

鉄筋コンクリート構造物発破解体時の振動，騒音に関する検討

小林茂雄*，世一英俊**，橋爪 清***，中川浩二****

構造物の解体に発破工法を用いる場合，発破によって生じる衝撃的な騒音，地盤振動や飛石が大きな問題となることが予想される。

本報告では鉄筋コンクリート壁付きラーメン構造3階建て構造物を，実際に発破を用いて一挙倒壊させた際の振動と騒音の予測と実測結果について論じた。

予測では最大値は段発破1段あたりの最大薬量に依存すると考えて，振動速度については式(1)，振動レベルについては式(2)，騒音レベルについては式(5)を使用した。

$$V = K_1 \times R^m \times L^n \dots\dots\dots (1)$$

$$VL = 20 \log V + 91 \dots\dots\dots (2)$$

$$L_a = 20 \log K_2 + 20a \log R + 20b \log L - 20 \log P_0 \dots\dots\dots (5)$$

ここでV：振動速度 (kine)，VL：振動レベル (dB)， L_a ：騒音レベル (dB(A))，R：距離 (m)，L：段あたりの薬量 (kg)， P_0 ：基準音圧 (2×10^{-5} Pa)， K_1 ， K_2 ，m，n，a，b：定数である。

実測に結果，式(1)と式(5)はほぼ予測値に近い値が得られたこと，式(2)はかなり安全側の値を与えることが判明した。さらに時間波形と周波数分析を通じて段発間隔の影響についても言及した。

1. 緒 言

周知のように鉄筋コンクリート構造物（以下RC構造物と呼ぶ）を発破解体する際には，飛石，発破による地盤振動，構造物が倒壊して地面に衝突することによる地盤振動，粉塵の拡散，騒音や衝撃波などが発生し，周辺環境に損傷を与える可能性がある。これらに

対しては発破計画に応じて適当な方法で現象を予測し，予測値が管理値より上回る項目については適宜軽減対策や防護措置を講じ，その効果を再度予測して全ての管理項目について管理値以下として，周辺住民の理解を充分に得ておく必要がある。

また，平成2年に策定された「コンクリート構造物発破解体工事保安技術方針」¹⁾によると，振動について速度振幅最大値2kine，振動レベル89dB，騒音について騒音レベル120dBを管理目標値とすることが提案されているが，この妥当性を裏付けるには，更なる実績の積み重ねが必要であることは言うまでもない。本報告では特に振動と騒音について実際の発破解体工事における予測と実測結果を述べる。

2. 振動，騒音の予測式

2.1 地盤振動の予測式

構造物の発破解体によって発生する地盤振動には発破そのものに起因した振動（以下発破振動と呼ぶ）と，構造物が倒壊して地面に衝突することによって生じる振動（以下倒壊振動と呼ぶ）の2種類があり，これら個々について予測する必要がある。

1993年10月1日受理

*新日本製鉄㈱ 設備技術センター

〒229-11 富津市新富20-1

TEL 0439-80-2553

FAX 0439-80-2760

**㈱ハザマ 技術研究所

〒305 つくば市期間字西向515-1

TEL 0298-58-8811

FAX 0298-58-8819

***日本化薬㈱ 化工品事業部

〒100 東京都千代田区丸の内1-2-1

TEL 03-3212-4365

FAX 03-3285-0374

****山口大学工学部 社会建設工学科

〒755 宇部市常盤台

TEL 0836-31-5100

FAX 0836-33-4404

発破振動の予測値は、その最大値が段発発破1段あたりの最大薬量に依存すると考えて、一般に式(1)により求められる¹⁾。

$$V = K_1 \times R^n \times L^m \dots\dots\dots (1)$$

ここでV:振動速度 (kine), K_1 , m , n :定数, R:距離 (m), L:段あたりの薬量 (kg)である。定数 m , n については多くの研究があり、発破の方法、地盤の種類により種々の値をとるが、概ね m は0.5~1, n は-1~-2程度の値が用いられている。 K_1 の値は、 m , n に応じて設定されることになる。

