

論文 円筒型鉄筋コンクリート構造物の変形性能に関する実験的研究

原田光男*1・鬼東俊一*2・足立正信*2・松尾豊史*3

要旨: 比較的低鉄筋比の円筒型鉄筋コンクリート構造物である LNG 地下タンク側壁については、変形性能に期待する照査指針が提案されているが、その破壊性状や地震の多方向性の影響は必ずしも明らかにされていない。そこで本研究では、実機タンクの側壁を模擬した試験体の気中における水平載荷試験を行った。その結果、低鉄筋比の場合には十分な変形性能を有していること、破壊が集中する位置におけるひずみの局所化が計測され、またその位置は側壁中腹部となり、高鉄筋比の場合と異なることなどが分かった。

キーワード: 面内せん断力, 低鉄筋比, 変形性能, 破壊性状, LNG 地下タンク側壁

1. はじめに

円筒型 RC 構造物の面内力に対する挙動の内、原子炉格納容器を対象とした鉄筋比 2%程度の高鉄筋比(鉄筋比は全鉄筋断面積のコンクリート断面積に対する比率)の円筒型 RC 構造物に関しては、既往の実験¹⁾により、鉄筋比に比例して最大耐力が増大し、変形性能は逆に小さくなる特性が確認されている。また、破壊位置は試験体下部に集中する傾向にある。

一方、比較的低鉄筋比(鉄筋比 0.8%程度)の LNG 地下タンク側壁(以下、タンク側壁とする)に関しては、最近の非線形有限要素法を用いた解

析的な研究²⁾(図-1)により優れた変形性能を有することが分かっており、変形性能に期待した照査指針が提案されている²⁾。

しかし、低鉄筋比のタンク側壁の場合には、その非線形特性や破壊性状は必ずしも明らかになっていないのが現状である。

そこで本研究では、比較的低鉄筋比の円筒型試験体を用いて、地震時の面内せん断力を再現するための水平載荷試験を行い、その変形性能や破壊性状を把握するとともに、ひずみ応答と変形性能の関係について検討した。また、荷重の載荷方向をパラメータとして、地震荷重の多方向性の影響についても検討した。

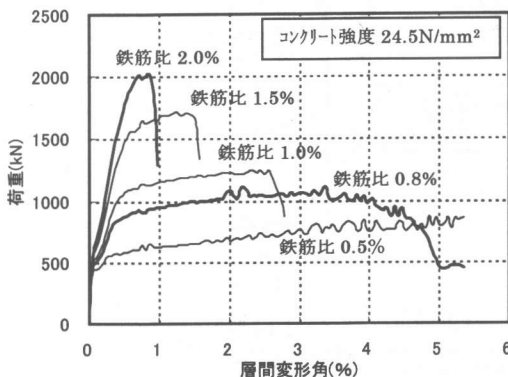


図-1 鉄筋比をパラメータとした解析結果²⁾

2. 実験の概要

2.1 試験体の諸元

試験体の諸元と配筋を図-2に示す。また、試験体中腹部の試験対象区間の配筋仕様を表-1に示す。試験体は実機タンク側壁の約 20 分の 1 の大きさであり、配筋については、実機タンクの側壁中腹部を模擬し、鉄筋比を約 0.8%程度としている。なお、実機タンクの境界条件を再現するために、側壁下端部と底版は一体構造ではなく、

*1 東京電力(株)建設部土木・建築技術センター 火力原子力土木技術グループ(正会員)

*2 東電設計(株)技術開発本部土木技術部(正会員)

*3 (財)電力中央研究所我孫子研究所 構造部(正会員)

PC 鋼棒により連結する構造とした。

試験体に用いたコンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表-2および表-3に示す。

表-1 試験体の鉄筋仕様

	鉄筋径	鉄筋間隔	鉄筋比
円周筋	D6	80mm	0.8%
鉛直筋		78.5mm	

表-2 コンクリートの材料試験結果(材齢 28 日)

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
NO.1	28	2.26×10 ⁴	2.2
NO.2	30	2.60×10 ⁴	2.4

表-3 鉄筋の材料試験結果

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	弾性係数 (N/mm ²)
D6	386	1900	2.0×10 ⁵

