度に比例する定数、 $K$ は変位角に比例する定数、 $M$ は外力を表す。

まず運動方程式を数値解析し、ジャイロ効果による吊荷の動きを把握した。その結果を基にモデル試験機の確認試験を行い、開発装置の各定数を決定した。

**3.1.1 吊荷の旋回位置決め** ジャイロモーメントを能動的に利用して吊荷の旋回位置決めを行う。図-2にジャイロスコープの各軸回りの挙動を示す。ここで、ジンバル軸（Y軸）、吊荷軸（Z軸）の変位角を $\theta, \phi$ 、角速度を $\dot{\theta}, \dot{\phi}$ 、入力トルクを $M_y$ とする。

吊荷を旋回させるには入力トルク $M_y$ を与える。時刻A( $t=0$ )でジンバル軸は角速度 $\dot{\theta}$ で回転し、Z軸回りには式(1)に対応するモーメント $M_z$ が発生する。これに伴い吊荷はその慣性によって瞬時に旋回を開始する。時刻Bでジンバルの回転は停止し、吊荷は一定の角速度 $\dot{\phi}$ で旋回する。この時入力トルク $M_y$ と吊荷の旋回に伴って

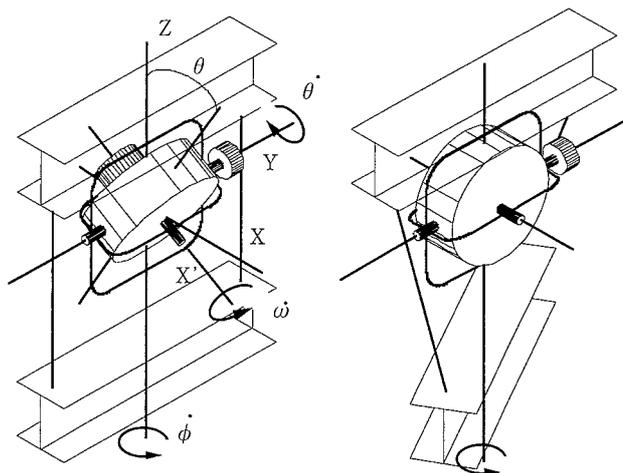


図-1 ジャイロスコープと吊荷の挙動概略

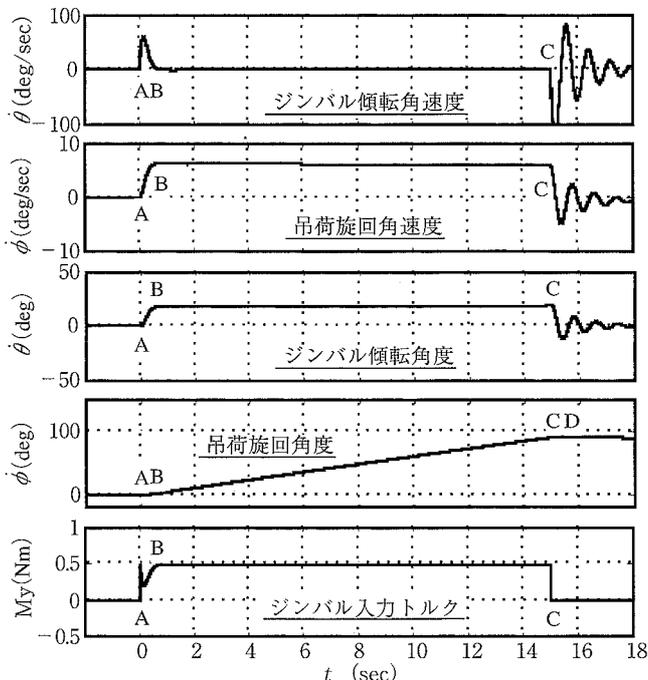


図-2 数値解析による吊荷の旋回位置決め挙動

発生するY軸回りのジャイロモーメントは釣合う。 $M_y$ を変化させることで旋回速度 $\dot{\phi}$ を制御できる。

吊荷を停止させるにはジンバル軸に与えた入力トルク $M_y$ を0にする。時刻CでY軸におけるモーメントの釣合が崩れ、ジンバルは逆向きに回転する。式(1)で示した逆向きのモーメント $-M_z$ がZ軸回りに作用して、吊荷は瞬時的に停止する（時刻D）。

