

4. 高層構造物の建設時における風による揺れと作業限界 および墜落に関する安全性の限界*

大幢勝利**, 永田久雄**

4. Working Limits and Safety Limits in Regards to Accidental Falls for Wind-Induced Vibration during High-Rise Construction Work*

by Katsutoshi OHDO** and Hisao NAGATA**

Abstract: During the construction of high-rise structures, weather has a strong influence on work efficiency and safety. Especially, bridge pylons under construction are likely to vibrate due to winds even less than 10m/s, which is a widely used criterion for suspension of construction work in Japan. In fact, at a site workers, who were welding, felt it difficult to work due to wind-induced vibration and construction work had to be interrupted. Although these problems are recognized there are no construction work efficiency standards or even safety standards for working in wind-induced low-frequency motion, particularly in regards to accidental falls.

Therefore, criteria of construction work efficiency and safety regarding falls under wind-induced vibration were experimentally investigated by an originally designed linear accelerator. In this study, limits of welding work were assumed to be criteria of construction work efficiency, and limits to keep an upright posture were assumed to be safety limits regarding falls during wind-induced vibration. In the experiments, low-frequency sine-wave acceleration was transmitted to each subject by the accelerator. The critical acceleration was investigated while straight line drawing, simulated welding tasks, and the critical limits to keep an upright posture were being conducted. Thirty young males and females, and five welders participated in a series of experiments.

From the results obtained, it was found that the critical acceleration for an upright posture for the male subjects was larger than the female subjects. Subjects were more likely to lose balance due to backward forces. The critical acceleration for an upright posture increased in proportion to frequencies, which ranged from 0.5 to 2.0 Hz, but under 0.5 Hz the critical acceleration tended to keep constant. On the other hand, the relations between the critical acceleration during straight line drawing tasks and for welding tasks showed similar tendencies and they were almost at the same levels. Both critical accelerations increased in proportion to frequencies between 0.5 to 2.0 Hz. However they were in inverse proportion to frequencies under 0.5 Hz. These results are different from the international standards of ISO 6897, which are used to evaluate the response on occupants on offshore structures to low-frequency horizontal motion.

As the result of this study, standards for construction work efficiency and safety standards, particularly for falls are proposed to be in the range of 0.1 to 2.0 Hz. Using these results for wind frequencies, it was found that construction work efficiency was negatively affected during the construction of the Hakucho Bridge or the Rainbow Bridge. Therefore, in case where vibration in the range from 0.25 to 2.0 Hz is expected and welding work is scheduled, the critical point at which

* 平成 12 年 6 月土木学会論文集 No.651/VI-47 に一部発表した。

** 建設安全研究部 Construction Safety Research Division

the vibration control system is activated, should be lowered from 10 cm/s², which was used on the Hakucho Bridge or Rainbow Bridge, to the critical point of 5 cm/s².

Keywords; Horizontal motion, Low frequency vibration, Welding work, Human standing posture, Construction

1. はじめに

構造物の高層化にともない、橋梁主塔架設時やゴンドラ作業時などにおいて、風により長周期大振幅の水平方向の揺れが発生することが多くみられる。これらの揺れは、建設工事の一般的な作業限界¹⁾である 10 m/s 以下の風で発生する場合もあり、揺れの中で作業を強いられることも多い。このため、橋梁主塔架設時に多くの現場では制振装置を導入しているが、制振しても実際の風による揺れで溶接作業に支障が生じ、作業が中止になった事例がある²⁾。また、Fig. 1 に示すアンケート調査でも、約 4 割の人が作業に支障が出たことがあると答えている。これは、制振装置の制振レベルを決定するにあたり、長周期大振幅の水平方向の揺れの中での作業性や安全性に関し、建設工事を対象とした明確な基準が示されていないためである。

長周期大振幅の水平方向動揺下での作業限界については、国際規格である ISO6897³⁾に規定されている。ISO6897 では、海洋構造物上で発生する水平方向の揺れに対し、熟練を要する作業を行うことが困難となる加速度を 0.063~1 Hz の範囲で表している。しかし、上記の作業が中止になった現場では、この基準加速度以下で制振していたにも拘わらず溶接作業に支障が出た。このため、ISO6897 は溶接作業の基準として適しているとは言えない。この基準以外にも、長周期振動に対する恕限度（容認できる限度）の中で知覚閾などに関しては、これまでに多くの研究（文献 4, 5 など）がなされているが、溶接の作業限界などに関して詳細な分析を加えた研究は見あたらない。

吊り下げ式のゴンドラなどが風により揺れた場合にも、まず上記のように溶接などができなくなる作業限

界に達するが、さらに揺れが大きくなると、直立姿勢を保持できなくなる。このように姿勢のバランスが保持できなくなった場合、転倒・墜落等を誘発し危険である。そこで、本研究では直立姿勢（以下、立位姿勢とする）のバランス保持限界を墜落に対する安全性の限界と考えた。

これまでに、矩形波などに対し立位姿勢のバランス保持限界を求める研究⁶⁾がなされており、この波形に対する立位姿勢のバランス保持限界については一般的な傾向が示されている。しかし、建設現場で発生する渦励振による構造物の正弦波状の揺れに対しては、立位姿勢のバランス保持限界を求める研究は行われていない。

このようなことから、本研究では建設工事で発生する風による長周期大振幅の揺れの中での作業限界や墜落に対する安全性の限界について、実験的に検討することとした。まず、揺れと建設作業の限界については、揺れにより実際に作業に支障が出た溶接作業の限界を調べることにした。しかし、実験室で溶接を何度も行うことは非常に困難なため、正弦波加速刺激下で被験者に溶接に類似した直線描き作業を行わせ、この作業が持続できなくなった時の正弦波加速度のピーク値（以下、限界加速度とする）を求めた。さらに、溶接工に溶接の疑似作業を行わせ、この作業の限界加速度より直線描き作業の結果を補完した。また、揺れと墜落に対する安全性の限界については、立位の被験者に正弦波加速刺激を与え、姿勢のバランス保持の限界加速度を求めた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

被験者に正弦波状の加速刺激を与える実験装置として、当研究所で開発した立位姿勢バランスの安定性評価装置（以下、リニア・アクセラレータ⁷⁾とする）を用いた。Photo 1 にリニア・アクセラレータを示す。本装置は、被験者を走行台に乗せこれを直流サーボモータにより駆動し、コンピュータでのコントロールにより、正弦波、矩形波、三角波等の加速刺激を与えることができる。

なお、走行台の動きが視覚的に察知されることによ

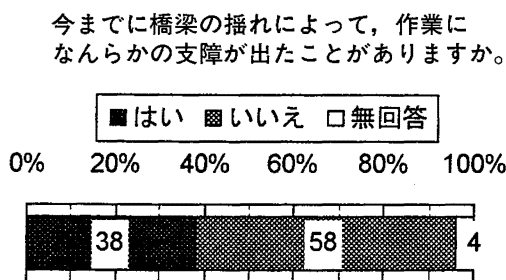


Fig. 1 Result of questionnaires about vibration. 揺れに対するアンケート結果

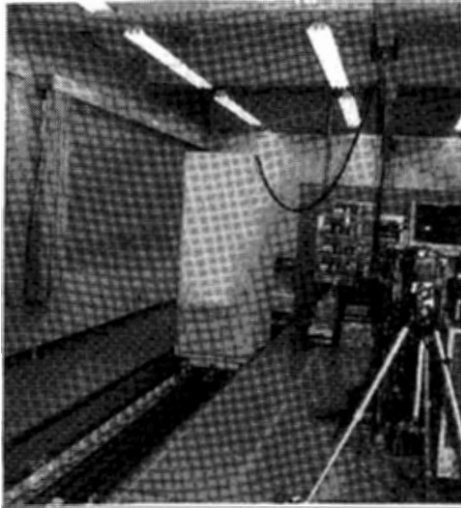


Photo 1 Linear accelerator.
リニア・アクセラレータ

る立位姿勢バランスの保持への影響や、実験室環境から受ける心理的影響を取り除くために、実験に際しては、Photo 1のように走行台の周囲を極薄茶色の布で覆った。

2.2 揺れと墜落に対する安全性の限界に関する実験

立っていかれるかどうかの立位姿勢のバランス保持限界を求めた。実験の対象とした被験者は、一般男子15名（平均年齢25.0歳，18～50歳），女子15名（平均年齢20.1歳，18～30歳）である。また、被験者の平均身長（体重）は、男子171.0 cm（65.6 kg），女子160.7 cm（53.9 kg）である。

