矩形開口を有するコンクリート系梁の終局強度

ULTIMATE STRENGTH OF STRUCTURAL CONCRETE BEAM WITH RECTANGULAR WEB OPENING

浜原正行*, 石井明男****, 末次宏光**, 中山 優***
Masayuki HAMAHARA, Akio ISHII, Hiromitsu SUETSUGU
and Yasashi NAKAYAMA

The AIJ "Design Guideline for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Buildings Based on Inelastic Displacement Concept" requires that the shear carried by arch action shall be ignored in the reinforced concrete beams with openings. The validity of this requirement, however, has not been verified yet. In this paper, 12 reinforced concrete short beams with web openings were loaded monotonically, in order to investigate the arch mechanism in the solid portions. The test variables were the size and location of the openings, bond performance of longitudinal reinforcement (i.e. bond or no bond) and the shear span. The conclusions obtained from this investigation were as follows.

- 1) The shear carried by arch action existed in the test beams having axial reinforcement with no bond.
- 2) The ultimate strength of the test beams was given by the smaller between the ultimate strength in the solid portion and the one in the openings.

Keywords : reinforced and prestressed concrete beams, arch action, bond performance, web openings, ultimate strength

鉄筋コンクリート梁, アーチ作用, 付着性能, 開口, 終局強度

1 はじめに

近年, わが国では, 鉄筋コンクリート(以後, RC)造終局強度型指針¹⁾やRC造靱性保証型指針²⁾に見られるようなトラス・アーチモデルを用いたせん断設計法が定着しつつある。これらの指針では, 有孔梁の設計はこのせん断理論の枠組みの中で論じられているが, 無開口梁と異なり, 母材はアーチ作用によるせん断力が考慮されていない。このことは, 母材が本来有している耐力が開口によって低減されることを意味している。

周知のように, アーチモデルは付着のない軸方向鋼材と材を対角線方向に結ぶコンクリート圧縮束によって構成される。この圧縮束の中に開口を設置すると, その応力の流れは開口によって遮断される。これに伴い, アーチ作用によるせん断力の伝達も阻害されることになる。上記の指針でアーチ作用による負担せん断力を無視するとしているのはこのような事情による。

文献 3)では, 曲げ卓越型の梁に開口を設けても母材本来の耐力は低減せず, 有孔梁としての終局強度は母材の曲げ終局強度と開口部の終局強度のいずれか小さいほうの値で与えられることを示している。文献 4)では, アーチ作用を実験的に再現するために軸筋の付着を除去したせん断スパン比 1 と 1.5 の RC 梁に対する逆対称載荷実験を実施した。この実験より, コンクリートの圧縮主ひずみは縁で最大とな

り, 縁から離れるにしたがって減少すること, したがって, アーチモデルに対応するような材の対角線方向主ひずみの増加は見られなかったことが示されている。この結果は, アーチモデルは部材のせん断終局強度の推定には有効であるが, 実際の梁のひずみ性状を再現できない場合があることを意味している。

軸筋が付着喪失した部材が上述のような曲げ部材に類似したひずみ性状を示すなら, このような梁に開口を設けても, 文献 3)の試験体同様, 母材が本来有している耐力は低減しないと考えられる。

本報告では, まず, せん断スパン比, 開口の寸法, 位置, 形状, および主筋の付着の有無を要因とする 12 体の有孔梁試験体に対して一方向漸増載荷実験を行い, これらの要因が有孔梁の終局強度に及ぼす影響を実験的に検討する。次に, 上記の試験体に 8 体の PCaPC 有孔梁試験体⁵⁾を含めた 20 体の試験体の終局強度が, 母材の終局強度と開口部の終局強度とのうち, いずれか小さい方の値で評価できるか否かについて考察検討を加えようとするものである。なお, 母材の終局強度とは, 無開口梁としての終局強度のことである。

2 記号

a_o : 反曲点から開口中心までの距離(mm)

b, D, d, L : 母材の幅, 同全せい, 同有効せい, 同内法スパン(mm)

* 日本大学理工学部海洋建築工学科 助教授・工博

** 日本大学理工学部海洋建築工学科 教授・工博

*** 日本大学短期大学部建設学科 教授・工博

**** 東武谷内田建設㈱

Assoc. Prof., Dept. of Oceanic Architecture & Engineering, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Oceanic Architecture & Engineering, College of Science and Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Construction, Junior College, Nihon Univ., Dr. Eng.

