

(1) 大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に資する静的曲げ耐力算定式の提案

Calculation formula kannti of static load-carrying capacity to contribute to a performance based impact resistant design method for large scale RC girders

今野久志*, 岡田慎哉**, 西 弘明***, 岸 徳光****
Hisashi Konno, Shin-ya Okada, Hiroaki Nishi and Norimitsu Kishi

- *博(工), 寒地土木研究所主任研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
**修(工), 寒地土木研究所研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
***博(工), 寒地土木研究所総括主任研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34)
****工博, 室蘭工業大学理事・教授, 建設システム工学科 (〒050-8585 北海道室蘭市水元町27-1)

Key Words : large scale RC beam, impact loading test, numerical analysis, Performance-based impact resistant design
キーワード: 大型RC梁, 重錘落下衝撃実験, 数値解析, 性能照査型耐衝撃設計

1. はじめに

近年, 様々な構造物の設計が許容応力度設計法から性能照査型設計法へ移行してきており, 落石防護施設等の設計においても各性能規定に対する断面設計を可能とする性能照査型の耐衝撃設計法の確立が望まれている. しかしながら, 構造物の主要な構成要素である梁部材でさえも, 十分に合理的な耐衝撃設計法が確立されていないのが現状である¹⁾. このことから, 筆者らは構造物の性能照査型耐衝撃設計法を確立するための基礎となる研究として, RC部材の性能照査型耐衝撃設計法に関する研究を進めてきており, 過去に実施した室内衝撃載荷実験結果を統一的に整理し, 曲げ破壊が卓越するRC梁に限定して耐衝撃設計法を提案している²⁾. RC梁の静的曲げ耐力を P_u (kN), 入力エネルギーを E (kN・m), 残留変位を δ (m) とすると, 提案式は以下のように示される.

$$P_u = 0.42 E / \delta \quad (1)$$

上記提案式は, 実験室レベルでの多様なRC梁の比較的広範囲な入力エネルギーに対応可能であり, 性能照査型耐衝撃設計法の確立に資する設計式と考えられる. 今後は, 実大規模のRC梁への適用性を検討し, さらなる適用範囲の拡大に努めることが肝要である. 提案式の適用範囲を大型RC梁まで拡大するためには, 小型RC梁における検討手法と同様に静的曲げ耐力の異なる各種大型RC梁に対する衝撃荷重載荷実験を実施する方法が考えられる. しかしながら, 大型RC梁の衝撃荷重載荷実験を数多く実施するためには莫大な実験費用が必要となり現実的ではない. 一方, 近年数値解析技術が向上しRC構造物等の耐衝撃挙動を精度よくシミュレート可能となっている³⁾.

そこで本研究では, 大型RC梁まで適用可能な性能照査型耐衝撃設計法を提案することを目的に, 筆者らが過去に実施した大型RC梁の衝撃載荷実験結果を基に, その耐衝撃挙動を精度よくシミュレート可能と判断された数値解析手法を用いて, パラメータスタディを実施した. 大型RC梁に対する実験では, 小型RC梁における実験結果と同様に残留変位が入力エネルギーに比例することが明らかとなっている⁴⁾. このことから, 大型RC梁の数値解析によるパラメータスタディにおいても解析結果の残留変位に着目するとともに, 耐衝撃挙動における重錘質量の影響についても検討を行った. これら数値解析結果を統一的に整理取りまとめることにより, 重錘質量の影響を考慮した大型RC梁の比較的広範囲な限界状態に対応可能な性能照査型耐衝撃設計法に資する静的曲げ耐力算定式を提案したので報告する.

2. 数値解析による大型RC梁のパラメータスタディ

2.1 解析ケース

図-1に, 解析を実施したRC梁の断面図および配筋状況を示す. 解析断面の名称は, Pの後ろに断面の種類, ハイフンの後ろにコンクリート標準示方書(以後, 示方書)に基づいて算定した静的曲げ耐力 P_{usc} の概略値(kN)を表示している.