立位姿勢保持の能力は、加速刺激を与える方向が人体の横方向か斜め方向か、あるいは前後方向かによって異なっており、矩形波による実験⁸⁾では、前または後方向へ加速刺激を与えた場合に、横方向や斜め方向へ加速刺激を与えた場合に比べ、立位姿勢保持の能力がかなり劣っていた。このため、正弦波の場合にも立位姿勢保持の能力は、加速刺激を被験者の前後方向に与えた場合に最も低くなると予想される。そこで、最も低い安全側の限界を求めため、被験者の前後方向に正弦波加速刺激を与えて立位姿勢保持の限界となる加速度を求めた。

実験では、まず、被験者をリニア・アクセラレータの走行台に立たせ、加速刺激を与えない状態で後方に倒れかかる練習をさせ、倒れることへの恐怖感を取り除かせた。次に、実験前から身構えの姿勢を取らないように被験者に指示し、一定の足幅でリラックスした状態で立たせた。この時の足幅は、矩形波での実験⁸⁾と同じものとした。また、靴のかかとの高さや靴底の摩擦等の影響を排除するため、被験者は裸足とした。

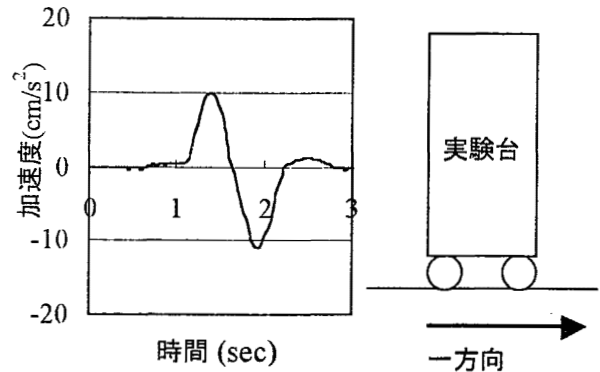


Fig. 2 The acceleration curve and the direction in case of one cycle wave of 1.11 Hz.
一方向単発の加速度波形と方向 (1.11 Hz)

この状態で走行台に立たせた被験者に対し、被験者の前方向と後ろ方向から0.2, 0.31, 0.5, 0.78, 1.11, 1.56, 2.0 Hzの7段階の周波数別に、同一方向1サイクル（以下、一方向単発とする）の正弦波加速外乱刺激をリニア・アクセラレータにより与えた。Fig. 2に、一方向単発波のときの加速度波形とその方向を示す。被験者の前方向からの刺激は被験者を前方向に、後ろ方向からの刺激は被験者を後方向に倒す力を与えるものである。加速刺激を与えた後は走行台を所定の位置に戻し、被験者を再度リラックスさせた状態で立たせた後、同じように次の加速刺激を与えた。その際、加速刺激の方向と周波数は同一のまま、加速度のみ徐々に大きくしていった。この一連の動作を、立位姿勢保持の限界に達するまで繰り返し行い、その後加速度を増減して限界値を再度確認し、慣れの影響ができるだけ出ないようにした。立位姿勢保持の限界は、Photo 2のように被験者が走行台の衝撃吸収パッドに倒れかかるか、倒れるのを防ぐために手摺につかまったり、バランスをとるためとっさに片足立ちになった場合とし、その時の正弦波の最大加速度を限界加速度として求めた。この実験を、加速刺激の方向別に周波数をランダムに変えながら行い、各方向各周波数ごとに立位姿勢保持の限界加速度を求めた。

なお、本実験では、被験者に一方向単発の加速刺激のみ与えることとした。安全のため、被験者には予め倒れる方向を指示し、その方向へ倒れることに対してのみ注意を払えるようにした。一方、双方向に連続波を与えた場合には、大きな加速度により前後どちらに倒れるか確定できず危険である。このため、連続波での実験は行わないこととした。

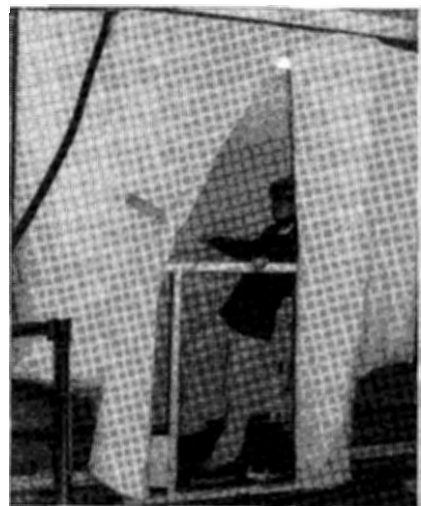
2.3 揺れと建設作業の限界に関する実験

(1) 揺れと直線描き作業の限界

揺れに対する建設作業の限界として溶接作業を取り



(a) 衝撃吸収パッドに倒れかかる



(b) 手摺につかまる, 片足立ちになる

Photo 2 Limits to an upright posture.
立位姿勢保持の限界

上げ, まず, 溶接に類似した直線描き作業の限界を求める実験を行った。実験では, 立位姿勢保持の場合と同様に, 一方向単発の正弦波加速刺激下で直線描き作業の限界を求め, さらに, 30 秒間双方向に連続する正弦波加速刺激下での直線描き作業の限界も求めた。Fig. 3 に, 双方向連続波のときの加速度波形とその方向を示す。一方向単発波での被験者は, 立位姿勢保持の限界を求めた被験者と同一の, 一般男子 15 名, 女子 15 名である。また, 30 秒間の連続波での被験者は, 一般男子 19 名 (平均年齢 22.3 歳, 19~26 歳) で, 平均身長 (体重) は 170.0 cm (63.8 kg) である。

実験は, Photo 3 に示すように, リニア・アクセラレータの走行台上に立たせた被験者に直線を描かせることにより行い, その最中に被験者の横方向と前方向 (連続波は前後方向) へ正弦波加速外乱刺激を与えた。そ

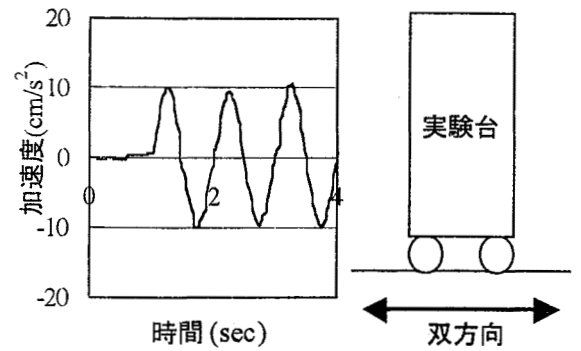


Fig. 3 The acceleration curve and the direction in case of continuous cycles of 1.0 Hz.
双方向連続の加速度波形と方向 (1.0 Hz).



