

(20)破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁の三次元弾塑性衝撃応答解析

An applicability of impact response analysis method for prototype RC girders
by using an equivalent fracture energy concept for concrete elements

岸 徳光*, 三上 浩**, 岡田 慎哉***

Norimitsu Kishi, Hiroshi Mikami, and Shin-ya Okada

* 工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

*** 修(工) 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所 研究員 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

Key Words : *prototype RC girder, impact response analysis, fracture energy, falling-weight impact test*

キーワード: 実規模 RC 桁, 衝撃応答解析, 破壊エネルギー, 重錘落下衝撃実験

1. はじめに

我が国における土木構造物に関する設計法は、許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、現在性能照査型設計法に移行しつつある。このような状況下において、載荷速度が比較的遅い場合のみならず、早い場合（衝撃荷重）に対しても性能照査型設計を可能にするために、土木学会構造工学委員会では小委員会を設置し検討に着手している。

しかしながら、現実的には構造部材の基本である RC 梁に限定しても、小型梁に対しては多少実験データが蓄積されているものの、実規模桁に関しては極端に少ないと言わざるを得ない。このため、実規模部材を対象とする場合には、小型部材に関する実験結果を基に構築された照査法の概念を検証する位置付けにすることが、より現実的であるものと判断される。また、照査法の妥当性を検証する場合においても、必ずしも単純な構造形式ばかりではないことを想定すると、実験法のみならず、数値解析的な手法を確立しておくことが重要である。

このような背景より、著者らは、まず重錘落下衝撃実験結果を基に小型 RC 梁を対象とした三次元弾塑性有限要素解析^{1),2)}を試み、その適用性に関する検討を行っている。さらに、小型 RC 梁に関する解析手法を踏襲した場合の実規模 RC 桁への適用性に関する検討³⁾を行い、小型 RC 梁に関する解析手法が適用可能であることを明らかにしている。しかしながら、このような検討結果に従えば、構造物が大きくなるに従い要素分割数も3次元数的に増加することとなり、現実的に解析不可能になることも想定される。このため、要素を大きくし、分割数を低減した場合においても解析精度を著しく損なわない解析手法の確立が望まれる。

このような観点から、本論文では三次元弾塑性応答解析法に基づいた実規模 RC 部材に関する簡易で合理的な衝撃挙動解析法の確立を目的に、要素分割数を低減した

場合においても工学的に妥当な数値解析結果を得るための方策を提案している。具体的には、曲げ破壊型 RC 桁を対象にコンクリート要素の軸方向要素長が基準の要素長よりも大きい場合に対して破壊エネルギー等価の概念（以後、 G_f ）を導入し、換算引張強度を用いて解析を行うものである。本論文では、実規模単純支持 RC 桁に関する重錘落下衝撃実験結果を対象に数値解析を実施し、実験結果と比較することにより提案手法の妥当性に関する検討を行っている。なお、本研究では、三次元有限要素法に基づいた衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA (ver.970)⁴⁾を用いている。

2. 実規模 RC 桁を用いた重錘落下衝撃実験の概要

2.1 試験体の概要

図-1に RC 桁の形状寸法と配筋状況図および各測定項目を示している。実験に使用する試験体は、実 RC 製 覆工頂版の設計断面緒元を基に決定した。試験体の断面は、梁幅を道路軸方向単位長さである 100 cm、梁高を実 覆工の頂版厚よりも若干低い 85 cm とする矩形断面とし、純スパン長を実覆工の内空幅と同程度である 8 m とした。軸方向鉄筋およびコンクリートのかぶりは実覆工と同格とした。すなわち、引張側の軸方向鉄筋は主鉄筋比を 0.64 % として D29 を 7 本配置し、圧縮側の軸方向鉄筋は引張側鉄筋比の 50 % を目安に D29 を 4 本配置した。また、コンクリートのかぶりは 150 mm としている。帯鉄筋の配置間隔は、梁の有効高さの 1/2 以下となるようにすることとし、D13 を 250 mm 間隔で配置した。なお、試験体は曲げ破壊先行型とするために、中間帯鉄筋を配置してせん断耐力を向上させることとした。

表-1には RC 桁の静的設計値の一覧を示している。表中、静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} はコンクリート標準示方書⁵⁾（以後、示方書）に基づいて算

