

打音検査時の打撃負荷に関しての一考察

保田 尚俊¹

¹正会員 京都大学特定助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: yasuda.naotoshi.3x@kyoto-u.ac.jp

コンクリート構造物の健全性評価には人が対象を直接ハンマーで叩き、その打音等から健全性を評価する打音法が良く用いられている。一方で、どのぐらいの力で叩けば欠陥部のはく離に対する安全性を担保できるかはあまり検討されていない。そこで、ハンマー打撃による動的負荷を等価な静的負荷として評価するための補正值について検討し、その後、ハンマー加振で十分な負荷を与えられるはく離欠陥の大きさを推定した。その結果、補正には1次振動モードの固有周期と負荷時間の比が重要な変数となること、欠陥形状はそれほど大きく影響しないことが分かった。実際の条件を加味すると、想定はく落塊の自重が数kgであれば、普通のハンマー加振で十分な負荷を与えられるものと推定された。

Key Words: hammering test, load, beam, spalling defects, plane concrete

1. はじめに

近年、老朽化の進むコンクリート構造物の点検・維持管理が問題となっている。コンクリート構造物の健全性評価のための代表的な検査法の一つとして、人が対象を直接ハンマーで叩き、その打音等から健全性を評価する打音法がある。この検査法が実務で良く用いられている理由の一つとして、「ハンマー打撃の形で一定の負荷を与えたが欠陥部に変化は見られなかった」ということにより、欠陥部のはく離に対する安全性を担保できるという点が挙げられる。一方で、どのぐらいの力で叩けば十分かという判断は感覚的なものとなっている。

ハンマー打撃時の加振力はインパクトハンマーを用いた計測で容易に評価できる。実際に計測してみると、鉄ハンマーでコンクリートを打撃する場合、最大加振力が数百Nを超えるような打撃は容易に実現できることが分かる。このことは、想定されるはく落塊の自重よりも大きな荷重をハンマー打撃で与えることは難しくないということを意味する。しかしながら、そのハンマー加振による負荷は瞬間的なものであり、欠陥部に作用する自重のような定常的な負荷とは異なっているので、両者は同じ基準で比較することはできない。

本報告では、ハンマー打撃による動的負荷を等価な静的負荷として評価するための補正值について検討する。さらに、その結果を踏まえ、ハンマー加振で十分な負荷を与えられるはく離欠陥の大きさを推定する。

2. 衝撃荷重による片持ち梁の応答

動的荷重と静的荷重の違いを考察するための足掛かりとして、まずは、**図-1**のような片持ち梁に集中荷重を与えた際の応答を考える。ハンマー加振を模擬した動的荷重 $F(t)$ を次式で定義する。

$$F(t) = \frac{F_0}{2} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right\} H(T-t) \quad (1)$$

F_0 は荷重の大きさを表す定数、 T は負荷時間を表す変数、 $H(t)$ はステップ関数を表している。 T の値は叩き方等によって変化する。検査用ハンマーでコンクリートを加振した場合には、0.0004s 程度となる。 $T=0.0004$ (s)とした際の動的荷重の時刻歴波形、その振幅スペクトルを**図-2**に示す。式(1)で与えられる荷重は0.5T秒で最大振幅 F_0 となることが分かる。また、その振幅スペクトルから、5000(=2/T)Hz 程度までの応答が強く含まれていることが分かる。なお、強く叩くほど、ハンマーとコンクリートの接触時間は短くなるので、 T の値は減少する。

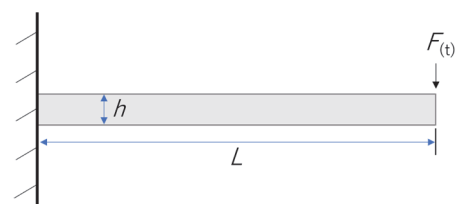
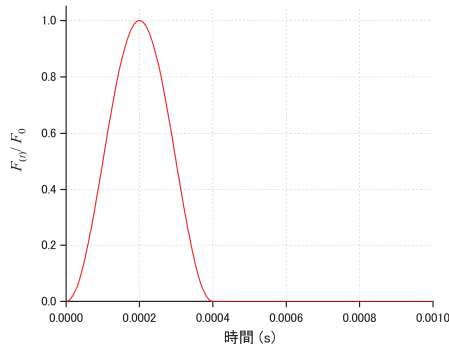
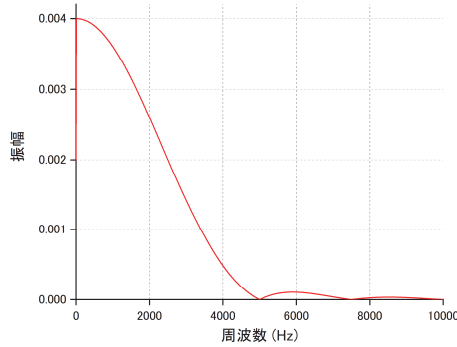