解析を実施した大型RC梁は, 過去に重錘落下衝撃実験を実施したPB-880, PC-620の2種類を含む全9種類である. 大型RC梁は, PB-880, PC-620の形状寸法を参考に, 梁幅を1.0m, 梁長9.0m, 純スパン長8.0mを固定とし, 静的曲げ耐力が異なるように梁高および軸方向鉄筋量を調整している.

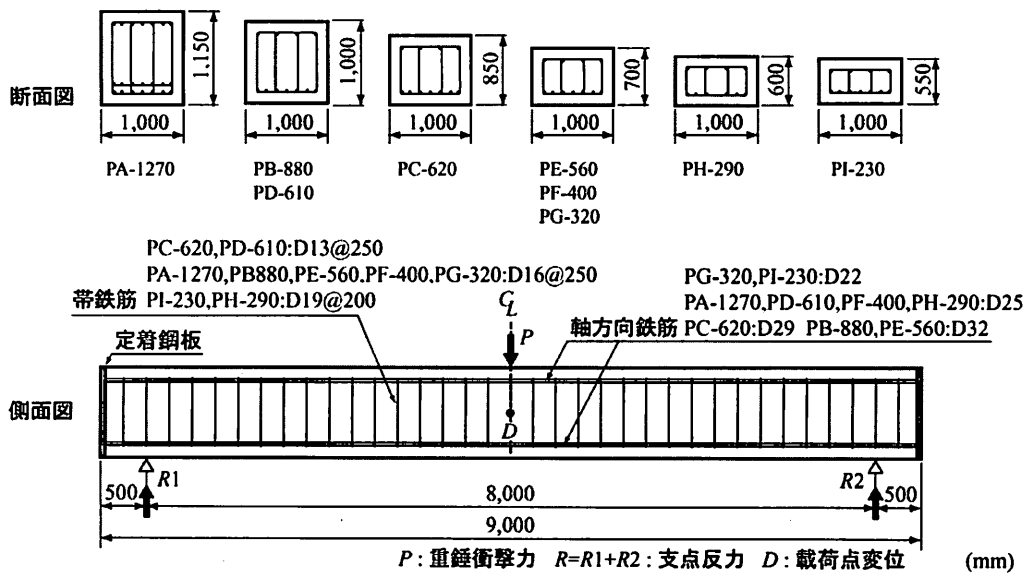


図-1 解析用大型RC梁の形状寸法および配筋状況

表-1 解析ケース一覧

| ケース名 | 静的曲げ耐力 Pusc(kN) | 静的せん断耐力 Vusc(kN) | せん断余裕度 asc | 重錘質量 W(t) | 梁質量 B(t) | 質量比 W/B | 入力エネルギー E(kJ) |
|---------|--------------------|---------------------|---------------|------------------|-------------|---------------------------|----------------------------|
| PA-1270 | 1,269 | 3,264 | 2.57 | 2, 28.7 | 23 | 0.09, 1.25 | 98, 147, 196, 245, 294 |
| PB-880 | 881 | 2,882 | 3.27 | 2, 5, 20, 25 | 20 | 0.1, 0.25, 1.0, 1.25 | 49, 98, 147, 196, 245 |
| PC-620 | 621 | 1,794 | 2.89 | 2, 21.25 | 17 | 0.12, 1.25 | 49, 98, 147, 196, 245 |
| PD-610 | 613 | 2,002 | 3.27 | 2, 5, 10, 20, 25 | 20 | 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 1.25 | 49, 98, 147, 196, 245 |
| PE-560 | 556 | 2,032 | 3.65 | 2, 17.5 | 14 | 0.14, 1.25 | 49, 98, 147, 196, 245 |
| PF-400 | 397 | 1,880 | 4.74 | 2, 17.5 | 14 | 0.14, 1.25 | 19.6, 39.2, 58.8, 78.4, 98 |
| PG-320 | 320 | 1,821 | 5.69 | 2, 17.5 | 14 | 0.14, 1.25 | 19.6, 39.2, 58.8, 78.4, 98 |
| PH-290 | 292 | 2,348 | 8.04 | 2, 15.0 | 12 | 0.17, 1.25 | 19.6, 39.2, 58.8, 78.4, 98 |
| PI-230 | 234 | 2,104 | 8.89 | 2, 13.7 | 11 | 0.18, 1.25 | 19.6, 39.2, 58.8, 78.4, 98 |

