

軽量コンクリートを用いたRC床版の 押抜きせん断耐荷力評価における低減係数の検討

Reduction Factor for Punching Shear Capacity of RC Slabs Using Lightweight Concrete

東山浩士^{*1}, 山本健太^{*2}

Hiroshi HIGASHIYAMA and Kenta YAMAMOTO

^{*1} 博 (工) 近畿大学 理工学部 社会環境工学科 (〒577-8502, 東大阪市小若江 3-4-1)

^{*2} 近畿大学 理工学部 社会環境工学科 (〒577-8502, 東大阪市小若江 3-4-1)

The purpose of this study is to verify a reduction factor for estimating the punching shear capacity of RC slabs using lightweight concrete by means of 3D non-linear finite element method program. Analytical results taking into account the characteristic length of lightweight concrete are able to well estimate the experimental results. Comparing the analytical results with an empirically proposed equation for the punching shear capacity of RC slabs using normal-weight concrete, validity of the experimentally derived reduction factor in author's past study was confirmed in this study and the reduction factor would be practically applicable to estimate the punching shear capacity of RC slabs using lightweight concrete. Furthermore, it was found that the reduction factor is remarkably related to the characteristic length of concrete.

Key Words: Lightweight concrete, RC slab, Punching shear capacity, Reduction factor, Non-linear finite element method

1. はじめに

コンクリート構造物への軽量化のニーズが高まる中、人工軽量骨材の使用が増加しつつある。一方、天然骨材の枯渇や採取制限、環境問題への対策として、産業副産物をコンクリート構造用骨材に有効利用する動きも活発化してきている。例えば、フライアッシュを原料とした骨材¹⁾、黄河の堆積物を原料とした骨材²⁾である。

軽量コンクリートの引張強度やヤング係数、破壊エネルギーは、普通コンクリートに比べて低くなるのが分かっている。これらの原因のひとつとして、骨材強度が低く、コンクリートの破壊時に骨材自身の割れを伴うためであるといえる。

著者のひとり、膨脹性頁岩を原料とした人工軽量骨材を用いた軽量コンクリートをRC床版に適用したときの耐荷力・耐久性について研究を行ってきた^{3),4)}。その結果、普通コンクリートを用いたRC床版(普通RC床版)に対する既往の押抜きせん断耐荷力算定式⁵⁾を適用した場合、軽量コンクリートを用いたRC床版(軽量RC床版)の押抜きせん断耐荷力は、算定値が実験値を過大に評価した。そこで、Hillerborgら⁶⁾が提案したコンクリートの脆性度を表す指標である「特性長さ」($l_{ch} = E_c G_f / f_t^2$, ここで、 E_c はヤング係数、 G_f は破壊エネルギー、 f_t は引張強度である。)の違いを考慮することによって耐荷力低下を表現できないか検討を行った。最終的に、低減係数は普通コンクリートと軽量コンクリートの単位容積質量の比で表され、実験結果を近似した低減係数式を誘導した。

本研究では、既往の研究⁴⁾にて提案した低減係数式について、その誘導過程を概説し、その後、非線形3次元有限要素法解析による軽量RC床版の押抜きせん断破壊挙動の解析的検討を行い、軽量RC床版の押抜きせん断耐荷力低下に関して、コンクリートの特性長さや単位容積質量との関係を調べ、既往の研究において提案した低減係数式の妥当性について検証することを目的とした。

2. 既往の押抜きせん断耐荷力評価方法

2.1 評価方法の概要

著者のひとり、軽量RC床版の押抜きせん断耐荷力について、次式に示す普通RC床版に対する算定式⁵⁾を用いた評価(ただし、中立軸の算出には軽量コンクリートのヤング係数を用いることとする。)を試みたところ、算定値が実験値を過大に評価することが分かった⁴⁾。

$$V_c = f_{cv} \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} + f_t \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m \} \quad (1)$$

