

剪力墙精确分析

谢靖中

(同济大学建筑工程系, 上海 200092)

提 要 本文从考虑剪力墙节点域变形的角度, 讨论了精确分析剪力墙的须满足的要求。简述了当前几种常用计算方法的优点和限制。最后介绍一种新的墙单元 Strat-NW, 并通过一些算例检测单元的性能。

关键词 剪力墙, 有限元, 墙单元

剪力墙是建筑结构中的重要构件, 长期以来, 对于剪力墙的计算一直未能达到工程实际应用的的要求, 各种计算方法均存在使用范围和限制。随着有限元技术的发展, 墙单元(即板+膜单元, 下同)的工程软件中的应用, 使剪力墙的分析计算达到新的高度, 但现有的各类墙单元仍有不足之处。

剪力墙结构由截面较大的墙和相对较小的连梁组成, 连梁比墙处于更大的应力水平, 连梁根部的应力在墙内扩散, 形成一定范围的应力集中区域, 产生节点域变形。节点域变形减弱剪力墙结构的抗侧刚度, 影响内力的分布, 会直接导致连梁内力的减小。考虑节点域变形对剪力结构的计算提出了更高的要求。

1. 剪力墙节点域变形

如图 1 所示, 当连梁根部作用有力矩 M 时, 剪力墙发生整体变形和节点域变形。轴线处有水平侧移 S 和转角 θ_1 , 这由整体变形所产生; 而连梁根部转角为 θ_2 , 有 $\theta_2 > \theta_1$, 包含有节点域变形, 如图 2(a) 所示。如果将两类变形分开, 则如图(b)、(c)所示, 图(a)为整体变形, 图(b)为节点域变形, 图中 $\theta_3 = \theta_2 - \theta_1$ 。大多数剪力墙的计算模式立足于求如图(b)中整体变形, 而忽略了图(c)中的节点域变形。

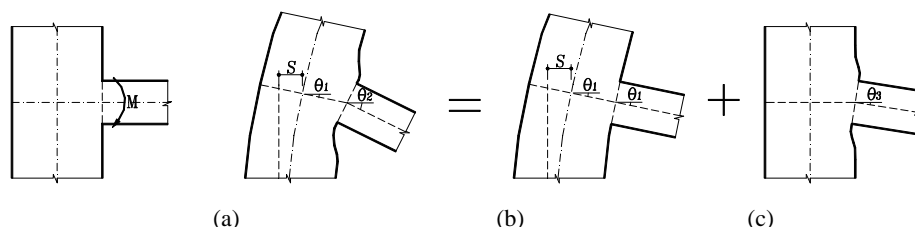


图 1、连梁根部作用弯矩 M

图 2、变形拆分

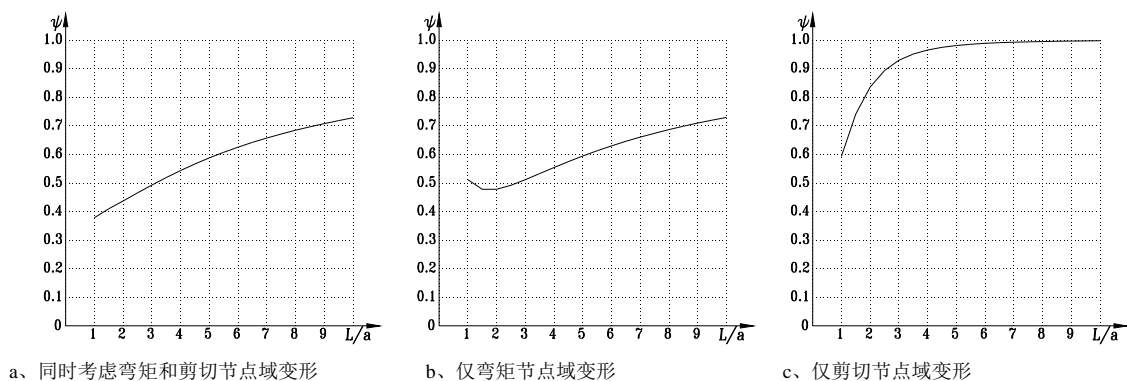
文献[1][2]采用弹性力学解析方法研究剪力墙节点域变形, 得出了考虑剪力墙节点域变形的连梁刚度的折减系数 ψ 的表达式:

$$\frac{1}{\psi} = 1 + \frac{8.64m^3 + 12m}{\pi \left(1 + \frac{\gamma E}{G} m^2 \right)} \quad (1)$$