Tohbu-Yachida Construction Co.

d_o : 開口部の上弦材の重心から下弦材の重心までの間距離 (mm)
 h_o, L_o : 開口部の上弦材または下弦材のせい, 開口の長さ (mm)
 j_o : 開口部の上弦材または下弦材におけるトラスモデルのせい (mm)
 N_1, N_2 : 上弦材に作用する偶力, 下弦材に作用する偶力 (kN)
 f_{wy}, p_w : 筋筋の降伏点 (N/mm²), 筋筋比
 Q_{a1}, Q_{a2} : 上弦材, 下弦材のアーチ作用によるせん断力 (kN)
 Q_{w1}, Q_{w2} : 上弦材, 下弦材のトラス作用によるせん断力 (kN)
 Q_M, Q_S : 母材の曲げ終局強度, 同せん断終局強度 (kN)
 Q_{wo} : 開口部の終局強度 (kN)
 T_y : 母材の上端筋または下端筋の降伏荷重 (kN)
 T_{ey}, T_{ey}' : 開口部の上弦材または下弦材を通る軸方向鋼材の中で母材の縁側に配置されたものの降伏荷重 (付着有), 同 (付着無) (kN)
 T_{iy} : 開口部の上弦材または下弦材を通る軸方向鋼材の中で開口側に配置されたものの降伏荷重 (本試験体はいずれも付着有) (kN)
 ν : コンクリート圧縮強度の有効係数

3 実験概要

実験要因はせん断スパン比 a/D , 開口の寸法, 位置, 形状, および軸筋の付着の有無である。表 1 に試験体の諸元を, 図 1 に配筋詳細の一例を示す。なお, 付着のない上端筋と下端筋には, シリーズ I ではアンボンド PC 鋼棒を, その他のシリーズでは試験区間をワックスで塗布した上にビニールテープを巻いた異型鉄筋を用いた。

荷重形式は図 2 に示すように 500kN ジャッキを用いた逆対称一方向漸増荷重とした。自由端側の 100kN ジャッキは加力用鉄骨とスタブの重量を支えた。このジャッキはスタブと加力用鉄骨の重心位置

表 1 試験体概要

シリーズ	試験体名	軸筋付着	a/D	開口の寸法 (mm)			開口位置	開口部弦材の軸方向補強筋	
				L_o	H_o	H_o		梁縁側	開口側
I	A1	無	1	90	90	180	中央	----	----
	A2		1.5						
	A3		1	300	150	150		1-D19	2-D13
	A4		1.5						
II	B1	有無	1	300	150	150	中央	----	2-D13
	B2								
III	C1	有無	1	200	200	125	端部中央	----	2-D13
	C2								
	C3								
	C4								
IV	D1	無	1	200	200	125	中央	----	2-D13
	D2								

*開口形状は円形で L_o, H_o は開口の直径

[共通因子] $b=200\text{mm}, D=450\text{mm}, d=410\text{mm}$

母材の上端筋と下端筋: シリーズ I は PC 鋼棒 2- $\phi 26$, 他は 3-D25
 筋筋=母材, 開口部の弦材共 D6- $\phi 75$ ($p_w=0.4\%$)

図 1 配筋詳細図 (B2 試験体)

から (1) 式による偏心距離分 先端に寄った位置に設置した。

$$e = \omega \cdot L^2 / \{4 \cdot (W_s + W_c)\} \quad (1a)$$

ここに, ω =試験体梁部分の単位長さ当たりの重量 (N/mm)