このようにジャイロスコープを利用すると、旋回の開始および停止の応答性が鋭敏であり、高精度の旋回位置決めが可能となる。数値解析とモデル実験を比較すると、Z軸回りにおける旋回状態はほぼ一致する結果が得られ、ジャイロモーメントを利用した吊荷制御装置の挙動を解析より十分把握できることを確認した。

3.1.2 姿勢保持 ジンバル軸に負荷トルクを与えない状態では、ジャイロモーメントの受動的作用により吊荷は静止状態を維持する。これは風などの外乱によって吊荷が回転すると、瞬時に外力とは逆向きのジャイロモーメントがジンバル軸に作用することに起因する。二つのモーメントは相殺され、吊荷は静止状態を維持しようとする。抵抗力は外力の早さと大きさに比例する。

3.1.3 旋回フリー Y軸回りの回転を強制的に拘束することで、Z軸回りに発生するジャイロモーメントを抑える。吊荷制御装置のない通常の状態となり、吊荷を自由に回転させることができる。

3.2 本装置の仕様と特長

開発した吊荷制御装置は中央部にジャイロモーメントを発生させるアクチュエータ部、側部に制御系、無線受信機および電源が各々装備されている。以下に本装置の特長を、表-1に仕様を示す。

3.2.1 吊荷定格と旋回速度 本装置の吊荷定格は吊荷の質量(W)と吊荷の長さ(L)から定まる極慣性モーメントを基準とする。図-3に吊荷の質量と長さ(L)を基準とした吊荷装置の定格(6型および18型)範囲を示す。定格範囲内では90度を15秒の速度で旋回でき、また風外乱にも十分に姿勢保持することができる。

3.2.2 操作方式 無線遠隔操縦により100m範囲内で制御することができる。通常、地上階と作業階の作業員が二つの操作器を持つ。入力信号は先行優先、再信号が入力されるまで現操作機能を維持する。

3.2.3 供給電源 蓄電池を使用し、連続8~10時間の連続運転が可能である。また、作業終了後の夜間充電により連日の使用が可能である。蓄電池を使用するため騒音は全く発生しない。

3.2.4 安全装置 吊荷の旋回中には警告ランプが点灯し、旋回方向を知ることができる。

3.3 作業手順

本装置の機能(旋回位置決め、姿勢保持、旋回フリー)を取入れたカーテンウォールの揚重、取付け作業および吊荷制御装置の操作フローシートを図-4に示す。風の比較的強くない通常時の作業と強風時の作業では操作方法を変えることによって作業効率をかなり向上させることができる。

写真-2に高層階および強風下におけるアルミカーテンウォールの揚重・取付け作業の実例を示す。本吊荷制御装置を強風時用の操作で運用することにより、取付け階の作業員が吊荷を正確に旋回、停止させることができ、極めて安全で、効率の良い作業が実現された。

4. 現場適用と作業測定

本吊荷制御装置の開発・実用化に伴い、既に10箇所の建築現場において、本装置が使用され、良好な成果を得ている。しかし、建設機械として実際に現場へ導入し、より良好な運用を実施するためには、機械の性能評価、作業の省力化、工期の短縮、安全性の向上についてさら

表-1 吊荷制御装置の仕様

型式	6型	18型
寸法	1.4 m×0.5 m×0.5 m	1.8 m×0.73 m×0.75 m
質量	400 kg	800 kg
駆動方式	ジャイロモーメント	
吊荷極慣性モーメント	6 tm <sup>2</sup>	18 tm <sup>2</sup>
回転速度	90度/15秒	
供給電源	DC12 V 2台	DC12 V 4台