式(1)で得られたVを振動レベルVL (dB)に変換する方法としては、発生振動が振動数8Hz以上の連続正弦波振動になると仮定して式(2)を用いる。

$$VL = 20 \log V + 91 + a \dots\dots\dots (2)$$

ここでは a は振動継続時間に依存する補正值である。倒壊振動の予測式としては研究事例や実績が少なく、重錘落下や杭打ち振動の予測式などを転用することが考えられるが、Perkinらは、発破解体によって構造物を倒壊させた場合の倒壊振動速度のrms値R (cm/s)の予測式とし式(3)を用いている²⁾。

$$R = (d/kE)^n \dots\dots\dots (3)$$

ここでd:距離 (m), k:地面の局部塑性破壊を考慮したカップリング係数, E:構造物の重量 (kg) × 落下高さ (m) × 重力速度 (9.81 m/s²), n:経験的な定数で一般に-0.5である。

式(3)は既往の試験結果や当該地盤での実験によりkを求めて使用することになる。ただし全火協・高島での実験結果によると、倒壊において最上部躯体の落下時間は自由落下時間の1.45~1.87倍であったと報告されており³⁾、落下加速度が見かけ小さく (< 9.81), (3)はかなり安全側の予測値を与えることが

予想される。したがって特に比較的小規模の構造物では、この振動が問題になることは少ないと考えられる。

2.2 騒音の予測式

ピーク過圧は地盤振動と同様、段発発破1段あたりの最大薬量に依存すると考えられ、基本的に式(4)で予測される。

$$P = K_2 \times R^a \times L^b \dots\dots\dots (4)$$

ここでP:ピーク過圧の予測値 (Pa), K_2 , a , b :定数, R:距離 (m), L:段あたりの薬量 (kg)である。

式(4)で得られたピーク過圧の予測値を元に騒音レベルを予測することになるが、Pを騒音レベルに変換する簡易手法は筆者らの知る範囲ではまだない。そこで式(4)をdBの定義式に代入して得られる式(5)を元に、既往の測定結果、試験発破時の測定結果を使って K_2 , a , b の3つの定数を求めることとした。

$$L_0 = 20 \log (P/P_0) \\ = 20 \log K_2 + 20a \log R + 20b \log L - 20 \log P_0 \dots\dots (5)$$

ここで L_0 :騒音レベル (dB(A)), P_0 :基準音圧 (2 × 10⁻⁵ Pa)である。

3. 発破解体工事の概要と計測計画

3.1 工事の概要

今回解体対象としたのは、製鉄所内に残存した実験設備構造物である。周辺状況としては製鉄所構内ということもあり、厳しい条件は課せられていないが、最も近い工場建家までが外壁から17m, JR鹿児島本線までが建物中心点から140m, 幹線地方道が170m, さらに遊園地が230m離れたところに存在する (Fig. 1)。特にJR線路上では、振動加速度20gal以内という条件が課せられた。構造物と発破工事の概要をTable 1に示す。

3.2 計測計画

距離減衰を明らかにすることを意図し、Fig. 1に

Table 1 Outline of the building and the work for the experiment

| | | |
|-------------------------|------------------------------|---------------------------|
| Outline of the building | Structure | Reinforced concrete |
| | Type | Rigid-frame with wall |
| | Height | 13m (3 floors) |
| | Floor space | 17.46m × 15m |
| | Weight | approx. 1,100 ton |
| Outline of the work | Quantity of crushed concrete | approx. 450m ³ |
| | Quantity of explosives | approx. 42kg |
| | Number of detonators | 440 |
| | Total length of drill holes | approx. 150m |

