

ダイナミック・ balancer に関する基礎的研究 (その5)

——レシプロ型コンプレッサ機械基礎の防振実験報告——

渡辺清治 寺村 彰

Basic Studies on Dynamic Balancer (Part 5)

——Experiments on Dynamic Balanced Methods for Compressor Machinery Foundation——

Seiji Watanabe Akira Teramura

Abstract

This paper describes response reduction tests for occupant discomfort by the Dynamic Balanced Method (D.B.M.) applied to a reinforced concrete machinery foundation, which has two vibrational modes under dynamic forces with two frequencies (12.5 Hz, 25.0 Hz) excited by a large-scale reciprocal-type compressor in operation. This D.B.M. is made from two different counter-balancers and an H-shaped steel beams as a common spring material concerning a two mass-one spring-vibrational system in order to reduce its size for setting in the confined space of a machinery room. As a result, the machine foundation and ground vibrations were reduced as expected and it was clarified that the scaled-down D.B.M. could be made practical for similar types of compressor machinery foundations.

概要

機械振動に起因する振動問題の対策法として開発してきたダイナミック・ balancer 防振法 (D.B. 防振法) に関して、本報告は、12.5 Hz と 25.0 Hz の 2 種類の強制振動を生じるレシプロ式大型コンプレッサ機械基礎に適用し、その防振効果を振動公害の観点から機械基礎および地盤の振動測定で調べた。この防振装置は、2 種類の振動形の防振と装置の小型化を計るために重量の異なる二つの鉄板製 balancer を 1 種類の H 形鋼ばね材に取り付ける方針で開発した。この結果、期待通りの D.B. 装置が製作され、また、予想通りの防振効果が得られた。今後、使用例の比較的多いこの種の大型コンプレッサ機械基礎に対してこの D.B. 防振法が実用化できることが明らかになった。

1. 序

住宅あるいは建物の振動問題は、私たちの生活と密接に結びついた問題である。最近では、大きな振動だけでなく、ほとんど感じない程度の微振動までが問題になることが多く、その方面での防振技術の開発が急がれている。新しく開発されたダイナミック・ balancer 防振法 (以下 D.B. 防振法と呼ぶ) は、前報^{1)~4)}までに述べたように、鉄板あるいはコンクリートなどを利用するおもりと、普通鋼材の鉄板、H 形鋼などを利用するバネとから構成される簡単な装置を、機械基礎とか建物に取り付けるだけで、この装置が一見、振動エネルギーを吸収するかのような、制振効果を発揮する新しい防振法であり、

機械基礎、工場建物の他、設備機械やダクト振動による RC 床板の振動防止対策などに適用する具体的方法を研究してきた。

本報告は、大型コンプレッサ機械基礎の 2 種類のロッキング振動に対して D.B. 防振法の装置を小型化して適用した実験工事について述べる。この機械基礎は、操業開始以来多年にわたって隣接する 3 階建 RC 建物および近隣住宅へ微振動が伝わりその対策が望まれていたものの、適切な防振方法が見い出されずにそのまま使用されてきたものである。

2. 機械・基礎・地盤などの概要

2.1. 機械・基礎

機械は、レシプロ式大型コンプレッサーでありその仕様を表一に示す。これを支えるRC基礎の形状は、図一に示し、重量、寸法および固有振動数などは、表二に示す。なお、固有振動数などは、基礎上面端部でジャンプして得たロッキング自由振動波形から求めた値である。また、基礎は建設に当り防振用にあらず厚さ15cmの砂を敷き、割栗石を敷きつめて、捨てコンクリート、基礎用コンクリートを打設し、側面には幅10cmの砂を敷きつめている。

