

$$M_{o2B} = \frac{3I_{o2}}{I_N} \cdot \frac{\alpha(\alpha\beta - \alpha + 1)}{(3\alpha - 1)} M \quad (6)$$

$$M_N = (\alpha\beta - \alpha + 1)M \quad (7)$$

また、この算定法を用いた場合の曲げ弾性剛性の因子別検証結果（一例）を図-2に示す。縦軸は剛性比（FEM解析結果／計算値）、横軸は開口位置である。同図を見ると、開口位置における回帰直線の傾きが若干小さくなったことが分かる。しかし、開口位置に対する曲げ弾性剛性低下率（有開口の剛性／無開口の剛性）の変動傾向を検討したところ、図-3に示すように、修正後の検討手法（剛性）3は、FEM解析結果と対応しないことが分かった。これに対し、断面全体の平面保持を仮定した断面2次モーメントを用いる手法（検討手法（剛性）2）は、FEM解析結果と良好に対応することが分かった。このことから、有開口耐震壁の曲げ弾性剛性は検討手法（剛性）2で算定する方が良いと判断した。曲げ弾性剛性の検討手法では、平面全体の中立軸位置の仮定を行っており、これが算定精度に大きく関わっていると思われる。したがって、これ以外の考え方は妥当ではないかと考え、図-1の曲げ抵抗機構に基づいた考えを基本として、曲げひび割れモーメント、曲げ終局強度時モーメントの算定手法を検討する。

3. 曲げひび割れモーメント算定法

(1) 検討手法（ひび）1

これは、断面全体に平面保持を仮定して断面係数を求

める算定手法である。これを式(8)に示す。式中の opM_{cr} は曲げひび割れモーメント、 σ_0 は開口の影響を考慮した軸方向応力度（圧縮を正とする）、 Z_o は開口を考慮した断面係数、 σ_B はコンクリートの圧縮強度である。 σ_{tf} はコンクリートの引張強度であり、式(9)に示す。

$$opM_{cr} = (\sigma_{tf} + \sigma_0)Z_o \quad (8)$$

$$\sigma_{tf} = 0.563\sqrt{\sigma_B} \quad (9)$$

(2) 検討手法（ひび）2

これは筆者らの提案手法²⁾で、断面係数を式(1)により求める方法である。これは、有開口耐震壁の開口高さ位置において三つの曲げ抵抗機構を仮定し、その際の引張側領域の引張端の応力度がコンクリートの引張強度となる時に曲げひび割れが発生すると考えており、その算定法を式(10)に示す。式中の opM_{fcr} は曲げひび割れ強度時曲げモーメントである。また、 Z_{ot} 、 σ_{tf} はそれぞれ式(1)、(9)を用いる。

$$opM_{fcr} = (\sigma_{tf} + \sigma_0)Z_{ot} \quad (10)$$

4. 曲げ終局強度時モーメント算定法

4.1 検討手法概要

(1) 検討手法（強度）1

これは、無開口耐震壁の曲げ終局強度時モーメント算定法より、開口位置の壁縦筋の引張力を削減した方法である。これを式(11)に示す。式中の opM_u は曲げ終局強度