W_s, W_c =加力鉄骨治具とスタブの重量 (N)

これより, 梁の右端の曲げモーメント (M_R) と左端の曲げモーメント (M_L) は, それぞれ (1b), (1c) 式で与えられ, 両端の曲げモーメントは逆対称となる。

$$M_R = (W_s + W_c) \cdot e = \omega \cdot L^2 / 4 \quad (1b)$$

$$M_L = (W_s + W_c) \cdot e - \omega \cdot L^2 / 2 = -\omega \cdot L^2 / 4 \quad (1c)$$

荷重中は, 左右スタブの回転角が等しくなるよう, このジャッキで制御した。相対変形角 R の測定は図 2 に示す $D1, D2$ の二台の電気式変位計を用い, (2) 式で求めた。

$$R = \{(1/2) \cdot (D_1 + D_2)\} / L \quad (2)$$

表 2 にコンクリートの調査表, 表 3, 4 にコンクリートと鋼材の材料試験結果を示す。

図 2 荷重装置図

表 2 コンクリートの調査表

シリーズ	スラブ (mm)	A (%)	W/C (%)	D_{max} (mm)	単位重量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
I	80	2.0	65	20	165	254	920	1005
II			67	25	175	261	904	987
III			65	20	165	254	898	984
IV	210	4.5	56	20	196	354	784	923

目標圧縮強度=30N/mm² W=水, C=セメント, S=細骨材, G=粗骨材
 A=空気量, W/C=水セメント比, D_{max} =粗骨材の最大寸法,

表 3 コンクリートの材料試験結果

試験体	A1	A2	A3	A4	B1	B2
項目						
σ_B (N/mm ²)	39.5	39.5	41.3	41.3	34.1	30.6
E (kN/mm ²)	33.1	33.1	32.8	32.8	28.3	28.6
σ_T (N/mm ²)	3.36	3.36	3.53	3.53	3.11	3.75
試験体	C1	C2	C3	C4	D1	D2
項目						
σ_B (N/mm ²)	38.5	37.5	35.9	32.8	22.7	22.7
E (kN/mm ²)	30.1	30.4	29.6	29.9	15.2	15.2
σ_T (N/mm ²)	2.88	2.77	2.87	2.51	1.64	1.64

σ_B : 圧縮強度, σ_T : 割裂強度, E : ヤング係数

表4 鋼材の材料試験結果

シリーズ	径	使用部位	材種	f_y	f_{max}	E_s	伸び率 (%)
I	D6	母材、弦材の肋筋	SD295	405	588	184	18.1
	D10	開口両側の肋筋		401	530	196	19.2
	D13	開口側の開口部補強筋		350	493	188	19.2
	D19	母材縁側の開口部補強筋	SD345	375	553	185	19.1
	φ26	アンボンド PC 鋼棒	B 種	1177	1288	200	9.0
II	D6	母材、弦材の肋筋	SD295	319	478	180	15.1
	D10	開口両側の肋筋		386	545	189	17.2
	D13	開口側の開口部補強筋		372	537	189	18.9
	D25	主筋	SD345	379	596	185	15.3
III	D6	母材、弦材の肋筋	SD295	327	480	181	16.8
	D10	開口両側の肋筋		372	505	189	17.1
	D13	開口側の軸方向鋼材		344	490	192	18.3
	D25	主筋	SD345	360	543	193	19.1
IV	D6	母材、弦材の肋筋	SD295	383	539	173	17.5
	D10	開口両側の肋筋		356	499	202	17.6
	D13	開口側の軸方向鋼材		347	497	186	18.7
	D25	主筋	SD345	386	583	177	24.8

f_y :降伏点(N/mm²), f_{max} :引張強度(N/mm²), E_s :ヤング係数(kN/mm²)