図-1 集中荷重を受ける片持ち梁



(a) 時刻歴波形



(b) 振幅スペクトル

図-2 $T=0.0003(s)$ とした際の動的荷重

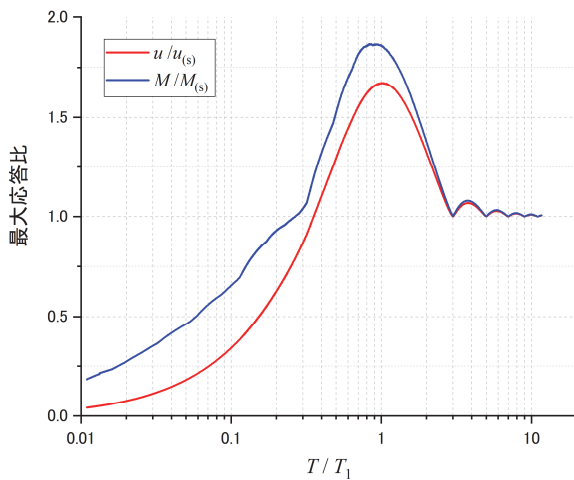
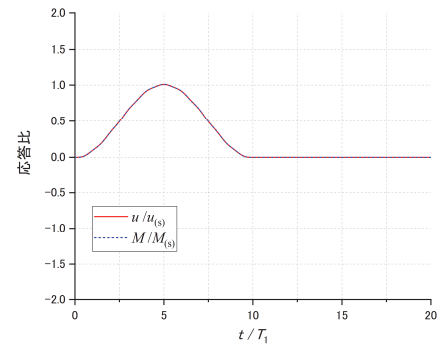


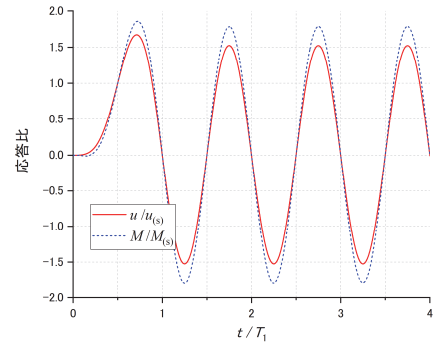
図-3 片持ち梁に生じる変位およびモーメントの最大応答比

片持ち梁に式(1)で表される動的荷重を与えた際の応答は、振動の減衰をゼロとした場合、解析的に解ける¹⁾。また、静的荷重として与えた場合 ($F_0=F_0$ とした場合) も解析的に解ける。以降では、それらの計算方法の詳細は割愛し、得られた結果のみを示す。

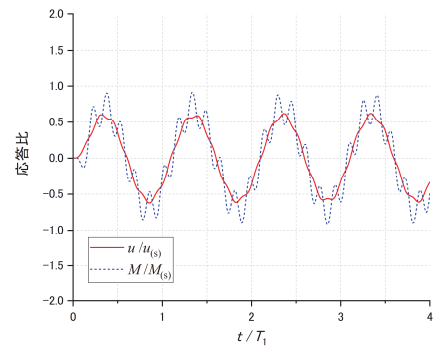
図-3は片持ち梁に生じる変位およびモーメントの最大応答比を計算したものである。 u および u_0 は梁の端部(荷重を与えた点)での変位で、 u は動的荷重を与えた際の変位の最大値、 u_0 は静的荷重を与えた際の変位を表



(a) $T/T_1=10$



(b) $T/T_1=1$



(c) $T/T_1=0.1$

図-4 応答比の時刻歴波形

す。また、 M および M_0 は梁の付け根に生じる曲げモーメントで、 M は動的荷重を与えた際のモーメントの最大値、 M_0 は静的荷重を与えた際のモーメントを表す。横軸の T_1 は梁の1次振動モードの固有周期である。この値は梁のヤング率、密度、長さ、厚さの4つの変数で計算される。変位やモーメントの計算に必要な変数は、先ほどの4つに荷重の振幅 F_0 、荷重時間 T の2つを加えた計6つとなるが、最大応答比は最終的に T/T_1 のみの関数となる。したがって、動的荷重と静的荷重の違いを考察するにあたっては、 T/T_1 すなわち、1次振動モードの固有周期と荷重時間の比が非常に重要な変数となることが分かる。図より、変位およびモーメントともに、 $T/T_1=1$ 付近で最大応答比が最大となり、1よりも十分に大きくな

