

論文 波形鋼板を耐震壁として利用したRC門型架構の力学性状に関する研究

帖佐和人^{*1}・柏井康彦^{*2}・市岡有香子^{*1}・河野進^{*3}

要旨：RC 構造物における耐震要素として波形鋼板を利用すると、曲げをフレームの負担、せん断を波形鋼板の負担、と曲げとせん断を切り離して設計でき、剛性・耐力の調節が容易にできる。本論では、RC 骨組と波形鋼板を一体化させる施工性に着目し、接合部におけるスタッド本数をパラメータとした実験を行った。その結果、合成構造設計指針及び耐震改修指針式の半分のスタッド本数や柱部分にスタッドを設けない試験体でも高い水平耐力を有し、さらに優れた変形性能、エネルギー消費能力を有することがわかった。また、試験体をモデル化して解析した結果、実験結果を精度良く追跡できた。

キーワード：波形鋼板、スタッド本数、エネルギー消費能力

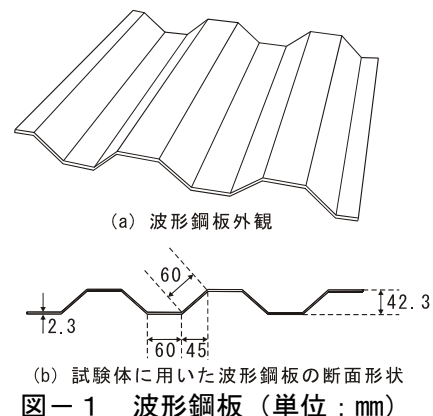
1. はじめに

RC 構造物において耐震性を向上させる場合はRC 耐震壁を設け、高い剛性と水平耐力を確保することが一般的であるが、高層・超高層建物においてRC 耐震壁の設計・施工は容易ではない。そこで、本論文では波形鋼板を耐震壁として利用することを提案している。

波形鋼板は図-1 (a)のように、構造用鋼板を波形形状に折り曲げ加工したものであり、現在土木分野ではPC 橋の一部材として利用されている。波形鋼板の特長は、(1) 幾何学的形状よりせん断座屈強度が大きい、(2) 曲げ剛性・軸剛性が工学的に無視できる、(3) 高いせん断剛性と高いエネルギー消費能力を有する、といった点がある。このような特徴より波形鋼板を耐震壁として利用すると、(2) の性質から曲げ成分をRC フレームの負担、せん断成分を波形鋼板の負担、と2つの成分を切り離して考えることが可能であり、また、剛性・水平耐力に関しては波形鋼板の厚さを変えることにより調節可能となるので、設計が容易になる。さらに、(3) の性質から強度のみならず靱性を確保すること

もできる。以上のような観点から、建築構造物において波形鋼板を耐震壁として利用する価値は高いと考えられる。

波形鋼板を耐震壁としてRC 造建物に利用する時、RC 造フレームと波形鋼板を一体化する必要があるが、現状では波形鋼板壁四周の周辺鋼板にスタッドを打ち、RC 造フレームと一体化することが一般的と考えられる。しかし、施工性・コスト面を考慮すると、スタッド本数の低減を検討する必要がある。そこで、本論ではスタッド本数を実験変数とした載荷実験を行い、最大耐力・剛性・等価粘性減衰定数等の力学性状に与える影響を確認した。



*1 京都大学 工学研究科建築学専攻 大学院生 (正会員)

*2 (株) NTT ファシリティーズ

*3 京都大学 工学研究科建築学専攻 准教授 Ph.D. (正会員)

2. 実験概要

2. 1 試験体概要

試験体は中低層 RC 造建物のコア部分を想定した 1/4 スケール 1 層 1 スパン RC 造フレームに波形鋼板を耐震壁として組込んだ形状である。

図－1 (b)に波形鋼板の断面形状を、図－2に試験体形状を、図－3に柱・梁の断面形状を示す。

スタッド本数については、文献 1), 2)より以下のように定めた。

$$(p/p_a)^{5/3} + (q/q_a)^{5/3} \leq 1.0 \quad (1)$$

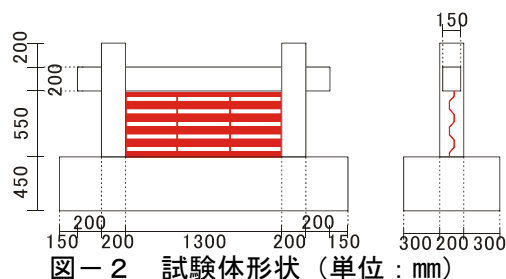
ここで、 p ：設計用引張力、 q ：設計用せん断力、 p_a ：引張力のみ作用した時の許容引張力、 q_a ：せん断力のみ作用した時の許容せん断力である。