2.2. 地盤

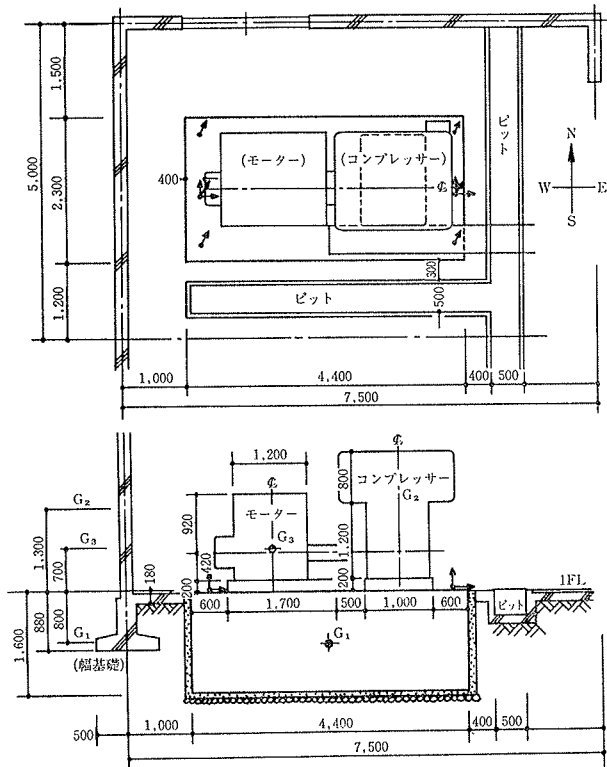
地盤の地層構造は、図一の⊗印で実施した調査結果を図一に示す。この付近は傾斜地であり、近くのボーリング試験結果と比べると、ローム層が薄く礫層が浅くなっているように思われる。そのため、基礎底は含水量

名称	電力(kW)	回転数(r.p.m)	重量(t)
コンプレッサー	205	725 (12.1Hz)	4.2
モーター	240	740 (12.3Hz)	2.6

表一 コンプレッサーの仕様

寸法 m. 4.4×2.3×1.6 (深さ)			重量(t) 41.0	
固有振動数	長辺	18.0 Hz	短辺	約3.0 Hz
減衰定数	長辺	0.044	短辺	0.030

表二 RC造基礎の仕様



図一 機械の基礎の概要

の多い細砂に位置していると推察される。地盤の動特性は、地表面とGL-2.7mとで、静かな時期（コンプレッサー停止後数日以上経過している）に地中地震計（サーボ型加速度計）で常時微動測定を行ない、FFT周波数解析を行なった結果、図一に示す様に、地盤の卓越振動数は15Hz~27Hzにある。また、地表面とGL-2.7mとの結果を重ね書きしているとうり、GL0.0m~-2.7mの表層の増幅現象がこれらの振動数範囲でみられる。これはS波伝播速度 $V_s=200\sim 250$ m/s、起伏が多いことから層厚 $H \cdot 2.5\sim 3.5$ m とすれば表層の固有振動数は $f=V_s/4H=14\sim 25$ Hz となりほぼ対応する。

2.3. 周辺環境

コンプレッサー基礎の位置とその近傍の状況は図二に示した。図二で基礎は、地上3階地下1階RC造建物の西側端部の1階建RC造建物内にあり、北および西側が6~7m離れて高さ3~4mの擁壁でさえぎられていて、南側道路方向に開放されている。

問題となる微振動は、隣接する3階建建物の一部のRC床版と窓周辺部、道路南側の2階建木造住宅（固有振動数測定値約3.0~4.0Hz）に生じていた。

3. 対策前の振動調査結果

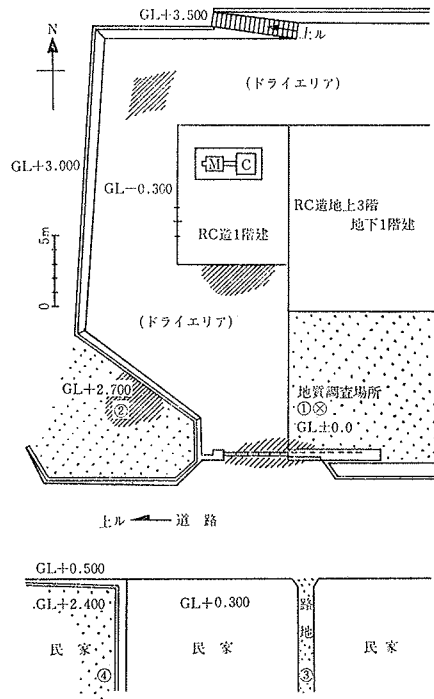
3.1. 基礎

基礎の振動測定は、(図一)に矢印で表わす基礎の四隅などに測点を配置し、動コイル型変位計で行なった。この測定振幅は対策後の振幅と比較して後で述べる。ここではD.B.防振法の

土質調査結果

標尺 m	土質名	観察	N値
1	盛土		3 4 7777
	ローム	ローム 粘土少量混入	
2	細砂	含水多量 粘土少量混入 細砂	
	礫混り細砂	10mm位 礫混入	
3			30以上