$$f_{cv} = 0.656 f_c'^{0.606} \quad (2)$$

$$f_t = 0.269 f_c'^{2/3} \quad (3)$$

ここで、 a , b は載荷板の主鉄筋、配力鉄筋方向の辺長(mm)、 x_m , x_d は主鉄筋、配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した時の中立軸深さ(mm)、 d_m , d_d は引張側主鉄筋、配力鉄筋の有効高さ(mm)、 C_m , C_d は引張側主鉄筋、配力鉄筋のかぶり深さ(mm)、 f_c' ,

f_{cv} , f_t はコンクリートの圧縮強度 (N/mm²), せん断強度 (N/mm²), 引張強度 (N/mm²)である。

この理由として, 軽量コンクリートの引張強度やせん断強度, 破壊エネルギーが普通コンクリートに比べて低下することが考えられる。そこで, 式(1)~式(3)より算定される押抜きせん断耐荷力値に低減係数を乗じることによって軽量 RC 床版の押抜きせん断耐荷力を評価しようとした。その誘導過程を以下に述べる。

2.2 低減係数

既往の研究⁴⁾において, 低減係数は普通コンクリートと軽量コンクリートの特性長さの比により表現できると仮定し, 軽量 RC 床版の押抜きせん断耐荷力を算定するための低減係数を次式のように表した。

$$\alpha = k_1 + k_2 \left(\frac{l_{ch,L}}{l_{ch,N}} \right) \quad (4)$$

ここで, k_1 および k_2 は定数, $l_{ch,L}$ は軽量コンクリートの特性長さ, $l_{ch,N}$ は普通コンクリートの特性長さである。

式(4)の第2項目は, それぞれのコンクリートのヤング係数, 破壊エネルギーおよび引張強度から次式のように表すことができる。

$$\frac{l_{ch,L}}{l_{ch,N}} = \left(\frac{E_{c,L}}{E_{c,N}} \right) \left(\frac{G_{f,L}}{G_{f,N}} \right) \left(\frac{f_{t,N}}{f_{t,L}} \right)^2 \quad (5)$$

ここで, それぞれの変数について, 記号 L は軽量コンクリート, N は普通コンクリートを表している。

Eurocode 2⁷⁾では, 軽量コンクリートの引張強度について, 普通コンクリートの引張強度に低減係数を乗じた次式が提案されている。

$$f_{t,L} = k \cdot f_{t,N} \quad (6)$$

$$k = 0.4 + 0.6 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (7)$$

ここで, ρ はコンクリートの単位容積質量 (kg/m³), $\rho_0 = 2400$ kg/m³である。

次に, 日本建築学会の RC 基準⁸⁾では, コンクリートのヤング係数について, 圧縮強度と単位容積質量に関連付けた次式が提案されている。

$$E_c = 2.1 \times 10^5 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{1.5} \sqrt{\frac{f'_c}{200}} \quad (8)$$

ここで, f'_c は圧縮強度 (kgf/cm²), ρ はコンクリートの単位容積質量 (t/m³), $\rho_0 = 2.3$ t/m³である。

コンクリートの破壊エネルギーは, これまでにいくつかの推定式⁹⁾が提案されているが, これらのほとんどが普通コンクリートに関するものである。したがって, 既往の研究⁴⁾では, 軽量コンクリートの破壊エネルギーに関する文献を収集し, それらのデータから,

