

I-23

衝撃力を受ける単純支持RC矩形板の動的挙動

室蘭工業大学 正員 松岡 健一, 正員 岸 徳光, 学生員 泉 智夫
専修道短大 正員 三上 敬司, 日本大学 正員 能町 純雄

1. はじめに

近年、土木建築構造の分野においても衝撃的な荷重载荷に対する構造物の動的挙動に関する理論的研究が行われるようになってきており、弾性問題としての検討や、弾塑性や破壊現象までの検討を行うための有限差分法や有限要素法に基づいた検討が種々可能となっている。しかしながら、貫通や侵徹、裏面剝離の発生など破壊に至る過渡的現象についての説明はいまだ十分に行われていないようである。

著者等は以上のような背景をふまえ、これまでに単純支持RC梁の弾性衝撃応答問題について種々検討を重ね、荷重载荷時間が梁の動的応答性状に及ぼす影響等について明らかにしてきた¹⁾。本論文では、4辺単純支持RC板に部分分布の衝撃荷重が载荷する場合の弾性衝撃応答問題を取り上げ、力積を一定としたときの部材の応答性状に及ぼす荷重継続時間の影響等について検討を行ったので報告する。

解析手法は弾性問題であるため種々考えられるが、ここでは複鉄筋RC板モデルを用いているため、断面方向に離散化し、軸方向に連続関数を用いる有限プリズム要素法²⁾を用いることにした。

2. 数値解析

解析モデルは4辺単純支持RC板とし、床板厚 1m, 1辺 10m, 片側鉄筋比 1%, かぶり 5cmの複鉄筋RC板となっている(図-1)。プリズム断面は要素数 902, 節点数 966としており、荷重は板中央に 1m×1mの正方形の形状で载荷させている。解析上の精度については、検討の結果 Fourier級数の項数を 61項、考慮する固有値の数を各項数に対して45個として以後の解析を行っている。

2.1. 荷重载荷時間が曲げ応力に及ぼす影響

荷重载荷時間と载荷点近傍での曲げ応力との関係を調べるために、図-2 に示された波形を基準として力積一定、波形分布の時間比を一定とした衝撃力(全28ケース)を入力した場合の応答解析を試みた。解析は荷重载荷時間を板の最低次固有周期、あるいはそれ以上までを想定し最大縁応力に注目し、減衰率 0%, 5%, 10%の3ケースについて行っている。

図-3(a)には減衰率 5%の場合における最大上下縁応力と荷重継続時間との関係を示している。図中、横軸は荷重継続時間と最低次固有周期 ($T_0 = 29.9\text{msec}$) との比で示し、また縦軸は基準波形の荷重強度 ($q = 10\text{kg/cm}^2$) を静的に载荷させた場合の縁応力度 ($\sigma_{st} = 13.75\text{kg/cm}^2$) との比で示している。図より荷重継続時間が短くなるに従い载荷部における上縁応力が下縁応力より大きくなる傾向がある。

一例を挙げると $T/T_0 = 0.0083$ の場合には上縁応力は下縁応力の 1.3倍となっている。この現象は荷重継続時間が短いため、構造全体としての 1次あるいは 3次の振動状態が励起される前に荷重が除荷され、主波動が板の深さ方

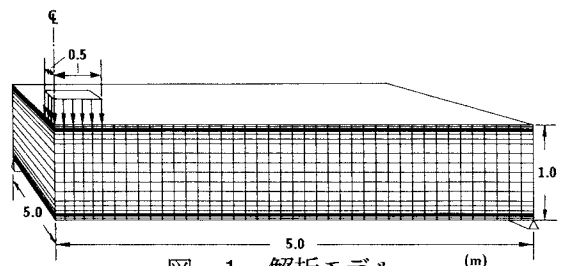


図-1 解析モデル (m)

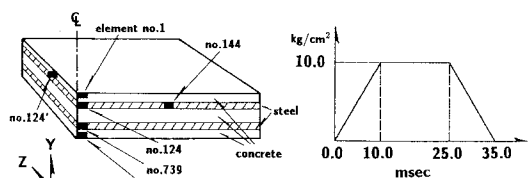


図-2 要素位置および基準荷重波形図

Dynamic Behavior of the Simply Supported RC Slab under the Impact Load

by Ken-ichi MATSUOKA, Norimitsu KISHI, Takashi MIKAMI, Sumio NOMACHI and Tomo IZUMI