Photo 3 A subject on the linear accelerator.
リニア・アクセラレータ上の被験者

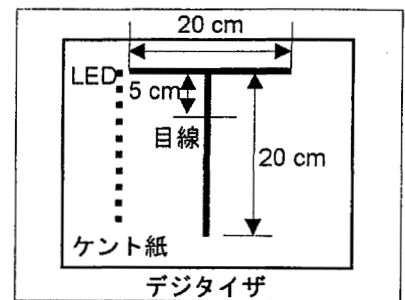


Fig. 4 Straight line input board.
直線入力板

の際, 単発波の場合には 0.125~2.0 Hz, 連続波の場合には 0.1~2.0 Hz の 8 段階の周波数別に実験を行い, 立位姿勢保持の場合と同様に, 徐々に加速度を大きくしながら繰り返し加速刺激を与え, 直線が問題なく描ける限界の加速度を求めた。8 段階の周波数は, 後述する予備実験の結果より決定することとした。

限界加速度の判断は, 被験者に①真っ直ぐ線を描く②一定速度で線を描く③一定筆圧で線を描くという 3 つ

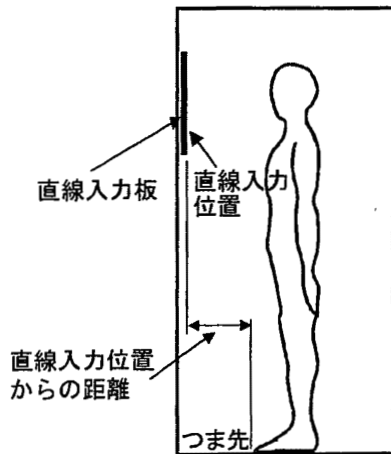


Fig. 5 Standing position of the subject.
被験者が立つ位置

Table 1 Conditions of pre-experiments.
予備実験の条件

実験番号	直線を描く方向	直線を描く道具	直線を描く速度	立つ位置
0	横	入力ペン	1 cm/s	30 cm
1	縦	入力ペン	1 cm/s	30 cm
2	縦	入力ペン	1 cm/s	20 cm
3	縦	入力ペン	1 cm/s	40 cm
4	縦	入力ペン	0.5 cm/s	30 cm
5	縦	入力ペン	2 cm/s	30 cm
6	縦	溶接器具	1 cm/s	30 cm

の条件を与え、この3条件をすべて満たせば直線が問題なく描けるものとした。この時の判定は、精神的な描きづらさは考慮しないものとし、「0：問題なく描ける」、「1：やや難しい」、「2：難しい」、「3：かなり難しい」、「4：非常に難しい」の5段階のカテゴリースケールを用いて、被験者自身に評価させた。作業に全く支障のない限界を調べるため、「0から1」に変わる時の正弦波の最大加速度を直線が問題なく描ける限界加速度とした。

直線を描く作業は、目線が Fig. 4 に示す位置になるように設置した、デジタイザ上のケント紙に描かれた長さ 20 cm の縦または横方向の直線を、デジタイザの入力ペンまたは実際の溶接器具の先に取り付けた入力ペンでなぞらせることにより行わせた。直線を描く方向は、通常の文字や線を描くのと同じように、横方向の直線は左から右、縦方向は上から下とし、直線を描く方向と道具は予備実験により決定することとした。被験者が描いた線の軌跡は、験者が走行台の外でモニ

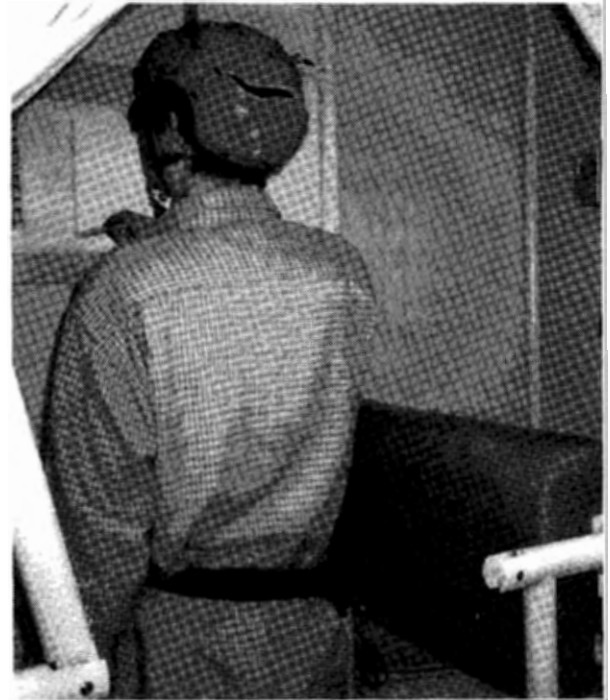


Photo 4 Measurement of displacement of head and waist.
頭部および腰部の変位測定

ターできるようにしており、加速刺激は一方向単発波の場合、デジタイザに描かれた軌跡をモニターして、入力ペンが 5 cm 進んだときに与えた。連続波の場合には、被験者に正弦波加速刺激を 30 秒間連続して与え、その最初の 10 秒間は何もしない状態で曝露し、次の 20 秒間で直線描き作業を行わせた。この時、直線の横に 2 cm 間隔の 10 個の LED を取り付け、直線を描く方向に等間隔時間で光らせ、これを頼りに一定の速度で直線を描かせた。また、Fig. 5 に示す被験者が立つ位置は、足幅は立位姿勢の場合と同じとして、つま先から直線入力位置までの水平距離が一定となるようにした。

予備実験は、Table 1 に示す各条件の組合せに対して行い、直線を描く方向、直線を描く道具、直線を描く速度、および被験者が立つ位置が限界加速度へ与える影響を調べ、本実験での条件を決定することとした。予備実験の被験者は、一般男子 6 名（平均年齢 22.0 歳、19～24 歳）で、平均身長（体重）は 169.5 cm（61.5 kg）である。予備実験は、一方向単発の正弦波加速刺激下で行い、0.125, 0.25, 2.0 Hz の 3 段階の周波数別に限界加速度を求め、その特性から本実験で測定する 8 段階の周波数も決定した。

また、単発波と連続波の実験結果を人体の動きから検証するため、直線描き作業の限界時における人体の変位を測定する実験を行った。単発波の被験者は、一般男子 5 名（平均年齢 20.0 歳、19～22 歳）で、平均身

長(体重)は166.6 cm (61.9 kg), 連続波の被験者は、一般男子5名(平均年齢22.0歳, 20~23歳)で、平均身長(体重)は170.0 cm (67.9 kg)である。実験では、走行台に立たせた被験者に対し、前もって測定した直線描き作業の限界加速度を各周波数ごとに与えた。その際、Photo 4 に示すように、被験者の頭部と腰部にワイヤーロープ式変位変換器を取り付け、これにより走行台と人体各部の相対変位を測定した。

(2) 揺れと溶接作業の限界

単発波および連続波に対し、直線描き作業の限界加速度を求めたが、実際の溶接作業との対応を見るため

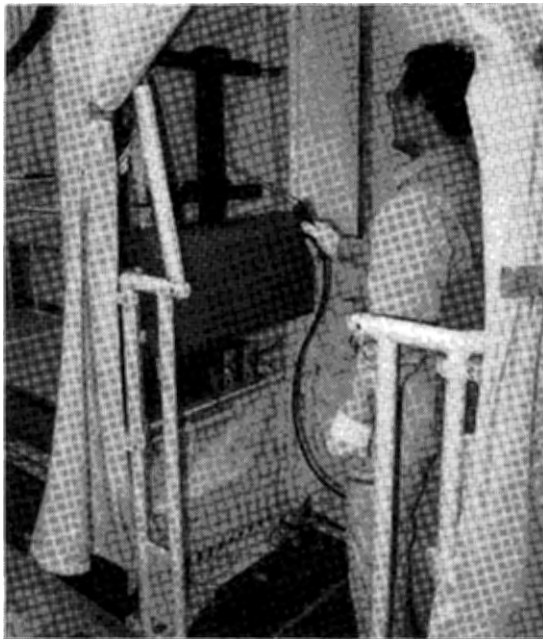


Photo 5 Experiment for measuring limits of welding tasks.
溶接作業の限界を求める実験

Table 2 Conditions of experiments excluding pre-experiments.
予備実験以外の全実験条件

動作	加速刺激の方向・種類	測定周波数	被験者(名)
立位姿勢保持	前・単発	0.2~2.0 Hz	男女各 15
	後・単発	0.2~2.0 Hz	男女各 15
直線描き作業	横・単発	0.125~2.0 Hz	男女各 15*
	前・単発	0.125~2.0 Hz	男女各 15*
	横・連続	0.1~2.0 Hz	男 19*
	前後・連続	0.1~2.0 Hz	男 19*
溶接作業	横・連続	0.1~2.0 Hz	溶接工 5
	前後・連続	0.1~2.0 Hz	溶接工 5

* 各5名ずつ、頭部と腰部の変位測定

に、鉄骨溶接を専門とする溶接工5名を被験者として、溶接作業の限界加速度を評価させた。被験者は、男子5名(平均年齢44.4歳, 26~60歳)のみで、平均身長(体重)は166.0 cm (62.7 kg)である。実験では、リニア・アクセラレータ内で溶接作業を行うことは危険なため、被験者に溶接器具を持たせ溶接の疑似作業を行わせた。その際、実際に溶接している環境に近づけるため、Photo 5 に示すように、2枚の鋼板を縦方向に溶接して接合するつもりで作業させた。また、立つ位置や溶接速度は溶接工の通常の作業通りにさせた。