$m = a/L$ 为连梁高跨比, γ 为截面剪切不均匀系数, E 、 G 为材料弹性、剪切模量。对于矩形截面取 $\gamma = 1.2$, 混凝土 $G = 0.4E$, 则上式可简写为:

$$\frac{1}{\psi} = 1 + \frac{2.75m^3 + 3.82m}{1 + 3m^2} \quad (2)$$

可见在剪力墙水平截面足够长时, 节点域变形对梁刚度的影响仅与连梁的高跨比 m 相关。其分子的 m^3 项由剪切节点域变形产生, m 项由弯矩节点域变形产生。将式(2)式图形化, 如图 3 所示。

图 3、折减系数 ψ

2. 常用的剪力墙计算方法简述

常用的剪力墙结构计算方法有理论解析法、壁式框架方法、薄壁杆方法、墙单元方法等。

解析方法中最典型的是联肢墙理论。该方法将连梁连续化，将连梁本身的弯剪变形、墙弯剪变形、墙轴向变形在连梁跨中协调，建立墙受力的微分方程。联肢墙理论是一种理想化的方法，作为理论解，常作为其它计算方法的对比依据。该方法未能考虑节点域的变形。

壁式框架方法将墙简化为柱，通过梁端、柱端的刚臂考虑墙、梁宽度的影响。该方法力学概念清楚，计算简单、结果可靠，但精度不高。可以通过调节刚臂长度考虑节点域的变形，这是该方法的潜在优势。但现在常用的刚臂取值方法，如图 4 所示，很明显未考虑节点域变形的因素。壁式框架方法在墙非线性分析中仍有应用，当前常见的墙非线性计算模式，实际上均可归结为壁式框架模式，只不过刚臂的定义不同。

薄壁杆方法应用薄壁结构理论，形成具有翘曲自由度的薄壁杆单元。该方法较好地反应了空间剪力墙的受力特点，计算量小，稳定可靠。特别适合小墙肢等符合薄壁杆力学假定的结构计算。当剪力墙平面复杂、墙肢较多时，仅有一个翘曲自由度不能完全反应空间剪力墙的实际受力。同样薄壁杆方法未能考虑节点域的变形。

墙单元作为面单元，更符合剪力墙的特点。墙单元可适用于任意复杂的剪力墙结构，且可以通过单元细分，达到更高的计算精度。当前国内外墙单元的膜部分(即平面内刚度部分)所采取的模式大致相同，即在平面 4 节点等参单元基础上，附加边中点的形函数，由边中点的位移转化为角点的转角自由度，再结合不同的内部非协调自由度改善单元性能。随着众多学者的努力^[3-5]，这类单元在计算墙相互连接的模型时，计算精度、畸变敏感性等方面均达到平面 8 或 9 节点高次单元的水平。

但这类墙单元普遍存在缺陷，即虽然具有节点平面内转角自由度，但其转角刚度的数值不准确，即不能可靠计算节点集中弯矩。而在建筑结构中，不可避免地存在梁-墙相连的情况，这使得梁在墙端的端部弯矩很小，相当于形成较支，减小了结构的抗侧刚度。当前对于高跨比较大的梁(如连梁)，多采用墙模拟梁，这在理论上是可以计算节点域变形。但墙单元是二次单元，用于模拟梁时，会使计算结果偏刚，连梁的内力反而偏大。再者，墙单元只是平面长宽接近时才有较好精度，当梁高度与跨度差别较大时，墙单元本身的误差也相当大。

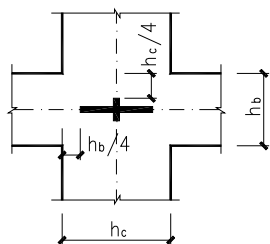


图 4、壁式框架的刚臂

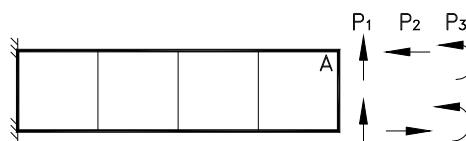


图 5、悬臂梁端部作用集中力

3. Strat-NW 单元介绍

由节点域变形的研究可知,这种变形对结构的影响不可忽略。节点域的影响的大小与梁的高跨比相关,即梁的高度有关。在梁的高度范围内,梁端弯矩、剪力等内力通过应力的方式作用于墙上,也就是说梁端作用于墙上的集中力,在微观上说,仍是分布力。另一方向,从弯矩的定义可知,不可能存在绝对的节点弯矩,因为当力偶的作用间距接近于 0 时,力的数值为无穷大,这显然是不可能的。