スタッド 1 本あたりの許容引張力は、1) 定着したコンクリート躯体のコーン状破壊により決まる場合のスタッド 1 本あたりの許容引張力、2) スタッドの降伏により決まるスタッド 1 本あたりの許容引張力、3) スタッドの頭部に接するコンクリートの支圧により決まる場合のスタッド 1 本あたりの許容引張力の最小値とする。また、スタッド 1 本あたりの許容せん断力は、1) コンクリートの支圧で決まるスタッドのせん断耐力、2) スタッド自体のせん断耐力の最小値とする。

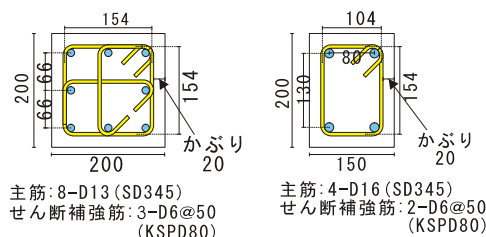
設計用荷重は図－4に示すモデルに対して弾性有限要素法解析を行い決定した。解析モデルは柱・梁はソリッド要素、波形鋼板・補剛リブはプレート要素とした。これより、波形鋼板が降伏する時点での定着界面での最大引張応力が 31.5N/mm^2 、平均せん断応力が 160N/mm^2 となった。この最大引張応力を設計用引張力 p 、平均せん断応力を設計用せん断力 q とした。ここで、スタッドが 2 列で 100mm ピッチの配置にすると、

式(1)を満たすので、このスタッド配置による波形鋼板を持つ試験体を基準試験体 A とした。また、試験体 A の半分の量のスタッドを持つものを試験体 B、水平方向のみにスタッドを持つものを試験体 C、スタッドを持たずに波形鋼板と RC フレームをモルタル充填により一体化する試験体を試験体 D とした。ただし、試験体 C は壁隅角部に引張応力が大きく作用するため、スタッドピッチを狭めて補強した。各試験体の説明を表－1 に、各試験体における波形鋼板壁とそのスタッド配置を図－5に示す。なお、波形鋼板の座屈を補剛するため、波形鋼板壁の四周・中央 2 か所に補剛リブを設けた。補剛リブの幅は各試験体とも 125mm で、厚さは試験体 A・B は四周・中央ともに 4.5mm 、試験体 C は四周の水平部・中央が 4.5mm で四周の鉛直部が 9mm 、試験体 D は四周が 9mm 、中央が 4.5mm である。

また、使用したコンクリート、鉄筋、波形鋼板の力学的特性をそれぞれ表－2、表－3に示す。



図－2 試験体形状 (単位：mm)



(a)柱断面図 (b)梁断面図

図－3 柱・梁の断面図 (単位：mm)

表－1 試験体一覧

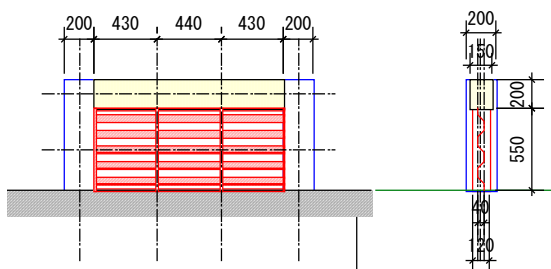
試験体名	フレーム寸法	波形鋼板壁の施工方法	波形鋼板壁寸法	スタッド配置
A	柱：200×200mm 梁：200×200mm	フレームと一体打ち	幅1300×高さ550mm	水平：2列 $\phi 9@100\text{mm}$ (26本) 鉛直：2列 $\phi 9@100\text{mm}$ (12本)
B				水平：1列 $\phi 9@100\text{mm}$ (13本) 鉛直：1列 $\phi 9@100\text{mm}$ (6本)
C				水平端部以外：2列 $\phi 9@100\text{mm}$ 水平端部：2列 $\phi 9@67.5\text{mm}$ (計30本)
D		フレーム打設後、鋼板をはめ込んでモルタル充填	幅1270×高さ520mm	-