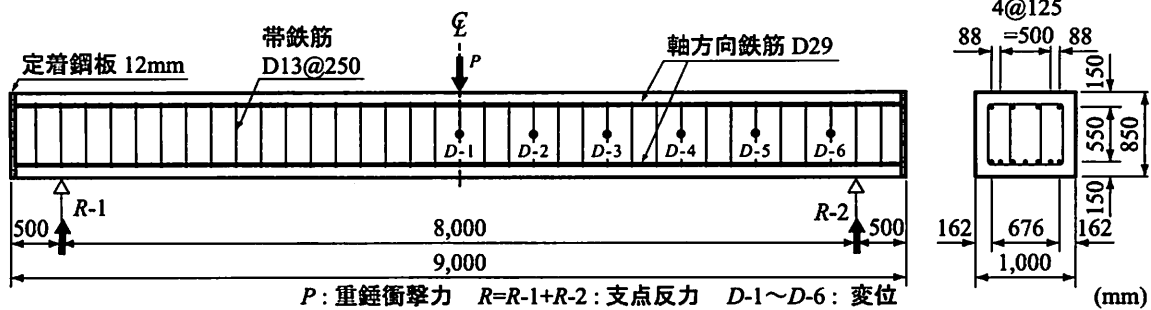


図-1 RC 桁の形状寸法および配筋状況図

表-1 静的設計値

主鉄筋比 p_t	せん断 スパン比 a/d	計算曲げ 耐力 $P_{usc}(kN)$	計算せん断 耐力 $V_{usc}(kN)$	計算せん断 余裕度 α
0.0064	5.71	621	1,794	2.89

表-2 コンクリートの力学的特性値

材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比 ν_c
43	31.2	25.4	0.177

表-3 鉄筋の力学的特性値一覧

鉄筋名称	鋼材種	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D13	SD345	390	206	0.3
D29		401		

定している。試験体のせん断余裕度が $\alpha (= V_{usc} / P_{usc}) > 1.0$ であることより、静載荷時には設計的に曲げ破壊型で終局に至ることが推察される。

表-2, 3 には、実験時におけるコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

2.2 実験方法

本実験では、2,000 kg 重錘をトラッククレーンを用いて所定の高さまで吊り上げ、脱着装置を用いて RC 桁のスパン中央部に自由落下させることにより行っている。落下高さは、桁高 1 m、落下高さを 20 m とする場合に、スパン長の 1% 弱程度の残留変位で桁側面かぶりコンクリートが大きく剥落して終局に至っていることより³⁾、本研究では、重錘落下高さを 10 m に設定して実験を行っている。

なお、重錘は直径 1 m、高さ 970 mm で底部が半径 800 mm の球形状の鋼製円筒内部に鋼塊とコンクリートを充填して質量を調整している。

RC 桁は支点反力測定用ロードセル付きの支点治具上に設置し、かつ重錘落下衝突時の桁端部の跳ね上がりを防止するために、直径 50 mm の鋼棒と押さえ用鋼梁からなる跳ね上がり防止用治具を用いて固定している。な

お、治具は支点と共に回転できるように工夫されている。従って、支点部の境界条件はピン支持に近い状態になっているものと推察される。

本実験における測定項目は、重錘衝撃力 P 、支点反力 R 、およびスパン方向各点の変位 $D-i$ ($i=1 \sim 6$) の各応答波形である。これらの測定において、重錘衝撃力に関しては重錘頂部に設置したひずみゲージ型加速度計 (応答周波数 1 kHz 以上、容量 1,000 G) から得られる負の加速度に重錘質量を乗じて評価している。支点反力の測定には起歪柱型衝撃荷重測定用ロードセル (応答周波数 1 kHz 以上、容量 1,500 G) を用いている。各点の変位測定には、非接触型レーザ式変位計 (応答周波数特性 915 Hz、計測範囲 200 mm) を用いている。

各センサーからの出力波形は、加速度計およびロードセルの場合には共にひずみゲージタイプであることより直流増幅器を、またレーザ式変位計の場合には専用のアンプユニットを介して増幅した後、サンプリングタイム 0.1 ms でデジタルデータレコーダにて一括収録を行っている。なお、重錘衝撃力波形に関しては、ノイズを含んだ高周波成分を除去するため、波形収録後に 0.5 ms の矩形移動平均法により数値的なフィルター処理を施している。

また、実験終了後には載荷点部、桁側面に生じたひび割れ分布をスケッチしている。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