2.2 載荷方法

載荷装置の概要を図-3に示す。本来、地中構造物である地下タンクの地震時荷重を気中状態で忠実に再現することは困難である。一方、地下タンク側壁の地震時挙動では、面内せん断力が卓越することが明らかになっている²⁾。そこでそのようなモードを再現できるように、図-3に示すように側壁上部に取り付けた鋼製治具を介して

荷重を載荷する方法を採用した。荷重が低いレベルは油圧ジャッキ(3000kN)のみにより荷重を制御し、非線形性の強く現れる最大荷重付近では、アクチュエータ 2台(500kN)を用いて荷重を制御した。

実験ケースは、地震荷重の多方向性の影響を把握するため表-4に示すように、荷重の載荷方向をパラメータとして2ケースを実施した。NO.1試験体は0°側と180°側から載荷する一方向正負交番載荷(P1載荷)、NO.2試験体はP1載荷の後、それに直交する90°側と270°側から正負交番載荷(P2載荷)する二方向正負交番載荷である。なお、載荷フレームの位置は固定とし、試験体を回転させて載荷方向を載荷フレームの位置に向けることで交番載荷に対応した。

表-4 載荷パターン

実験ケース	載荷パターン	載荷方向
NO.1 試験体	P1 載荷	正側載荷 0° 側
		負側載荷 180° 側
NO.2 試験体	P1 載荷	正側載荷 0° 側
		負側載荷 180° 側
	P2 載荷	正側載荷 90° 側
		負側載荷 270° 側

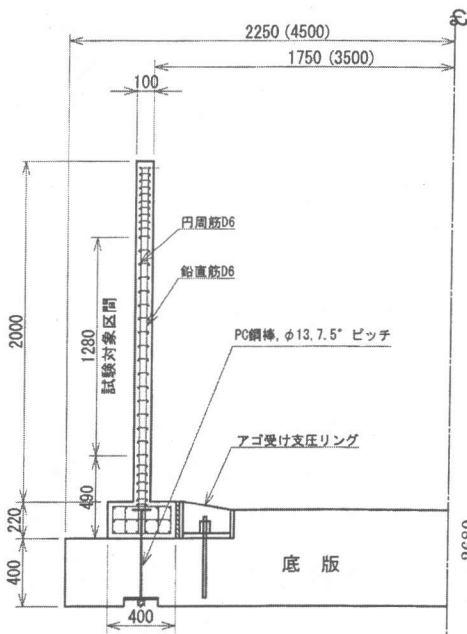


図-2 試験体の諸元と配筋

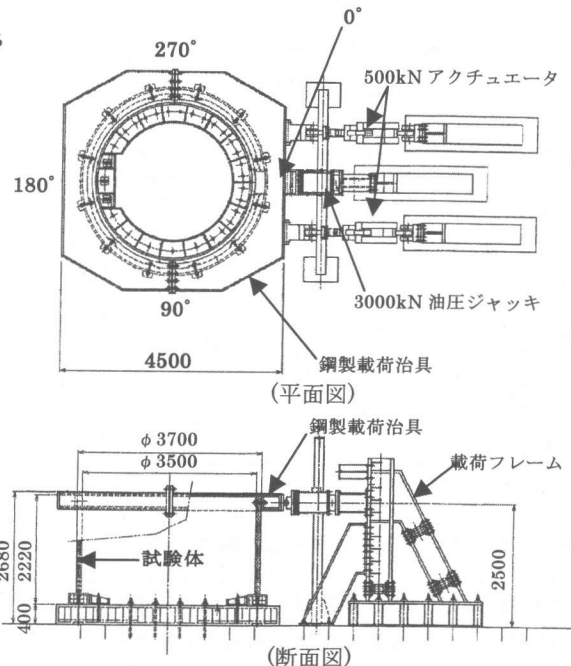


図-3 載荷装置の概要と載荷方向

2.3 計測項目

今回の実験では試験体の変形や鉄筋ひずみの計測に加えて、側壁の非線形特性を把握する目的から変位計による側壁表面のひずみ計測を行った。計測方法は図-4に示すように、変位計をロゼット式に配置し、300mm区間の鉛直、水平、対角方向の変位を計測し、それらの変位成分から計測区間における平均的な主ひずみを求めるものである。