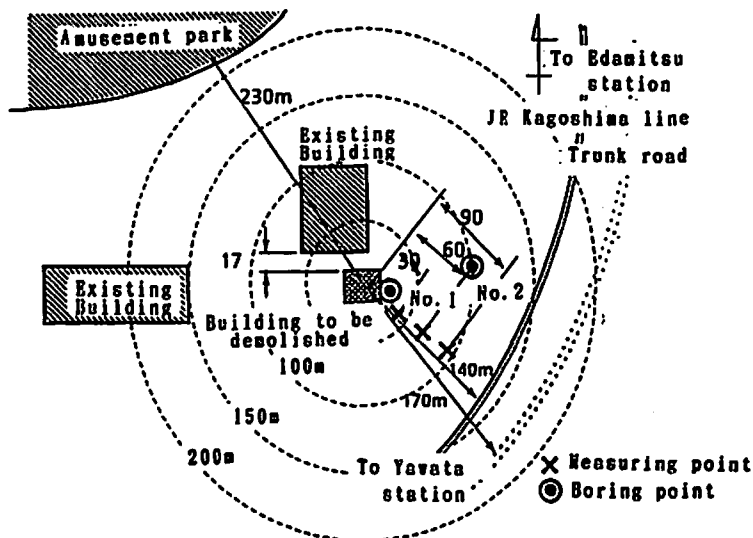


Fig. 1 Plan of demolition site

Table 2 Measuring Instruments

| Name | Type | Maker | Main specification |
|---------------------------------|---------|----------|--|
| Low-frequency sound level meter | NA-17 | Rion | measuring range:40-150dB frequency range:1-1000Hz |
| Sound level meter | NA-20 | Rion | measuring range:40-130dB frequency range:10-20000Hz |
| Geophone | GS-11D | Geospace | frequency range:4.5-500Hz |
| Vibration sensor | ASQ-2BL | Kyowa | measuring range:0-2G frequency range:0-370Hz |

示す3点で測定した。

地盤振動については所定の位置にて計測器を石膏で地盤と一体化するとともに空気衝撃波が直接あたらないように段ボール箱等で覆いをした。測定モードは周波数の範囲が10Hz以下から100Hz以上まで含むため、基本的に振動速度を測定することとした。測定方向はr(波動伝播方向), θ (波動伝播方向と直角方向), z(鉛直方向)の3方向とした。

騒音レベルについては周波数の範囲が10Hz以下の低周波音から1kHz以上の広い周波数帯域を対象とするため、普通騒音と低周波音の両方を測定した。

使用した計測機器の一覧をTable 2に示す。

3.3 地盤条件

地盤条件は振動の発生、伝播に影響する。土質柱状図をFig. 2に示す。No. 1地点表層部の地層構成は、地表から10.3mまでが埋土層であり、以下25mまでが砂質ロームとなっている。埋土層はN値5~15程度の

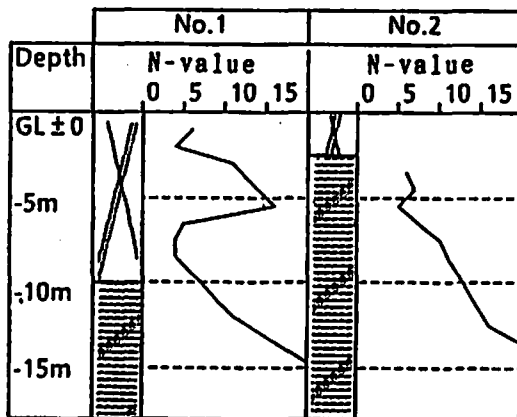


Fig. 2 Boring log

(reclaimed soil, sandy or silty loam)

比較的軟弱なものであるが、砂質ローム層は固い。これに対しNo. 2では埋土層の厚さがわずか2.6mしか

Table 3 Prediction of ground vibration and A-weighted sound level

| m | 30 | 60 | 90 | 130 | 200 | Security criteria |
|-------|------|------|------|------|------|-------------------|
| kine | 0.53 | 0.13 | 0.06 | 0.03 | 0.01 | 2 ¹⁾ |
| dB | 85 | 73 | 66 | 60 | 53 | 89 ¹⁾ |
| dB(A) | 123 | 117 | 113 | 110 | 106 | 120 ¹⁾ |

なく、この付近の地盤はかなり不均一性が高いと思われる。

当該地盤の弾性波伝播性状をあらかじめ確認しておくため、発破に先だってバックホーによる打撃試験を行った。波形から読みとった振動の伝播速度は340 m/sと音速と同程度であり埋土層としてはかなり速く、堅い粘土かN値50以上の砂地盤程度であった。

一般に地盤の卓越周波数Fは式(6)により求められる。

$$F = V / (4 \cdot H) \dots\dots\dots (6)$$

ここでV:弾性波伝播速度(m/s), H:層厚(m)である。

本地層構成から推定される地盤の卓越周波数を埋土層厚を元に計算すると、No.1地点では340/4/10.3=8.3Hz, No.2地点では340/4/2=42.5Hzとなる。実測波形の周波数分析結果にはいくつかピークが見られるが、本地盤の卓越周波数はz方向で10から20Hzおよび40Hz付近に存在すると思われ、先の計算値とほぼ一致した数値を含んでいる。