図-2 には、本研究において基準解析モデルとなる要素分割状況を示している。解析モデルは RC 桁の対称性を考慮してスパン方向および断面の桁幅方向にそれぞれ 2 等分した 1/4 モデルとした。

適用した要素タイプは、軸方向鉄筋および帯鉄筋要素には剛性、断面積、重量を等価とした梁要素を用い、その他の要素は全て 8 節点の三次元固体要素とした。なお、総節点数および総要素数はそれぞれ 38,875, 34,832 である。

各構成要素に関するモデル化の詳細を述べると、RC 桁部は重錘落下衝撃実験に用いた桁の形状寸法に基づいて忠実にモデル化している。また、重錘部は、実形状に即

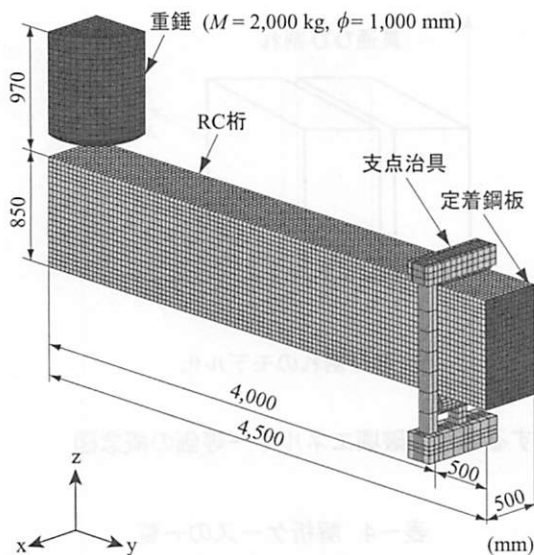


図-2 数値解析モデル

してモデル化している。重錘の内部要素には密度を除き全て鉄の材料物性値を用い、重錘質量 2,000 kg を重錘モデルの体積で除した値を密度として入力することで数値解析の簡略化を図っている。なお、予備解析を行い、重錘モデルの簡略化による数値解析への影響のないことを確認している。支点治具部は、前述の解析結果に即してロードセルや跳ね上がり防止用治具も含め実構造に即して忠実にモデル化することとした。なお、支点底部には、実験時と同様に治具全体の x 軸周りの回転のみを許容するように境界条件を設定している。

要素の積分点数に関しては、固体要素に対して 1 点積分を、梁要素に対して 4 点積分を行うこととしている。コンクリートと重錘および支点治具の要素間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。ただし、摩擦は考慮していない。また、コンクリートと鉄筋要素間には、完全付着を仮定している。衝撃荷重は、重錘要素を RC 桁に接触する形で配置し、その全節点に設定した衝突速度を付加することにより作用させている。質量に比例する粘性減衰定数は、RC 梁の最低次固有振動数に対して 1.5% を設定した。なお、全解析時間は重錘が RC 桁に衝突した時点から RC 桁がほぼ定常状態に至るまでの 400 ms 間としている。

3.2 材料物性モデル

図-3 には、コンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ特性を示している。以下に、コンクリートと鉄筋等に関する材料物性モデルの概要を述べる。

(1) コンクリート

図-3(a) には、コンクリート要素に関する応力-ひずみ特性を示している。コンクリート要素に用いる物性モデルに関しては、圧縮側に対しては折線近似による相当応力-相当ひずみ関係、引張側に対しては線形の相当応

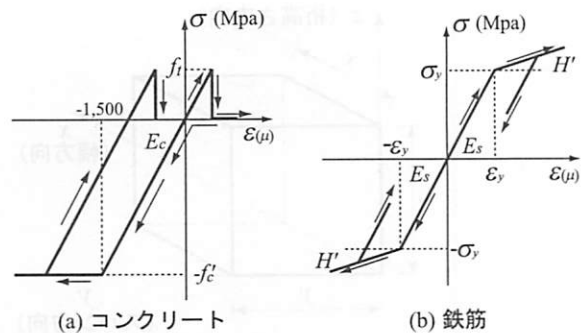


図-3 材料構成則モデル

力-相当ひずみ関係を仮定し、破壊圧力に達した段階で引張力を伝達しないとするモデルである。圧縮側に関しては、相当ひずみが 1,500 μ に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式⁶⁾を採用している。なお、引張強度は後述のように要素の軸方向要素長に依存して決定される換算引張強度 f_t を仮定する。また、引張側の圧力は、要素内に生じる 3 方向の直応力の平均値として評価している。