図-2 曲げ弾性剛性の因子別検証結果（開口位置）

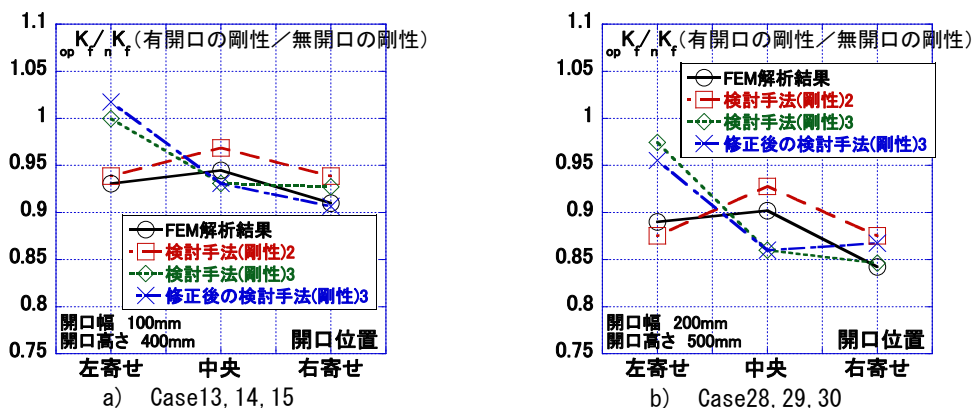


図-3 曲げ弾性剛性低下率～開口位置関係（一例）

時モーメント, a_g , σ_{cy} は引張側柱主筋の全断面積と降伏強度, a_{wv1} は引張側壁板内縦筋の全断面積, a_{wv2} は圧縮側壁板内縦筋の全断面積, σ_{wy} は壁板内縦筋の降伏強度, l_1 は引張側壁板長さ, l_2 は圧縮側壁板長さ, l は両側柱の芯々間距離, N は軸力である。

$${}_op M_u = a_g \sigma_{cy} l + a_{wv1} \sigma_{wy} l_1 + a_{wv2} \sigma_{wy} l_2 + 0.5N \quad (11)$$

(2) 検討手法 (強度) 2

これは筆者らの提案手法²⁾で, 図-1 においても示した開口下端レベルでの三つの曲げ抵抗機構のモーメント負担率を用いて曲げ終局強度時モーメントを算定する手法である。また, 引張側柱主筋と壁板内全縦筋は引張降伏を仮定する。以下に算定式を示す。詳細については参考文献²⁾を参照願いたい。

引張側柱主筋によるモーメントを引張側領域負担曲げモーメント (M_1) と, 軸方向剛性負担曲げモーメント (M_2) に分配する。

$$M_1 = \frac{M_{olB}}{M_{olB} + M_N} \sigma_{cy} a_{cv} \left(\frac{D}{2} + L_{ol} - \frac{x_{n1}}{2} \right) \quad (12)$$

$$M_2 = \frac{M_N}{M_{olB} + M_N} \sigma_{cy} a_{cv} (L_w - D) \quad (13)$$

次に, 引張側領域の壁板内縦筋によるモーメントを引張側領域負担曲げモーメント (M_3) と, 軸方向剛性負担曲げモーメント (M_4) に分配する。

$$M_3 = \frac{M_{olB}}{M_{olB} + M_N} \sigma_{wy} a_{w1} \left(\frac{L_{ol}}{2} - \frac{x_{n1}}{2} \right) \quad (14)$$

$$M_4 = \frac{M_N}{M_{olB} + M_N} \sigma_{wy} a_{w1} \left(L_w - \frac{3D}{2} - \frac{L_{ol}}{2} \right) \quad (15)$$

圧縮側領域の壁板内縦筋の引張力によるモーメント (M_5) は,

$$M_5 = \sigma_{wy} a_{w2} \left(\frac{D}{2} + \frac{L_{o2}}{2} \right) \quad (16)$$

軸力に対する引張側領域と圧縮側領域のそれぞれの負担曲げモーメント (M_6), (M_7) は,

$$M_6 = N_{ol} \left(-\frac{L_w}{2} + D + L_{ol} - \frac{x_{n1}}{2} \right) \quad (17)$$