主ひずみの計測位置は図-5に示すとおりで、面内せん断力が卓越する範囲の側壁中腹部を主に計測した。なお、同図は試験体の半円部分の展開図を示したもので、図上側の数値はNO.1試験体における角度を、また()内はNO.2試験体における角度をそれぞれ表している。今後、試験体に関する実験結果の図示は、図-5と同様に展開図として表示する。

3. 実験結果

3.1 荷重～変位関係

各試験体の荷重～層間変形角関係を図-6～図-8に示す。なお、NO.2試験体についてはP1載荷(図-7)とP2載荷(図-8)を別々に表示した。また、図中の層間変形角は試験体の頂部変位を試験体高さで除したものである。

両試験体の荷重～層間変形角曲線を見ると、P1載荷(図-6, 7)においては正載荷、負載荷とも斜めひびわれが発生した時点で、試験体の剛性低下が認められる。また、斜めひびわれ発生後に鉄筋の初降伏が発生するが、局所的な鉄筋降伏の影響は荷重～変形角曲線には現れず、変形角が

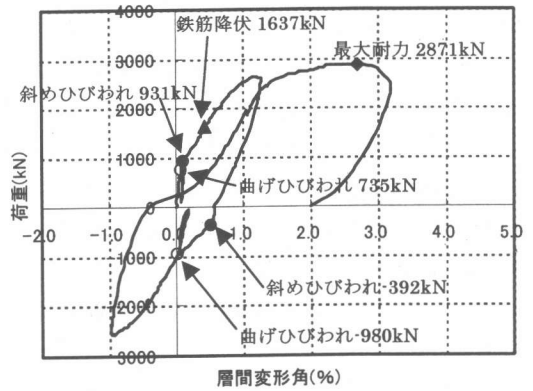


図-6 NO.1試験体の荷重～変形角曲線

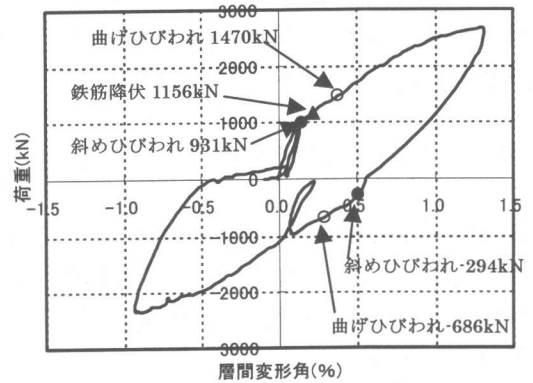


図-7 NO.2試験体の荷重～変形角曲線(P1載荷)

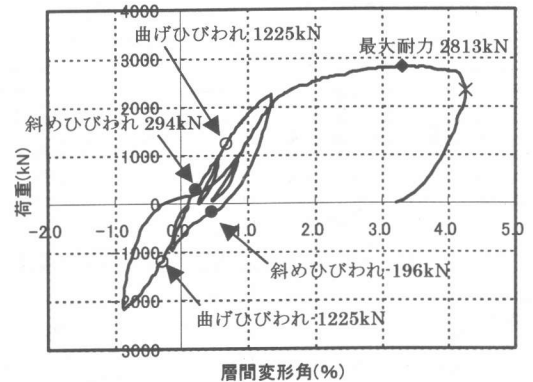


図-8 NO.2試験体の荷重～変形角曲線(P2載荷)

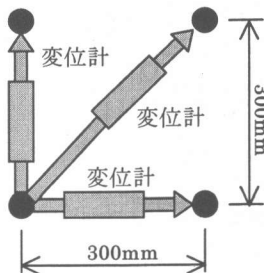


図-4 ひずみ計測方法

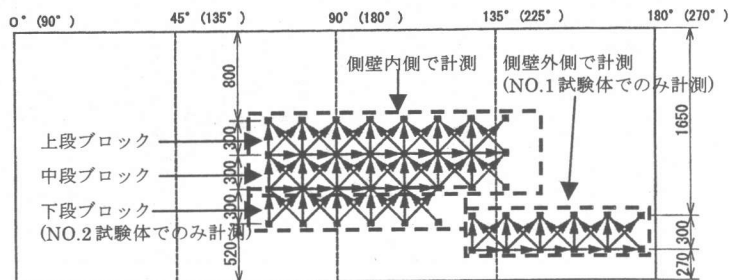


図-5 変位計によるひずみの計測位置

1.0%付近に達すると徐々に剛性が低下している。このように剛性が変化する層間変形角は、鉄筋降伏が側壁の45°～135°のほぼ全域に広がった時点と対応している。(図-9参照)