(2) 鉄筋

図-3(b) には、鉄筋要素に関する応力-ひずみ特性を示している。鉄筋要素に用いた物性モデルは、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルである。降伏応力 σ_y 、弾性係数 E_s およびポアソン比 ν_s には、表-3 に示されている値を採用している。また、単位体積質量 ρ_s には公称値である $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ を用いることとした。降伏の判定は von Mises の降伏条件に従うこととし、塑性硬化係数 H' は弾性係数 E_s の 1% と仮定している。

(3) 重錘、支点治具および定着鋼板

重錘、支点治具および定着鋼板に関する全要素に関しては、実験時に塑性変形が確認されていないことより、弾性体モデルを適用している。要素の弾性係数 E 、ポアソン比 ν 、単位体積質量 ρ には公称値を用いることとし、全部材で等しく、それぞれ $E = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu = 0.3$ 、 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定している。

4. コンクリート要素の引張破壊モデル

4.1 破壊エネルギー等価の概念

コンクリート要素の具体的な引張破壊モデルについて述べる。RC 構造を対象とした衝撃応答解析を前提に考えると、幅方向 (x 軸方向) へのひび割れの発生より、スパン方向 (y 軸方向) へのひび割れの分散分布を現実的に即して評価可能にすることが肝要である。これより、本論文では、スパン方向に比較的粗なひび割れ分布が発生する状態を想定し、図-4(a) に示されるようなコンクリート要素において、図-4(b) に示されるように幅方向と高さ方向に貫通する 1 個のひび割れが発生する状況を設定し、

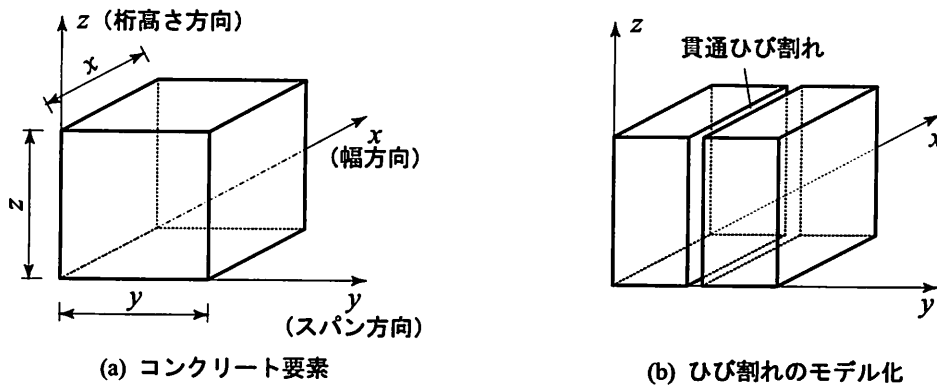


図-4 コンクリート要素に1個の貫通ひび割れが発生する場合の破壊エネルギー等価の概念図

そのひび割れ現象がスパン方向の要素長にかかわらず同一の引張破壊エネルギーのもとに発生するものと仮定した。また、そのエネルギーは要素のひずみエネルギーを用いて評価するものとする。本研究では離散ひび割れを仮定していないことより、数値解析的には要素のひずみエネルギーが引張破壊のレベルに達すると、要素に分散ひび割れが発生し引張力が伝達されない状態に至ることは勿論である。

本研究では、圧縮試験による圧縮強度 f'_c を圧縮側の降伏応力とし、引張強度 f_t は、基本要素に対しては、既往の研究¹⁾の場合と同様に圧縮強度の1/10(基準引張強度)と仮定している。また、要素長が変化する場合には、一要素に一個の曲げひび割れが発生するものと仮定し、基本要素長と等しいひずみエネルギーでひび割れの発生が考慮できるようにするため、コンクリートの軸方向要素長に対応した仮定の換算引張強度を設定することとした。

なお、軸方向要素長が y_i である要素の換算引張強度 f_{ti} は次式のように算定される。すなわち、

$$f_{ti} = f_{t0} \sqrt{\frac{y_0}{y_i}}$$

ここで、 f_{t0} はコンクリートの基準引張強度、 y_0 は基準となる要素の軸方向要素長である。

5. 提案の概念を用いた有限要素モデルの妥当性検討

5.1 解析ケース一覧

本研究では、実規模 RC 桁の衝撃応答解析において、軸方向の要素分割長が基準要素のそれと異なる場合に対して、提案の破壊エネルギー等価の概念を導入して換算引張強度を設定し、その概念を適用する場合の妥当性を実験結果と比較することにより検討を行う。また、分割数を種々変化させた場合の数値解析も実施し、その精度について同様に実験結果と比較検討を行うものとする。