表－２ コンクリートの力学的特性

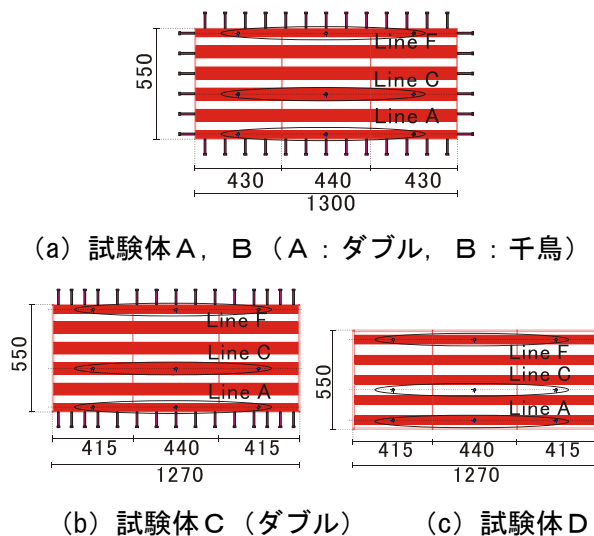
	弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)
コンクリート	29.3	62.0	3.93
モルタル	－	63.4	－

表－３ 鉄筋・鋼材の力学的特性

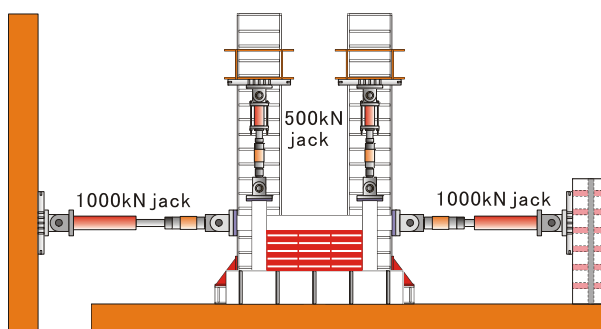
	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
D6(柱・梁補強筋)	196	1099	1207
D13(柱主筋)	186	391	551
D16(梁主筋)	180	391	569
波形鋼板ウェブ	191	264	362
波形鋼板フランジ・リブ	200	282	438
波形鋼板スタッド	208	479	512



図－４ 弾性有限要素法解析モデル（単位：mm）



図－５ 波形鋼板図（単位：mm）



図－６ 載荷装置図

２．２ 載荷方法

載荷装置を図－６に示す。軸力は２台の 500kN ジャッキを用いて、365kN（軸力比 0.15）の一定軸力を作用させた。水平力は図のように 2 台の 1000kN ジャッキを用い、最初は±150kN、±250kN において荷重制御で 2 回ずつ、その後は層間変形角（以下 R）が±0.1%、±0.2%、±0.4%、±0.6%、±0.8%、±1.0%、±2.0%、±4.0%でそれぞれ 2 回ずつ繰返し、最終的に載荷装置の限界である R=10%まで正方向へ漸増載荷を行った。

３．実験結果

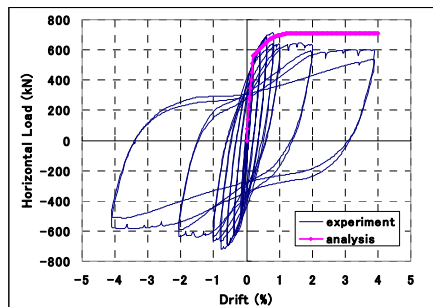
３．１ 水平荷重 - 層間変形角関係

各試験体の水平荷重 - 層間変形角関係（R＝4.0%まで）を図－７に示す。スタッドを有する試験体 A, B, C はいずれも鋼板が R＝±0.4% サイクル前後でせん断降伏したが、それまでは弾性的な挙動を示し、せん断降伏後は高いエネルギー消費を示す紡錘形の復元力特性となった。なお、せん断降伏の順序は A, B, C とスタッド量に応じ、スタッドにより鋼板が RC フレームに拘束されている効果うかがえる。降伏後、R＝±0.8% サイクルで最大耐力に達し、鋼板がせん断座屈を起こした。せん断座屈後は各試験体とも耐力劣化していったが、緩やかなもので、靱性ある挙動を示した。なお、座屈の発生はスタッド量に比例し、A, B, C の順番に鋼板の座屈が生じた。また、耐力劣化はスタッド量が少ないものほど大きく、耐力劣化量は A<B<C という結果になった。