$$M_7 = N_{o2} \left(\frac{L_w}{2} - \frac{D}{2} \right) \quad (18)$$

引張側領域と圧縮側領域のそれぞれの負担軸力 (N_{ol}), (N_{o2}) は,

$$N_{ol} = \frac{M_{olB}}{M_{olB} + M_{o2B} + M_N} N \quad (19)$$

$$N_{o2} = \frac{M_{o2B} + M_N}{M_{olB} + M_{o2B} + M_N} N \quad (20)$$

以上より, 曲げ終局強度時モーメントは, M_1 から M_7 までの和となる。

また, 引張側領域では, 引張と圧縮領域の軸方向剛

性による引張力と外力の軸方向力の和が正 (引張) となる場合は, 曲げひび割れが貫通すると仮定する。このときの全体の曲げモーメントが曲げ終局強度時モーメントより小さい場合, 曲げ終局強度到達前に引張側領域をひび割れが貫通し断面の剛性が低下すると考え, 引張側領域の断面 2 次モーメントを 0.25 倍に低減する。それらの算定法を式(21), (22)に示す。式中の ${}_c M_{cr}$ はひび割れ貫通時曲げモーメントである。この手法の詳細は, 参考文献²⁾を参照願いたい。

$$\frac{{}_c M_{cr} M_N}{(L_w - x_{o1} - x_{o2})(BD + L_{ol} t_w) M} - \sigma_0 = 0 \quad (21)$$

$${}_c M_{cr} = \frac{\sigma_0 (BD + L_{ol} t_w)(L_w - x_{o1} - x_{o2}) M}{M_N} \leq {}_op M_{fu} \quad (22)$$

4.2 提案手法概要 (検討手法 (強度) 3)

検討手法 (強度) 2 では, 引張側領域において, ひび割れが貫通しても, 外力の圧縮軸力を曲げ剛性に応じて負担すると仮定している。しかしながら, ひび割れが貫通すると, コンクリートの圧縮部位が引張領域に存在しないことから, この状態では, 圧縮軸力への抵抗は困難と考え, この場合には, 圧縮軸力は全て圧縮領域で負担すると考えた。この提案手法を検討手法 (強度) 3 とする。これより, 式(19), (20)は式(23), (24)となる。

$$N_{ol} = 0 \quad (23)$$

$$N_{o2} = N \quad (24)$$

5. 算定精度検証

(1) FEM シミュレーション解析

曲げひび割れ, 曲げ終局強度時モーメント算定法の検証をするにあたり, 鉄筋コンクリート造ドア型有開口耐震壁の既往実験結果は少なく十分な検証が行えないため, FEM 解析を用いて検討対象を増やすことにした。

FEM 解析には, 「FINAL」^{3), 4)}を用いた。まず, 岩本らの実験結果⁵⁾の試験体 COPH, COPL, LOPH, ROPH (LOPH の負加力側) についてシミュレーション解析を行った。解析モデル (COPH) を図-4 に, 試験体諸元を表-1 に示す。コンクリートは四辺形要素, 鉄筋は線材要素としてモデル化した。また, 壁筋が丸鋼であることから鉄筋を線材要素でモデル化し, 付着の有無による曲げ挙動の差異を検討した。テンションスティフニング特性は出雲らのモデル⁶⁾ ($C=1.0$), コンクリートの圧縮応力度～ひずみ度曲線は修正 Ahmad モデル⁷⁾, 圧縮強度到達後のひずみ度軟化曲線は修正 Ahmad モデル, 圧縮破壊条件は Kupfer-Gerstle の提案方法⁸⁾, ひび割れ後のせん断伝達特性は長沼モデル³⁾, 圧縮強度低減方法は長沼の提案式³⁾により低減し, 圧縮強度時ひずみ度は低減しなかった。図-5 にシミュレーション解析によって得られた試験体 COPH の水平荷重～水平変形関係を既往実

験結果と比較して示す。既往実験結果と最も対応が良かったのは、付着を無しにした場合であった。また、両結果の最大耐力を比較すると強度比（FEM最大耐力（付着なし）／実験最大耐力）は1.066であり、解析結果は既往実験結果を十分に再現できていると判断し、この解