軸方向の要素分割はせん断補強筋間隔(250 mm)に対して、1, 3, 5, 7 分割する場合について設定するものとする。なお、基準要素の軸方向要素長は、小型梁に関する

表-4 解析ケースの一覧

解析ケース	軸方向要素長 (mm)	総節点数	総要素数
MS250-N/ G_f	250.0	12,757	11,234
MS83-N/ G_f	83.3	21,493	18,914
MS50-N/ G_f	50.0	29,593	26,456
MS35-N/ G_f	35.7	38,875	34,832

表-5 換算引張強度の一覧

解析ケース	換算引張強度 (MPa)	G_f の有無
MS250/83/50/35-N	3.12	無し
MS250- G_f	1.18	有り
MS83- G_f	2.04	
MS50- G_f	2.64	
MS35- G_f	3.12	

解析結果の下に上述の7分割時の要素長 35.7 mm とした。表-4には、本研究で実施した解析ケースの一覧を示している。表中、記号"MS"に続く数字は各要素の軸方向要素長の概略値 (mm) を意味している。また、ハイフンで繋がれている"N"は正規のコンクリートとして処理し、破壊エネルギー等価の概念を適用しない場合であり、" G_f "は破壊エネルギー等価の概念を適用し換算引張強度を設定する場合である。表-5には、各解析ケースに関する換算引張強度の一覧を示している。

5.2 G_f を考慮しない場合

前項で設定した軸方向要素長の異なる4種類の有限要素モデルに関して、破壊エネルギー等価の概念を適用する場合と適用しない場合(以後、簡略化して G_f 考慮の有無)に関する数値解析を行い、実験結果と比較検討を行った。

図-5には G_f を考慮しない場合における各数値解析結果を実験結果と比較して示している。図-5(a)より実験結果の重錘衝撃力波形に着目すると、衝撃初期には継続時間が3.5 ms前後で最大振幅が12,000 kN程度の正弦半波状の主波動が湧起している。一方、解析結果を見るといず

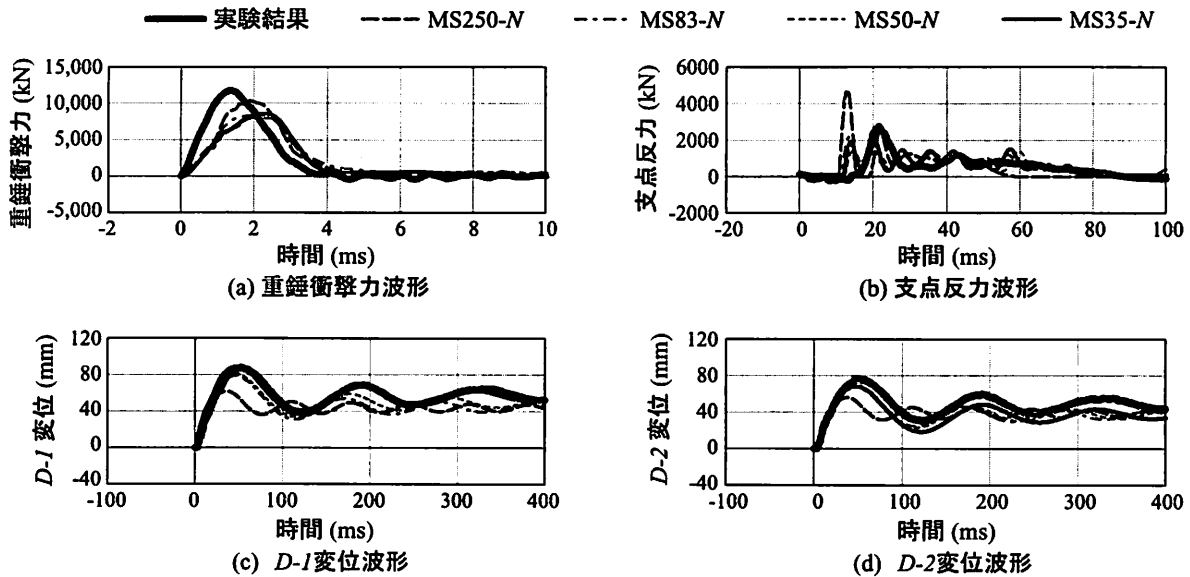


図-5 G_f を考慮しない場合における各応答波形の比較図

れの場合においても、波形の初期勾配および最大振幅は実験結果と比較して小さいものの、実験結果と大略類似の波形性状を示している。また、重錘衝撃力波形に関しては要素長の大きさによる影響が小さいことがわかる。