4. 実際問題での振動, 騒音の予測

4.1 振動の予測

倒壊振動の検討の必要性は高くないと判断されたため発破振動のみを対象とした。解体における発破振動の検討はほとんど見られないため岩盤掘削における発破振動を参考にし、式(1)においてm=3/4, n=-2とする日本化薬の提案式、すなわち式(1)'を用いることとした。

$$V = K_1 \times R^{-2} \times L^{3/4} \dots\dots\dots (1)'$$

定数K₁は文献1)によると88±41程度であるが、地盤条件等の現地条件に大きく依存すると考えられる。したがって試験発破を実施して求めるべきものであるが、今回対象構造物の構造上の制約から小規模な試験発破しかできなかったため、試験発破のデータは参考値としての扱いにとどめ、高島の例³⁾を参考にしつつこれを求めることとした。高島での実測結果を式(1)'に代入してK₁を求めることにより式(1)'が得られた。

$$V = (46.8 \sim 80.6) \cdot R^{-2} \cdot L^{0.75} \dots\dots\dots (1)''$$

小規模な試験発破の結果から、K₁として最大値80.6を用いておけば最大でも予測値の2倍を超えないことを確認した。

使用薬量の全体量は前述のように42kg程度であるが、段当りの最大斉発量は1階または2階外側の柱を一気に発破した場合であり、10.56kgである。これを式(1)''に代入して振動速度を求め、次に式(2)を用いて振動レベルを求めた。この際a=0としている。建物より30m~200m離れた地点での地盤振動を予測した結果Table 3を得、いずれも管理値より小さいため対策は必要なしと判断した。

4.2 騒音の予測

式(5)中bについては、一般的によく用いられる値0.4⁴⁾を採用した。また距離減衰については試験発破の結果から求めた値としてa=-1.0を用いることとした。これらを式(5)に代入し、高島の実測値を当てはめてK₂を求めると、K₂=316が得られた。

これらにより得られた今回の予測式は式(5)'である。

$$L_a = 144 - 20 \log R + 8 \log L \dots\dots\dots (5)'$$

これに最大薬量を代入して騒音レベルを求めたものがTable 3の最下段である。騒音レベルも所定の距離において管理値より小さく、対策は不要と判断した。

5. 発破解体時計測結果

5.1 地盤振動

5.1.1 時系列波形

発破時の時系列波形を振動速度についてFig. 3に示す。

段発パターンに応じ、DS#2~DS#4に対応した第1波、DS#7とDS#8に対応した第2波、およびDS#10に対応した第3波というように3つの部分に分かれている。すなわち段発間隔が0.5秒以上の時、波形に切れ目ができることがわかる。また第4波目として第3波目より振幅の小さい振動が観測されているが、これは発生タイミングから判断して構造物の倒壊による振動であると思われる。

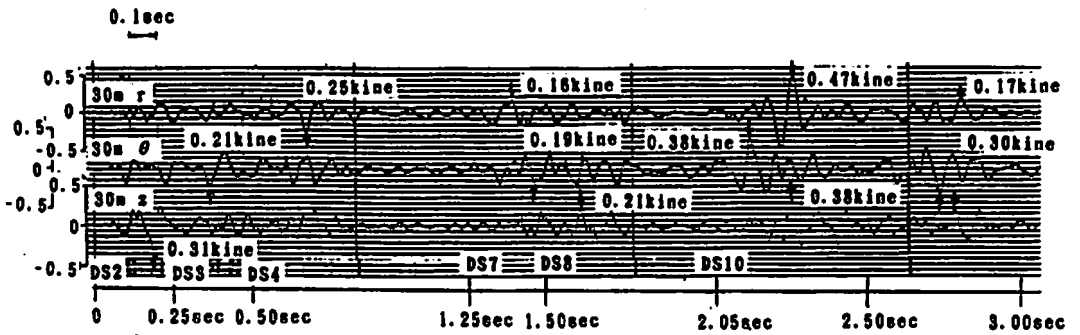


Fig. 3 Particle velocity-time curve caused by blasting demlition work at 30m

Table 4 Peak value of particle velocity(kine)

| Delay No | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 10 | by collapse |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Weight of explosives (kg) | 9.68 | 4.88 | 1.12 | 5.28 | 10.6 | 10.6 | |
| r | 30m | 0.25 | | 0.16 | 0.47 | 0.17 | |
| | 60m | 0.07 | | 0.08 | 0.18 | 0.08 | |
| | 90m | 0.04 | | 0.06 | 0.07 | 0.05 | |
| θ | 30m | 0.21 | | 0.19 | 0.38 | 0.30 | |
| | 60m | 0.09 | | 0.08 | 0.12 | 0.05 | |
| | 90m | 0.07 | | 0.06 | 0.07 | 0.06 | |
| z | 30m | 0.31 | | 0.21 | 0.38 | 0.19 | |
| | 60m | 0.09 | | 0.09 | 0.10 | 0.10 | |
| | 90m | 0.04 | | 0.04 | 0.08 | 0.06 | |