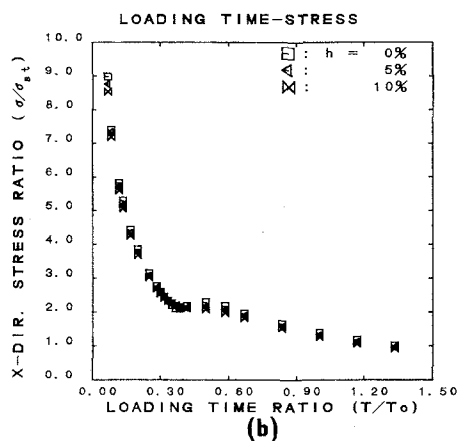
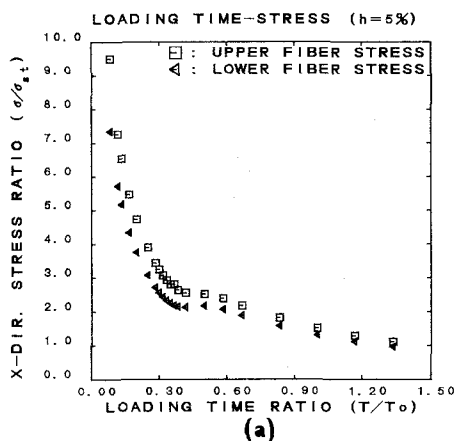


図-3 荷重継続時間-縁応力応答最大値相関図

向及び中央部から支点へと減衰しながら伝播するためであるものと考えられる。

図-3(b)には最大下縁応力と荷重継続時間との関係を変化させて示している。図より継続時間が短い場合を除いては、減衰率を変化させても応答値にはそれほど大きな差は現れていない。

尚、図-3 に関する一連の結果は σ_x について整理しているが、 σ_z についてもほぼ同様の結果を得ている。

次に荷重載荷時間の上下縁曲げ応力波形への影響について検討を行った。図-4に荷重継続時間が $T/T_0 = 0.0167$, 0.1668 , 0.3002 の3ケースの減衰率5%における上下縁x方向応力波形について示している。図-4(a)より $T/T_0 = 0.0167$ の場合は、荷重継続時間が非常に短いため最低次固有振動が励起されず荷重除荷後急速に減衰している。(b)の $T/T_0 = 0.1668$ の場合、最低次の固有振動は励起されているが、最大値はやはり荷重載荷時に発生している。(c)の $T/T_0 = 0.3002$ の場合、低次振動は励起されているが、3次以上のモードは初期の段階よりほとんど発生していないようである。またその低次振動周期も最低次固有周期より若干大きくなっている。これは載荷荷重の影響によるものと考えられる。最大応答値は(a),(b)と同様荷重載荷時に発生している。これは、RC梁が同様の条件下で最低次固有振動状態において最大値を示す事実と著しい違いを示している。

以上より、荷重載荷時間の極めて短い場合以外は最低次の固有振動が励起されるが、3次以上の固有振動状態はあまり励起されないこと、また最大応答値は、RC梁の場合とは異なり全解析ケースにおいて荷重載荷時に発生していることなどが明らかとなった。

2.2. 応力波の伝播性状

ここでは応力波の深さ方向、および軸方向への伝播性状の検討を行うために構造全体の変形挙動と主応力分布に関する解析を行った。紙面の都合より、ここでは載荷時間比 $T/T_0 = 0.0167$ の場合についてのみ示す。図-5に板中

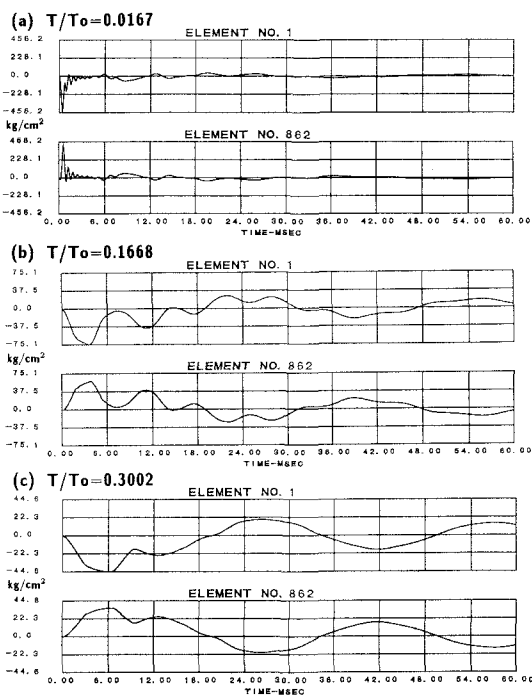


図-4 σ_x に関する縁応力応答波形図 (h=5%)