从这些概念出发,在文献[1][2]研究的基础上,作者尝试着提出了一种新的墙单元 Strat-NW。新单元采用完全不同于此前各类墙单元的构造模式,利用力偶的概念构造膜部分的平面内转角刚度,能够完全有效地计算梁墙节点弯矩,并可考虑节点域的变形影响。

下面通过一些算例来检测单元的性能。算例 1 检测单元的一般力学性能,算例 2 检测计算节点集中弯矩的性能,算例 3 检测单元应用于剪力墙-框架结构的情况。

3.1 算例 1

如图 5 所示悬臂梁,取单元尺寸 5×5 ,厚度 1,弹性模量 $E=3000$,泊松比 $\mu=0.25$ 。作用荷载类型 $P_1=10$ 为端部剪力, $P_2=2$ 为端部力偶。用 Strat-NW 单元计算,其端部 A 点侧移及底部截面内力如表 1 所示。

表 1: P_1 、 P_2 荷载作用

	端部 A 点侧移			底部内力(Strat-NW)		
	Strat-NW	精确解	误差	弯矩 M	剪力 Q	误差
P1 荷载	0.8834	0.8989	1.84%	200.00	10.00	0.00%
P2 荷载	0.0640	0.0645	0.78%	10.00	0.00	0.00%

由表中数值可看出,在 P_1 、 P_2 等节点力作用下 Strat-NW 性能优异。

3.2 算例 2

仍取图 4 所示悬臂梁,作用荷载 $P_3=5$,为端部节点的集中弯矩。由于现有各种墙单元的文献中均回避了这类集中弯矩的计算,只能用现有软件进行计算对比。其中 CQ12M8 单元为文献[3]中的单元,现已引入结构软件 Strat,表中数值为 Strat 软件计算结果。

表 2: P_3 荷载作用

软件	A 点转角	误差	端截面转角	误差
Ansys	0.5410	8353.13%	0.0064	0.00%
SAP84	0.0227	254.69%	0.0064	0.00%
CQ12M8	0.0256	300.00%	0.0048	-25.00%
Strat-NW	0.0074	15.63%	0.0065	1.56%
理论解			0.0064	

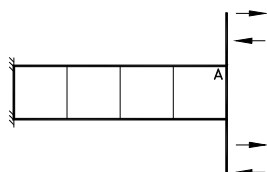
A 点转角的误差根据端截面转角的理论值计算。端面转角为端部两点的纵向位移计算的截面平均转角。

从表中数值看出,在节点集中弯矩作用下,虽然各单元的端面转角与理论解接近,其中 Ansys

的结果还达到精确解。但此时弯矩作用点的转角则是数量级上的差别。考虑节点域变形的因素，集中弯矩作用点的转角应该大于端截面的平均转角，但这种差别应是有限的。这种弯矩作用点过大的转角，是导致墙梁节点梁端弯矩极小的直接原因。

从表中反应情况，Strat-NW 单元的端截面转角完全达到理想的计算精度，尤其是弯矩作用点的转角数值，符合节点域变形的理论的结论。

与 SATWE 对比：由于 SATWE 不能直接加点弯矩，且大于 2m 的墙须细分，因此另外构造计算模型。单元长宽 2m，厚度 0.2m，C30 砼。同时形成两片墙，墙之间小梁连接，加 0.01m 厚弹性楼板。通过悬臂梁在各角点施加 5kN*M 的集中弯矩。同时用 Strat 计算，但数值精度与 SATWE 一样取 0.001 毫米。

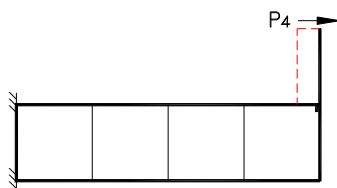


软件	A 点转角	误差	端截面转角	误差
SATWE	3.36×10^{-5}	68.0%	1.9×10^{-5}	-5.00%
Strat-NW	2.30×10^{-5}	15.0%	2.0×10^{-5}	0.00%
理论解			2.0×10^{-5}	

3.3 算例 3

计算简图如图 6 所示，为图 5 悬臂结构顶端一侧加梁单元。梁长度 5，与膜等厚(宽为 1)，高 1.5，材料与膜部分相同。在悬伸梁端部加一竖向的集中力 $P_4=10$ ，计算梁端部节点的竖向位移。

同时按壁式框架计算。按壁式框架的计算方法，墙端刚臂减去梁高的 1/4，即梁的计算长度



$L=5.375$ 。

图 6、膜-梁结构

表 3：膜-梁结构算例

软件	梁端侧移	误差
SAP84	2.4347	144.03%
CQ12M8	1.5752	57.88%
SATWE*	1.092	9.45%
Strat-NW	1.0209	2.33%
壁式框架	0.9977	