図一 地質調査結果



図二 配置図

D. B. 形状計画に必要な基礎の振動性状について述べることにする。

まず測定波形の上下、水平両波形を合成して振動軌跡を描き図-5に示す。測定波形を振動数分析すると、主に、12.5 Hzと25.0 Hzである。次に、この2種類の振動波形の分離を行ない。再度、上下・水平(主に長辺方向)両波形を合成して振動方向等を調べた。以上の結果(イ)12.5 Hzの振動は上下・水平波形の位相が対応し、図-5に示す Z_1 を回転中心とするロッキング動であり、モーター側の振幅が大きい。(ロ)25.0 Hzのそれは同様に図-5に示す Z_2 を回転中心とするロッキング動でありコンプレッサー側の上下振幅が大きい、(ハ)短辺水平動は、長辺水平動に比べて小さく、コンプレッサー側の振幅が大きいことから若干振れていることなどが分かった。これは、モーター側は表-1機械の仕様に示された回転数の影響を受け、コンプレッサー側はレシプロタイプのコンプレッサーが12.5 Hzとその2倍の25.0 Hzで運動することから25.0 Hzの影響をより強く受けているものと思われる。

3.2. 地盤

地盤振動の測定は、図-2に示すドライエリアおよび南側地盤測点①~④などで動コイル型変位計で行なった。この測点①~④の測定結果は、対策後の振幅と比較して後で述べる。また、距離減衰を調べるために、ドライエリア(薄い捨てコン造)、地表面などで測定した結果、次の様な特徴が明らかになった。(イ)距離減衰が少ない。(ロ)場所によっては距離減衰曲線に全く適合しない振動の大きいところが図-2に斜線で示すようにある。これらは表層地盤の卓越振動数範囲が強制振動数に一致しているため、また、さらに詳細に調べた結果、12.5 Hzの振動は基礎からの距離(X_1)がおおよそ20 m間隔で大きくなり、25.0 Hzのそれは、おおよそ10 m間隔で大きくなる傾向が観察された。このことは東側が建物、北および西側はよう壁地下構造にさえぎられていることによる波動の干渉に因るものではないかと推察された。すなわち基礎で放射された波動(A_1)とよう壁等地下構造体で反射されてくる波動(A_2)との干渉波動(A_3)は、

$$A_3 = A_1 + A_2$$

$$= A \cos 2\pi f(t - x_1/v) + A \cos 2\pi f(t - x_2/v)$$

ここで、 X_1 は基礎からの距離、 X_2 は反射波の伝達距離であり、 $V \approx 250$ m/sec、 $f = 12.5$ Hzおよび $f = 25.0$ Hzとすると、干渉波の波長がそれぞれ20 mおよび10 mになる。