表-1に、解析ケースの一覧を示す。表中には解析用RC梁の種類、静的曲げ耐力 Pusc、静的せん断耐力 Vusc、せん断余裕度 asc (=Vusc/Pusc)、重錘質量 W、支点間の梁質量 B、質量比 W/B、入力エネルギー E を示している。なお、Pusc、Vusc は、それぞれ示方書に基づいて算定した静的曲げ耐力、静的せん断耐力である。表より、本解析断面のせん断余裕度はいずれも asc > 1.0 であり、設計的には静载荷時に曲げ破壊型で終局に至る。解析における重錘質量については、PB-880、PC-620 の重錘落下衝撃実験と同様に質量 2 ton の重錘を衝突させる解析ケースを基本とし、入力エネルギーについては実験時の大型 RC 梁の損傷状況等を考慮し 49 kJ から 245 kJ まで 49 kJ ピッチで 5 段階を設定した。ただし、静的曲げ耐力が最も大きい PA-1270 については 98 kJ から 294 kJ までの 5 段階、静的曲げ耐力が小さい PF-400 から PI-230 までの 4 種類については 19.6 kJ から 98 kJ までの 5 段階とし静的曲げ耐力の大小によって入力エネルギーを調整している。さらに、PB-880 および PC-620 では、質量比 W/B の影響を検討するための解析ケースを設定した。以上のような考えに基づいて設定した解析ケース数は全 115 ケースである。

2.2 数値解析概要

(1)非線形衝撃応答解析コード

本数値解析に用いた構造解析プログラムは、解析手法に有限要素法を用いた非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA(ver.970) である。LS-DYNA は、構造物の大変形問題、衝突体と被衝突体との接触問題等の非線形問題を解析することが可能なコードである。

(2)数値解析モデル

図-2(a)に、数値解析モデルの一例として、PB-880 における要素分割状況を示す。解析対象は、大型 RC 梁の対称性を考慮してスパン方向および断面の梁幅方向にそれぞれ 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 3 次元固体要素とした。

図-2(b)に、PB-880 における軸方向鉄筋および帯鉄筋に関する有限要素モデルを示す。なお、総節点数および総要素数はそれぞれ 32,978 および 29,333 である。

各構成要素に関するモデル化の詳細を述べると、大型 RC 梁部は重錘落下衝撃実験に用いた梁の形状寸法に基

ついて忠実にモデル化している。ただし、軸方向鉄筋および帯鉄筋のモデル化には梁要素を用いているため、それらの要素は見かけ上体積や面積を持たない直線要素で表示される。また、重錘部は、実験で使用している重錘の実形状を参考にモデル化している。すなわち、重錘質量が 10 ton 未満の場合については直径 1.0 m、高さ 97 cm、底部が半径 80 cm の球状、重錘質量が 10 ton 以上の場合には、直径 1.25 m、高さ 95 cm、底部が半径 1.0 m の球状とし、密度を調節することにより所定の重錘質量としている。支点治具部は、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、支点の底部には、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。

要素の積分点に関しては、固体要素に対しては 1 点積分を、鉄筋のモデル化に用いている梁要素に対しては 4 点積分を行うこととしている。なお、固体要素の積分点数に関しては、コンクリートのひび割れの進展を精度良く追跡するためには要素分割数を多くすることが必要であることを前提に、ひび割れ進展を精度良く追跡することが梁全体の解析精度の向上に繋がるものと判断し、要素分割数を増加させかつ数値解析時間を短縮させるために 1 点積分を採用することとした。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。ここで定義している接触面は、2 面間の接触と分離に伴う解析が可能であり、ペナルティ法を適用して接触反力が算定可能となっている。ただし、摩擦は考慮していない。また、コンクリートと軸方向鉄筋要素間、コンクリートと帯鉄筋要素間には、完全付着を仮定している。衝撃荷重は、重錘要素を大型 RC 梁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初速度として付加することにより梁に衝突させ発生させることとした。なお、全解析時間は、重錘が大型 RC 梁に衝突した時点から RC 梁がほぼ定常状態に至るまでの 400 ms 間としている。また、減衰定数は質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して 1.5% と設定している。