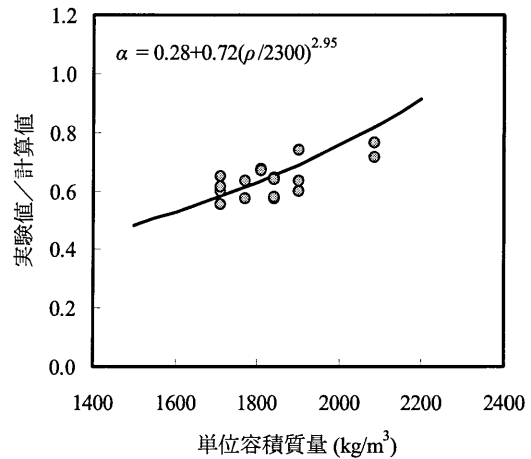


図- 1 低減係数と単位容積質量の関係

コンクリートの圧縮強度と単位容積質量に関連付けた次式を提案した。

$$G_f = 2.85 \sqrt{f'_c} (\rho/1000)^{2.45} \quad (9)$$

ここで, G_f は破壊エネルギー (N/m), f'_c は圧縮強度 (N/mm²), ρ はコンクリートの単位容積質量 (kg/m³)である。

最終的に, 式(5)~式(9)を式(4)に代入し, 図- 1に示す実験結果 (膨張性頁岩⁴⁾, フライアッシュを原料とした骨材¹⁾, 黄河の堆積物を原料とした骨材²⁾)を近似した次式の低減係数式とした。ここで, 図- 1の縦軸は, 実験値を式(1)~式(3)より算定される計算値で除した値であり, 低減係数を意味している。

$$\alpha = 0.28 + 0.72 \left(\frac{\rho}{2300} \right)^{2.95} \quad (10)$$

ここで, ρ はコンクリートの単位容積質量 (kg/m³)である。また, 基準となる普通コンクリートの単位容積質量は, 国内にて一般的に用いられる 2300kg/m³を採用した。

3. 非線形有限要素法解析

本解析では, 有限要素法プログラム ATENA¹⁰⁾を用いた非線形 3次元有限要素法解析を実施し, 4辺単純支持した軽量 RC 床版の押抜きせん断破壊挙動を調べた。解析に用いた有限要素は, 8節点アイソパラメトリックソリッド要素で, 数値積分に用いる Gauss 点数は 8点である。コンクリートのひび割れモデルは, 回転分散ひび割れモデルを採用した。また, コンクリートの構成則には, 破壊-降伏基準に基づいたモデルを採用した。詳細は文献¹⁰⁾を参照されたいが, このモデルでは, 全ひずみを弾性ひずみ, 塑性ひずみ, 破壊ひずみに分解し¹¹⁾, 塑性ひずみ成分は Menetrey-Willam の降伏基準¹²⁾に基づき, 破壊ひずみ成分は Rankine の破壊基準¹³⁾に基づき評価される。鉄筋は軸方向の剛性のみ

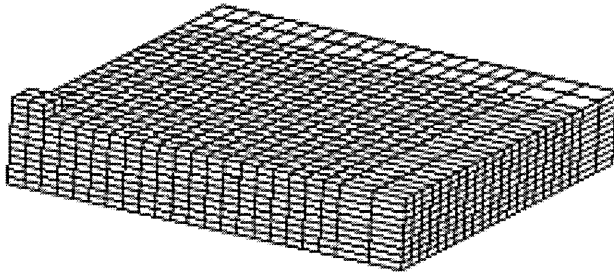


図- 2 要素分割モデル (対称 1/4 モデル)

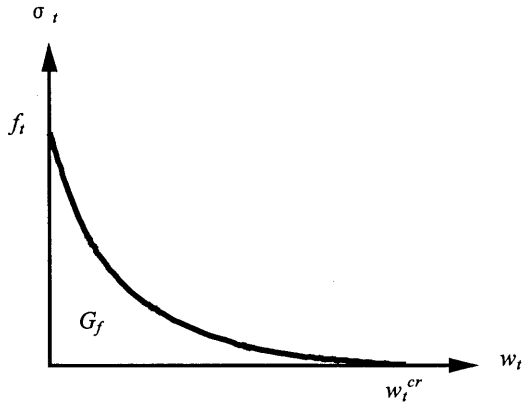


図- 3 引張軟化モデル

を考慮した完全付着はり要素とし、完全弾塑性モデルとした。解析モデル (床版寸法: 1200mm×1200mm) は、図- 2 に示すようにその対称性から 1/4 モデル (600mm×600mm) とした。また、要素は、コンピュータのメモリー制限から、厚さ方向の長さを 10mm、長手方向および奥行き方向の長さを 25mm となるように分割した。