4 破壊モードと最大荷重

図3, 図4は母材主筋の付着を除去したシリーズIにおける試験体の最終破壊状況と荷重一部材角関係をせん断スパン比に示したものである。せん断スパン比1の試験体は, 開口寸法 90mm 角の A1 が母材端部のコンクリートの圧壊, 開口寸法 150mm×300mm の A3 が開口部弦材のせん断破壊によって耐力低下を起こした。この2体の耐力と靱性を比較すると, A1 は最大荷重 300kN を超え, 比較的靱性にも富んでいたのに対し, A3 は最大荷重が A1 の 2/3 にも達しておらず, 靱性にも乏しい。せん断スパン比 1.5 の試験体(A2, A4)は, 開口寸法に関係なく母材端部のコンクリートの圧壊によって耐力低下を起こした。これらの試験体は開口寸法に関係なくいずれも最大荷重が約 200kN であり, 靱性にも比較的富んでいる。軸筋の付着を除去し, 母材のトラス作用が期待できないような有孔梁でも, 十分な耐力を保持し得る場合がある。

図3 最終破壊状況(シリーズI)

図4 荷重一部材角関係(シリーズI)

図5(a), (b)は母材主筋の付着の有無が試験体の最終破壊状況と荷重一部材角関係に及ぼす影響を調べたものである。主筋の付着を除去しなかった試験体 B1, 主筋の付着を除去した試験体 B2 と開口部弦材のせん断破壊によって耐力低下した。主筋の付着を除去した B2 は B1 と比較するとひび割れ本数が少ない。また, B2 の最大荷重は B1 の約 2/3 である。トラス作用の成立条件は, そのメカニズム上, 軸筋に付着が確保されていることである。したがって, 軸筋の付着を除去した B2 は開口部弦材でのトラス作用を発揮できないことになる。上記の結果はこのことに起因している。また, このような傾向はシリーズIIIの試験体にも見られた。

シリーズIVの試験体はいずれも開口部弦材でせん断破壊したが, 開口寸法が矩形の試験体(D1)の最大荷重は円形の試験体(D2)の約 60% であった。

図5(a) 最終破壊状況(シリーズII)

図5(b) 荷重一部材角関係(シリーズII)

5 終局強度に対する検討

本節では, 母材のトラス作用が発揮されないように主筋の付着を除去した有孔梁試験体やトラスとアーチが混在していると考えられる通常の有孔梁試験体の終局強度が, 曲げ卓越型の梁に開口を設けた場合と同様, 母材と開口部の終局強度のうち, いずれか小さい方の値で評価できるか否かについて検討を加える。

5.1 解析に用いた試験体

表5に解析に用いた諸元の一覧を示す。検討には, 4節までで触れたシリーズI~IVの12体の試験体に文献5)に掲載されている8体のPCaPC有孔梁試験体(表5中, P1~P8)を含めた20体分の実験資料を用いた。P1~P8には, 図2と同じ逆対称荷重を採用し, 加力ルールは正負繰り返し荷重とした。表5中に記載したこれらの試験体の最大荷重 Q_{ou} は正負の平均値である。図6にPCaPC試験体の配筋詳細の一例を示す。

図6 PCaPC試験体の配筋詳細

5.4 開口部の終局強度²⁾

符号と記号

鋼材の応力は引張をプラス、圧縮をマイナスとし、コンクリートの応力と軸方向力は圧縮をプラス、引張をマイナスとした。添え字の“1”は上弦材，“2”は下弦材に関連する記号を表している。また、添え字の“c”は圧縮“t”は引張に関連する記号を表している。

解析条件

解析に用いた試験体は、いずれも開口部の上弦材と下弦材の断面寸法と配筋が同一に設定されている。したがって、解析に際しては以下に示す諸元が上弦材と下弦材で等しい。

- ① 開口部弦材の全せい h_o 、同トラスモデルのせい j_o
- ② 肋筋比(p_w)と肋筋の降伏荷重(f_{wy})
- ③ 母材の縁側に配置された付着を有する軸方向鋼材の降伏荷重(T_{ey})、同付着を除去した軸方向鋼材の降伏荷重($T_{ey'}$)
- ④ 開口部側に配置された軸方向鋼材の降伏荷重(T_{iy})