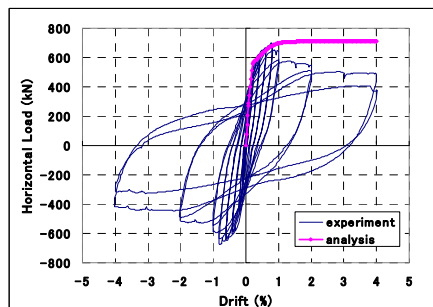
一方、スタッドのない試験体 D については、R＝±0.2% サイクルで目地と鋼板の境界で目開きが生じ、以降スリップ形の挙動を示した。鋼板は R＝1.5% で降伏、R＝2.0% でせん断座屈を起こし、耐力低下したが、耐力劣化は緩やかであった。

全試験体とも R＝±4.0% サイクル終了後も大きな耐力劣化は無く、靱性に富んだ挙動を示した。その後、正方向にプッシュオーバーを行っ

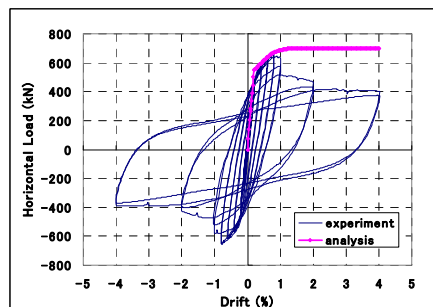
たが、スタッド有の 3 試験体は明確な破壊を起こさずに優れた靱性能を示し、 $R=10.0\%$ で載荷終了した。スタッドのない試験体 D については、 $R=5.0\%$ で面外方向へ試験体が大きく倒れたため載荷終了した。



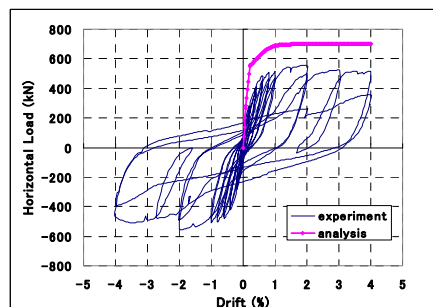
(a) 試験体 A



(b) 試験体 B



(c) 試験体 C



(d) 試験体 D

図－7 水平荷重 - 層間変形角関係

3. 2 最大耐力・初期剛性

各試験体の最大耐力・初期剛性を表－4に示す。なお、初期剛性は、載荷において最初のサイクルである $\pm 150\text{kN}$ サイクル 1 回目のループの正負の最大応答点を結んだ直線の傾きとして求めた。最大耐力はスタッド本数に比例して $A > B > C > D$ となり、予想に違わぬ結果となった。

初期剛性に関しては、A, D, B, C といった順に小さくなり、スタッド有の試験体については、スタッド本数に比例して初期剛性が小さくなっていったが、スタッドの無い試験体 D が 2 番目に大きい結果が得られた。

表－4 最大耐力・初期剛性

試験体名	正方向		負方向		初期剛性 ($\times 10^5 \text{kN/rad}$)
	R(%)	Qmax(kN)	R(%)	Qmax(kN)	
A	0.801	716	-0.759	-720	5.55
B	0.797	702	-0.803	-676	4.10
C	0.803	667	-0.783	-655	3.44
D	1.97	556	-1.94	-555	4.56

3. 3 波形鋼板壁の負担水平力

$R=1.0\%$ までの波形鋼板壁の負担水平力を図－8に、水平力負担率を図－9に示す。波形鋼板壁の負担水平力は図－5に示した Line-C 上に貼り付けた 3 つのロゼットゲージの歪値から平面応力状態を仮定してせん断応力を算出し、長さ・板厚を乗じて算出した。