(3)材料物性モデル

図-3に、本数値解析に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料構成則モデルを示す。コンクリート要素に用いた物性モデルは、LS-DYNA コードに組み込まれている弾塑性体モデルである。すなわち、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モデルである。ここでは、圧縮側に関しては、図-3(a)のように相当ひずみが 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。したがって、引張破壊に至った後、要素は引

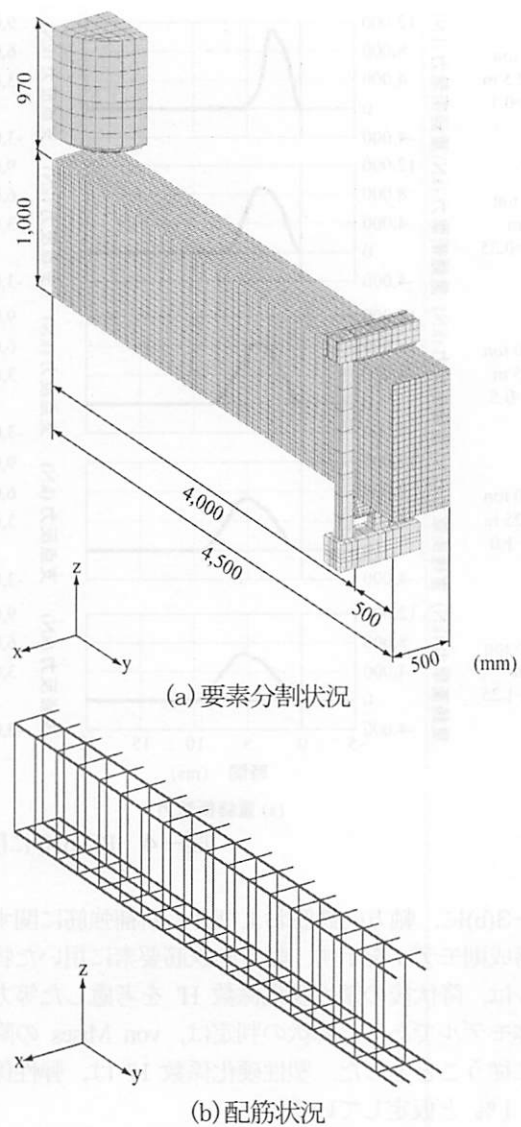


図-2 有限要素モデルの要素分割状況 (PB-880)