実験は、連続波での直線描き作業の場合と同じ周波数について行い、被験者をリニア・アクセラレータの走行台に立たせ、30秒間連続する正弦波加速刺激下で、最初の10秒間曝露した後、20秒間溶接の疑似作業を行わせた。溶接できるかどうかの評価は、溶接しづらいという精神的なものではなく、溶接した結果に欠陥がなく満足できるかどうかで行わせた。この時、直線描き作業と同様に、「0:問題なく溶接できる」、「1:やや難しい」、「2:難しい」、「3:かなり難しい」、「4:非常に難しい」の5段階のカテゴリースケールを用いて、被験者自身に評価させた。溶接作業に全く支障のない限界を調べるため、「0から1」に変わる加速度を、溶接が問題なくできる限界加速度とした。Table 2 に予備実験以外の全実験条件を示す。

3. 実験結果

3.1 揺れと墜落に対する安全性の限界に関する実験結果

立位姿勢保持の限界を求める実験の結果を、周波数と限界加速度の関係として、Fig. 6 に男子の平均値を、Fig. 7 に女子の平均値を示す。Fig. 6, 7 より周波数0.5 Hz 以上の場合に、周波数の増加とともに限界加速度も直線的に増加していた。しかし、0.5 Hz 以下の場合には直線の傾きが小さくなり、限界加速度は100 cm/s² 以下の一定値に近づいていった⁹⁾。

3.2 揺れと建設作業の限界に関する実験結果

(1) 揺れと直線描き作業の限界

予備実験の結果として、Fig. 8 に直線を横方向または縦方向に描く場合の限界加速度の平均値を、周波数の関係として両対数軸上に示す。Fig. 8 では、0.25 Hz で屈曲しているが、より正確な屈曲点については以降に行った本実験で確認することとした。Fig. 8 より、限界加速度は測定した全ての周波数で、横方向に比べ縦方向に描いた方が明らかに小さくなっている。よって、より小さいレベルの限界加速度を求めるために、本実

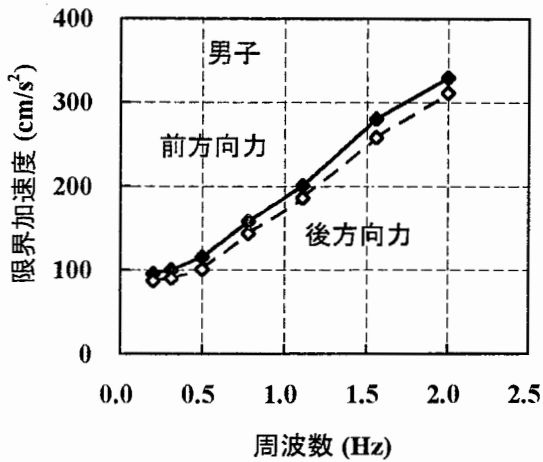


Fig. 6 Relationship between frequency and critical acceleration for male upright posture.
周波数と立位姿勢保持の限界加速度の関係 (男子)

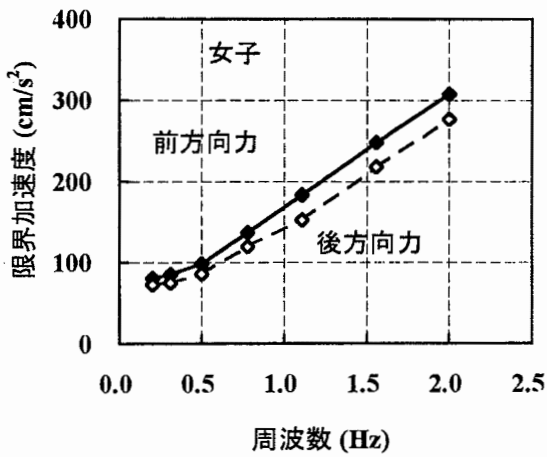


Fig. 7 Relationship between frequency and critical acceleration for female upright posture.
周波数と立位姿勢保持の限界加速度の関係 (女子)

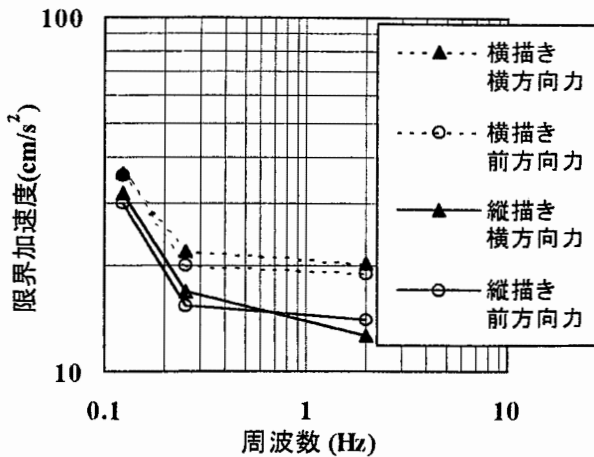


Fig. 8 Critical acceleration in cases of drawing straight line vertically or horizontally.
直線を縦または横方向に描く場合の限界加速度

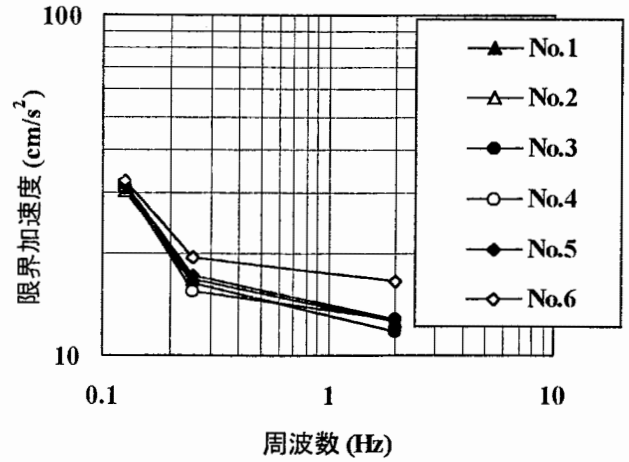


Fig. 9 Critical acceleration in cases of giving sideward forces.
横方向に加速刺激を与えた場合の限界加速度

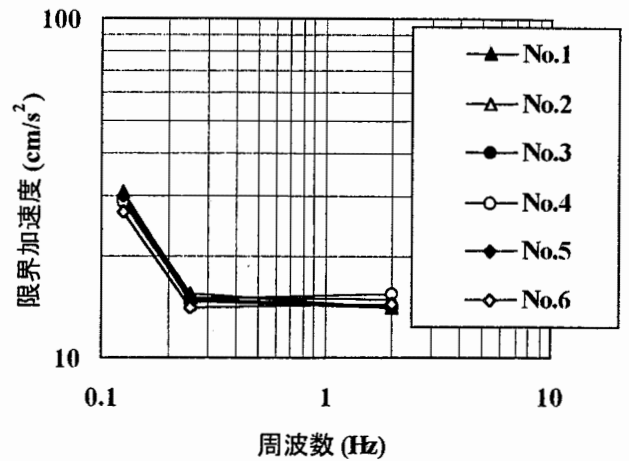


Fig. 10 Critical acceleration in cases of giving forward forces.
前方向に加速刺激を与えた場合の限界加速度

験では直線を縦方向に描く場合についてのみ行うこととした。

次に、Table 1 に示した条件で行った予備実験の結果の平均値を、周波数の関係として加速刺激の方向別に Fig. 9, 10 に示す。Fig. 9, 10 も Fig. 8 と同様に、0.25 Hz で屈曲している。Fig. 9 では、溶接器具により直線を描いた場合 (No. 6) に限界加速度が若干大きいですが、実験後の被験者のコメントより、溶接器具の柄が長いので線が曲がったかどうか判断できないとのことであった。このため、限界加速度が大きく判断されてしまったようだが、この場合を除いて Fig. 9, 10 では限界加速度のレベルは実験条件によらずほとんど同じであった。したがって、直線描き作業の限界加速度は直線を描く速度と立つ位置について、予備実験で行った範囲では影響がないことがわかった。また、実験条件を変えても同一周波数での限界加速度のばらつきが