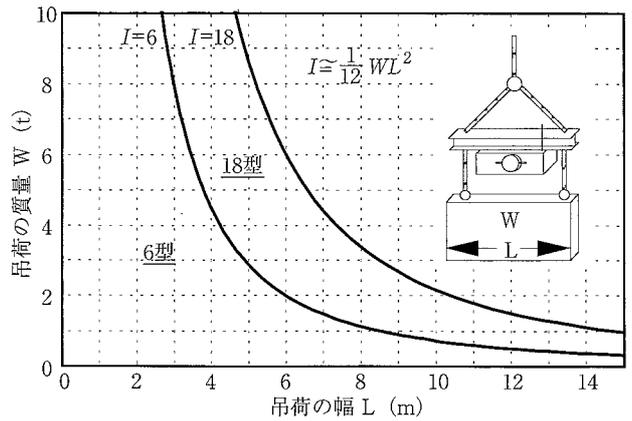


図-3 吊荷制御装置の定格範囲と吊荷形状

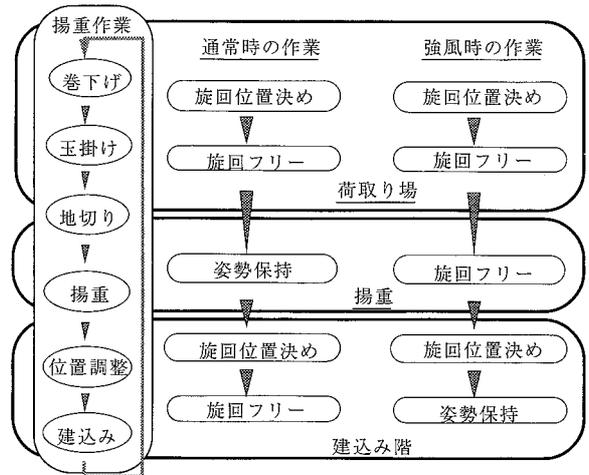
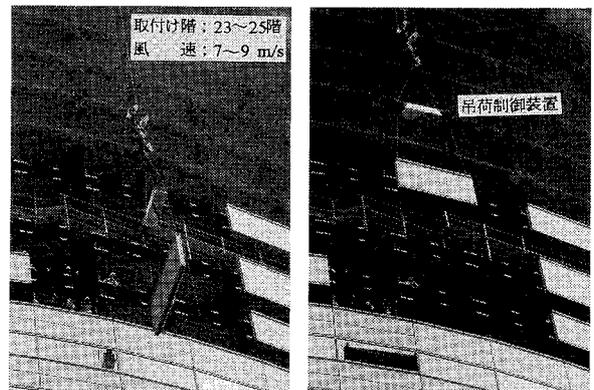


図-4 揚重・取付け作業と吊荷制御装置の操作フロー



(a) 旋回開始 (b) 旋回停止  
写真-2 外壁パネルの旋回位置決め状況

に検討が必要である。そこで、本装置を実際の建築現場に導入し、吊荷の揚重、取付けの作業測定と現場作業員の安全について定量的な評価を実施した。

作業測定を実施した建築工事では、以下に示す特殊状況があり、本装置の導入が現場サイドから要望された。

① 本建築ビルは図-5に示すように半円形の棟からなる特異形状であり、海側に隣接していることから瞬間風速 10 m/s を越える強風が発生し、しかも風向きが頻繁に変化するため作業性能や安全性の低下が予想される。

② タワークレーンが半円棟の中心に設置されているため、クレーンの回転に伴う慣性モーメントの影響を強く受け、各種の資材自体が回転することが予想される。

③ 取付け外壁 PC 板は図-5に示すようにバルコニー部分が外に大きく張り出した形状であるため、躯体に接触しやすく、また PC 板自体を破損する危険性がある。表-2に外壁 PC 板の仕様を示す。