荷荷は変位制御による増分解析を行い、収束計算には Newton-Raphson 法を用いた。

3.1 引張応力を受けるコンクリート

引張側の構成則では、引張強度に達するまで線形弾性関係を、それ以降は図- 3 および次式に示す応力-ひび割れ開口変位関係で定式化された指数関数型モデル¹⁴⁾とした。

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left\{ 1 + \left(c_1 \frac{w}{w_t^{cr}} \right)^3 \right\} \exp \left(-c_2 \frac{w}{w_t^{cr}} \right) - \frac{w}{w_t^{cr}} (1 + c_1^3) \exp(-c_2) \quad (11)$$

$$w_t^{cr} = 5.14 \frac{G_f}{f_t} \quad (12)$$

ここで、 f_t は引張強度、 w はひび割れ開口幅、 w_t^{cr} は限界ひび割れ開口幅、 G_f は破壊エネルギーである。なお、式(11)中の定数は $c_1=3.0$ 、 $c_2=6.93$ とした。

ひび割れ開口幅は、ひび割れ帯幅モデル¹⁵⁾に基づき、

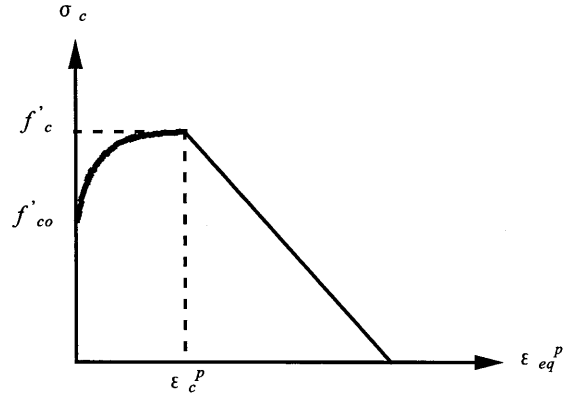


図- 4 圧縮応力-等価塑性ひずみモデル

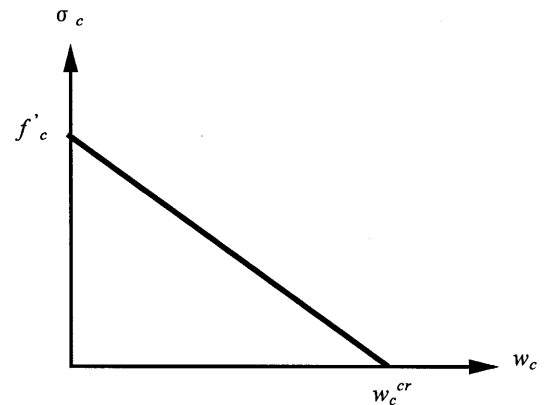


図- 5 圧縮軟化モデル

解の要素寸法依存性を低減させるよう等価長さを用いて破壊ひずみに変換される。なお、除荷時については、初期剛性を有する線形除荷モデルが採用されている。

3.2 圧縮応力を受けるコンクリート

圧縮側の構成則では、圧縮強度の 2/3 に達するまで線形弾性関係を、それ以降は図- 4 および次式に示す圧縮強度に至る応力-等価塑性ひずみ曲線で定式化されている。

$$\sigma_c = f'_{co} + (f'_c - f'_{co}) \sqrt{1 - \left(\frac{\epsilon_c^p - \epsilon_{eq}^p}{\epsilon_c^p} \right)^2} \quad (13)$$