* SATWE 的计算模式与前面相同，表中数值是按 2m 单元 C30 混凝土、0.01m 厚弹性楼板计算结果折算得到。在该算例中，如采用刚性楼层模式，Strat-NW 的计算结果为 0.9492，位移显著减少，可

见平面内的约束增加了结构的刚度。SATWE 的弹性楼板对刚度有一定贡献，如能完全不计楼板刚度，SATWE 的计算侧移会有所增大。

本算例不但体现膜单元的转角刚度，而且体现了膜单元的轴拉、弯曲等综合性能。Strat-NW 单元的计算结果达到了非常理想的精度，证明单元不但有可靠的节点转角刚度，而且综合性能优异。

3.4 算例 4

如图 7 所示 8 层平面框架-剪力墙结构，层高 3m。墙长 3m，厚 0.3m；梁截面 0.3×0.6，梁长 6m，柱截面 0.5×0.5。分别作用梁上均布竖向荷载 $P_1=10\text{kN/m}$ ，和墙顶端作用水平荷载 P_2 。按比例绘出梁柱的弯矩图。

在梁上竖向均布荷载 P_1 作用下，近墙的梁端弯矩大，柱梁端小。由于结构对称，梁墙端弯矩数值介于远端铰支的 45 和远端嵌固的 30 之间，由于墙节点域变形其弯矩值还有一定程度的减低。顶层弯矩大于底部端弯矩，是由于墙的竖向压缩变形小于柱的变形而在梁中产生的附加弯矩。

在水平荷载作用下，梁墙端弯矩大于梁柱端弯矩，这是因为墙的线刚度大于柱的线刚度，梁柱节点产生更大的转角释放梁端弯矩。

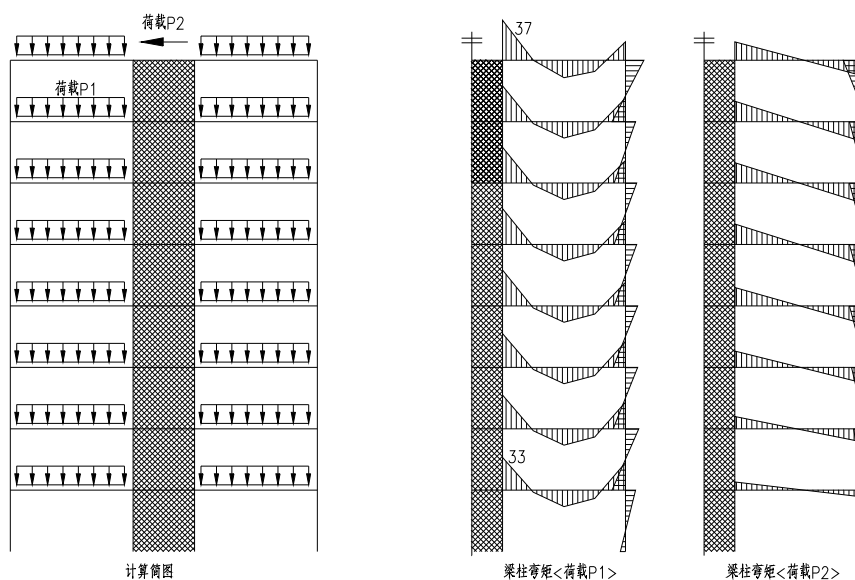


图 7、平面框架-剪力墙结构

从四个算例的结果看，Strat-NW 墙单元有着优秀的力学性能。用于建筑结构的剪力墙模拟，计算结果符合结构理论的结论，数值是准确的。

参 考 文 献

- [1] Xie Jingzhong, Research of Local Deformation of Shear-wall Structures, The Fifth International Conference on Tall Buildings, Hong Kong, 1998
- [2] 谢靖中, 剪力墙节点变形分析, 工程力学增刊, 2000
- [3] 龙驭球, 须寅, 构造几何不敏感的四边形膜单元的广义协调方法, 力学学报, Vol.29, No.6, 1997
- [4] Allman D.J., A Quadrilateral finite element including Vertex Rotations for Plane Elasticity Analysis, Int J for Numerical Methods in Engineering, Vol.26, 1988
- [5] R.Piltner, R.L.Taylor, A Quadrilateral Mixed Finite Element With Two Enhanced Strain Modes, Int J for Numerical Methods in Engineering, Vol.38, 1995