#### 4.1 装置の性能評価

本装置を用いた外壁 PC 板の揚重・取付け作業は、現場状況を考慮すると、図-4で示した強風時の操作フローにしたがって実施した。

図-5はバルコニー付き PCa 板を荷取り場からタワークレーンで揚重し、取付け階まで搬送した場合の PCa 板の実巡回位置の概略を示す。荷取り場からの距離、角度、さらに風の方向、強さが相互に作用するため、PCa 板は不規則な巡回を行い、揚重ごとに予想もできない巡回角度になることがわかる。このような作業環境では作業員が行う吊荷の巡回作業はその都度大きく変化し、その負担もかなり大きくなる。

表-3には図-5で示したように、様々な角度で揚重されてきた PCa 板を所定の取付け角度まで巡回させるための平均巡回時間と平均巡回角速度の値を示す。また、参考として外乱を受けない状況下における本装置の定格巡回値を併記しておく。ここで、在来工法は作業員が押

棒やロープを用いたマンパワーによる作業で行った値を示し、新工法は本吊荷制御装置を利用した作業の値を示す。写真-3に両工法の作業状況を示す。

新工法は在来工法に比して約40%の巡回時間で所定の位置まで巡回できることがわかる。これは作業員によるマンパワーだけでは PCa 板が動き出すまでにかかなりの時間を費やし、また静止させるには慣性力の影響を受けて位置決めが困難になるためと考えられる。一方、新工法ではジャイロ効果による鋭敏な応答性が位置決め作業に効果的に作用し、巡回時間の短縮が実現できる。

また、本現場では実際に風速 10 (m/s) を越える強風下にもかかわらず、定格角速度の80%以上の性能が得られていることから、装置性能を評価する点では十分現場適用が可能であると考えられる。

#### 4.2 作業測定と評価

本装置を用いた吊荷の揚重・取付け作業を、作業の省力化、工期の短縮、安全性の面からを評価するため、下記の内容について測定を行い、在来工法と比較した。

表-2 外壁 PC 板の仕様

部材の寸法 (縦×横×厚さ)	外壁部 : 1.7×3.3×0.2 m バルコニー部 : 1.2×3.3×0.2 m
質量	約 3 t
慣性モーメント	約 6 tm <sup>2</sup>