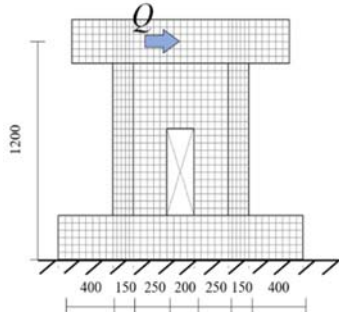


図-4 シミュレーション解析モデル

表-1 試験体諸元

試験体名	COPH	COPL	LOPH
開口寸法 (mm)	200×600	200×300	200×600
壁厚 (mm)	70		
コンクリート 圧縮強度(N/mm ²)	45.9		
壁縦横筋 (%), 降伏強度(N/mm ²)	φ 4@50(0.36) 593		
柱主筋 (%), 降伏強度(N/mm ²)	4-D6(0.34) 395		
せん断補強筋(%), 降伏強度(N/mm ²)	φ 4@50(0.57) 593		

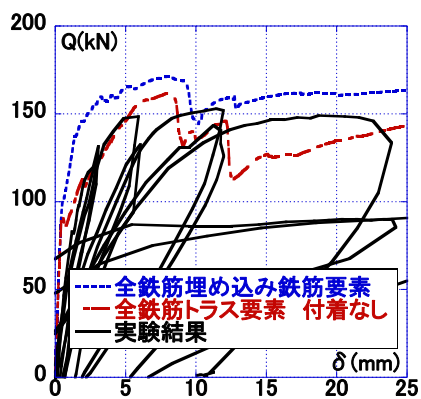


図-5 水平荷重～水平変形関係 (COPH)

表-2 解析共通諸元

コンクリートの材料特性	
圧縮強度(N/mm ²)	45.9
ヤング係数(N/mm ²)	2.98×10^4
ポアソン比	0.167
解析モデルの寸法	
柱寸法(mm)	150×150
壁厚(mm)	70
壁内法高さ(mm)	1050
壁内法長さ(mm)	700

析仮定を用いて、パラメトリック解析を行うことにした。

(2) FEM パラメトリック解析

解析共通諸元を表-2、解析ケース一覧を表-3 に示す。表-3 の開口位置は記号で表しており、C は中央、R は右寄せ、L は左寄せである。パラメトリック解析モデルは、シミュレーション解析モデルを基本としたが、基礎梁は設けておらず、壁脚部で固定とした。また、図-5 を見ると鉄筋モデルの違いによる最大耐力の差は小さいこと、実際の耐震壁は鉄筋とコンクリートの付着が良いこと、パラメトリック解析においてハンドリングの良さを考慮し、鉄筋はすべて埋め込み鉄筋要素とした。解析は、開口の位置、幅、高さ、軸応力度をパラメータとし、軸応力度が2.0 (N/mm²)、4.0 (N/mm²) の2ケースの無開口耐震壁を合わせて全20 ケース行った。

次に、パラメトリック解析結果を用いて、曲げひび割れ、曲げ終局強度時モーメントの検討手法の精度検証を行った。今回はパラメトリック解析を用いて検討

表-3 解析ケース一覧

解析 ケース	開口幅 (mm)	開口高さ (mm)	軸応力度 (N/mm ²)	開口位置
1	200	600	2.00	C
2				R
3				L
4		300		C
5				R
6				L
7		900		C
8				R
9				L
10	100	600		C
11				R
12				L
13	300			C
14				R
15				L
16	200	600	4.00	C
17				R
18				L
19	—	—	2.00	—
20	—	—	4.00	—