図-5 (b) より実験結果の支点反力波形に着目すると、正反力は重錘衝突時点より遅れて励起していることが分かる。また、全体波形は継続時間が 70 ms 程度の正弦半波波形と周期が 20 ms 程度の正弦減衰波が合成された波形性状を示している。解析結果を見ると、MS250-N の場合には、要素長が大きいため RC 桁の剛性が大きく評価されることにより、衝撃初期に継続時間が短く振幅の大きい波形が生じており、かつ主波動の継続時間が 55 ms 程度と実験結果より小さいことがわかる。また、波形の立ち上がり時間が 5 ms 程度実験結果よりも早い。MS83/50/35-N の場合に関しては、MS250-N の場合と同様に波形の立ち上がり時間は 5 ms 程度実験結果よりも早いものの、主波動の振幅や波動継続時間は大略類似の性状を示しているものと判断され、要素長の大きさによる影響が小さいことがわかる。

図-5 (c), (d) より実験結果の D-1/2 の変位波形を見ると、変位波形は重錘衝突後に最大変位を示す第 1 波目の正弦半波から除荷後の自由振動波形から構成される波形性状を示している。載荷点から支点方向に離れている D-2 では、振幅も減少している。また、各波形も時間の経過とともに減衰の傾向を示しているが、零レベルまでは低減せず変位が残留していることがわかる。解析結果を見ると、MS250-N の場合には、D-1/2 共に最大応答変位は実験結果より 25 % 程度小さかつ除荷後の自由振動状態における振動周期は実験結果の約 1/2 程度と小さい。これより、損傷の程度が過小に評価されていることが推察される。MS83/50-N の場合には、最大応答変位は実験結果に近い値を示しているものの、自由振動状態にお

ける振動周期は未だ対応するまでには至っていない。しかしながら、MS250-N と比較して要素長を小さくしたことにより解析精度が向上しているものと推察される。MS35-N に関しては、特に D-1 点において、ほぼ忠実に実験結果を再現していることがわかる。このような解析結果は、MS35 における要素を基準要素として設定したことが妥当であることを示唆している。

5.3 G_f を考慮する場合

図-6 には G_f を考慮する場合における各数値解析結果を実験結果と比較して示している。衝撃力波形に関しては、要素長の大きさにかかわらず大略実験結果と類似しているが、前述のように波形の初期勾配は実験結果より小さい。最大衝撃力値は、MS250 の場合が実験値に最も近い値を示している。

支点反力波形に関しても、衝撃力波形の場合と同様に要素長の大きさにかかわらず大略類似の応答性状を示していることがわかる。実験結果と比較すると、解析結果はいずれの場合も G_f を考慮しない場合と同様に、波形の立ち上がり時間が 5 ms 程度実験結果よりも早いものの、主波動の振幅や波動継続時間は大略類似の性状を示している。

変位波形に関しては、要素長の大きさにかかわらず D-1/2 共に最大変位や除荷後の自由振動状態における振幅や周期および残留変位成分等いずれも実験結果と大略対応していることがわかる。詳細に見ると、誤差の程度は大きくないものの 4 ケースの中で実験結果を最も過小に評価しているケースは、MS83 の場合である。要素長の最も大きい MS250 の解析結果は、MS35 の場合と同程度の分布性状を示しており、要素分割が粗い場合においても解析精度が十分確保されていることが確認できる。このことは、軸方向要素長が基準要素と異なる場合においても、スターラップの配筋間隔と同じ程度（基準要素長の 7 倍）