$$f'_{co} = \frac{2}{3} f'_c \quad (14)$$

$$\epsilon_c^p = \frac{f'_c}{E_c} \quad (15)$$

ここで、 f'_c は圧縮強度、 ϵ_{eq}^p は圧縮強度に達するまでの等価塑性ひずみ、 E_c は初期ヤング係数である。

また、圧縮強度以降の軟化域は図- 5 および次式に示す圧縮応力が直線的に低下する応力-塑性変位関係で定式化されている。

$$\sigma_c = \left(1 - \frac{w_c}{w_c^{cr}} \right) f'_c \quad (16)$$

表- 1 試験体一覧と解析結果

床版	床版厚 (mm)	鉄筋量* (mm)		有効高さ (mm) 主鉄筋 配力鉄筋	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	コンクリート の種類	実験値 (kN)	解析値 (kN)
		主鉄筋	配力鉄筋							
No.1	100	D10@160 D10@80	D10@160 D10@80	80.0 70.5	28.6	—	25.9	普通	157.2	149.3
No.2	100	D10@160 D10@80	D10@160 D10@80	80.0 70.5	41.3	2.72	20.6	軽量	136.4	135.4
No.3	100	D10@240 D10@120	D10@240 D10@120	80.0 70.5	41.3	2.72	20.6	軽量	123.0	110.3
No.4	150	D10@160 D10@80	D10@160 D10@80	110.0 100.5	38.7	2.73	19.5	軽量	235.4	231.2
No.5	150	D10@240 D10@120	D10@240 D10@120	110.0 100.5	38.7	2.73	19.5	軽量	194.5	189.2