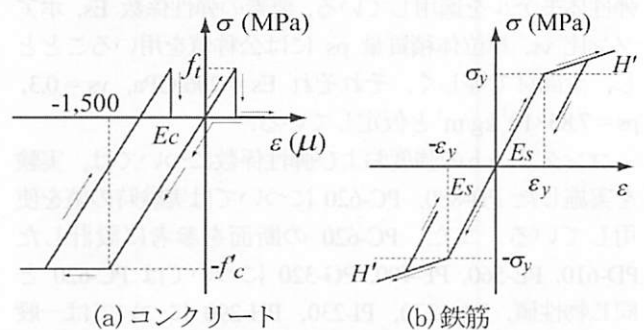
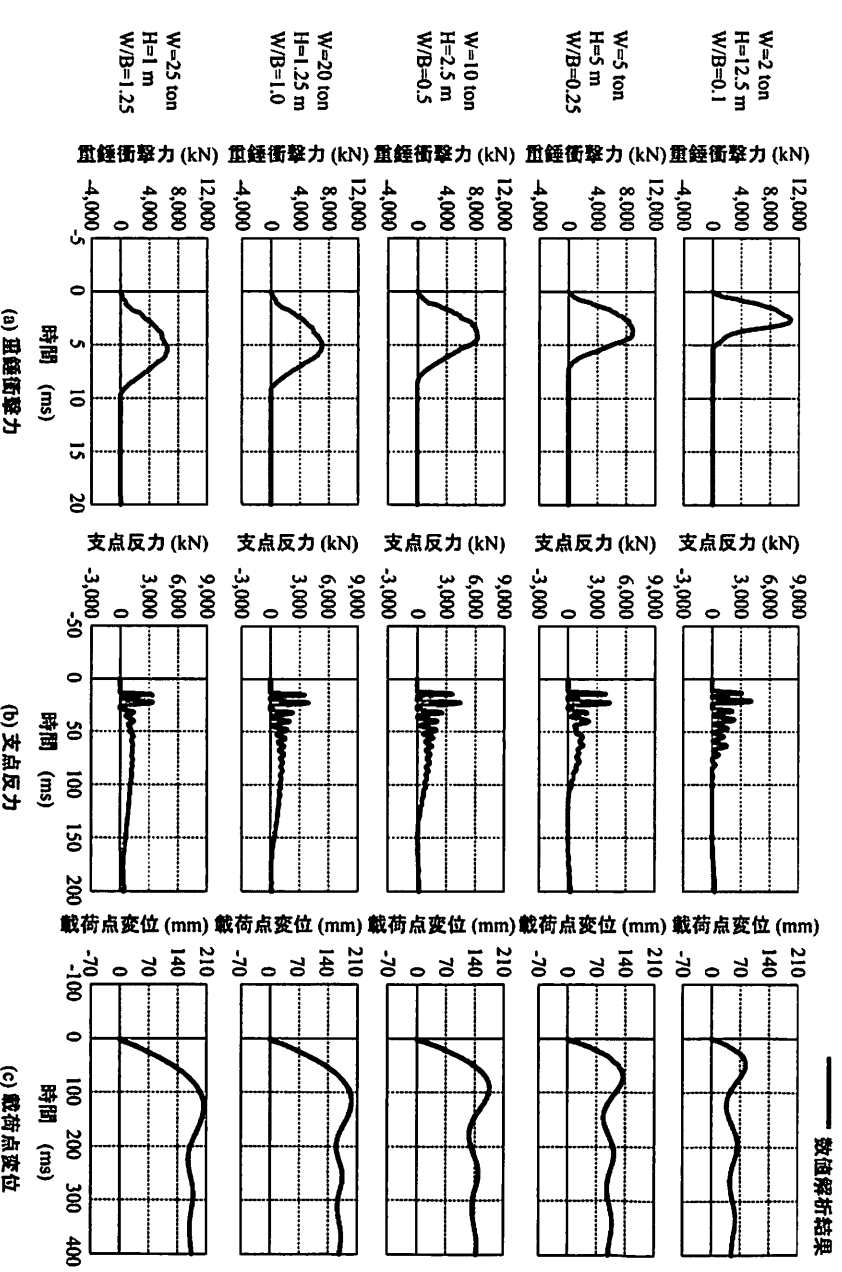


図-3 材料構成則モデル

張力を伝達することはできないが、圧縮力に対しては図-3(a)に即して伝達するように挙動することとなる。降伏の判定には Drucker - Prager の降伏条件式を採用している。なお、引張強度は過去の小型 RC 梁に関する数値解析の場合と同様に圧縮強度の 1/10 と仮定している。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。



図一4 PD-610に関する各応答波形 (E=245kJ)

図一3(b)に、軸方向鉄筋およびせん断補強筋に関する材料構成則モデルを示す。軸方向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。降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととした。塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の1%と仮定している。

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、弾塑性体モデルを適用している。要素の弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s 、単位体積質量 ρ_s には公称値を用いることとし、全部材で等しく、それぞれ $E_s = 206 \text{ GPa}$ 、 $\nu_s = 0.3$ 、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と仮定している。

コンクリートの強度および弾性係数については、実験を実施した PB-880, PC-620 については実験時の値を使用している。また、PC-620 の断面を参考に設計した PD-610, PE-560, PF-400, PG-320 については PC-620 と同じ物性値、PA-1270, PI-230, PH-290 については一般的な物性値を採用した。鉄筋の強度および弾性係数については、実験を実施した PB-880, PC-620 については実験時の値を使用し、それ以外の大型 RC 梁については PB-880 および PC-620 の物性値を参考に決定している。