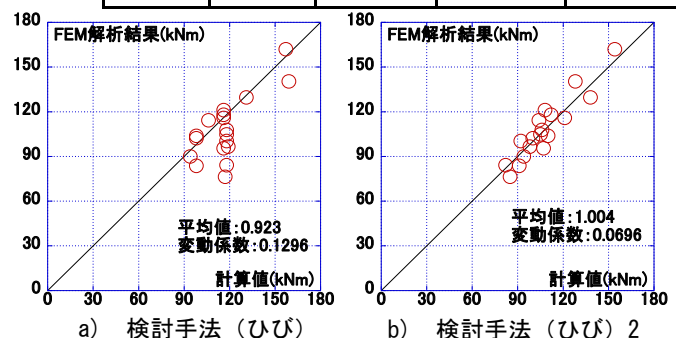


図-6 曲げひび割れモーメントの精度検証結果

手法をまとめたものであり、適用範囲については、実験変数は用いていないので幅広いと思うが、今後、既往実験結果に適用し、その算定精度を確認した上で定めたいと考える。図-6が曲げひび割れモーメント、図-7が曲げ終局強度時モーメントの検証結果であり、縦軸はFEM解析結果、横軸は計算値である。FEM解析結果の曲げひび割れモーメントは、曲げモーメント～部材角関係の剛性が大きく変化するときとした。また、耐力低下を起こさなかった解析ケース（14ケース/18ケース）においては、今回シミュレーション解析で対象とした実験では、ほぼ部材角 $1/100$ (rad) 時まで耐力を示していたこと、また曲げ降伏後の耐力増大はさほど大きくないことから、耐力低下しない解析ケースの耐力を部材角 $1/100$ (rad) 時とした。図-6から、検討手法（ひび）1は比較的危険側に評価し、ばらつきが認められた。検討手法（ひび）2は、検討手法（ひび）1より危険側に評価するケースは少なくなり、変動係数も小さくなるのが分かった。また、図-7から、各手法におい

て平均値、変動係数ともに大きな差異は認められなかった。

次に、開口位置による曲げモーメントの低下率（有開口のモーメント/無開口のモーメント）の変動傾向について検証を行った。図-8が曲げひび割れモーメント、図-9が曲げ終局強度時モーメントの検証結果であり、縦軸は曲げモーメントの低下率、横軸は開口位置である。また、図-9には引張側領域の断面2次モーメントを低減した場合は、その旨を示した。無開口耐震壁の曲げひび割れモーメントは式(8), (9), 曲げ終局強度時モーメントは式(11)で算定した。図-8よりFEM解析結果の変動傾向に対し、検討手法（ひび）1による結果は異なるが、検討手法（ひび）2の結果はほぼ対応することが分かった。よって、曲げひび割れモーメントは検討手法（ひび）2で算定する方が良いと言える。また、図-9より検討手法（強度）1は開口が圧縮側に存在すると、FEM解析結果と変動傾向が対応しないことが分かった。検討手法（強度）2, 3（モーメント負担率を用いる方法）