表-3 外装 PC 板取付け作業における巡回性能

	角速度 (deg/sec)	90 deg 巡回時間 (sec)
在来工法	2.04	44.1
新工法	4.91	18.3
定格巡回性能	6.0	15.0

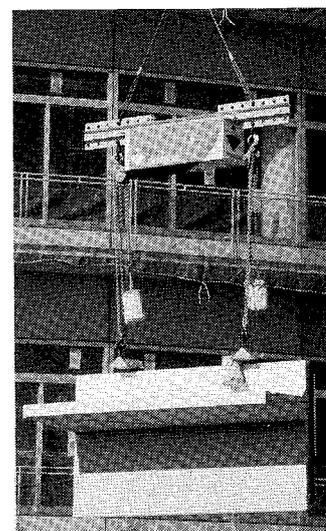
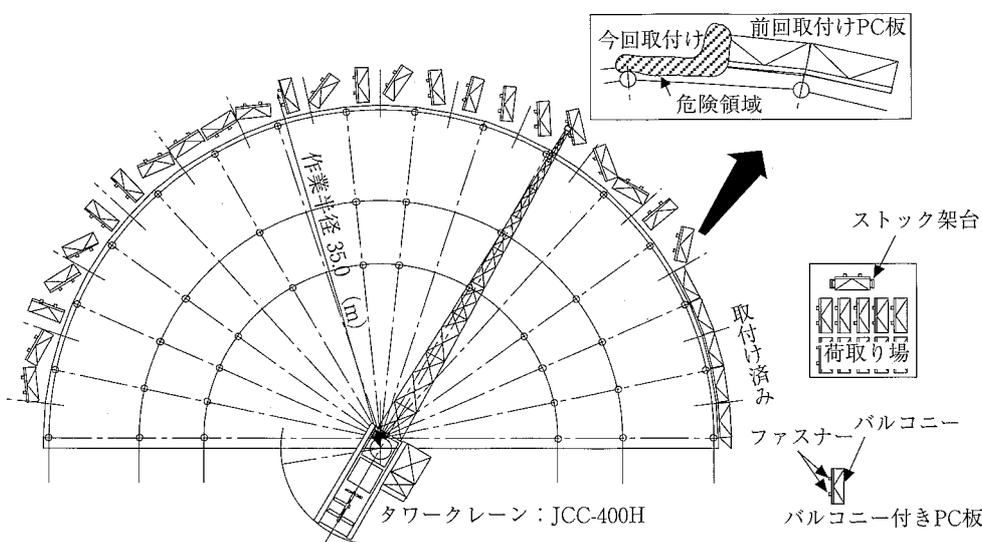
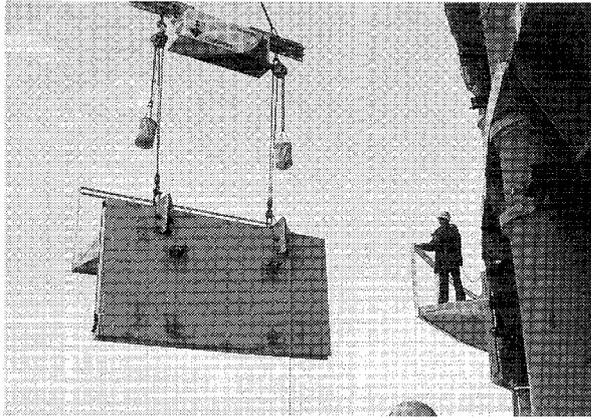
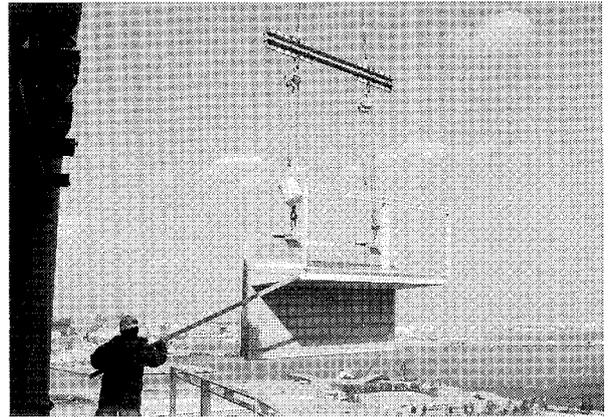


図-5 風外乱を受けた外壁 PC 板の取付け直前の巡回位置および外壁板 PC の形状



(a) 吊荷制御装置の利用 (新工法)



(b) 押棒や介錯ロープの利用 (在来工法)

写真-3 現場作業員が行う旋回作業状況の比較

① 携帯測定器を用いて作業内容を分類し、作業工数(人・分)の比較

② 作業内容をビデオ撮影・分析し、各作業時間の比較および作業員の行動、移動範囲から安全性の比較。

4.2.1 作業工数の比較 外壁PC板の揚重・取付け作業に係わる作業員は、計5人で行われ、各々3箇所配置された。作業内容は作業階により異なり、図-6に示すような項目に分けられる。ここで本装置に直接関連する作業(旋回、引き寄せ作業)を直接関連作業、間接的に関連する作業(位置調整)を間接関連作業とし、本測定では特に着目した。

作業全体および本装置に関連する作業について平均の作業工数を算出し、在来工法と新工法とを比較した結果を図-7に示す。作業工数は関連作業で約30%減少し、これに伴い全体作業では約10%の省力化が実現された。これは関連作業が全体作業にかなりの影響を与えることを示すもので、PCa板の取付け作業にバラツキが生じると全体作業にも相当に影響することを示している。

図-8には従来工法と新工法における関連作業工数のバラツキの様子を示す。在来工法では風外乱が影響し作業工数のバラツキが大きいが、新工法ではバラツキが小さく抑えられていることがわかる。PCa板の取付け枚数が全体で400枚を越えるようなこの作業では、バラツキの小さい作業を達成することは作業効率や工期計画の点でより有効である。本装置の導入によって安定した作業が可能となった。