トラス作用によるせん断力(図8)

上弦材と下弦材のトラス作用によるせん断力 Q_{w1} 、 Q_{w2} は(6)式と(7a)式～(7c)式で与えられる。

$$Q_{w1}, Q_{w2} = \min(1Q_{w1}, 2Q_{w2}, 3Q_w) \quad (6)$$

$$1Q_w = p_w \cdot f_{wy} \cdot b \cdot j_o \quad (7a)$$

$$2Q_w = \frac{2 \cdot T_{oy} \cdot j_o}{L_o + j_o} \quad (7b)$$

$$3Q_w = \frac{(T_{ey} + T_{iy} + T_{ey'} + N) \cdot j_o}{L_o + j_o} \quad (7c)$$

ここに、(7b)式中の T_{oy} は T_{ey} と T_{iy} のうち、小さい方の値である。

(7a)式は開口部弦材の肋筋が降伏したときのせん断力、(7b)式は開口部の軸方向鋼材が降伏したときのせん断力である。(7c)式は母材曲げモーメントによる軸方向力 N の残余分で構成されるトラスモデルのせん断力であり、軸方向力の符号が負となる引張を受ける側の弦材のみに適用される。

図8 トラスモデル

上弦材と下弦材の上端筋と下端筋には、(8a)式に示す引張力 T_{w1} 、 T_{w2} と(8b)式に示す圧縮力 C_{w1} 、 C_{w2} が生じる。

$$T_{w1} = \frac{Q_{w1}}{2} \cdot \left(\frac{L_o}{j_o} + 1 \right) \quad (8a)$$

$$T_{w2} = \frac{Q_{w2}}{2} \cdot \left(\frac{L_o}{j_o} + 1 \right)$$

$$C_{w1} = \frac{Q_{w1}}{2} \cdot \left(\frac{L_o}{j_o} - 1 \right) \quad (8b)$$

$$C_{w2} = \frac{Q_{w2}}{2} \cdot \left(\frac{L_o}{j_o} - 1 \right)$$

上弦材と下弦材のコンクリート斜材には(9)式に示す圧縮応力が生じる。

$$\sigma_{w1} = \frac{Q_{w1}}{b \cdot j_o} \quad (9)$$

$$\sigma_{w2} = \frac{Q_{w2}}{b \cdot j_o}$$

アーチ作用によるせん断力(図9)

上弦材と下弦材において、母材の縁側に配置した軸筋の応力 T_{ex1} 、 T_{ex2} と開口部に配置した軸筋の応力 T_{in1} 、 T_{in2} の許容範囲は、トラス作用の残余分として、それぞれ(10a)式、(10b)式で与えられる。

$$\begin{aligned} -(T_{ey} + T_{ey'} - C_{w1}) &\leq T_{ex1} \leq (T_{ey} + T_{ey'} - T_{w1}) \\ -(T_{ey} + T_{ey'} - C_{w2}) &\leq T_{ex2} \leq (T_{ey} + T_{ey'} - T_{w2}) \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} -(T_{iy} - C_{w1}) &\leq T_{in1} \leq (T_{iy} - T_{w1}) \\ -(T_{iy} - C_{w2}) &\leq T_{in2} \leq (T_{iy} - T_{w2}) \end{aligned} \quad (10b)$$

開口部の上弦材と下弦材における全軸方向鋼材の応力 S_1 、 S_2 は、

$$\begin{aligned} S_1 &= T_{ex1} + T_{in1} \\ S_2 &= T_{ex2} + T_{in2} \end{aligned} \quad (11)$$