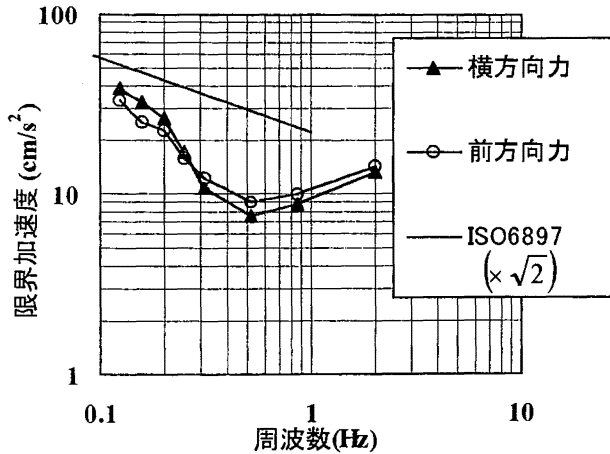


Fig. 11 Critical acceleration for straight line drawing tasks in cases of one cycle wave, male.
単発波での直線描き作業の限界加速度 (男子)

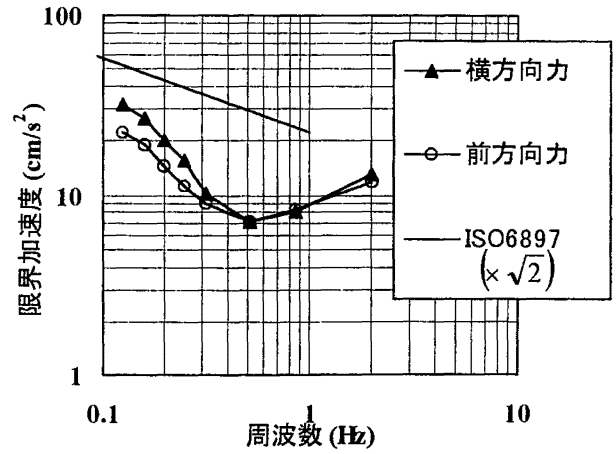


Fig. 12 Critical acceleration for straight line drawing tasks in cases of one cycle wave, female.
単発波での直線描き作業の限界加速度 (女子)

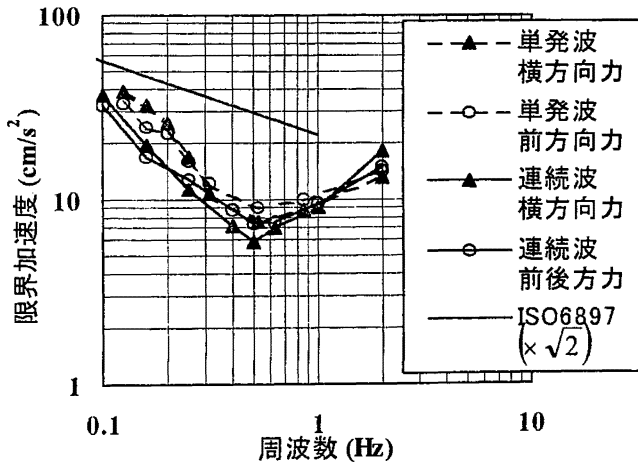


Fig. 13 Critical acceleration for straight line drawing tasks in cases of one cycle wave and continuous cycles.
直線描き作業の限界加速度 (単発波, 連続波)

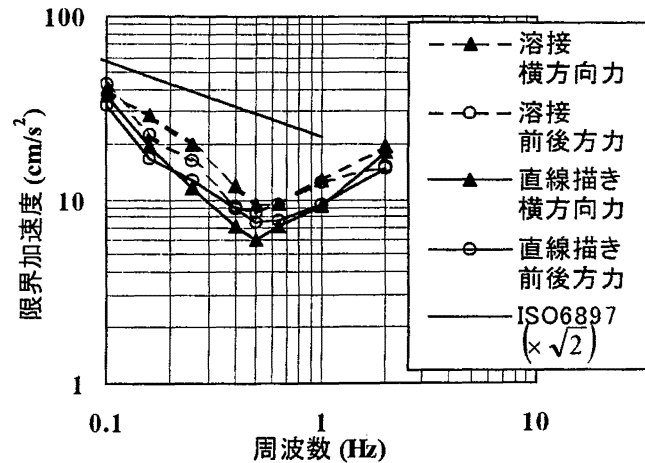


Fig. 14 Critical acceleration for straight line drawing tasks and welding tasks (continuous cycles).
直線描きと溶接作業の限界加速度 (連続波)

小さいため、限界加速度の判断は今回の方法で再現性の高い結果が得られることがわかった。

以上の予備実験の結果より本実験での直線を描く方向は縦方向、直線を描く道具はデジタイザの入力ペン、直線を描く速度は1 cm/s、立つ位置はつま先から入力位置までの水平距離が30 cmのところとした。この条件で、一方向単発波に対する直線描き作業の限界加速度を求めたが、予備実験では0.25 Hzで屈曲していることから、この周波数を中心に0.125, 0.16, 0.2, 0.25, 0.315, 0.5, 0.8, 2.0 Hzの8段階の周波数別に実験を行った。

実験の結果を、周波数と限界加速度の関係として、Fig. 11に男子の平均値を、Fig. 12に女子の平均値を両対数軸上に表示する。同図より、周波数約0.5 Hzを境に、それ以上の場合は周波数の増加にともない限

界加速度が上昇している。これは、立位姿勢保持の場合と同様な傾向である。しかし、0.5 Hz以下の場合、周波数の低下にともない限界加速度が大きく上昇している。

ここで、Fig. 11, 12には海洋構造物上での作業限界に関する国際規格ISO6897を示してあるが、この加速度レベルと比較してみると、本実験による限界加速度はISO6897の限界加速度に比べ全体的に低くなっている、また、0.5 Hz以下での周波数と限界加速度の関係はISO6897と同じように右下がりの曲線となっているが、0.5 Hz以上では曲線の傾きが逆になっておりISO6897とは異なる傾向を示している。

次に、連続波での直線描き作業の限界を求める実験の結果を、周波数と限界加速度の関係として、各被験者の平均値を Fig. 13に両対数軸上に表示する。Fig.