4. 防振方法

4.1. 防振方法

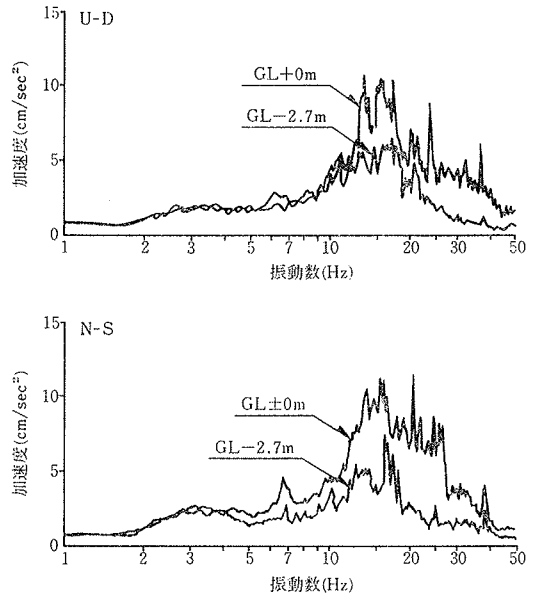


図-4 地盤の常時微動振動数解析結果

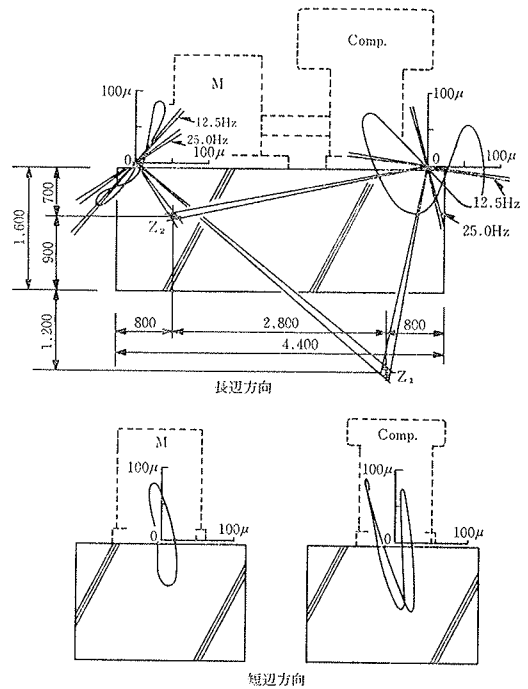


図-5 基礎の振動性状

防振方法に関しては、基礎の改造、地中振動遮断壁の構築などが提案されたが、防振効果、運転の継続、地中振動の複雑さなどを考慮して、D.B.防振法で発振源の基礎の振動を制振することに方針付けられた。しかし、基礎の各種の振動に対してD.B.取付け空間が狭いという問題点が残った。

4.2. ダイナミック・バランス防振法

防振の対象振動は、検討の結果、振動の大きな(イ)モーター側の12.5 Hzの上下動、(ロ)コンプレッサー側の25.0 Hzの上下動、(ハ)長辺水平動の3種類に定められた。そ

して短辺方向の振動はほぼ現状のまま残るだろうという予想から、この振幅以下を目標とした。D.B. 重量はこの目標値に対して D.B. と剛体基礎との2質点系ロッキング振動方程式の解より求めた。

以上の方針に沿って計画された D.B. 防振装置の形状は基礎に取り付けられた状態で図-6 に示す。同図にて、D.B. のばね材料は基礎長辺の両側面に設けられた H 形鋼 (H-200×200) であり、バランサー (おもり) 材料は基礎短辺に平行して2本の H 形鋼の両先端部に載荷されている $W=1.6t$ (12.5 Hz 防振用) と $W=0.53t$ (25.0 Hz 防振用) の鉄板である。この H 形鋼は構造上3点支持にされることによって、両者の共通のばね材料となり、狭い空間に2種類の D.B. 装置を形成することが出来た。そしてこれらの D.B. は、前記(イ)(ロ)の上下動の防振装置であるが、さらに基礎と連成することによって図-5 に示したロッキング中心 (Z_1, Z_2) が H 形鋼高さまで上昇してくることにより、長辺水平動の振幅も小さくなることが試算の結果から予想されていた。

H 形鋼の支持点は、振動力のやりとりをする重要な場所であるために基礎の側面を削り、 \square チャンネル、長軸ボルトなどで側面全周を締め付けて、鉄筋補強後コンクリートを打設した幅 400 mm 高さ 500 mm の架台上に設けている。

この D.B. の振動数調整方法は、鉄板製バランサーをオイルジャッキなどで H 形鋼上面で移動する方式である。

5. 対策後の確認測定結果

5.1. 基礎

D.B. の防振装置調整後に基礎の振動の確認測定を実施し、その結果は、対策前の振幅と比較して表-3 に示す。防振効果は、同表で対策前、後の振幅の比をとり低減比として示す通り、上下動が $1/5 \sim 1/6$ 、長辺水平動が $1/7 \sim 1/30$ が確認された。なお、短辺水平動は防振対象外であるが、参考までに示している。これらの対策後の振動軌跡は図-7 に示す。

5.2. 地盤

地盤振動の確認測定結果は、図-2 に示す測定①~④に関して代表し、対策前の振幅と比較して表-4 に示す。防振効果は、12.5 Hz に関して上下、EW、NS 共に平均約 $1/4$ の減少率であり、25.0 Hz に関しても同様に平均約 $1/2 \sim 1/3$ の低減比である。