4.2.2 作業時間の比較 本装置を利用した作業は直接関連作業が主であるため、この作業を以下の作業内容に分けて測定を行った。

- ① 旋回作業の時間
- ② 引き寄せ作業の時間
- ③ 建込み全体作業時間(旋回作業から仮据置きまでの合計時間)

図-9に示すように、旋回作業時間は在来工法に比し、約半分以下の時間に短縮できた。これは写真-3の作業

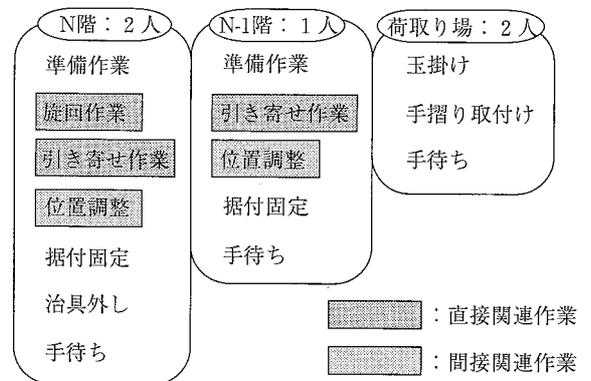


図-6 各作業階における作業項目と作業員の配置

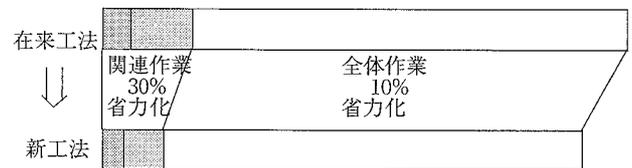


図-7 作業工数の省力化

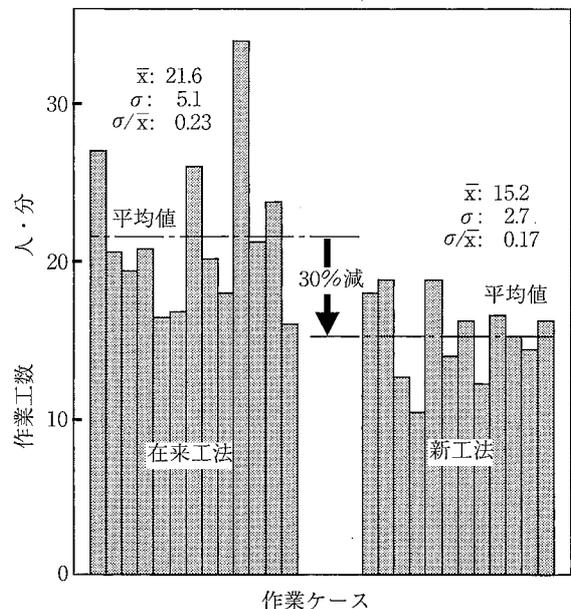


図-8 関連作業における作業工数のバラツキ

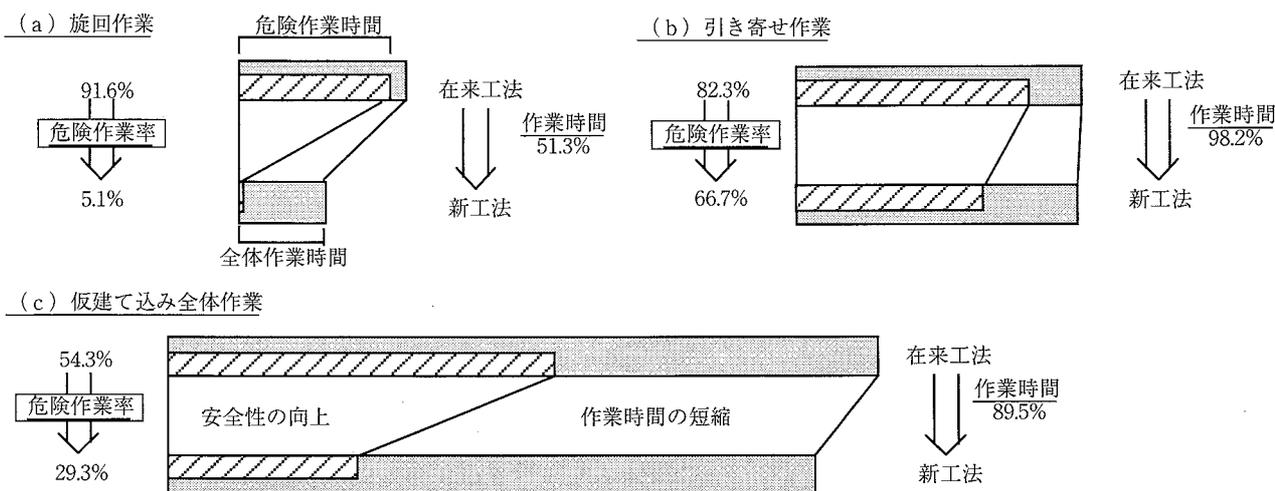


図-9 直接関連作業における作業時間と安全性の比較

状況から分かるように、新工法ではジャイロモーメントを利用した安定な旋回遠隔制御が可能であるが、在来工法ではマンパワーが主となり、必ずしも十分な旋回力を与えられないためである。一方引き寄せ作業は主にクレーンの寄せ付け作業に依存するため、両工法とも作業時間に大きな差は見られない。しかし新工法では引き寄せ作業中も吊荷の姿勢保持状態を保つことができ、次の仮据置きが容易となる利点がある。建込み全体作業では従来工法に比し、約10%の時間短縮が可能になった。

4.2.3 作業の安全性の比較 本装置の導入に伴う作業の安全性を評価するため、以下に示す3種類の作業を危険性作業と見なした。そしてこれらの作業が図-5で示した危険領域で行われた場合を危険作業とし、その時間を危険作業時間と定義した。また、この危険作業時間の全体作業時間に対する割合を危険作業率とした。

- ① PCa板に作業員が直接手を触れる作業
- ② 介錯ロープを持ってPCa板に引かれる作業