* 鉄筋量: 上段は圧縮鉄筋, 下段は引張鉄筋

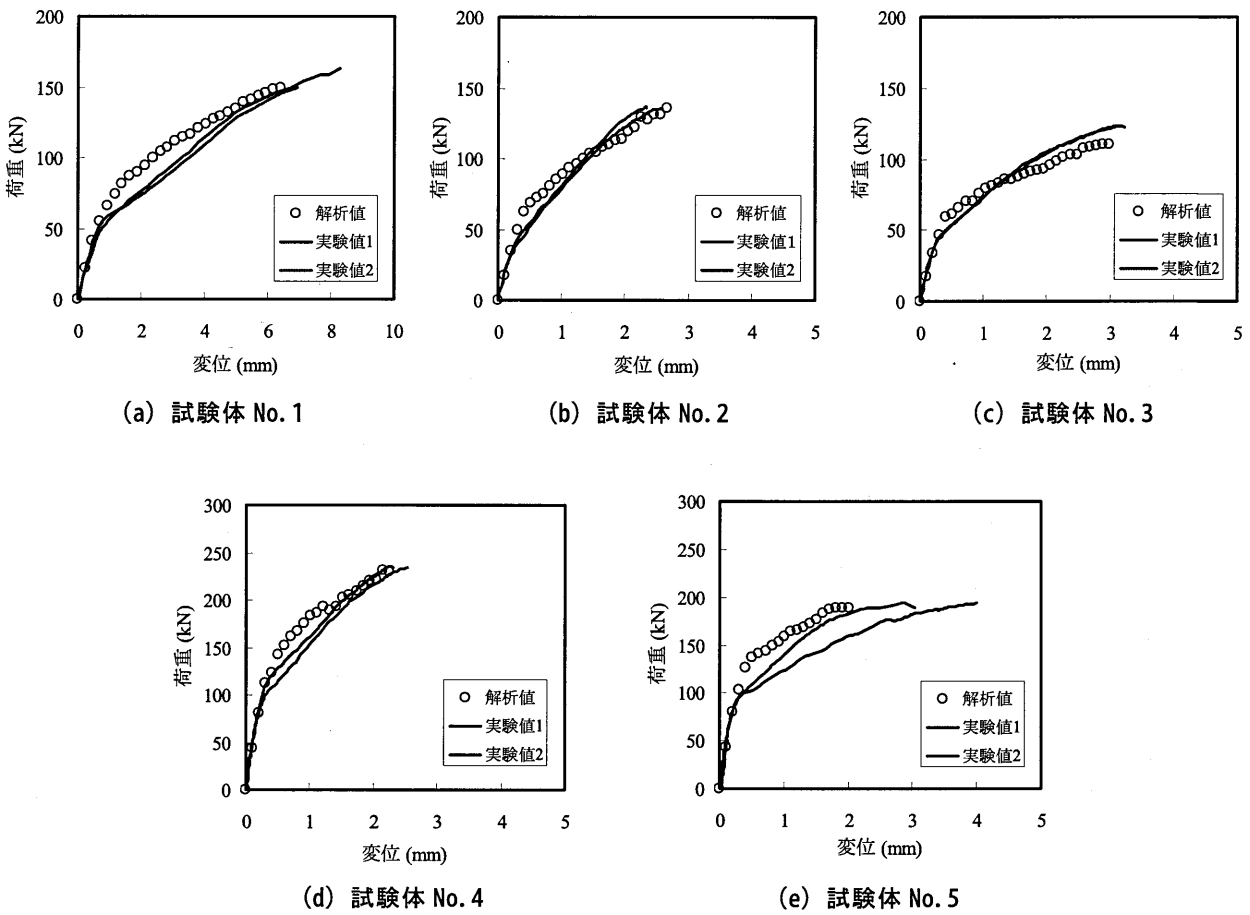


図- 6 解析精度の検証結果

ここで, w_c は塑性変位, w_c^{cr} は限界塑性変位である。

van Mier¹⁶⁾は普通コンクリートの圧縮実験から, 限界塑性変位を 0.5mm としている。軽量コンクリートの限界塑性変位は明らかでないため, 本解析では, 普通コンクリートと同じく 0.5mm とした。また, 塑性変位は, 引張におけるひび割れ帯幅モデルと同様な考えに基づき, 解の要素寸法依存性を低減させるよう等価長さを用いて等価塑性ひずみに変換される。なお, 除荷時については, 初期剛性を有する線形除荷モデルが採用されている。

3.3 解析精度の検証

本解析結果の精度を検証するために, 表- 1 に示す RC 床版 (普通コンクリートおよび軽量コンクリート) の押抜きせん断挙動を比較した。これらの押抜きせん断実験は, 床版寸法 1200mm×1200mm の試験体に対して, 床版支間長 1000mm の 4 辺単純支持の状態で行った。また, 荷重は 100mm×100mm の鋼製板を介して, 油圧ジャッキにより行った。

解析におけるコンクリートの破壊エネルギーは式 (9) より算出される値を, その他の材料定数は表- 1 に示した値を用いた。図- 6 から, 変形挙動は概ね最大荷重まで追跡できた。ただし, 試験体 No.5 の変位は解

表- 2 解析モデル

床版	床版寸法 (mm)	床版支間長 L (mm)	床版厚 t (mm)	平均鉄筋比 p (%)	平均有効高さ d (mm)
Model-1	1200×1200	1000	100	1.19	75
Model-2			150	1.17	105

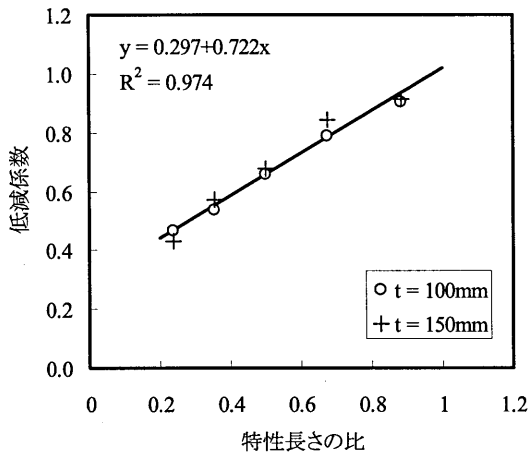


図- 7 低減係数と特性長さの比の関係

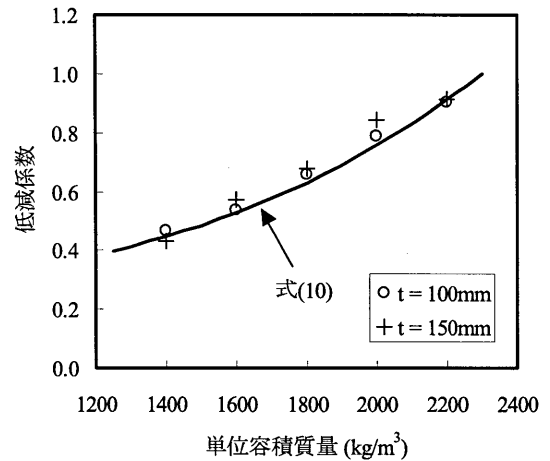


図- 8 低減係数と単位容積質量の関係

析値の方が小さい結果となった。また、表- 1 から、耐荷力に関しては、実験値に比べて 1~12%の範囲で解析値の方が小さい結果となったが、試験体 No.3 を除いて概ねよい精度で耐荷力を推定できたと判断される。