ここで、基礎と地盤との両者の防振効果に相異がみられることについて若干考察すると次の通りである。

まず、対策前の振動量は、長辺方向のロッキング振動が大きく約 60μ であった。対策後はこの振動が防振された結果、短辺方向の約 15μ の振動が取り残されて最大振

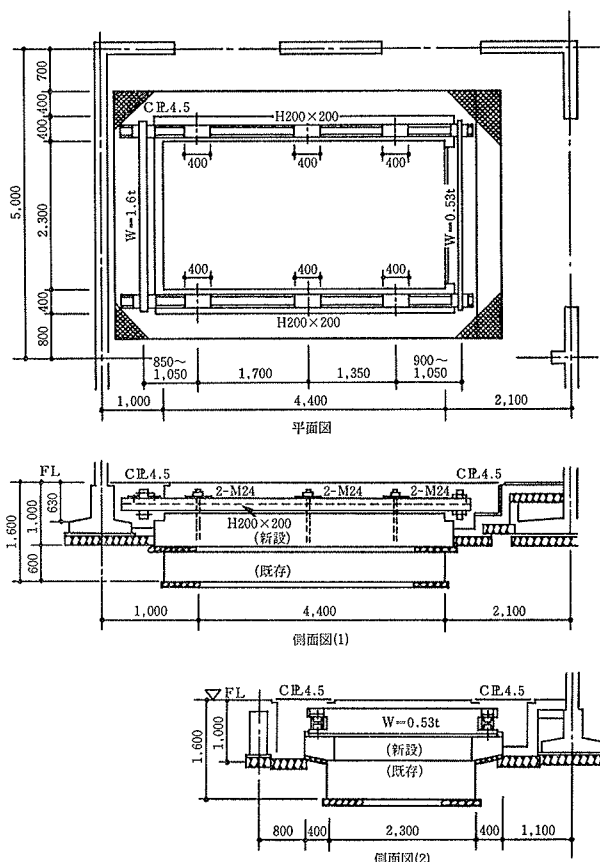


図-6 D.B. 装置の取り付け状況

幅になっている。この比をとれば約 $1/4$ になり上記にほぼ対応する。次に、地中振動測定を図-2 で実施し、この結果は上下動と NS 水平動とを図-8 に示す。同図で、円内のベクトル方向は地表面を基準にした位相遅れを表わす。この結果対策前は上下動の振幅がはるかに大きかったのに対し、対策後は、基礎の短辺方向に相当する NS 水平動の方が大きくなっており上記に対応する。

以上の結果から明らかなように、基礎の短辺方向の振動量が、地盤の防振効果を制限している傾向にある。なお、図-8 の地中振動

測定は加速度で表示している結果 25 Hz の振動量の方が大きくなり、注目される。今回バランサーの調整に当って両振動数成分の変位量を等しく防振する方針で実施された結果であるが、本来、地盤振動に対しては振動速度あるいは加速度で防

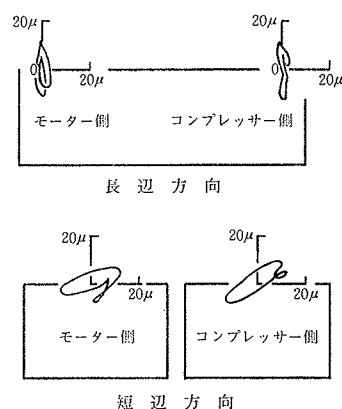


図-7 対策後の振動軌跡

振目標値を定めた方がよいと考える。このためのバランスの再調整は、バランス両者の位置関係等を若干変える方法で容易にできることが確認されているため、将来、機会をみて実施し、その効果を確認したいと思っている。また、図一8の地中振動測定結果から、(イ)GL-2m以内ではベクトル方向がほぼ一致しているのに対し、GL-2.7m(礫層)で位相遅れが大きいことから、地中振動は主に表層で生じている。(ロ)GL-2mの基礎底位置に近い振動量が若干大きい。ことなどの地中振動性状が確認された。