3. 数値解析結果

3. 1 重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位波形

図一4には、入力エネルギーを $E = 245 \text{ kJ}$ とし、質量

比 W/B を 0.1 から 1.25 まで 5 段階に変化させた PD-610 に対する数値解析結果の重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位の各応答波形を示している。

重錘衝撃力についてみると、いずれの質量比においても正弦半波状の波形性状を示しているものの、質量比が大きくなるに従って振幅が小さくなるとともに、ピーク値発生までの時間や波形の継続時間が長くなる傾向が示されている。

一方、載荷点変位については質量比の増加とともに最大変位と残留変位および周期が増加する傾向が示されている。このことは、入力エネルギーが等しい場合には、重錘質量が大きく重錘落下高さの小さい場合の最大変位および残留変位は、重錘質量が小さく重錘落下高さの大きい場合よりも大きくなる傾向を示すことを意味している。

支点反力波形は、重錘衝突初期の周期が短く振幅の大きい正弦半波とその後に続く周期が長く振幅の小さい正弦半波が合成されたような波形性状を示している。PD-610 の場合には、質量比の増加とともに支点反力のピーク値が減少するとともに波形の継続時間が長くなる傾向が示されている。

他の数値解析ケースにおける各応答波形についても支点反力波形の波形性状が若干異なっている場合があるものの、重錘衝撃力および載荷点変位波形はほぼ同様の性状を示している。

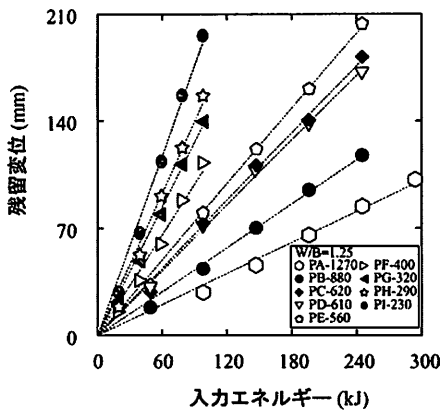


図-5 残留変位と入力エネルギーの関係 (W/B=1.25)

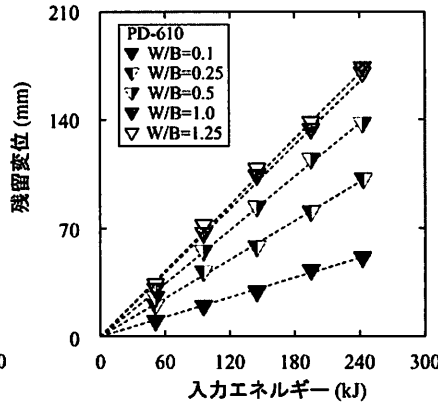


図-6 残留変位と入力エネルギーの関係 (PD-610)

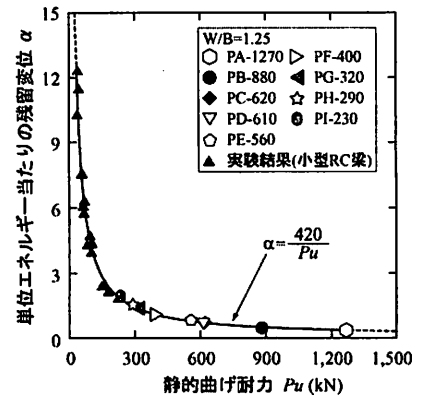


図-7 各種 RC 梁の残留変位係数 α と静的曲げ耐力の関係

3.2 残留変位と入力エネルギーの関係

図-5には、質量比 $W/B = 1.25$ における全 RC 梁の残留変位と入力エネルギーの関係を示している。全 RC 梁において、残留変位は入力エネルギーの増加に対して、ほぼ線形に増大する傾向を示している。また、同一の入力エネルギーに対しては静的曲げ耐力の大きい RC 梁ほど残留変位が小さくなる傾向が示されている。これらの傾向は質量比が 0.1 程度と小さい場合においても同様である。また、最大載荷点変位と入力エネルギーの関係においても同様の傾向にあることを確認している。