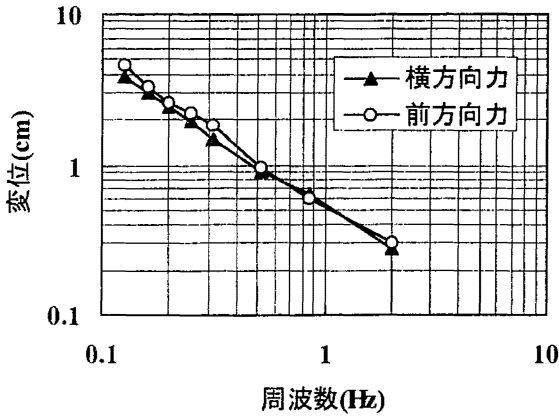


Fig. 15 Displacement of the head in one cycle wave.
単発波における頭部の変位

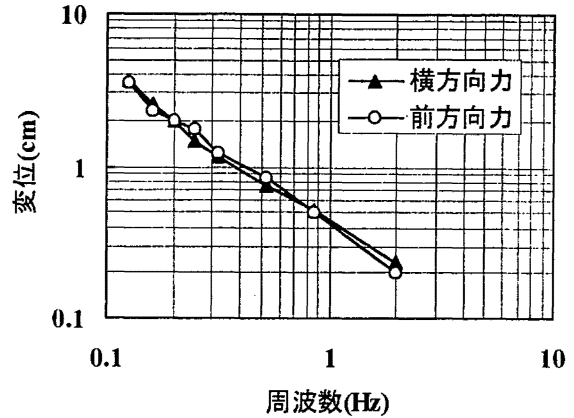


Fig. 16 Displacement of the waist in one cycle wave.
単発波における腰部の変位

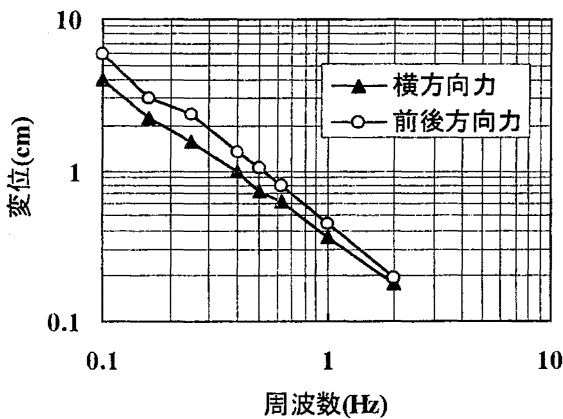


Fig. 17 Displacement of the head in continuous cycles.
連続波における頭部の変位

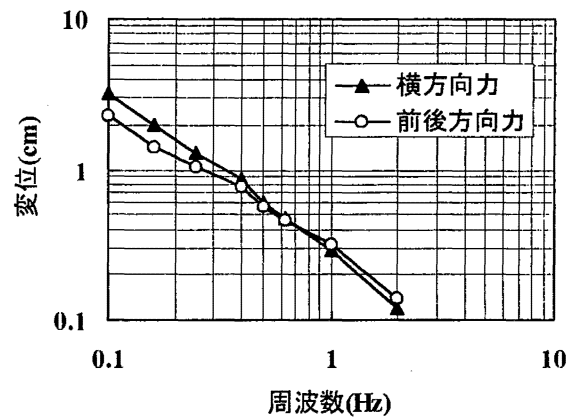


Fig. 18 Displacement of the waist in continuous cycles.
連続波における腰部の変位

13では連続波の場合に加え単発波の場合も示したが、単発波の場合に0.5 Hz付近で屈曲していたことから、連続波の場合は単発波では測定しなかった0.5 Hz付近の0.4, 0.63 Hzも含め8段階の周波数(0.1, 0.16, 0.25, 0.4, 0.5, 0.63, 1.0, 2.0 Hz)で測定した。その結果、曲線の傾きをみると単発波とほぼ同じ傾向が現れ、0.5 Hzで屈曲してこれを最低値としてV字型の分布を示した。

(2) 揺れと溶接作業の限界

連続波における溶接作業の限界を求める実験の結果を、周波数と限界加速度の関係として、各被験者の平均値をFig. 14に両対数軸上に表示する。同図には、連続波での直線描き作業の限界加速度も示してあるが、溶接作業の限界加速度も連続波での直線描き作業と同一周波数で測定した。Fig. 14より曲線の傾きをみると、直線描き作業と溶接作業はほとんど同じ傾向を示しており、0.5 Hzで屈曲してV字型の分布を示した。

Fig. 13, 14にはFig. 11, 12と同様に、海洋構造物上での作業限界を示す国際規格ISO6897を示しているが、連続波での直線描きや溶接作業の限界加速度は単

発波と同様にISO6897より非常に低くなっている。直線の傾きについても、0.1~0.5 HzまではISO6897と同様に限界加速度は周波数の増加に伴い減少しているが、0.5~2.0 Hzでは周波数の増加に伴い増大しており、ISO6897とは異なる傾向を示している¹⁰⁾。

4. 考察

4.1 頭部、腰部の変位と作業限界

直線描き作業の限界時における頭部および腰部変位の測定結果を、周波数と最大変位の関係として、Fig. 15, 16に単発波の、Fig. 17, 18に連続波での各被験者の平均値を両対数軸上に表示する。同図に示した最大変位は、直立静止状態からの頭部および腰部の変位の最大値で、走行台の固定点を基準とした相対変位で表している。Fig. 15~18より、頭部および腰部の最大変位は周波数の上昇にともないほぼ直線的に減少している。すなわち、周波数が低いゆっくりとした揺れの中では、頭部および腰部が大きく変位しても直線を真っ直ぐ描くことができるが、揺れが早くなるにつれ

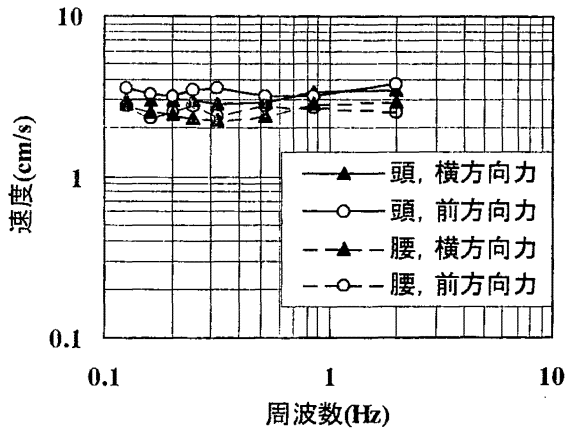


Fig. 19 Velocity of head and waist in one cycle wave. 単発波における頭部と腰部の速度

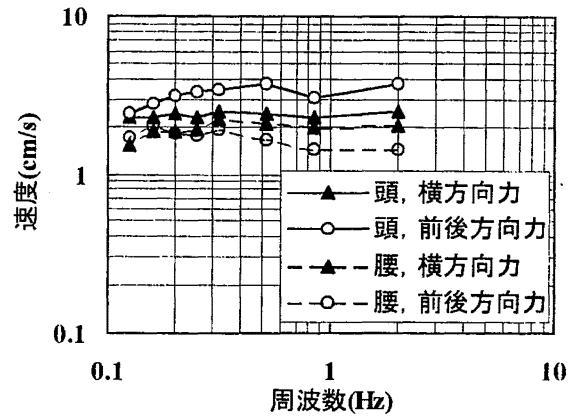


Fig. 20 Velocity of head and waist in continuous cycles. 連続波における頭部と腰部の速度

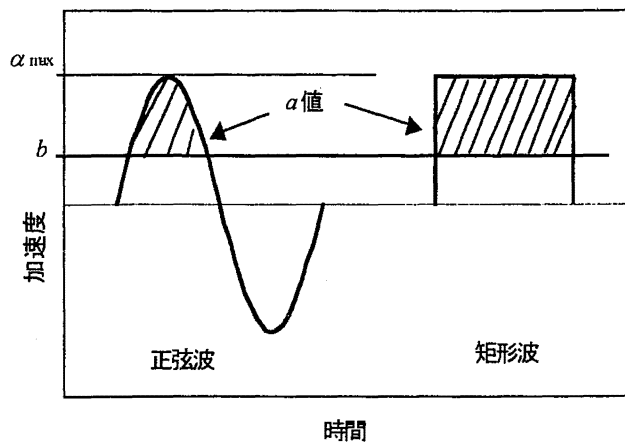


Fig. 21 The "a" value on the sine wave and the square wave. 正弦波と矩形波の a 値

て小さな変位でも直線を真っ直ぐ描くことができなくなる。

ここで、頭部および腰部の変位の測定結果より速度成分を算出すると、Fig. 19, 20 のようになる。Fig. 19 は単発波における頭部および腰部の最大速度を、Fig. 20 は連続波における各部の最大速度を示すが、それぞれ走行台の固定点を基準とした相対速度で表している。Fig. 19, 20 より、頭部および腰部の最大速度は、周波数によらずほぼ一定値になることがわかった。一方、Fig. 13 より単発波および連続波の限界加速度は 0.5 Hz を中心に V 字型の分布をしていた。これより、周波数と直線描き作業の限界は、加速度ではなく頭部および腰部の最大速度により一定値として表すことができると考えられる。