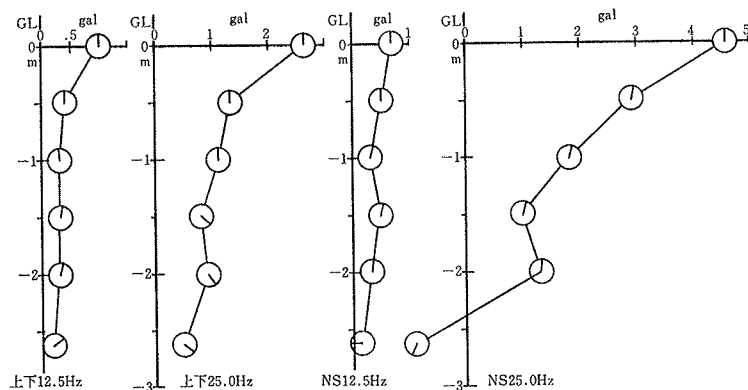
		フーリエ振幅				オールパス振幅		
		振動数 Hz	対策前 μ	対策後 μ	低減比	対策前 μ	対策後 μ	低減比
		モーター側	上下動	12.5	32.5	6.2	1/5.2	60.0
25.0	10.0			2.0	1/5.0			
水平長辺	12.5		27.0	0.9	1/30.0			
	25.0		16.5	2.2	1/7.5			
コンプレッサー側	上下動	12.5	27.0	9.0	(1/3.0)	18.2	13.5	(1/1.4)
		25.0	9.1	8.0	(1/1.1)			
	水平長辺	12.5	6.5	1.5	1/4.3			
		25.0	44.8	7.1	1/6.0			
コンプレッサー側	上下動	12.5	37.2	1.2	1/31.0	61.5	4.5	1/14.0
		25.0	14.4	2.1	1/6.8			
	水平長辺	12.5	54.0	12.0	(1/4.5)			
		25.0	34.0	6.4	(1/5.3)			

()内は、防振対象外であるが参考までに示す。

表一三 対策前・後の基礎振動の測定結果

測点・方向	12.5Hz			25.0Hz		
	対策前 μ	対策後 μ	減少比	対策前 μ	対策後 μ	減少比
	① 上下	1.8	0.57	1/3.2	2.4	0.85
EW	0.7	1.77	—	0.5	0.14	1/3.6
NS	0.9	0.45	1/2.0	0.9	0.55	1/1.6
② 上下	2.3	0.81	1/2.8	13.0	5.10	1/2.5
EW	4.9	0.90	1/5.5	6.6	8.30	—
NS	5.5	0.90	1/6.0	7.3	4.70	1/1.6
③ 上下	3.2	1.13	1/2.8	0.7	0.26	1/2.7
EW	0.7	0.20	1/3.5	0.2	0.17	1/1.2
NS	0.9	0.69	1/1.3	0.2	0.48	—
④ 上下	1.6	0.34	1/4.7	1.0	0.57	1/1.8
EW	2.8	1.00	1/2.8	0.6	0.37	1/1.5
NS	3.0	0.55	1/5.5	1.5	0.31	1/4.9

表一四 対策前・後の地盤振動の測定結果



図一八 地中振動測定結果(対策後)

6. 結び

二つの振動を同時に防振するダイナミック・バランス防振装置の組み立て方を開発し、レシプロ式大型コンプレッサーの発生する2種類の強制外力振動で複雑な振動性状を現わしていた機械基礎の防振対策に適用してみた。

この結果、ほぼ予想通りの約1/6以下の防振効果が得られ、このD.B.形式が十分実用的であることが分かった。

一方、地盤振動はこの防振法を適用した結果、3階建物の微振動が小さくなり、民家側地盤(図一2, 測点③④)が12.5 Hzで約1 μ 以下、25.0 Hzで約0.5 μ 以下に小さくなって苦情は解消した。しかし、防振技術的に考察すれば、基礎短辺方向の未対策の振動が初期に予想された通りかなり残存し、地盤振動の防振効果をさまたげているなどが確認された。そして、新設基礎であれば設計時に各種の方法で対処できるが、既設基礎ですべての振動を防振する目標をたてる場合、他の方法も含めて十分配慮することが望ましいが、D.B.防振法に関してはさらに多様な振動に適用できる方法の開発課題が与えられた。

謝辞

本実験に当り、技術研究所中川恭次本部長付、斎藤二郎次長の御指導を受け、工事に当っては、東京サービスセンター 菅谷勝夫所長、磯田清課長、伊木正芳職員、また測定およびデータ整理に際して日本検査コンサルタント 関西村佳春、伊波弘彰氏の御協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺, 島口, 寺村: ダイナミック・ダンパーに関する基礎的研究, 大林組技術研究所報, No. 10, (1975), pp. 30~34
- 2) 渡辺, 島口, 寺村: 同題(その2), 大林組技術研究所報, No. 12, (1976), pp. 57~62
- 3) 渡辺, 島口, 寺村: ダイナミック・バランスに関する基礎的研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 14, (1977), pp. 34~38
- 4) 渡辺, 寺村: 同題(その4), 大林組技術研究所報, No. 25, (1982), pp. 41~46