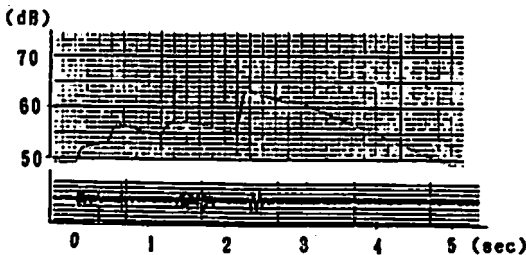


Fig. 4 Vibration level-time curve caused by blasting demolition work at 30m (r-direction)
lower: Particle velocity-time curve shown in Fig. 3

Table 4に各段の薬量と、それに対応した各振動の速度のピーク値をまとめた。第1波、第2波と比較して第3波がr、θ、z各成分とも大きい。第3波のDS#10は地面の最も近くでの発破であったことが原因と考えられる。

5.1.2 振動レベル

振動レベルの時系列応答曲線をFig. 4に示す。いずれの方向においても前段の発破の影響を強く受けていると思われる、全体的な傾向として右上がりの曲線になっている。図はr方向のものであるが、全方向ともほぼ同じ傾向を示した。また若干ではあるが、倒壊に起因したと思われるピークも見られる。

5.1.3 周波数特性

発破振動、倒壊振動の結果を周波数分析し、フーリエスペクトルとして整理した。その際、発破振動全波形を解析対象とした場合(サンプリングタイム4s)、波形グループ毎に分けた場合(サンプリングタイム0.8s)の2種類とした。

サンプリングタイム4sとした解析結果についてFig. 5に示すが全体的に地盤固有振動数の近傍にピークが見られる。また段発間隔から決まる周波数(1/0.25n:nは整数)、すなわち4Hz、2Hz、1.3Hz…に相当するピークは見られない。これにより地盤の固有振動数で発破解体時振動の卓越周波数は決定されるも

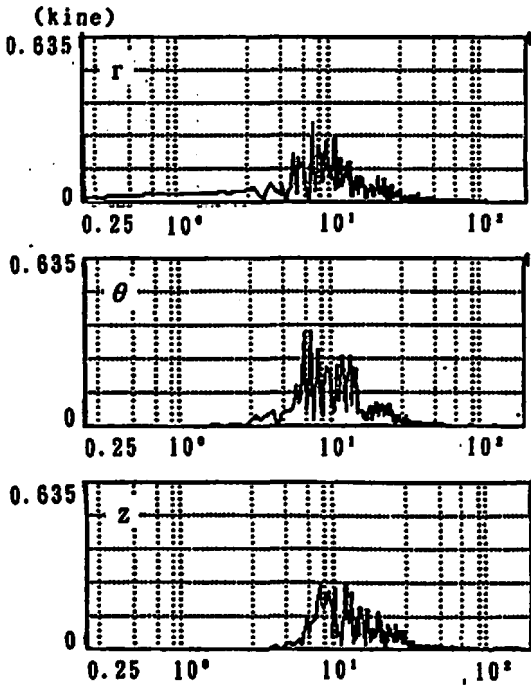


Fig. 5 Power spectrum of the measured particle velocity-time curve shown in Fig. 3

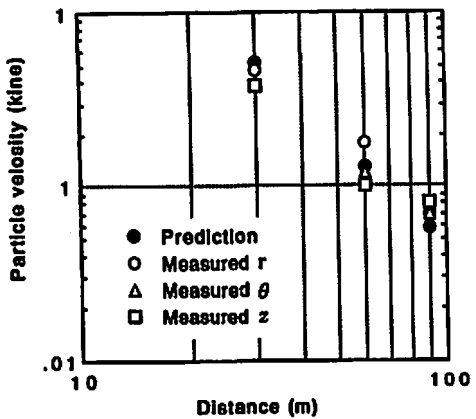


Fig. 6 Plot of the peak of particle velocity (kine) v.s. logarithm of distance from blasting site