図-6には、質量比を 0.1 から 1.25 まで変化した場合の PD-610 における残留変位と入力エネルギーの関係を示している。図より、静的曲げ耐力および入力エネルギーが等しい場合には、質量比が大きい場合（すなわち、重錘重量が大きい場合）には残留変位も大きくなることわかる。また、残留変位に対する質量比の影響は質量比の小さい領域ほど大きく示されており、質量比が 1.0 以上では残留変位に対する質量比の影響は認められない。

以上のように、残留変位と入力エネルギーの関係には極めて高い相関があり、RC 梁の種類や入力エネルギーの大小、言い換えれば損傷の状況や損傷程度に関わらず、極めて普遍性の高い関係であることが大型 RC 梁に関する数値解析結果からも明らかとなった。

なお、図-5および図-6の図中に示されている直線は、原点を通る直線で最小二乗法により近似した結果である。厳密には、残留変位が零、つまり各 RC 梁が弾性応答する入力エネルギー範囲が存在する。しかしながら、弾性応答の入力エネルギー範囲が本解析結果や過去に実施された実験結果からも非常に小さいことが明らかであることより、入力エネルギーと残留変位の間をより単純な形で整理するために直線近似したものである。

4. 性能照査型耐衝撃設計法に適用可能な設計式の提案

筆者らは、過去に実施した 36 体の小型 RC 梁の単一衝撃載荷実験結果を統一的に整理し、図-5と同様に残

留変位と入力エネルギーの関係を整理している。残留変位 δ は近似直線の勾配を α とし、入力エネルギーを E とすると式 (2) で与えられる。

$$\delta = \alpha \cdot E \quad (2)$$

ここで、 δ : 残留変位(mm), E : 入力エネルギー (kN・m) であり、勾配 α は単位エネルギー当たりの残留変位に關与する N^{-1} の単位を有する指標となっている。また、直線勾配 α は全般的に静的曲げ耐力の大きな試験体ほど小さい傾向にあることが実験結果から示される。静的曲げ耐力と単位エネルギー当たりの残留変位 α (以後、残留変位係数) について整理すると、静的曲げ耐力と残留変位係数 α には高い相関が認められる。その近似曲線を求めると α は静的曲げ耐力の逆数に比例し、その係数を最小二乗法により求めると、以下のように表すことができる。

$$\alpha = 420/P_u \quad (3)$$

ここで、 P_u : 静的曲げ耐力(kN)

図-7は、大型 RC 梁の数値解析結果より求めた図-5の残留変位係数 α と静的曲げ耐力の関係を式 (3) で示される近似曲線とともに示したものである。図より、近似曲線は質量比 W/B が 1.25 の大型 RC 梁の α と非常に整合がよいことがわかる。これは小型 RC 梁に対する実験での質量比が平均で 1.23 と大きい場合を対象として整理されたためと考えられる。

次に、質量比が異なる場合の大型 RC 梁の静的曲げ耐力と α の関係を表す近似曲線を求めるために質量比 W/B に関する補正係数の算出を試みる。

図-8は、PD-610 に対する数値解析結果の質量比 W/B と各解析結果による残留変位 δ に対して、質量比 $W/B=1.25$ の場合の残留変位を 1.0 としたときの相対残留変位との関係を示している。これらの値より最小二乗法を適用して近似曲線を求めると、以下のように示される。

$$\beta = 0.288 \ln(W/B) + 0.9605 \quad (4)$$

ここで、 β : 質量比に対する残留変位の補正係数

W/B : 質量比

W : 重錘質量(kg)