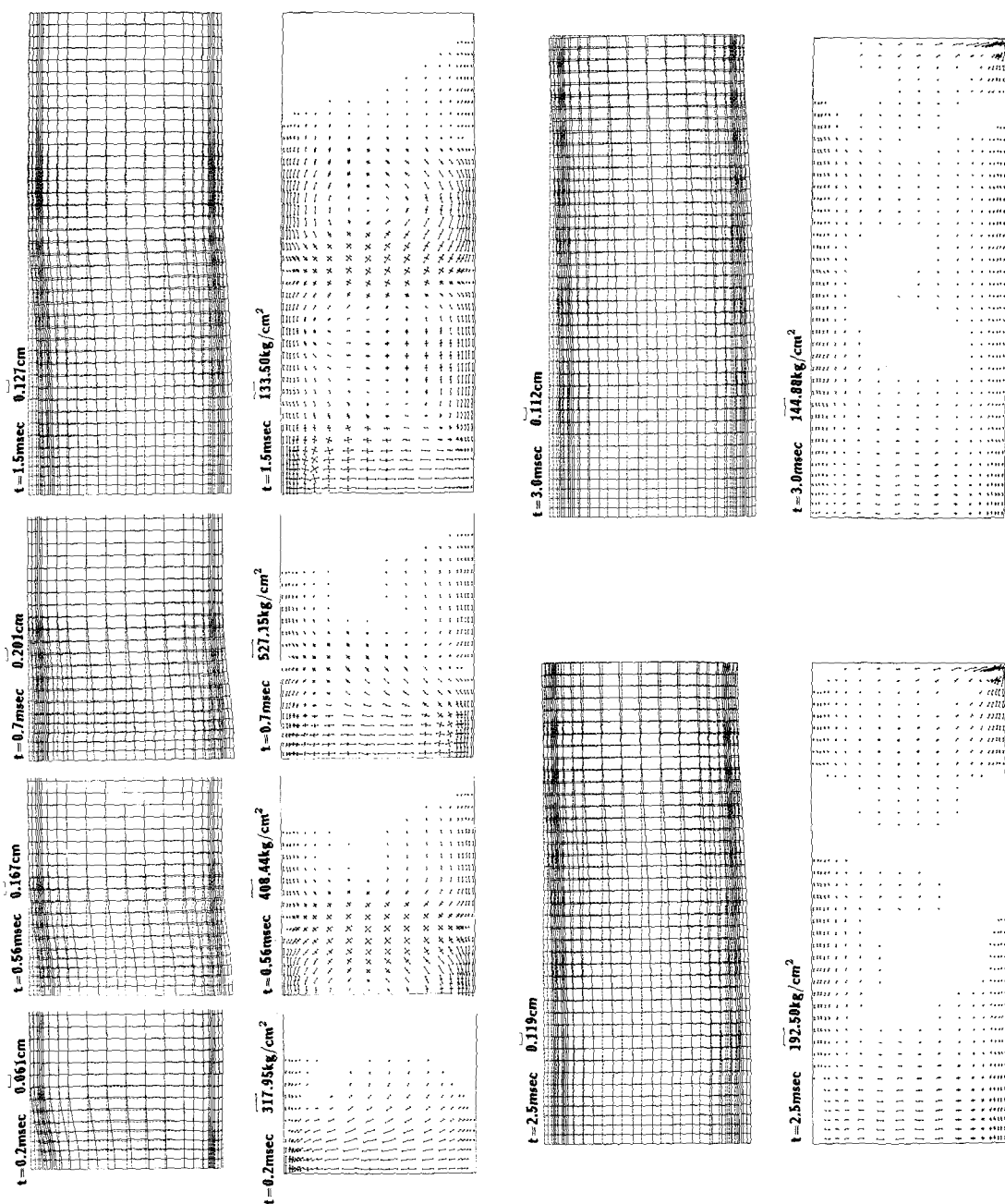


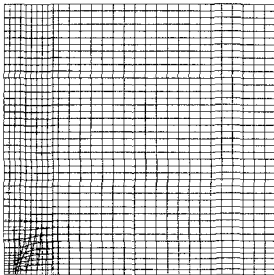
図-5 変形図及び主応力図 (板中央プリズム断面)