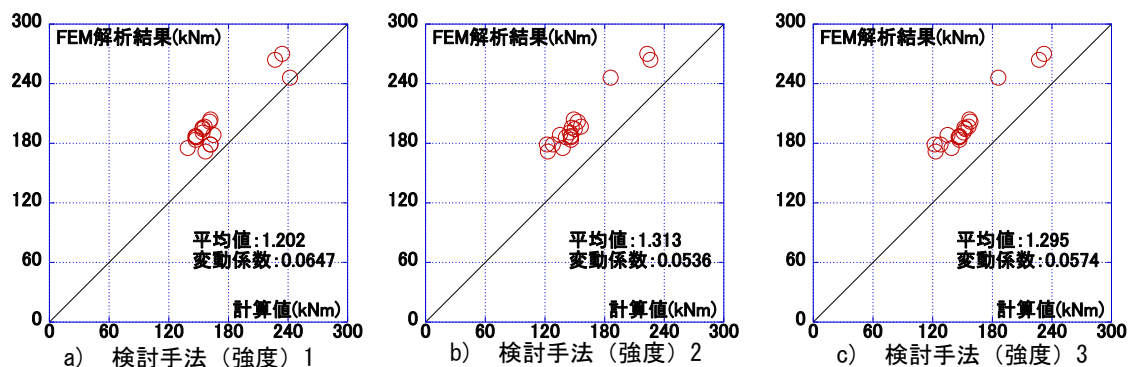


図-7 曲げ終局強度時モーメントの精度検証

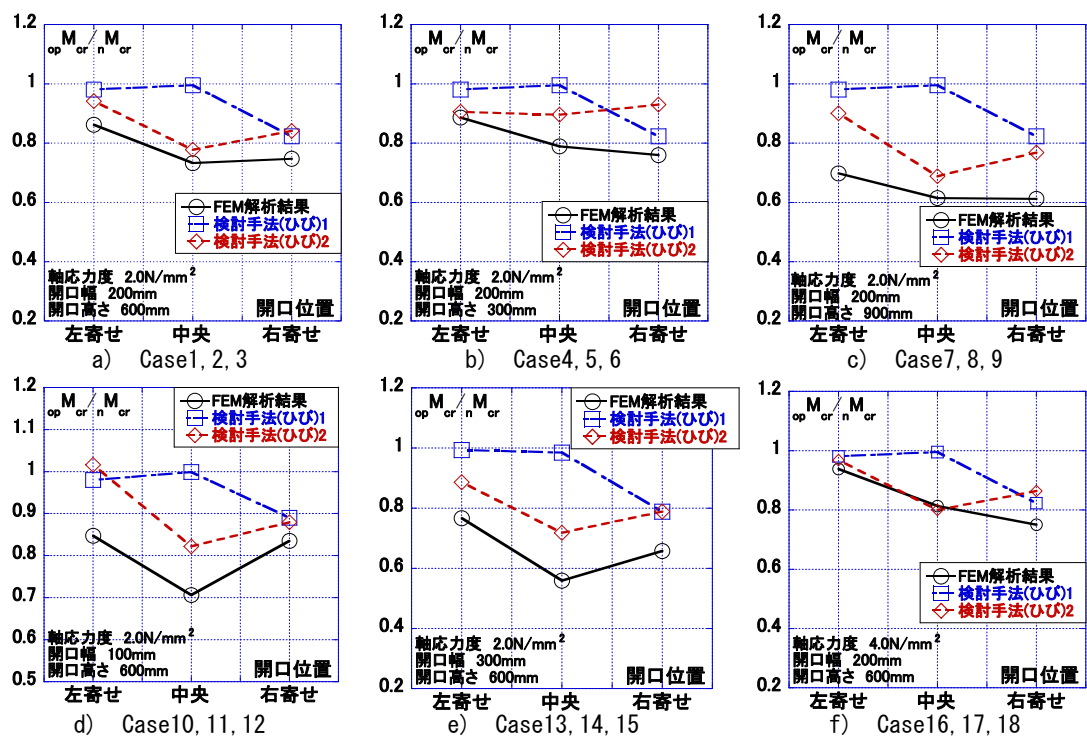


図-8 曲げひび割れモーメント低下率～開口位置関係

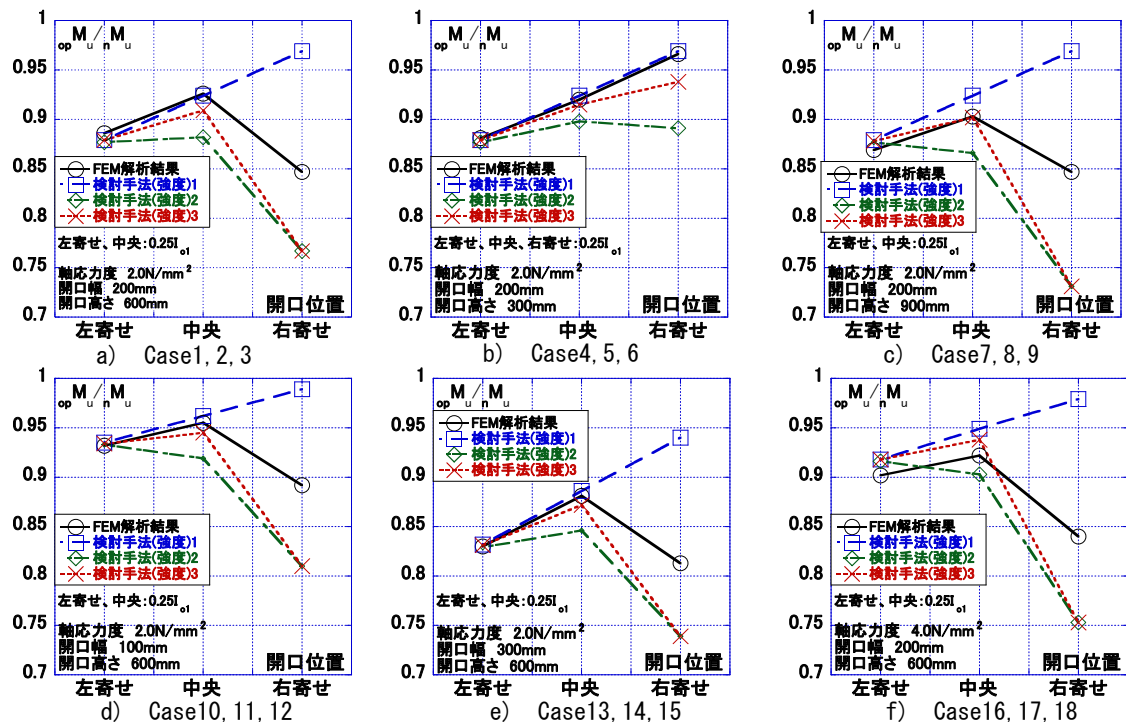


図-9 曲げ終局強度時モーメント低下率～開口位置関係

では、FEM 解析結果と同様に、開口が圧縮側に存在すると、曲げ終局強度時モーメントの低下が認められた。さらに、既報²⁾より開口が圧縮側に存在する場合、引張側領域もせん断力を負担することで、単独の曲げモーメントが生じることが報告されている。そして、これを考慮したものが検討手法（強度）2、3 であり、このうち、引張側領域のひび割れの貫通が認められた際、その断面 2 次モーメントを低減すると同時に負担軸力の割合を変更した場合が FEM 解析結果の変動傾向により近づいたことから、曲げ終局強度時モーメントは検討手法（強度）3 で算定した方が良いと考える。

6. まとめ

鉄筋コンクリート造ドア型有開口耐震壁の曲げ弾塑性挙動について検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 曲げ弾性剛性低下率と開口位置の関係からみると、全断面の平面保持仮定より算定した断面 2 次モーメントを用いた場合が最も対応が良いことが分かった。
- 2) 曲げひび割れモーメント算定法に関しては、三つの曲げ抵抗機構を仮定した提案手法が最も精度が良いことが分かった。
- 3) 曲げ終局強度時モーメント算定法に関しては、三つの曲げ抵抗機構を仮定し、引張側領域にひび割れが貫通する場合に外力の圧縮軸力を全て圧縮側領域に負担させる手法の算定精度が最も良いことが分かった。

これまでの検討を踏まえて、今後は鉄筋コンクリ

ート造ドア型有開口耐震壁の復元力特性についての検討を行いたい。

参考文献

- 1) 久米凱到，津田和明：鉄筋コンクリート造ドア型有開口耐震壁の弾性剛性の算定法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.2，2021
- 2) 津田和明：鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の曲げ強度算定法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 83 巻，第 751 号，pp.1331-1341，2018.9
- 3) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究，その 1，日本建築学会構造論文集，第 421 号，pp.39-48，1991.3
- 4) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究，その 2，日本建築学会構造系論文集，第 431 号，pp.7-16，1992.1
- 5) 岩本周晃，津田和明：鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の曲げ挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，2016
- 6) 出雲淳一，他：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学論文集，Vol.26，No.9，pp.107-120，1987.9
- 7) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，pp.163-170，1995.8
- 8) Kupfer, H.B and Gerstle, K.H : Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No.EM4, pp.853-866, Aug.1