4. 低減係数とパラメトリック解析

4.1 低減係数の妥当性

既往の研究⁴⁾において、軽量 RC 床版の低減係数として提案した式(4)、あるいは式(10)の妥当性を検証するため、表- 2 に示す 2 つの解析モデル (床版厚: 100mm と 150mm) を用いてパラメトリック解析を行なった。すなわち、コンクリートの単位容積質量を 2200kg/m³~1400kg/m³ の範囲で 200kg/m³ 毎に変化させ、それに合わせて引張強度は式(3)、式(6)および式(7)、破壊エネルギーは式(9)、ヤング係数は式(8)より算出した値を用いて解析を行なった。なお、コンクリートの圧縮強度は 40N/mm² に固定した。

まず、低減係数を誘導した際の仮定である式(4)が妥当であるかどうかを検証するため、低減係数 (解析値/計算値) と特性長さの比 ($l_{ch,L}/l_{ch,N}$) の関係を図- 7 に示す。ここで、計算値は式(1)~式(3)より計算される押抜きせん断耐荷力である。ただし、中立軸の算出には軽量コンクリートのヤング係数を用いた。この結果より、低減係数 (解析値/計算値) は、特性長さの比 ($l_{ch,L}/l_{ch,N}$) と線形関係を有していることが分かる。このことから、低減係数を誘導した際の仮定である式(4)が妥当であったといえる。

次に、式(4)を基に誘導した低減係数式である式(10)の妥当性について検証した。図- 8 は、低減係数 (解析値/計算値) とコンクリートの単位容積質量の関係

を表している。図中の実線は式(10)である。この結果から、コンクリートの特性長さを構成している、引張強度、破壊エネルギーおよびヤング係数に関する算定式を式(4)に代入して誘導し、実験結果を近似した低減係数式 (式(10)) とよく一致することが分かる。

以上の結果から、既往の研究⁴⁾にて提案した低減係数式は軽量 RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定において適用可能であると判断できる。

4.2 パラメトリック解析

近年、軽量コンクリートの高強度化を目的とした高性能軽量骨材が研究開発^{1), 2)}される中、軽量コンクリートに要求される性能が高まっている。このようなことを視野に入れ、破壊力学パラメータである引張強度、破壊エネルギーおよびヤング係数を変化させたパラメトリック解析を行い、低減係数に及ぼす影響を調べた。

パラメトリック解析では、①引張強度を固定 (式(3)より得られる普通コンクリートの引張強度) し、単位容積質量に応じて破壊エネルギー (式(9)による.) とヤング係数 (式(8)による.) を変化させたケース、②破壊エネルギーを固定 (式(9)より得られる普通コンクリートの破壊エネルギー) し、単位容積質量に応じて引張強度 (式(3)、式(6)、式(7)による.) とヤング係数 (式(8)による.) を変化させたケースについて検討を行なった。ただし、コンクリートの圧縮強度を 40N/mm² に固定し、コンクリートの単位容積質量は、2200kg/m³~1400kg/m³ の範囲で 200kg/m³ 毎に変化させた。解析モデルは表- 2 の Model-1 を用いた。