中央プリズム断面の変形図及び主応力図を、時間を追って示した。尚、ここではコンクリート要素のみ図示する。

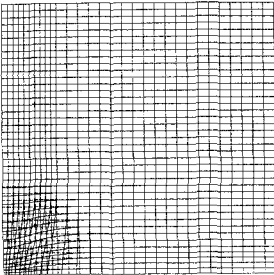
まず、時間の極めて早い $t=0.2\text{msec}$ では、主波動は載荷点近傍部のみにしか伝播せず、変形も極めて局所的なものにとどまっている。主応力図では載荷点直下の大部分に荷重と同方向の圧縮応力が作用しているようである。

upper surface

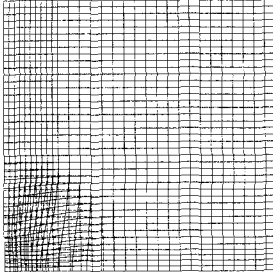
t=0.2msec 0.021cm



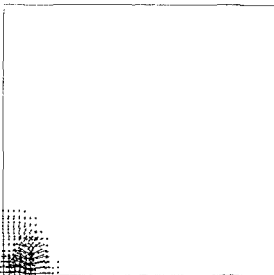
t=0.56msec 0.036cm



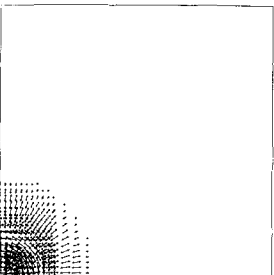
t=0.7msec 0.036cm



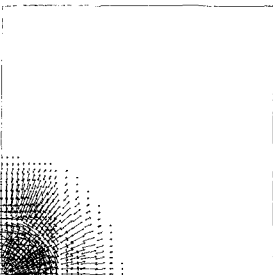
t=0.2msec 235.77kg/cm²



t=0.56msec 300.35kg/cm²

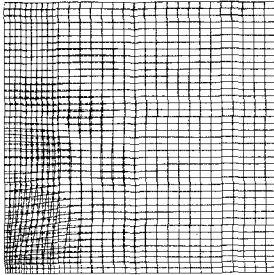


t=0.7msec 173.48kg/cm²

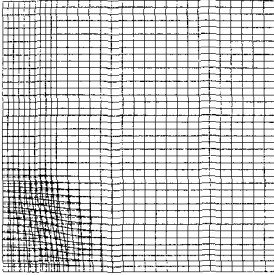


lower surface

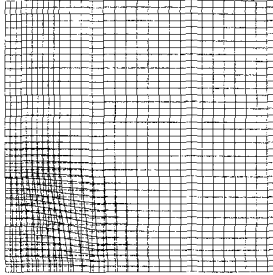
t=0.2msec 0.004cm



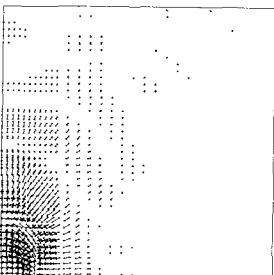
t=0.56msec 0.045cm



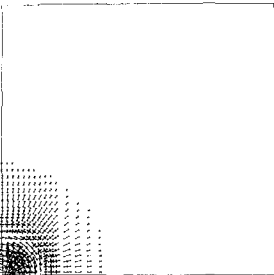
t=0.7msec 0.052cm



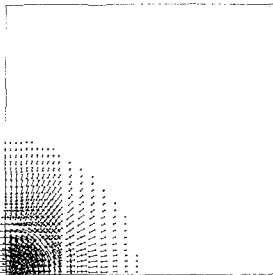
t=0.2msec 35.09kg/cm²



t=0.56msec 425.06kg/cm²



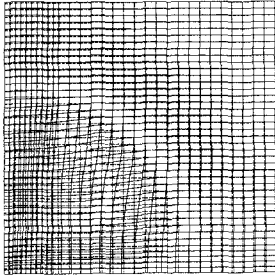
t=0.7msec 356.87kg/cm²



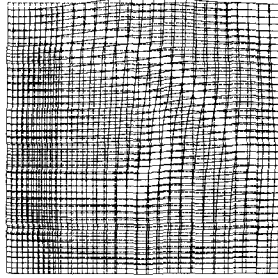
図一 6 (1) 変形図及び主応力図 (表面及び裏面)