図9 アーチモデル

で与えられる。したがって、開口部の上弦材と下弦材における全軸方向鋼材の応力 (S_{c1} , S_{c2}) は(12)式の範囲をとり得る。

$$\begin{aligned} S_{c1} &\leq S_1 \leq S_{t1} \\ S_{c2} &\leq S_2 \leq S_{t2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_{c1} &= -(T_{ey} + T_{ey}' + T_{iy} - 2 \cdot C_{w1}) \\ S_{c2} &= -(T_{ey} + T_{ey}' + T_{iy} - 2 \cdot C_{w2}) \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} S_{t1} &= T_{ey} + T_{ey}' + T_{iy} - 2 \cdot T_{w1} \\ S_{t2} &= T_{ey} + T_{ey}' + T_{iy} - 2 \cdot T_{w2} \end{aligned} \quad (13b)$$

ただし、P1~P8のPC鋼材は上弦材と下弦材の軸心を通っているため(図6)、(12)式では考慮されていない。したがって、これらの試験体の S_{t1} と S_{t2} はPC鋼材の降伏荷重 T_y を付加した(13c)式で与えられる。

$$\begin{aligned} S_{t1} &= T_{ey} + T_{ey}' + T_{iy} + T_y - 2 \cdot T_{w1} \\ S_{t2} &= T_{ey} + T_{ey}' + T_{iy} + T_y - 2 \cdot T_{w2} \end{aligned} \quad (13c)$$

コンクリート強度もトラス作用の残余分として(14)式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_{a1} &= v \cdot \sigma_B - \sigma_{w1} \\ \sigma_{a2} &= v \cdot \sigma_B - \sigma_{w2} \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 σ_{w1} , σ_{w2} は(9)式による。

上弦材と下弦材には開口部位置に作用する母材曲げモーメントによる偶力が軸力として作用している。上弦材と下弦材のアーチ作用によるせん断力 Q_{a1} , Q_{a2} はこの軸力の大きさに応じ、(10)式~(14)式の応力の範囲での極値として(15a)式、(15a)式で与えられる。

$$Q_{a1} = C_{o1} \left[\sqrt{2 \cdot \left(\frac{C_1}{C_{o1}} \right) - \left(\frac{C_1}{C_{o1}} \right)^2 + \left(\frac{L_o}{h_o} \right)^2} - \left(\frac{L_o}{h_o} \right) \right] \quad (15a)$$

ただし、 $N_{c1} \leq N_1 \leq N_{t1}$ の場合 : $C_1 = C_{o1}$
 $N_1 < N_{t1}$ の場合 : $C_1 = N_1 + S_{t1}$
 $N_1 > N_{c1}$ の場合 : $C_1 = N + S_{c1}$

ここに、 $N_{t1} = C_{o1} - S_{t1}$ $N_{c1} = C_{o1} - S_{c1}$
 $C_{o1} = \sigma_{a1} \cdot b \cdot h_o / 2$

$$Q_{a2} = C_{o2} \left[\sqrt{2 \cdot \left(\frac{C_1}{C_{o2}} \right) - \left(\frac{C_1}{C_{o2}} \right)^2 + \left(\frac{L_o}{h_o} \right)^2} - \left(\frac{L_o}{h_o} \right) \right] \quad (15b)$$

ただし、 $N_{c2} \leq N_2 \leq N_{t2}$ の場合 : $C_2 = C_{o2}$
 $N_2 < N_{t2}$ の場合 : $C_2 = N_2 + S_{t2}$
 $N_2 > N_{c2}$ の場合 : $C_2 = N_2 + S_{c2}$

ここに、 $N_{t2} = C_{o2} - S_{t2}$ $N_{c2} = C_{o2} - S_{c2}$
 $C_{o2} = \sigma_{a2} \cdot b \cdot h_o / 2$