のと考えられ、この傾向はサンプリングタイム0.8sの場合も同様である。すなわち発生する振動の卓越周波数は段発間隔の影響を受けず、地盤の固有振動数に依存すると思われる。

5.1.4 距離減衰および予測値との比較

距離減衰グラフを、あらかじめ予測した値と併せて Fig. 6, Fig. 7 に示す。

まず地盤振動速度であるが、最大30%程度の誤差が

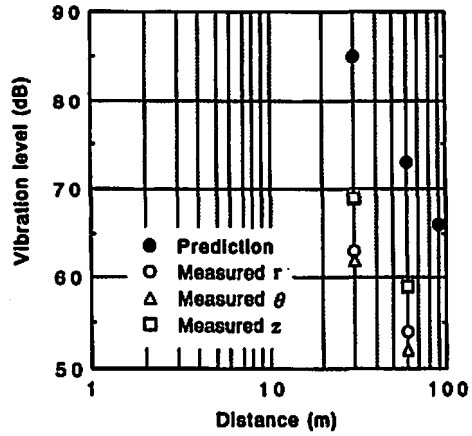


Fig. 7 Plot of the vibration level (dB) v.s. logarithm of distance from blasting site

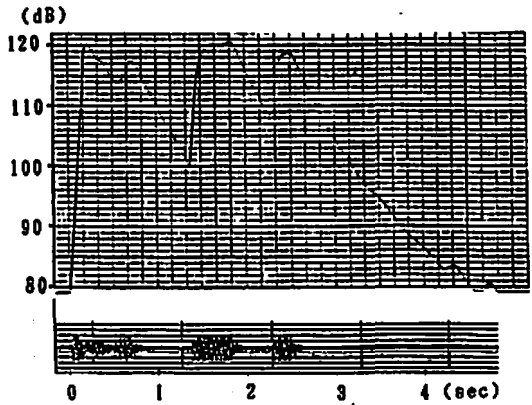


Fig. 8 A-weighted sound level-time curve caused by blasting demolition work at 30 m (Fast) lower: Measured over pressure-time curve

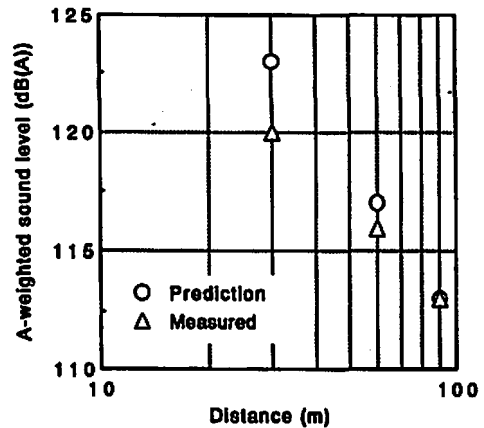


Fig. 9 Plot of A-weighted sound level v.s. logarithm of distance from blasting site.

あるものの、値自体が10⁻²kineレベルと小さく、実用

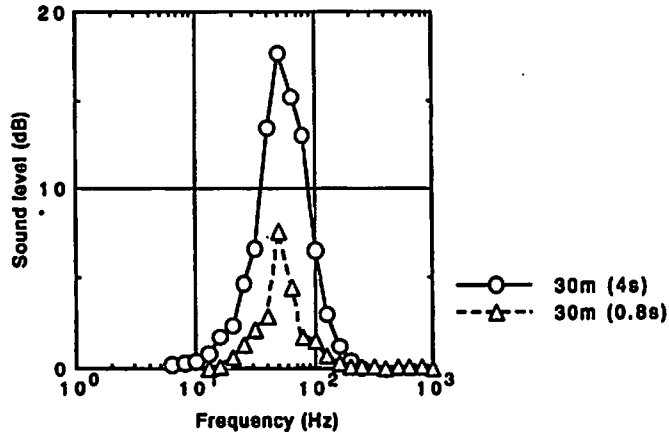


Fig. 10 1/3 octave-band spectrum of the measured sound pressure-time curve(at 30 m)

上問題のない精度であると思われる。

振動レベルは予測値よりかなり小さい。これは実際の振動においては、8 Hz以下の周波数成分および継続時間の影響と考えられ、発破パターンと地盤の卓越周波数に応じた補正值 α の値を設定する必要がある。