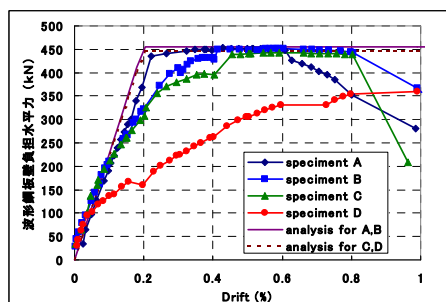
図－9より各試験体とも波形鋼板壁は座屈するまで全体の水平力の 60～70%を負担しており、小変形時から有効に性能を発揮していることが分かる。また、図－8より、波形鋼板の負担水平力は A, B, C, D の順に早く増加していき、スタッド量が多いほど剛性が高く、波形鋼板壁の効きが早いことが分かる。ただし、スタッド本数が多いほど、座屈の発生が早く生じた。

3. 4 等価粘性減衰定数

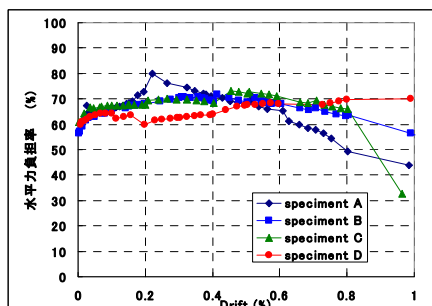
各試験体の等価粘性減衰定数（以下 heq ）を図－10に示す。スタッド有試験体は波形鋼板がせん断降伏した $R=0.4\%$ 時から急激に heq の値が増加し、非常に早い段階で多くのエネルギー消費をしたことが分かる。せん断座屈発生までは、

A>B>C とスタッド量に比例して heq の値が大きい。R=1.0%以降も、フレームの損傷により安定して heq は増加し、高いエネルギー消費能力を有していることが示された。

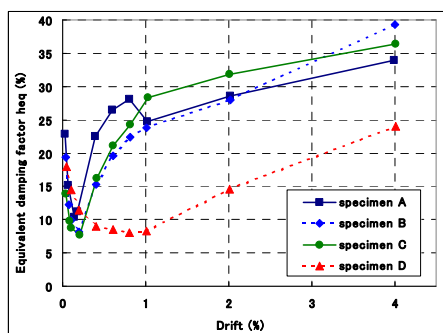
スタッドの無い試験体 D については、波形鋼板の変形が RC フレームの変形に追従できないために波形鋼板のせん断降伏が遅く、スタッド有試験体のように早い段階でエネルギー消費能力を発揮することができなかった。



図－8 波形鋼板壁の負担水平力



図－9 波形鋼板壁の水平力負担率



図－10 等価粘性減衰定数

4. 解析及び実験結果との比較

4. 1 解析概要

汎用非線形骨組解析ソフトを用いて静的荷重漸増解析を行い、実験結果との比較を行った。

解析モデルを図－11 に示す。フレームは材端にバネ要素を仮定し、接合パネルゾーンを剛、柱脚部は固定端支持とした。波形鋼板は梁中央部と地面を連結したせん断バネでモデル化した。柱、梁の材端バネにおけるモーメント-回転角関係の復元力特性は、ひび割れ点までは文献3)の設計例による式(2)～式(5)より、降伏曲げモーメント、終局曲げモーメント及び回転角は平面保持仮定、完全付着を仮定した断面解析より求めた。波形鋼板であるせん断バネの水平力-変形関係の復元力特性は梁中央部と波形鋼板壁上端中央点の水平変位が同一であると仮定し、波形鋼板壁のせん断変形のみを考慮して算出した。波形鋼板のせん断降伏条件はミーゼスの条件を用い、材料構成則は完全弾塑性とした。なお、波形鋼板の座屈は考慮していない。コンクリート、鉄筋、波形鋼板の材料定数は材料試験から得られた実測値を用いている。図－12 に柱・梁・波形鋼板壁の復元力特性を示す。

$$K_G = 6E_C I_G / l \quad (2)$$

$${}_gM_C = 0.6\sqrt{F_C} Z \quad (3)$$

$$K_C = 6E_C I_C / l \quad (4)$$

$${}_cM_C = 0.6\sqrt{F_C} Z + ND/6 \quad (5)$$

ここで、 K_G ：梁の第1折れ点までの剛性、 E_C ：コンクリートのヤング係数、 I_G ：梁の断面2次モーメント、 l ：各部材内法長さ、 ${}_gM_C$ ：梁の曲げひび割れモーメント、 Z ：各部材の断面係数、 K_C ：柱の第1折れ点までの剛性、 I_C ：柱の断面2次モーメント、 N ：軸力、 D ：柱せいを示す。