開口部の終局強度 開口部終局強度は上弦材の終局強度 Q_{u1} と下弦材の終局強度 Q_{u2} の和として(16)式によって与えられる。

$$Q_{uo} = Q_{u1} + Q_{u2} \quad (16)$$

上弦材の終局強度と下弦材の終局強度は、それぞれトラス作用によるせん断力とアーチ作用によるせん断力の和として(17)式で与えられる。

$$\begin{aligned} Q_{u1} &= Q_{w1} + Q_{a1} \\ Q_{u2} &= Q_{w2} + Q_{a2} \end{aligned} \quad (17)$$

5.2項の仮定④より、母材曲げモーメントによる上弦材と下弦材の軸方向力 N_1 , N_2 (図10)は(18)式で与えられる。

$$N_1, N_2 = \pm \frac{Q_{uo} \cdot a_o}{d_o} \quad (18)$$

開口部終局強度は、(6)式~(18)式を満たす解として与えられ、具体的には、その解は図11に示す収斂計算によって求まる。

図10 開口部周りの釣り合い

図11 開口部の終局強度を求めるフロー

5.5 実験結果との比較

図12は、縦軸に終局強度の実験値を母材終局強度で無次元化したものを、横軸に開口部の終局強度を母材終局強度で無次元化したものを取り、この平面に全試験体の結果をプロットしたものである。表7は全試験体の終局強度と破壊部位の実験結果と計算による結果の一覧を示したものである。

計算に際して、コンクリート圧縮強度の有効係数 η は0.7とし、試験体の終局強度は母材終局強度と開口部終局強度のうち、小さい方の値とした。

表7と図12より、以下のことが指摘できる。

- ① 図11のフローに従った計算精度は比較的高い。(実験値/計算値の平均値=0.983, 変動係数=7.5%)
- ② 開口部終局強度 Q_{uo} が母材終局強度 Q_{su} を上回っている(図12中、横軸が1を上回る領域に属する)試験体は理論上、母材破壊が開口部のせん断破壊に先行したと判断されるが、実際にもこの領域にある試験体は母材破壊が先行している。
- ③ 以上の検討より、母材にトラス作用が形成されないように主筋の付着を除去した有孔梁試験体、およびトラス作用とアーチ作用が混在していると考えられる軸筋に付着のある有孔梁試験体の終局強度は、曲げ卓越型の梁に開口を設けた場合同様、それぞれ独立に算定した母材と開口部の終局強度のうち、いずれか小さい方の値で評価できることが分かる。すなわち、有孔梁母材のせん断終局強度の算定に際しては、アーチ作用によるせん断力を見込めることになる。
- ④ 周知のように、アーチモデルは軸筋に付着を喪失した曲げせん断部材に適用されるものである。しかしながら、1節でも述べたように、このような部材のコンクリートの圧縮ひずみは、縁で最大となり、縁から離れるにしたがって減少し、対角線方向を結ぶ圧縮束に対応するようなひずみは存在しなかったことが示されている⁴⁾。アーチモデルは付着を喪失した曲げせん断部材の耐力を評価する上では極めて有効なツールであるといえ、本論でもこれを用いた。しかし、このモデルの応力状態については、実現象と乖離している場合がある。圧縮束が母材に存在しないなら、開口によって母材が本来有している耐力は低減されることはないと考えられる。③で述べた結果は、このようなことに起因している。

6 まとめ

せん断スパン比、開口の寸法、位置、形状、および主筋の付着の有無を要因とする12体の有孔梁試験体に対して一方向漸増荷重実験を行い、さらに、上記の試験体に8体のPCaPC有孔梁試験体⁹⁾を加えた20体の試験体の終局強度について考察検討を加え、以下に示す知見を得た。

- ① 母材のトラス作用が期待できない軸筋の付着を除去した有孔梁でも十分な耐力を保持し得る場合がある。
- ② 有孔梁のせん断終局強度を計算する方法を示した。この方法は母材の終局強度と開口部の終局強度をそれぞれ独立に計算し、有孔梁としての終局強度は両者のうち、いずれか小さいほうの値とした。母材のせん断終局強度にはアーチ作用による負担せん断力も考慮し、開口部のせん断終局強度は、上弦材と下弦材のトラス作用とアーチ作用によるせん断力の和で表した。
- ③ 上記の方法を用いて付着の有無を主要因とした有孔梁試験体のせん断終局強度を算定し、実験結果と比較したところ、計算精度は比