4.2 限界加速度と屈曲点

実験結果では、全ての場合において限界加速度は 0.5 Hz で屈曲していたが、これを、立位姿勢保持の限界より考察する。文献 8 では、「矩形波状の加速刺激を立位

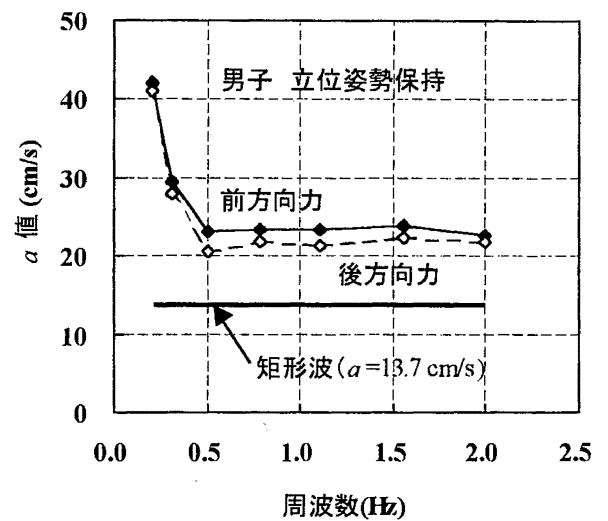


Fig. 22 Relationship between the "a" value and frequency. a 値と周波数の関係

姿勢に与えた場合に、加速時間の逆数と限界加速度の関係が一次の線形になる。」ことが示されている。同文献によると、限界加速度が $\alpha \text{ cm/s}^2$ 以上の時に立位姿勢バランスを崩して倒れるものとする、その時の加速時間 T 秒との間に次の一次式が成立している。ただし、一次式の傾きを a 、切片を b とする。

$$\alpha = \frac{a}{T} + b \quad (1)$$

また、式 (1) より、

$$(\alpha - b) \cdot T = a \quad (2)$$

式 (2) の左辺より、限界加速度 α の b 値以上の成分と加速時間 T の積が一定値 a となる。このことを言い換えると、左辺の積が a 値以上の時に立位バランスを崩すことになる。これを本実験結果に適用し、正の

加速度によって転倒するものと仮定すると、式 (2) は次のように書き直すことができる。

$$\int \left(\left[\alpha_{\max} \cdot \sin \left(\frac{2\pi t}{T} \right) - b \right] \geq 0 \right) dt = a \quad (3)$$

ここで、式 (3) の a 値とは、Fig. 21 に示す正弦波の斜線部分の面積を表す。矩形波の結果と比較するため、式 (3) に文献 8 で得られた $b = 60.6 \text{ cm/s}^2$ を代入し、男子の立位姿勢保持の結果について計算すると Fig. 22 のようになる。Fig. 22 より、周波数 0.5 Hz 以上の場合に a 値はほぼ一定値となるが、それ以下の場合にはこの一定値より大きく増加している。文献 11 によると、この増加量は立ち直り反射により人体が転倒することに耐えた効果分を表すものとされている。こ

のような反射的な姿勢の立ち直り効果は矩形波状の急な加速刺激では現れず、文献 8 でも a 値は 13.7 cm/s と一定値となっていた。しかし、本研究のような正弦波状の加速刺激では 0.5 Hz 以下でその立ち直りが時間的に間に合い、加速時間が長くなる（すなわち、周波数が低くなる）ほどその効果がより大きく現れ、 a 値の一定値からの増加量も大きくなったものと考えられる。

このようなことから、各限界加速度は 0.5 Hz 以下で立ち直り効果が現れ、この周波数を境に限界曲線が屈曲したものと考えられる。

5. 建設作業の限界と墜落に対する安全性の限界

以上より、立位姿勢保持と直線描きおよび溶接作業の限界加速度を周波数の関係として求めた。この結果

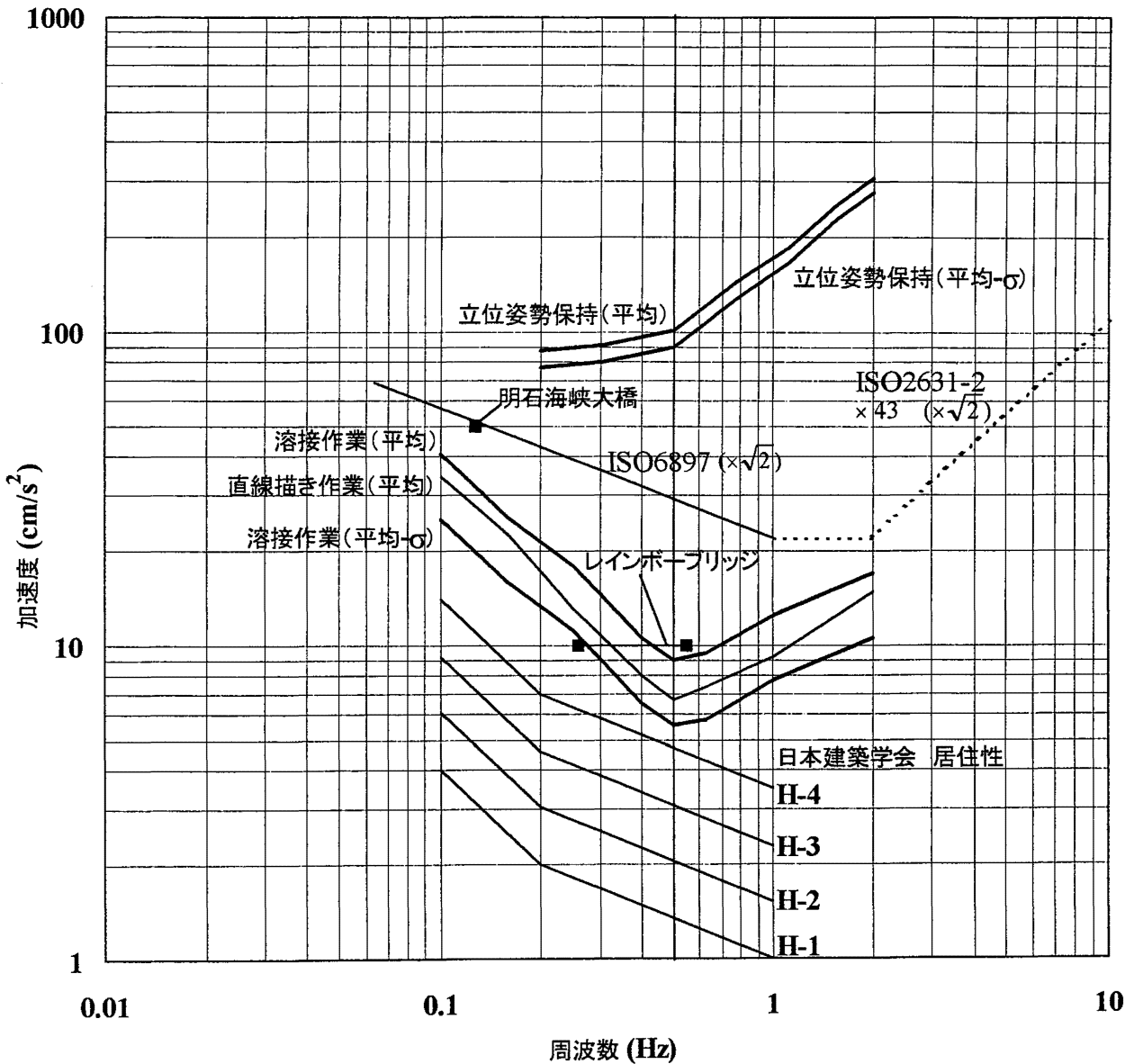


Fig. 23 Working limits and safety criteria regarding accidental falls for wind-induced vibration.
風による揺れに対する建設作業限界および墜落に対する安全性の限界

から、風による揺れに対する建設作業の限界と墜落に対する安全性の限界について検討する。Fig. 23 は、立位姿勢保持の限界と直線描き及び溶接作業の限界を男子についてまとめたものである。Fig. 23 では、限界加速度的低い側（より厳しい方）として、立位姿勢保持の限界では後ろ方向へ加速刺激を与えた場合の平均値を示す。一方、直線描き作業の限界加速度は単発波に比べ連続波の方がより低いレベルであることから連続波の結果についてのみ示す。連続波における直線描きと溶接作業の限界加速度は加速刺激の方向別にあまり差がないことから、横方向と前後方向の両者を合わせた場合の平均値を示す。

建築物の振動に関する居住性能評価指針¹²⁾によれば、居住性能の基準を振動知覚閾に対する実験結果に基づいて検討している。同指針では、1%（およそ、平均値－標準偏差 3σ ）の人のみ感じる最小知覚閾と平均知覚閾を基に、Fig. 23 に示すように H-1 から H-4 まで4つの曲線を描き、建築物の用途別に3段階にランク分けしている。本実験の場合には、溶接作業と直線描き作業はほぼ同じ傾向をしていると推定されるため、実際の溶接工による溶接作業のデータをそのまま使い、溶接作業を風による揺れに対する建設作業の限界、立位姿勢保持を墜落に対する安全性の限界と考え、平均値とともに平均値－標準偏差 σ を Fig. 23 に示す。