4. 2 水平荷重 - 層間変形角関係

図－7 に解析で得られた荷重漸増解析結果を実験結果と比較して示す。スタッド有試験体については、それぞれ波形鋼板の座屈発生前までは復元力特性の包絡線が精度良く予測できている。スタッド量が少なくなるほど最大耐力は実験値より解析値の方が若干大きくなるが、概ね

一致している。ただし、座屈後は実験結果を追跡できていない。一方、スタッドの無い試験体 D は、波形鋼板のすべりが無視されているため、実験結果をうまく捉えられていない。

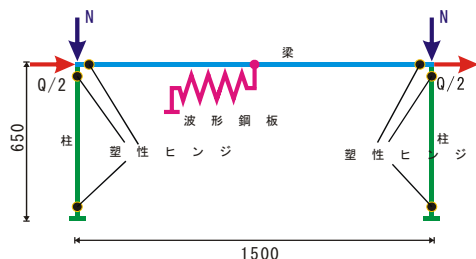
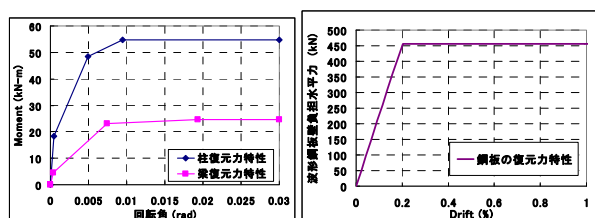


図-11 解析モデル (単位: mm)



(a) 柱・梁 (b) 波形鋼板

図-12 復元力特性

4. 3 波形鋼板壁の負担水平力

解析で得られた $R=1.0\%$ までの波形鋼板壁の負担水平力を図-8に示す。スタッド有試験体については、各試験体とも全体的な傾向は概ね予測できている。試験体 A の初期剛性・折れ曲がり点が解析値とほぼ同じであるが、スタッド本数が少なくなるほど初期剛性・折れ曲がり点が精度良く予測出来ていない。

5. 結論

RC フレームに波形鋼板を耐震壁として組込んだ 4 体の試験体の載荷実験を行い、スタッド本数による力学性状の違いの確認を行った。また、試験体をモデル化し、解析を行って実験結果を追跡した。本研究より、各種合成構造設計指針及び耐震改修指針を満たす量のスタッド本数の試験体は安定した力学性状を示したが、その半分のスタッド本数及び水平方向のみスタッドを持つものでも座屈が生じるまでの変形では耐力・変形性能に優れた履歴特性が得られ、ス

タッド本数の低減及び配置の選択範囲の拡大を示唆することができた。以下に詳細を示す。

- スタッド有試験体では、スタッド本数が多いほど最大耐力は大きくなったが、大きな差異はなかった。ただし、最大耐力後の耐力低下はスタッド本数が少なくなるほど大きくなった。スタッド無試験体は有試験体ほど大きな耐力を有さなかった。
- スタッド有試験体では、波形鋼板壁は小変形時から有効に水平力を負担した。スタッド無試験体では、有試験体ほど大きな水平力を発揮しなかったが、全体の 6~7 割の水平力を負担した。
- スタッド有試験体は波形鋼板の降伏により、小変形時から非常に高いエネルギー消費能力が発揮された。一方、スタッド無試験体では、早期からのエネルギー消費能力には期待できない。
- 解析では、スタッド有試験体は非常に精度良く包絡線を追跡することができた。波形鋼板壁の負担水平力は全体的な傾向は概ね予測できたが、スタッド本数が少なくなるほど実験値を精度良く追跡できていない。

謝辞

この研究の一部は、平成 18 年度国土交通省建設技術研究開発費補助金（代表：渡邊史夫）、平成 18 年度科学技術振興機構シーズ発掘試験（代表：河野進）及び平成 18 年度東京工業大学建築物物理研究センター共同利用研究（受入：林静雄教授）によって行われました。また、研究全般を通して、柏井康彦氏（当時 M2）の多大なる尽力がありました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説,1985
- 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説,2001 年 10 月
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説,1997 年 7 月