較的良好であることが分かった。さらに、この方法は母材破壊が先行するか開口部破壊が先行するかについても判別できた。

- ④ 以上の検討から、母材のアーチ作用によるせん断力は軸筋の付着の有無に関係なく考慮できることが分かった。

図12 $(Q_{eu}/Q_{su})-(Q_{uo}/Q_{su})$ 平面上での破壊モードの判別

表7 実験値と計算値の比較

試験体	Q_{eu} (kN)	計算値(kN)				Q_{eu}/Q_{cu}	破壊部位	
		Q_M	Q_S	Q_{uo}	Q_{cu}		実験	計算
A1	320.8	1213.9	272.7	571.2	272.7	1.18	母材	母材
A2	204.3	809.2	249.2	571.2	249.2	0.82	母材	母材
A3	202.3	1235.4	285.2	219.9	219.9	0.92	開口	開口
A4	212.2	823.6	259.1	219.9	219.9	0.97	母材	開口
B1	235.2	471.1	302.8	179.7	179.7	1.31	開口	開口
B2	162.1	464.9	211.3	140.9	140.9	1.15	開口	開口
C1	193.9	455.7	335.5	189.9	189.9	1.02	開口	開口
C2	115.4	454.4	258.2	116.8	116.8	0.99	開口	開口
C3	162.6	452.5	316.9	177.3	177.3	0.92	開口	開口
C4	120.4	448.1	226.5	152.9	152.9	0.79	開口	開口
D1	72.8	450.6	156.7	105.8	105.8	0.69	開口	開口
D2	122.4	450.6	156.7	137.3	137.3	0.89	開口	開口
P1	227.5	226.5	207.8	243.7	207.8	1.10	母材	母材
P2	115.2	113.3	111.5	243.7	111.5	1.03	母材	母材
P3	287.0	399.8	323.0	278.7	278.7	1.03	開口	開口
P4	159.4	199.9	175.7	278.7	175.7	0.91	母材	母材
P5	252.3	397.3	313.6	265.8	265.8	0.95	開口	開口
P6	173.8	198.6	170.7	242.7	170.7	1.02	母材	母材
P7	225.6	404.2	338.7	267.0	267.0	0.84	開口	開口
P8	167.7	202.1	184.0	267.0	184.0	0.91	母材	母材

Q_{eu} =終局強度の実験値 Q_M =(3)式による母材の曲げ終局強度

Q_S =(4)式、(5)式による母材のせん断終局強度

Q_{uo} =図11のフローに従った開口部の終局強度

Q_{cu} =終局強度の計算値(Q_M , Q_S , Q_{uo} のうち、最小値, 太ゴシック)

*計算から判断される破壊部位は以下のように決めた

開口破壊: 開口部終局強度(Q_{uo})<母材終局強度(Q_M , Q_S)

母材破壊: 母材終局強度(Q_M , Q_S)<開口部終局強度(Q_{uo})

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, pp.104-146, 1990, 10
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保障型耐震設計指針・同解説, pp.138-175, 1997, 7
- 3) 浜原ほか：プレストレストとコンクリート有孔梁の終局強度型設計法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.442, pp.133-139, 1992, 12
- 4) 飯田ほか：軸筋の付着の有無が鉄筋コンクリート部材のせん断性状に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文報告集, No.564, pp.103-108, 2003, 2
- 5) 浜原ほか：プレキャストプレストレストコンクリート有孔梁の力学的挙動に関する実験的研究, プレストレストコンクリート第41巻(第5号) pp.14-19, 2000

(2005年7月6日原稿受理, 2006年2月16日採用決定)