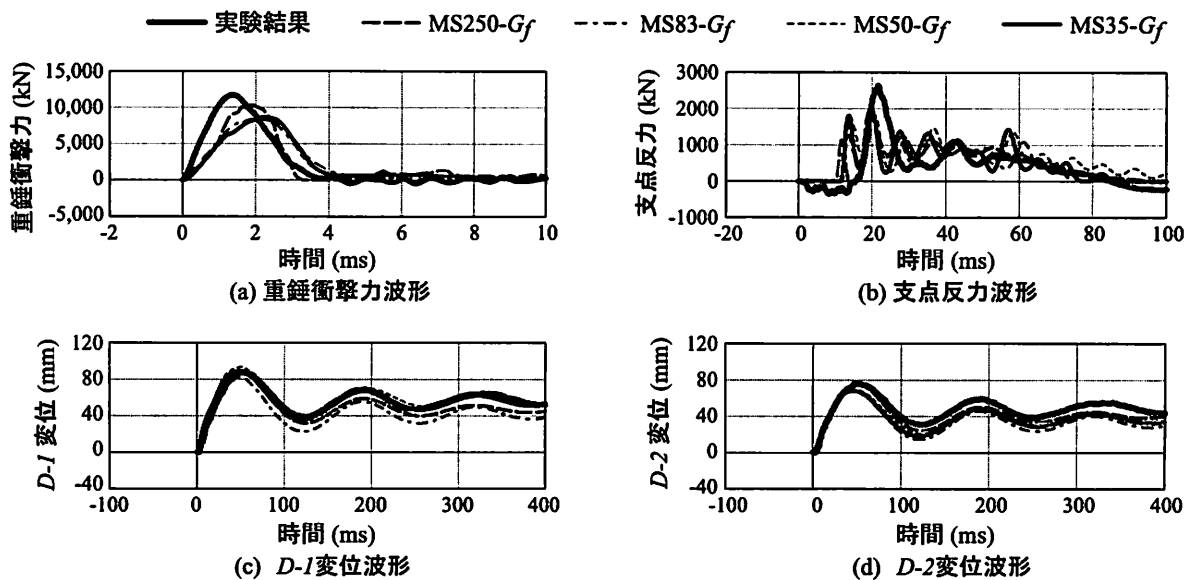


図-6 G_f を考慮する場合における各応答波形の比較図

までは、破壊エネルギー等価の考え方に基いて換算し評価した引張強度を用いることにより、基準要素を用いる場合と同程度の精度を有する解析が可能であることを意味している。

以上より、軸方向の要素分割を粗にする場合においても、破壊エネルギー等価の概念を適用してコンクリート要素の引張強度を換算評価することによって、基準要素を適用する場合と同等の解析精度を保持した解析が可能であることが明らかになった。

6. まとめ

本研究では実規模 RC 桁の三次元弾塑性応答解析を対象に、粗な要素分割状態に対しても精度的に妥当な解析結果を保証する方策として、引張破壊エネルギー等価の概念を導入した換算引張強度算定法を提案し、軸方向要素長を変化させた数値解析を行い、実験結果と比較することによりその妥当性を検討した。数値解析は、過去の研究成果³⁾を基に、3方向の要素長が40～50 mmとなる直方体要素を基準要素として、曲げひび割れの発生を前提に軸方向要素長を変化させ、破壊エネルギー等価の概念を適用してコンクリート要素の引張強度を換算評価し、実施した。なお、コンクリート材料には Drucker-Prager の降伏条件式を適用し、かつ粘性減衰定数を $h = 1.5\%$ と仮定している。本研究の範囲で得られた結果を整理すると、以下の通りである。

- 1) RC 桁の実挙動において、基準要素と軸方向要素長の異なる要素に対しても、いずれも桁幅方向、桁高さ方向に貫通する1個のひび割れが発生するものと仮定し、破壊エネルギー等価の概念を導入して任意要

素の換算引張強度を算定する手法を提案した。

- 2) 軸方向要素長をせん断補強筋間隔と等しくする場合に対して、提案の手法を適用することにより基準要素を用いる場合と同程度の精度を有する数値解析が可能である。
- 3) それらの解析結果より、実験結果の支点反力波形に関しては主波動の振幅と波動継続時間、載荷点変位波形に関しては最大変位と除荷後の自由振動状態における振幅・周期および残留変位を適切に評価可能であることが明らかになった。
- 4) 衝撃荷重に関しては、波形の初期勾配と最大衝撃力に若干過小評価の傾向がある。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4
- 2) 土木学会: 構造工学シリーズ 15 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004.1
- 3) 岸 徳光, A.Q. Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉: 重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 52A, pp. 1261-1272, 2006.3
- 4) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6.
- 5) コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 構造性能照査編, 土木学会, 2002
- 6) Chen, W.F.: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill Book Company, 1982