解析結果を図- 9 に示す。また、図中の実線は式(10)である。この結果から、低減係数に及ぼす引張強度と破壊エネルギーの影響は、引張強度よりも破壊エネル

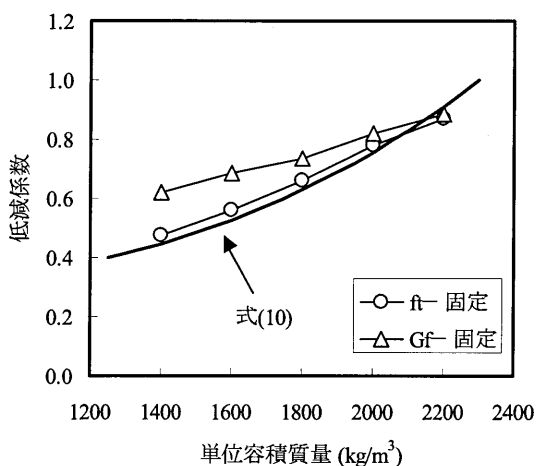


図- 9 パラメトリック解析の結果

ギーの方が顕著であることが分かる。すなわち、高性能軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力向上のためには、引張強度だけでなく、破壊エネルギーをも評価する必要があると示唆される結果となった。

5. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- (1) 軽量コンクリートの材料特性を用いた非線形 3 次元有限要素法解析により、軽量 RC 床版の押抜きせん断挙動と耐荷力を比較した結果、それらを概ね推定することができた。
- (2) 軽量 RC 床版の押抜きせん断耐荷力算定における低減係数は、軽量コンクリートと普通コンクリートの特性長さの比と線形関係を有することが明らかとなり、既往の研究にて提案した低減係数の妥当性を検証することができた。また、軽量コンクリートの単位容積質量で表した低減係数式は、解析結果とよく一致したことから、本研究にて検討した軽量骨材に関しては、この低減係数を適用した軽量 RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価が可能であると考えられる。
- (3) 引張強度、破壊エネルギーおよびヤング係数を変化させたパラメトリック解析の結果、低減係数に及ぼす引張強度と破壊エネルギーの影響は、引張強度よりも破壊エネルギーの方が顕著であることが分かった。これに関しては、パラメータを増した解析を今後も実施し、それらの影響を調べていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針（案），2001。
- 2) 伊藤 始，岩波光保，横田 弘：軽量コンクリー

トスラブの押抜きせん断特性に及ぼす PVA 短繊維の影響，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1321-1331，2005。

- 3) 東山浩士，水越睦視，松井繁之，小田憲司：軽量コンクリートを用いた RC 床版の押抜きせん断耐荷力の評価とその実用性に関する研究，コンクリート工学論文集，Vo.16，No.1，pp.45-54，2005。
- 4) 東山浩士，水越睦視，青木真材，松井繁之：破壊特性を考慮した軽量コンクリート RC 床版の押抜きせん断耐荷力評価手法，コンクリート工学論文集，Vo.17，No.2，pp.23-31，2006。
- 5) 前田幸雄，松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文報告集，第 348 号，pp.133-141，1984。
- 6) Hillerborg, A., Modeer, M., and Petersson, P.E.: Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol.6, pp.773-782, 1976.
- 7) Walraven, J.: Design of Structures with Lightweight Concrete: Present Status of Revision EC2, Proc. of the Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Kristiansand, pp.57-70, 2000.
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，1991。
- 9) 例えば，土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕 2002 制定，2002。
- 10) Cervenka Consulting: ATENA Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, Program Documentation, 2002.
- 11) De Borst, R.: Non-linear Analysis of Frictional Materials, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, 1986.
- 12) Menetrey, P. and Willam, K.J.: Triaxial Failure Criterion for Concrete and Its Generalization, ACI Structural Journal, 92(3), pp.311-318, 1995.
- 13) Chen, W.F. and Saleeb, A.F.: Constitutive Equations for Engineering Materials, John Willey & Sons, 1982.
- 14) Hordijk, D.A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, 1991.
- 15) Bazant, Z.P. and Oh, B.H.: Crack Band Theory for Fracture of Concrete, Materials and Structures, RILEM, Vol.16, pp.155-177, 1983.
- 16) van Mier, J.G.M.: Multiaxial Strain-softening of Concrete, Part I, Fracture, Materials and Structures, RILEM, Vol.19, pp.179-190, 1986.