次に、両試験体の最大荷重(図-6, 8)を比較すると、NO.1試験体の2871kNに対してNO.2試験体では2813kNとほぼ同程度であることから、地震荷重の多方向性が最大荷重に及ぼす影響は小さいものと思われる。

一方、変形性能でも、図-6, 8から分かるように両試験体ともに変形角が1.0%を越えると剛性は非常に小さくなり、最大荷重点まで延性的な挙動を呈している。最大荷重時の層間変形角はNO.1試験体が2.7%, NO.2試験体が3.3%となっており、ともに十分な変形性能を有していると言える。

図-9にNO.1試験体の層間変形角1.0%時におけるひずみゲージによる計測結果としての鉄筋降伏の状況を示す。なお、降伏ひずみは鉄筋の材料試験結果に基づき1900 μ と定義した。

図より、円周筋では45°～135°面の中腹部を中心に、鉛直筋では載荷側である0°側の下端部

と90°中腹部にかけて鉄筋が降伏している。このように円周筋ならびに鉛直筋ともに90°付近を中心に降伏しているのは、面内せん断力が卓越しているためと思われる。

以上の結果から、地震時の地下タンクと同様に面内せん断力が卓越する損傷モードを実験的に再現できていること、低鉄筋比のこの種の構造物では十分な変形性能を有していることが確認できた。また、一方向から作用する荷重により、鉄筋降伏が全体に広がるような損傷を受けた状態であっても、それに直交する荷重に対しては十分な変形性能が期待できるものと考えられる。

3.2 試験体表面の損傷状況

図-10にNO.1試験体における0°～180°の範囲の側壁内側のひびわれ図を示す。図より、試験体には、45°から135°の範囲に発生している面内せん断力によると考えられるほぼ45°の斜めひびわれと、載荷側となる0°側と180°側下部の曲げによると考えられる水平ひびわれが発生している。全体的には斜めひびわれによる損傷が大きくなっており、このひびわれ性状からも面

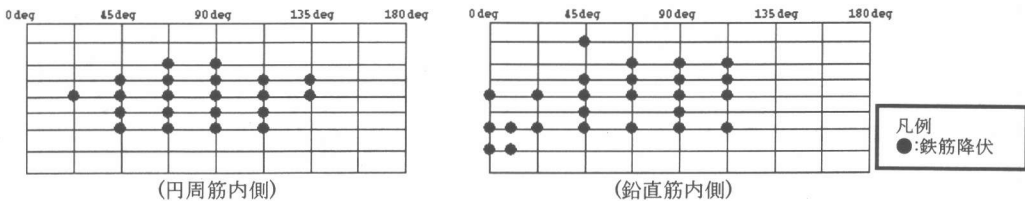


図-9 変形角1.0%時の鉄筋降伏領域(ひずみゲージによる計測結果)

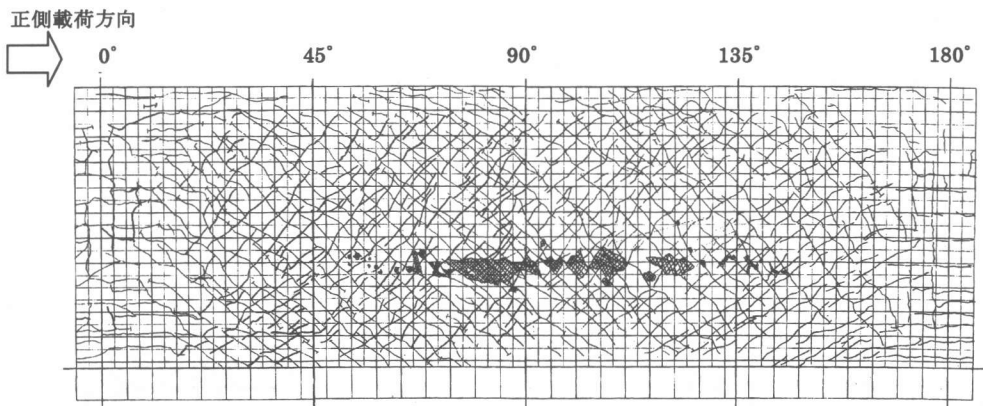


図-10 NO.1試験体側壁内側のひびわれ図

内せん断力が卓越していることが分かる。図中の斜線部はコンクリートの剥離が確認された箇所であり、側壁中腹部で損傷が大きくなっていることが分かる。NO.2 試験体でも同様にP2 載荷時に面内せん断力の卓越する側壁中腹部辺りに破壊が集中していた。