5.2 騒音

5.2.1 騒音レベル

Fig. 8に動特性Fast、周波数補正A特性として出力したレベル計の波形を示す。最大薬量10.56kgの8段目に対応した3つめのピークが最大となっておりこれは他地点でも同様である。

この最大値についてFig. 9に距離減衰のグラフを示した。いずれの地点でも精度よく予測できており、今回用いた予測式が妥当であることが示された。

ちなみに低周波音の計測値は、普通騒音の計測値に5 dB加えた値であった。

5.2.2 周波数特性

周波数分析結果としてFFTによる1/3オクターブバンドスペクトルをFig. 10に示す。図は30 m地点、低周波騒音のものであるが卓越周波数は50 Hz近傍であり、これはいずれの計測地点においても、またサンプリングタイムに拘らず大きく違わない。このことは起爆秒時差が騒音の周波数特性に与える影響も振動と同様小さいことを示唆している。

6. 結 言

以上の検討より今回得られた知見は以下のようにま

とめられる。

- (1) 発破振動の予測式として一般に用いられる式(1)は、構造物解体発破の場合も適用することができる。ただし精度向上のためには、適当と思われる規模の試験発破を実施して係数を求めることが望まれる。
- (2) 振動速度から振動レベルを予測する式(2)は、解体発破の場合実際よりかなり大きい値を与える。したがって発破パターンと地盤の卓越周波数を考慮した適当な補正值をその都度求める必要がある。
- (3) 発破騒音の予測式として式(5)を用いた結果、予測値と実測値の間で良好な一致が見られた。
- (4) 段発発破の結果発生する地盤振動および騒音の卓越周波数では、段発間隔やパターンの影響は小さい。
- (5) 振動レベルは前段の発破の影響を強く受ける。

文 献

- 1) 全国火薬類保安協会、「コンクリート構造物発破解体工事保安指針」、P. 34 (1991)
- 2) M. A. Perkin, "EXPLOSIVES ENGINEERING HANDBOOK", Technical paper No. 3, P. 8 (1989), WRECKERS.
- 3) 全国火薬類保安協会、「RC集合住宅発破倒壊要素技術実験報告書」、P. 89 (1989)
- 4) DU. PONT, "Blaster's Handbook", Chapter 26, P. 434 (1980)

A study on the vibration and blast noise in blasting demolition of reinforced concrete structures

by Shigeo KOBAYASHI*,Hidetoshi YOICHI**,Kiyoshi HASHIZUME***
and Koji NAKAGAWA****

In blasting demolition work of reinforced concrete structures,it is very important to reduce the level of ground vibration and impulsive blast noise to less than the permissible level prescribed by local authorities as well as problems of flying debris and dust.

In this paper we describe the predictions of ground vibration and A-weighted sound pressure level and their estimation in the actual demolition work.

The predictions of particle velocity V (kine),vibration level VL (dB) and A-weighted sound pressure level L_a (dB(A)) corrected by Fast detector-indicator characteristic we used were obtained as follows by the assumption that the peak values depended on the maximum explosives weight of every delay:

$$V=K_1 \times R^n \times L^m \dots\dots\dots (1)$$

$$VL=20\log V+91 \dots\dots\dots (2)$$

$$L_a=20\log K_2 + 20a\log R + 20b\log L - 20\log P_0 \dots\dots\dots (5)$$

where L :the maximum explosives weight of every delay (kg) , D :distance from the center of the demolishing structure (m), P_0 :reference pressure ($=2.0 \times 10^{-5}$ Pa), K_1, K_2, m, n, a, b ,:site factors.

To compare with the values measured in the field of actual demolition work,it was proved that the predictions obtained from the equation (1) and (5) were good for practical purposes but that of equation (2) gave a larger value.

Moreover,we refer the influence of the delay time using the wave forms and the frequency analysis.

- (*Civil Engineering Division, Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi, Futtsu, Chiba 299-12, Japan
- **Technical Research Institute, Hazama Corpotation, 515-1 Nisimukae, Karimaaza, Tsukuba, Ibaragi 305, Japan
- ***Explosives and Catalysts Division, Nippon Kayaku Co., Ltd., 1-2-1, Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100
- ****Faculty of Engineering, Yamaguchi University Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755, Japan)