upper surface

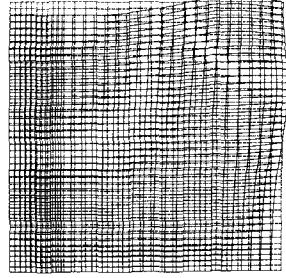
$t=1.5\text{msec}$ $\bar{\epsilon}=0.030\text{cm}$



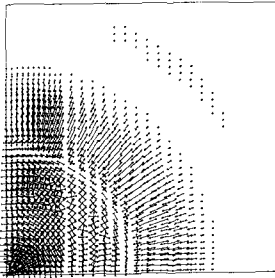
$t=2.5\text{msec}$ $\bar{\epsilon}=0.021\text{cm}$



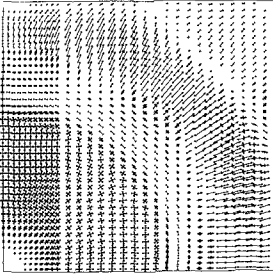
$t=3.0\text{msec}$ $\bar{\epsilon}=0.026\text{cm}$



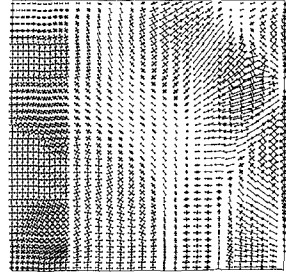
$t=1.5\text{msec}$ $\bar{\sigma}=103.51\text{kg/cm}^2$



$t=2.5\text{msec}$ $\bar{\sigma}=94.07\text{kg/cm}^2$

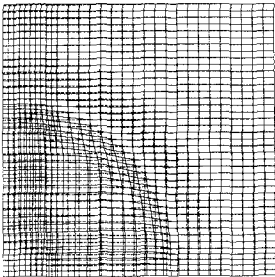


$t=3.0\text{msec}$ $\bar{\sigma}=65.41\text{kg/cm}^2$

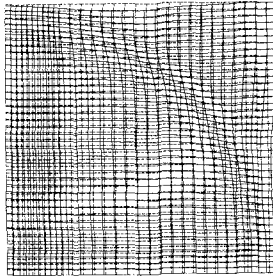


lower surface

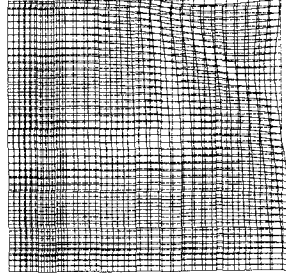
$t=1.5\text{msec}$ $\bar{\epsilon}=0.030\text{cm}$



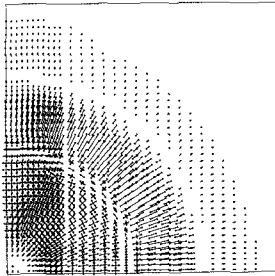
$t=2.5\text{msec}$ $\bar{\epsilon}=0.018\text{cm}$



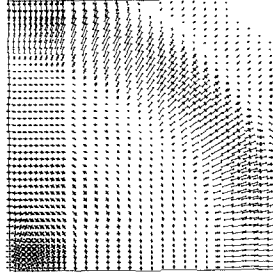
$t=3.0\text{msec}$ $\bar{\epsilon}=0.021\text{cm}$



$t=1.5\text{msec}$ $\bar{\sigma}=129.96\text{kg/cm}^2$



$t=2.5\text{msec}$ $\bar{\sigma}=115.17\text{kg/cm}^2$



$t=3.0\text{msec}$ $\bar{\sigma}=120.71\text{kg/cm}^2$

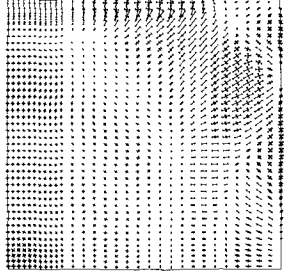


図-6(2) 変形図及び主応力図 (表面及び裏面)