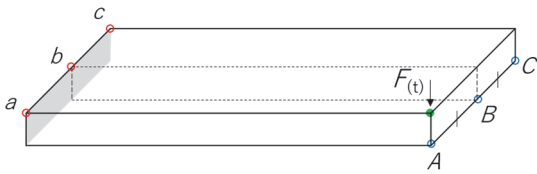


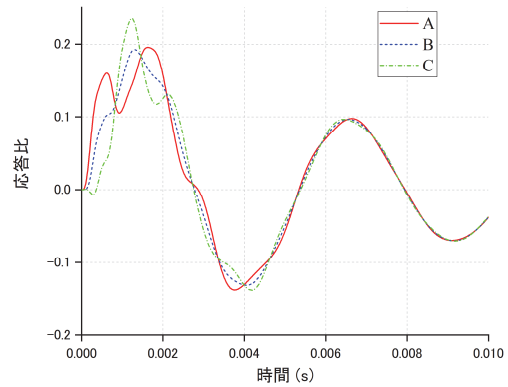
図-5 集中荷重を受ける平板

ると、最大応答比は1に近づくことが分かる。また、 T/T_1 が1よりも小さくなるほど、最大応答比は減少していくことが分かる。応答比の時刻歴波形を図-4に示す。ここでは T/T_1 の値が10, 1, 0.1の3つのケースを示している。 $T/T_1=10$ の場合、すなわち、梁の1次振動モードの固有周期に比べて負荷時間が十分に長い場合は、準静的な応答となり、打撃荷重の入力波形と梁の応答波形がほぼ一致することが分かる。 $T/T_1=1$ の場合では、変位、モーメントともに、1次の振動モードが卓越しており、応答比の最大値は1.5を超えている。 $T/T_1=10$ の場合では、変位、曲げモーメントともに、2次の振動モード以降の応答も励起されていることが分かる。変位に比べると、曲げモーメントの方が高次モードの影響をより受けやすくなっている。このため、曲げモーメントの方が変位よりも応答比の最大値が大きくなる。

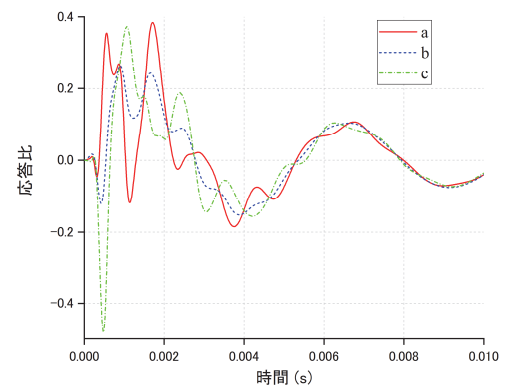
3. 衝撃荷重による平板の応答

前章では片持ち梁の応答について考察を行ったが、ここではより実際の欠陥に近い、図-5のような平板の応答について考察する。板の寸法は $0.3\text{m} \times 0.15\text{m} \times 0.03\text{m}$ とし、左端の平面の境界条件は完全固定とする。集中荷重 F_0 は先ほどと同様に式(1)で表されるものとし、右端の面の上端部に作用させる。集中荷重の接触時間 T は 0.0004s とする。解析に用いたコンクリートのヤング率、ポアソン比、密度はそれぞれ、 30GPa 、 0.2 、 2300kg/m^3 とした。この条件での平板の最低次モードの固有周期 T_1 は約 0.005 秒（振動数は約 200Hz ）であり、 T/T_1 は 0.08 程度となる。ここでの振動応答は解析的に解くことが困難であったので、FEM解析ソフトのANSYSを用いて計算した。解析時の振動の減衰比は 0.1 としている。減衰比は応答比が安全側の評価（小さめ）となるように、実際に想定されるよりも大きな値とした。

解析結果の一例を図-6に示す。計測位置によって応答が異なるが、たわみ変位の応答比の最大値は 0.2 より少し大きな値、縁応力の応答比の絶対値の最大値は 0.4 より少し大きな値となっていることが分かる。図-3の梁の結果と比較すると、変位の最大応答比は約 16% 小さい。



(a) たわみ変位



(b) 縁応力

図-6 応答比の時刻歴波形

また、図-3の曲げモーメントは、そのまま縁応力と置き換えることができることを踏まえて両者を比較すると、縁応力の最大応答比は約 20% 小さい。応答を \sin 波と仮定した場合は、振動の減衰比を 0.1 とすると、最大振幅は $e^{-0.1\pi/2}$ 倍となるので、最大振幅は、減衰比をゼロ（減衰無し）とした場合に比べ、約 15% 減少する。したがって、振動減衰の有無を除外すれば、梁と板の最大応答比は概ね同じであると判断できる。