既往の実験¹⁾によれば、高鉄筋比の円筒体では、拘束の大きい試験体下部に破壊が集中する傾向にあるが、今回の試験体のような低鉄筋比の場合には、破壊位置は側壁中腹部となり、鉄筋比の違いにより破壊位置が異なる傾向を示すことが分かった。

このような現象は、図-11 に示すように解析からも予測されている。解析は、前川らによって開発された非線形 FEM プログラム「COM3」(ver9.2)³⁾を用いて実施した。

同図は図-1 の鉄筋比が 2.0%と 0.8%のケースにおける圧縮によるコンクリートの損傷を示し

たものであり、図中の●印は主圧縮ひずみが 10000 μ を越えている積分点を表している。

両ケースの結果を比較すると、実験の傾向と同様に、鉄筋比 2.0%のケースでは試験体の上端と下端部付近に損傷が集中しているのに対して、

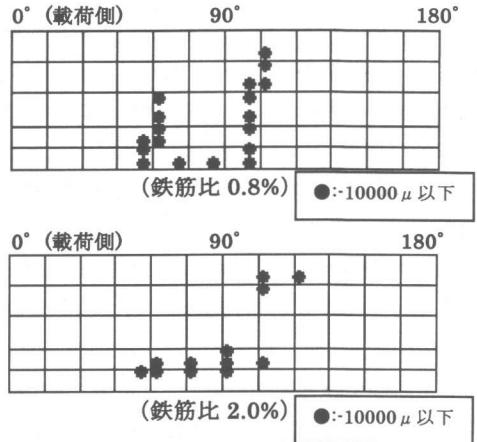
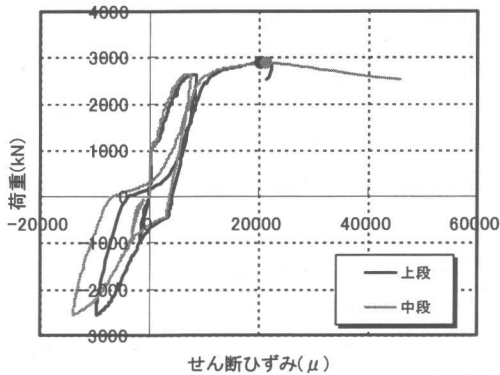
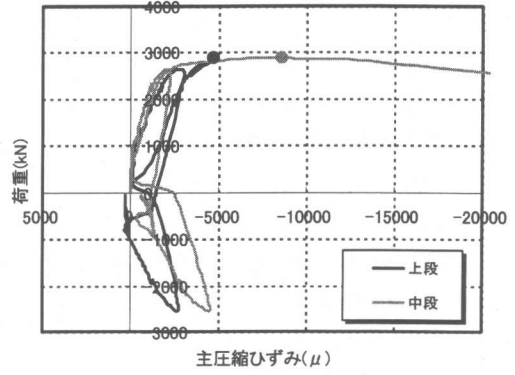


図-11 鉄筋比の違いによる圧縮損傷の集中する位置の比較

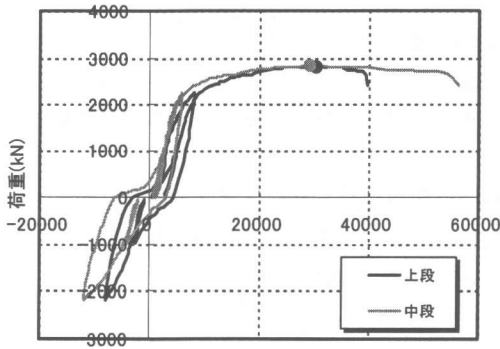


せん断ひずみ(μ)