Fig. 23 より、墜落に対する安全性の限界は 0.5 Hz までは緩やかに上昇し、0.5 Hz を境にそれ以上の周波数では急激に上昇する。一方、建設作業の限界は全ての周波数で上記居住性能の基準を上回っているが、溶接作業（平均値－ σ ）の曲線を見ると、0.25 Hz 以下の周波数では 10 cm/s^2 を越えているものの、0.25 Hz 以上では 0.5 Hz を最低値（ 5.5 cm/s^2 ）として 2 Hz 付近まで 10 cm/s^2 以下となっている。

Fig. 23 に示した、ISO2631-2¹³⁾では、基本曲線の倍率を基に建物内の住人や事務所で働く人の振動耐限度を、周波数 1～80 Hz の範囲で示している。ISO6897 では、海洋構造物上で発生する水平方向の揺れに対し、熟練を要する作業を行うことが困難となる加速度を 0.063～1 Hz の範囲で示しているが、ビルを一般的な目的で使用する場合の振動耐限度の 6 倍の値としたものである。Fig. 23 に示した ISO2631-2 の基本曲線の 43 倍の曲線は、1 Hz で ISO6897 と連続性が保たれるようにした曲線であるが、ISO2631-2 では一日に何度か発生する一時的な振動に対し、住人が日中に耐え得る限界の加速度としている。作業場での限界加速度は、基本曲線の 90～128 倍とさらに高いレベルになっている。このような ISO6897 とそれに連続する ISO2631-2 の曲線と比べると、本研究で示した建設作業の限界は非常に

低い加速度レベルであることがわかった。

また、Fig. 23 には橋梁主塔架設時の制振レベル¹⁴⁾を示してあるが、明石海峡大橋の場合、文献 2 の調査より、本研究での建設作業の限界を遙かに越えているが問題なく作業が行われていた。これは、明石海峡大橋主塔は主塔の各ブロックをボルトで接合し溶接作業がほとんど行われなかったためであり、本研究での作業限界は溶接作業を行う場合に適用できる最低の限界と考える。しかし、今後は橋梁主塔の場合、景観等を考慮してボルト接合に比べ表面に接合部が現れない溶接接合が増えると予想される。このような状況になった場合は、溶接作業の限界を建設作業の限界としてもよいものとする。

一方、溶接接合が行われたレインボーブリッジでは、当初制振レベルが 20 cm/s^2 であったものの、作業に支障が出たため 10 cm/s^2 に制振レベルを上げて作業を行った²⁾。本実験結果より、この制振レベルは周波数によって溶接作業の平均値の曲線を若干超えているが、熟練した作業員で本研究の平均値を超える者のみ働く場合には、制振レベルを 10 cm/s^2 程度に設定してもよいと考えられる。しかし、より働きやすい現場を目指すのであれば、平均値－標準偏差 σ の曲線から、0.25～2.0 Hz 程度の揺れが発生すると予想されかつ溶接作業を行う場合には、制振レベルを 10 cm/s^2 より厳しくして、 5 cm/s^2 程度にすることが望ましい。

6. まとめ

本研究では、風による揺れに対する建設作業の限界と墜落に対する安全性の限界について実験的に検討した。このため、正弦波加速刺激下での、立位姿勢保持と直線描き作業および溶接作業の限界を調べるための実験を行った。その結果以下のことがわかった。

- (1) 立位姿勢保持の限界加速度は 0.5～2.0 Hz の範囲では周波数の増加に伴い上昇する傾向が見られる。しかし、0.5 Hz 以下の場合には直線の傾きが小さくなり、限界加速度は 100 cm/s^2 以下の一定値に近づいていった。
- (2) 直線描き作業と溶接作業の限界加速度と周波数の関係を両対数軸上に表示すると、0.5 Hz を中心に V 字型の傾向をしていた。これは、海洋構造物上での作業限界を示した国際規格 ISO6897 とは異なる傾向であった。
- (3) 直線描き作業の限界時における頭部および腰部の変位を測定した結果、両対数軸上では周波数の増加に伴い変位が直線的に減少することがわかった。これを速度成分で表すと周波数によらずほぼ一定値となった。これにより、周波数と直線描き作業の

限界は、加速度ではなく頭部および腰部の速度で一定値として表すことができる。

- (4) 各限界加速度が0.5 Hzで屈曲していることについて、立位姿勢保持の限界加速度を矩形波の実験結果と比較した。その結果、本研究で行った正弦波の場合は矩形波に比べ加速刺激が緩やかなため、0.5 Hz以下で姿勢の立ち直り効果が見られた。よって、この立ち直り効果により0.5 Hzを境に各限界加速度がV時型に変化したものと考えられる。
- (5) 本研究の結果より、溶接作業の限界を風による揺れに対する建設作業の限界、立位姿勢保持の限界を墜落に対する安全性の限界と考え、周波数との関係として両対数軸上に示した。その結果、ボルト接合の明石海峡大橋では、本研究での建設作業の限界を遥かに越えているが問題なく作業が行われていた。しかし、今後は橋梁主塔の場合、景観等を考慮してボルト接合に比べ表面に接合部が現れない溶接接合が増えると予想されることから、溶接作業の限界を建設作業の限界としてもよいものとする。
- (6) 熟練した作業員で、溶接作業の限界が本研究の平均値を超える者のみ働く場合には、制振レベルを10 cm/s²程度に設定してもよいと考えられる。しかし、より働きやすい現場を目指すのであれば、平均値-標準偏差σの曲線から、0.25~2.0 Hz程度の揺れが発生すると予想されかつ溶接作業を行う場合には、制振レベルを10 cm/s²より厳しくして、5 cm/s²程度にすることが望ましい。

参考文献

- 1) 労働省安全衛生部, 安衛法便覧 — 平成11年度版, 労働基準調査会 (1999).
- 2) 大幡勝利, 庄司学, 藤野陽三, 天候が塔状構造物の施工および作業性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 534/VI-30, pp. 125~134 (1996).
- 3) ISO6897, Guidelines for the evaluation of the response of occupants of fixed structures, especially buildings and off-shore structures, to low-frequency horizontal motion (0.063 to 1 Hz) (1984).
- 4) 神田順, 田村幸雄他, 超高層住宅の長周期振動に対する振動感覚の調査研究 (その2), 住宅総合研究財団 (1992).
- 5) 野口憲一, 浮遊式海洋建築物の動揺評価に関する実験研究, 大成建設技術研究所報, 第26号, pp. 317~324 (1993).
- 6) 永田久雄, 大野央人, 加速刺激に対する立位姿勢の安定性に関する研究 その1~4, 日本人間工学会第34~36回大会講演集 (1993~1995).
- 7) 永田久雄, 急加速刺激を加えた場合の立位姿勢の安定性評価装置の開発, 人間工学, Vol. 27, No. 4, pp. 221~223 (1991).
- 8) 永田久雄, 大野央人, 小美濃幸司, 水平加速外力に対する靴ヒール高別の立位姿勢の保持限界に関する研究, 人間工学, Vol. 32, No. 1, pp. 1~9 (1996).
- 9) 永田久雄, 大幡勝利, リニア・アクセラレータを用いた長周期・大振幅の揺れに関する基礎的な研究, 日本人間工学会第37回大会講演集 (1996).
- 10) Katsutoshi Ohdo, Hisao Nagata, Limits of Construction Work under Low-frequency Horizontal Motions, IABSE Symposium, Vol. 79, pp. 529~530 (1998).
- 11) 永田久雄, 糟谷清基, 斎藤忠一, 動く歩道・エスカレーターの非常停止方法に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, Vol. 499 (1997).
- 12) 建築物の振動に関する居住性能評価指針・解説, 日本建築学会 (1991).
- 13) ISO2631-2, Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz) (1989).
- 14) B. F. Spencer, Jr., Michael K. Sain, Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback, IEEE Control Systems Magazine: Special Issue on Emerging Technologies (Tariq Samad Guest Ed.), Vol. 17, No. 6, pp. 19~35 (1997).

(平成12年11月17日受理)