今回行った検討はあくまでも単純な構造の応答に対してのものであるが、動的荷重と静的荷重の違いを考察するにあたっては、1次振動モードの固有周期とハンマーが負荷を与えている時間の比が重要な変数であること、形状の影響はそれほど大きくないということが分かった。また、欠陥部の進展や破壊を考えると、変位ではなく、応力が重要となるが、図-3と図-6の結果を踏まえると、振動減衰を考慮した場合の応力（モーメント）の最大応答比は振動減衰を考慮しない場合の変位の最大応答比を下回ることはないものと予想される。したがって、図-3の変位の最大応答比のグラフがハンマー打撃による動的負荷を等価な静的負荷として評価するための補正值の目安になるものと考えられる。

4. ハンマー加振で十分な負荷を与えられる欠陥の大きさ

鉄道トンネル内のβ判定箇所では振動計測を行った際の結果²⁾を見ると、欠陥部の最低次(1次)モードの固有振動数は数百Hz~3000Hz程度までに分布していることが分かる。また、コンクリート供試体を用いた実験結果からは、最低次モードの固有振動数が1000Hz以上あるようなものはく落のリスクはまずないと判断できることが報告されている²⁾。

ハンマー打撃時の負荷時間 T を0.0004s、最低次モードの固有振動数が1000Hz($T_1=0.001$ s)と仮定すると、 T/T_1 は0.4となる。図-3の変位の最大応答比を参考とすると、最大応答比は1程度となり、この場合では、ハンマー打撃による動的負荷と静的負荷はほぼ同等、すなわち、ハンマー打撃時の最大加振力 $X(N)$ であれば、 $X(N)$ 相当の荷重を静的に与えた場合と同等の負荷を与えられていると判断できる。また、最低次モードの固有振動数が250Hz($T_1=0.004$ s)と仮定した場合には、 T/T_1 は0.1となり、ハンマー打撃による動的負荷は静的負荷に換算すると約30%まで減少することが分かる。なお、最低次モードの固有振動数が250Hzよりも低くなっているような悪い欠陥は、定期的に点検が行われていれば、現場にはほとんどないものと推測される。

欠陥部の付着の状態が悪いものほど、最低次モードの固有振動数は低下している(T_1 は大きくなっている)。そのため、欠陥部の状態が悪いものほど、ハンマー加振による負荷は付着部に伝わりにくくなっている。

インパクトハンマーを用いてコンクリートを打撃した際の最大加振力を計測すると、軽く叩いた場合で100N程度、強く叩くと1000N以上であり、普通に叩くことで、数百N程度の打撃は容易に実現できる。ハンマー打撃による動的負荷は静的負荷に換算すると30%程度は期待できると考えられるので、普通に叩くと、100N程度の静

的荷重は与えられているものと推定できる。

自重による負荷の何倍の負荷に耐えられれば、はく離に対する安全性は十分と判断できるかの基準値を設定することは困難であるが、仮に5倍とすると、想定されるはく落塊の自重が数kgであれば、普通のハンマー加振で十分な負荷を与えられると判断できる。また、強く叩けば、想定されるはく落塊の自重が数十kgまで十分な負荷を与えられるものと推定される。

ただし、動的載荷の場合、大きな負荷がかかる時間はごくわずかな時間となるため、破壊が一気に生じるとは限らないことには十分な注意が必要である。

5. まとめ

ハンマー打撃による動的負荷を等価な静的負荷として評価するための補正值について検討した結果、1次振動モードの固有周期とハンマーが負荷を与えている時間の比が重要な変数であること、形状の影響はそれほど大きくないということが分かった。実際の条件を加味した結果、想定されるはく落塊の自重が数kgであれば、普通のハンマー加振で十分な負荷を与えられると推定される。

参考文献

- 1) 足立忠晴：衝突工学の基礎と応用，材料，Vol.70，No.9，pp.712-718，2021。
- 2) 保田尚俊，島田義則，江本茂夫，金田道寛，田中幸司，武岡学，石田信孝，御崎哲一，岡義晃，桶谷栄一：覆工コンクリートのはく落に対する健全度判定の評価指標，土木学会論文集F1(トンネル工学)，Vol.77，No.1，pp.32-43，2021。

(2022. 8. 26 受付)

A CONSIDERATION ON IMPACT LOAD DURING HAMMERING TEST

Naotoshi Yasuda

The hammering test is often used to evaluate the soundness of concrete structures. On the other hand, there has been little research on how much force should be applied to ensure safety against concrete spalling. Therefore, we investigated the correction value for evaluating the dynamic load due to hammering as an equivalent static load and estimated the size of the delamination defect that can give sufficient load by hammering. As a result, it was found that the ratio of the natural period of the first vibration mode and the loading time is an important variable. However, the effect of the shape was not significant. In addition, it was presumed that a sufficient load could be applied by ordinary hammering when the self-weight of a defect is assumed to be several kilograms.