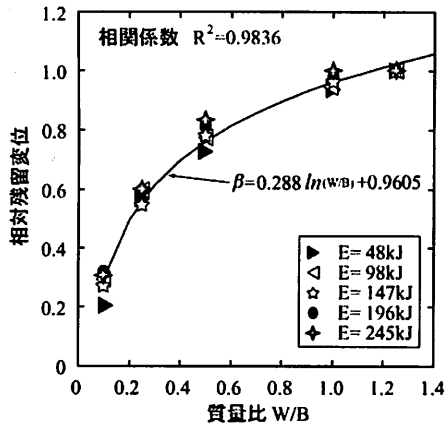


図-8 相対残留変位と質量比の関係

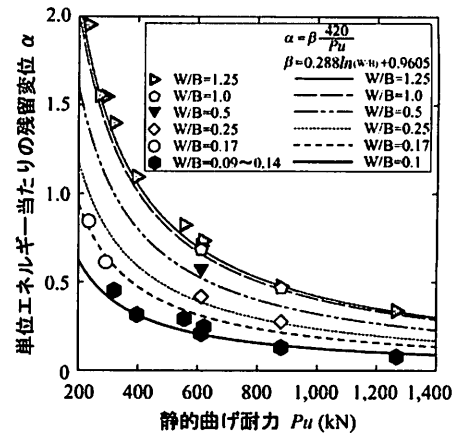


図-9 質量比を考慮した大型RC梁の α と静的曲げ耐力の関係

B: 大型RC梁の支点間質量(kg)

式(3)に対して質量比による残留変位の補正係数を考慮すると、式(5)が得られる。

$$\alpha = 420\beta / Pu \quad (5)$$

図-9には、式(5)より質量比を0.1から1.25までの間で変化させた場合の α と静的曲げ耐力に関する近似曲線を示している。質量比に関して補正した近似曲線は、数値解析結果とよく整合していることがわかる。

以上の結果より、式(2)と式(5)を用いて整理すると、式(6)が得られる。

$$Pu = 0.42 \cdot \beta E / \delta \quad (6)$$

ここで、 Pu : 静的曲げ耐力 (kN), β : 質量比に関する補正係数, E : 入力エネルギー (kN・m), δ : 残留変位 (m) である。すなわち、想定する入力エネルギーに対して、残留変位を各種の限界状態に対応して規定すると、その規定値を満足するRC梁は式(6)より得られる静的曲げ耐力を有するRC梁を断面設計することで設計可能となる。

5. まとめ

衝撃載荷時に曲げ破壊が卓越する大型RC梁の性能照査型耐衝撃設計法を提案することを目的に、筆者らが過去に実施した静的曲げ耐力が異なる2種類の大型RC梁に対する衝撃荷重載荷実験結果を数値解析によりシミュレートし、解析結果の妥当性が検証された数値解析手法によるパラメータスタディを実施した。数値解析では純スパン長が8m、せん断余裕度 α_{sc} が2.0以上で、静的曲げ耐力が230kNから1,300kN程度までの9断面の大型RC梁に対して、入力エネルギーや質量比をパラメータとする全115ケースの数値解析を実施し、残留変位に着目して統一的な整理を行った。本研究により得られた結果を整理すると、以下の通りである。

1) 重錘質量Wと大型RC梁の支点間質量Bとの比である質量比W/Bが重錘衝撃力や残留変位等に影響を及ぼすことが数値解析結果により明らかとなった。

- 2) 全解析ケースで残留変位と入力エネルギーは小型RC梁に対する実験結果と同様に線形関係にあり、高い相関が認められた。また、直線の勾配は静的曲げ耐力の逆数と高い相関関係にあることが確認できた。
- 3) 上記関係を基に、残留変位と入力エネルギーを規定し、その規定値に対応した静的曲げ耐力を有するRC梁を断面設計することで、耐衝撃設計が可能となる設計式を提案した。
- 4) 提案式は、静的曲げ耐力を Pu (kN)、質量比に関する補正係数を β 、入力エネルギーを E (kN・m)、残留変位を δ (m) とすると、以下のように示される。

$$Pu = 0.42 \cdot \beta E / \delta$$

本提案式は、重錘と梁の質量比の異なる条件下において、大型RC梁の比較的広範囲な入力エネルギーに対応可能であり、性能照査型耐衝撃設計法の確立に資する設計式と考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 岸 徳光，三上 浩：衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越するRC梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.53A，pp.1251-1260，2007.3
- 3) 岸 徳光：三次元弾塑性有限要素法を用いた実規模RC桁の重錘落下衝撃挙動解析に関する精度検討，第8回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.259-271，2006.11
- 4) 今野久志，岸 徳光，石川博之，三上 浩：敷砂を設置した大型RC梁の重錘落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，2006.7
- 5) 岸 徳光，今野久志，三上 浩，岡田慎哉：大型RC梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.54A，pp.1077-1088，2008.3

(2008年11月7日受付)