図-12 NO.1 試験体のブロックで平均化した荷重～ひずみ曲線

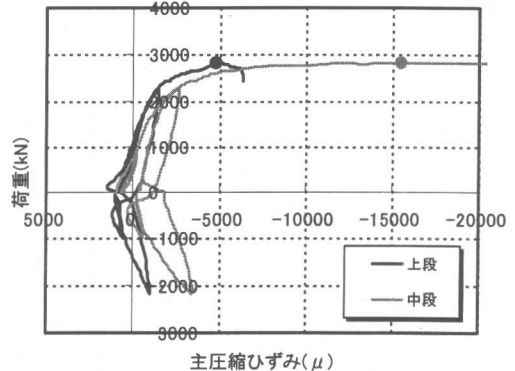


主圧縮ひずみ(μ)



せん断ひずみ(μ)

図-13 NO.2 試験体のブロックで平均化した荷重～ひずみ曲線



主圧縮ひずみ(μ)

0.8%のケースでは側壁中腹部にも損傷の領域が広がっていることが分かる。

3.3 ひずみ挙動の評価

両試験体において、変位計により計測した側壁表面のひずみと荷重の関係を図-12, 13 にそれぞれ示す。図-12 は NO.1 試験体の P1 荷重, 図-13 は NO.2 試験体の P2 荷重の結果を示したものである。なお、同図のひずみは図-5 に示した上段および中段の各ブロック毎に平均化したものである。また、図中の●印は最大荷重点を表している。

図より、両試験体ともにせん断ひずみは、最大荷重点まで上段平均と中段平均でほぼ同じ挙動を示している。なお、主引張ひずみの挙動についてもせん断ひずみと同様であった。一方、主圧縮ひずみは最大荷重点前から中段に集中する傾向にあり、最大荷重点以降は NO.1 試験体の上段では除荷状態になっている。

主圧縮ひずみが集中する中段の計測位置は図-10 の斜線部に一致しており、被りコンクリートの剥離等、最も損傷が大きくなっている。このことから、損傷が集中する側壁中段においては、最大荷重に達する前から主圧縮ひずみが集中しやすい傾向にあることが分かる。

次に、主圧縮ひずみと層間変形角の関係を図-14 に示す。図中の●印は最大荷重点を示している。図より、層間変形角が約 2.5% 辺りになると、両試験体とも明らかにひずみが増大する傾向に

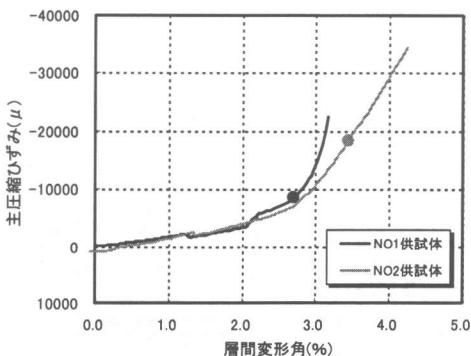


図-14 主圧縮ひずみと変形角の関係

あることが分かる。このひずみが増大する現象は、最大荷重点に近い変位レベルで現れており、このことから、この種の構造物の耐震性能を主圧縮ひずみの挙動を指標として、適切に評価することが可能であると考えられる。

5. まとめ

実機タンク側壁の約 20 分の 1 の試験体による水平荷重試験を行った結果をまとめると以下のとおりである。

- ①低鉄筋比のタンク側壁の場合には、直交する二方向荷重に対しても最大荷重まで十分な変形性能が期待できる。
- ②地震の多方向性が最大荷重や変形性能に及ぼす影響は小さい。
- ③低鉄筋比の円筒体の場合、破壊は側壁中腹部付近に発生し、下端部に発生する高鉄筋比の場合とは異なる傾向を示す。
- ④破壊の集中する位置では、ひずみが局所化する現象を実験的に確認でき、それは耐震性能を示す指標として有効である。

謝辞

本研究の実施にあたり、東京大学前川宏一教授には解析プログラムを使用させて頂くと共に実験の実施について、貴重なコメントをいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、瀬戸川ほか：円筒型鉄筋コンクリート耐震壁に関する水平加力実験，日本建築学会論文報告集第 290 号，昭和 55 年 4 月
- 2) 土木学会：LNG 地下タンク躯体の構造性能照査指針，コンクリートライブラリー-98，平成 11 年
- 3) 例えば前川ほか：疑似直交 2 方向ひびわれを有する平面 RC 要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No. 634，V-45，pp157-pp176，1999.11