$t=0.56\text{msec}$ の状態では主波動の先端部で固定端のような曲げ変形をしており、主応力分布は中央部から支点方向へ、下に凸の曲げ、せん断、上に凸の曲げと変化している。載荷点直下の下側の部分では、わずかながら鉛直方向の引張応力が生じている。続く $t=0.7\text{msec}$ では、この引張応力がいっそう大きくなりかつ曲げ零の領域が右方へ移動している。 $t=1.5\text{msec}$ では構造のほぼ全体が変形しており、主応力図ではまさに支点上に主波動が伝播しつつある状態が示されている。この段階では不完全ながら3次の固有振動状態になっているようである。 $t=2.5$ 及び 3.0msec では支点上まで完全に波動は伝播し支点部では支持点を中心に回転しているようである。また主応力図より載荷部に比べて支点部に大きな応力が引張で作用していることがわかる。これは、応力波が支点上に到達して反射する時点の挙動であるためと思われる。

次に、同様の結果について、板全体の $1/4$ 部分を真上からみた状態で変形、主応力図を示すと図-6のようになる。各図の左下の部分が板の中央部すなわち載荷部であり、板モデルの表面及び裏面を図化している。

$t=0.2\text{msec}$ では、載荷初期であるので表面は載荷部での局所的な変形にとどまっている。裏面では、最大変位あるいは主応力が小さいため比較的広域にわたって変形や応力が分布しているように示されている。 $t=0.56, 0.7\text{msec}$ では載荷部を中心として同心円を拡大するように応力波が伝播する様子が観察できる。表面の変形は載荷部に引き込まれるように、裏面では載荷部から広がるように変形している。応力分布は、表面では中心部で2軸圧縮、その円周に沿って1軸圧縮、その外円でせん断、更にその外円で放射線状に1軸の引張応力が作用している。一方裏面では表面と逆の分布で、中心より外へ2軸引張、1軸引張、せん断、1軸圧縮といった分布をなしている。このうち、中心部の2軸および1軸の引張応力は円周方向に沿って分布しており、中心部の曲げひび割れ発生を示唆しているものと考えられる。 $t=1.5\text{msec}$ では、これらの挙動が更に拡大されている。応力図では、表面の1軸引張(裏面での圧縮)分布の外側にわずかながら圧縮応力(裏面で引張)が生じている。 $t=2.5\sim 3.0\text{msec}$ の応答状態を見ると、最初に主波動は同心円状に境界辺に向かって伝播していき、境界辺中央部(図左側上端部あるいは右側下端部)に到達後は反射波として板内側へ向かう波動と隅角部に沿って伝播していく波動が存在しているようである。これより、境界辺に主波動が到達するまで、板の動的解析は板の形状や支持条件に依存せずばば軸対称問題として扱うことが可能であることを示唆しているものと考えられる。

3. おわりに

4辺単純支持RC板に部分分布の衝撃荷重が載荷する場合の弾性衝撃応答問題を取り上げ、力積を一定としたときの部材の応答性状に及ぼす荷重継続時間の影響などについて検討を行った。その結果、載荷時間が短いほど応答値が大きくなり、その最大値も載荷初期に発生し載荷時間が長い場合では低次の固有振動の励起状態などを確認することができた。更に載荷時間の短い場合について、各時間における構造全体の主応力状態、変形状態を図化処理し、載荷点から構造全体への波動の伝播状況及び低次振動状態への移行の様子を確認できた。

4. 参考文献

- 1). 岸徳光, 松岡健一, 三上敬司, 能町純雄, 泉智夫: RC部材の衝撃応答性状に及ぼす載荷時間の影響, 土木学会北海道支部論文報告集, 第46号, PP.171-176, 1990.1.
- 2). 岸徳光, 松岡健一, 能町純雄, 本名一夫: 衝突衝撃荷重に対するRC矩形板の衝撃応答解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第45号, PP.199-202, 1989.1.
- 3). 吉田博, 榎谷浩, 岡衛: 落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について, 土木学会論文集, 第362号, PP.461-470, 1985.10.
- 4). 岸徳光, 吉田紘一, 松岡健一, 能町純雄: 層状弾性体にモデル化した覆工敷砂部の衝撃応答解析, 構造工学論文集, vol34A, PP.817-826, 1988.3.