- ③ 旋回を抑えるためPCa板を棒で押す作業

図-9に各作業に対する危険作業率を示す。新工法では無線遠隔操作が可能であるため、危険作業域への立ち入りがなくなり、旋回作業の危険作業率は極めて低い。寄せ付け作業では吊荷装置の姿勢保持機能が働き、作業員が危険領域に入って、直接吊荷に触れる時間数が減少するため危険作業率は15%以上減少し、安全性が向上することが示された。このことから、建込み全体作業では在来工法に比し、約25%の安全性向上が可能となった。

## 5. まとめ

ジャイロモーメントを利用した吊荷の旋回、静止保持を可能にする制御装置の開発を行い、実際の工事現場に適用した。本装置の導入に伴い、吊荷作業時間の短縮が可能となり、また安全性向上にも大きく貢献できた。

なお、本装置は「ジャピタス」という名称を付け、平成7年12月より市販を開始した。

## 謝辞

最後に本装置の開発・実用化にあつては、共同開発者である三菱重工業(株)高砂研究所神吉主査(当時)、猫本研究員、また、当社技術研究所システム技術研究室、機械部、本店工務部、ゲートタワー北棟JVおよびその他の多くのJV現場の協力を得た。さらに作業測定調査・分析には国土館大学三浦延恭教授より貴重な御助言を頂いた。ここに記してに深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 井上, 他: ジャイロモーメントを利用した吊荷制御装置の開発, 建設機械と施工法シンポジウム, p. 160~163, (1994)
- 2) 猫本, 神吉: 荷役用グラフCMG旋回位置決め装置の開発, Dynamics and Design Conference '94, p. 548~551, (1994)
- 3) 井上, 他: ジャイロモーメントを利用した吊荷制御装置の開発と実用化, 建設ロボットシンポジウム, Vol. 5, p. 107~116, (1995)